

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

Design of a WWTP for the “La Primavera” country condo, and photovoltaic energy supply feasibility

Daniel Esteban Sánchez Sánchez¹

1. Aspirante al título de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental

Resumen

El objetivo de la investigación es determinar la factibilidad de alimentar una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de Lodos Activados para el Condominio la Primavera de Moniquirá con energía solar. Se seleccionaron las estructuras de tratamiento más apropiadas y se realizó el diseño volumétrico de las mismas. A su vez, se realiza el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos en dos escenarios: Un *escenario híbrido*, donde la planta se alimenta tanto del sistema interconectado como del sistema fotovoltaico. Un segundo escenario, donde la planta cuenta con alimentación total del sistema fotovoltaico, al que se le denomina *escenario con almacenamiento*. Al analizar los dos escenarios planteados frente a un escenario sin la implementación de un sistema fotovoltaico, se encontró que es factible económicamente la instalación ambos sistemas propuestos. Los tiempos de recuperación de la inversión inicial son inferiores a 5 años en ambos escenarios. Se encuentra, además, que los tiempos de retorno de la inversión inicial para un sistema con almacenamiento son menores a los de un sistema híbrido por lo que esta resulta la mejor opción a implementar.

Introducción

Una de las problemáticas particulares que se presentan en el territorio colombiano es la falta de tratamiento de las aguas residuales antes de ser vertidas en el suelo y en cuerpos de agua. Una de las

razones que dificulta el desarrollo de plantas de tratamiento para las aguas residuales (PTAR) es que en algunas regiones del país no existe un suministro energético continuo, necesario para la operación de dichas plantas.

Colombia para el año 2017 contaba con 682 PTAR (Supeservicios, 2018), buscando mejorar la situación registrada desde el 2016 donde se registró un vertimiento de 8.074 Ton DQO/día, a los cuerpos de agua (IDEAM, 2019). Sin embargo, aún se presentan desafíos remanentes asociados a la operación de estas plantas de tratamiento. Las PTAR pueden tener diferentes tecnologías de tratamiento, entre las cuales se encuentra el reactor de lodos activados como una de las tecnologías más implementadas (Romero, 2016). Este proceso tiene grandes necesidades energéticas, lo que se traduce en altos costos de operación y una necesidad de contar con un suministro energético continuo e ininterrumpido.

Frente a esta problemática se evalúa la viabilidad de instalar sistemas fotovoltaicos que provean total o parcialmente la demanda energética de las plantas. Con este propósito, se escoge como estudio de caso el condominio campestre La Primavera, ubicado en el municipio de Moniquirá en el departamento de Boyacá. Se diseña la planta de tratamiento de aguas residuales, estimando sus consumos energéticos y posteriormente se dimensiona un sistema de alimentación FV para el suministro energético. De esta

manera es posible evaluar la viabilidad económica de la implementación de este tipo de sistemas de suministro energético descentralizados.

1. Metodología

Se recopiló información meteorológica de la zona e información referente a las proyecciones de población del condominio.

Posteriormente, se implementó una metodología de análisis multicriterio para la selección de las tecnologías a diseñar en las diferentes etapas del sistema dicha matriz se le dio los siguientes criterios y pesos:

Proceso	Parámetros de evaluación	Puntaje posible	Ecuación
Pretratamiento	Facilidad de limpieza	0-2	$P_{pt}: FL + FC + NT$
	Facilidad de construcción	0-2	
	Necesidad	0-2	
T. Secundario	Eficiencia	0-5	$P_{sc} = EF + AO + PO + CF$
	Área de ocupación	0-2	
	Producción de olores	0-2	
	Confiabilidad	0-2	
Opciones de vertimiento	Proximidad	0-1	$P_{ver} = PRX + DPD + IM$
	Disponibilidad	0-1	
	Impacto ambiental	0-2	

El análisis multicriterio usa matrices que están diseñadas para obtener un puntaje en cada parámetro de 0 a 2, se tiene en cuenta que el mayor puntaje es la opción más viable en cada caso.

Las matrices de selección se presentan a continuación:

¹ L: Facilidad de limpieza

² FC: Facilidad de construcción

³ Nt: Necesidad para el tratamiento

⁴ Σ : Sumatoria de puntajes

⁵ E: Eficiencia

⁶ A: Área de ocupación de la estructura

Tabla 1. Selección para el pretratamiento

Estructura	L ¹	FC ²	Nt ³	Σ ⁴	
Cribado	Rejilla de barrotes	2	2	2	6
	Rejilla con orificios	1	2	2	4
Extracción de grasas	Flotación por aire	2	0	2	4
	Trampa de grasas y aceites	2	2	2	6

Fuente: autor

Tabla 2. Selección para el tratamiento secundario

Estructura	E ⁵	A ⁶	O ⁷	C ⁸	Σ
Reactor UASB	4	2	0	1	7
Laguna facultativa	5	0	1	2	8
Reactor RAP	4	2	0	1	7
Lodos activados	5	2	1	1	9
Filtro percolador	4	2	1	1	8

Fuente: autor

Tabla 3. Selección del vertimiento

Tipo	P ⁹	D ¹⁰	I ¹¹	Σ
Vertimiento a suelo	1	0	0	1
Vertimiento en Quebrada "Las Fuentecitas"	1	0	1	2
Vertimiento en Quebrada "NN"	0	0	1	1
Vertimiento en Rio Moniquirá	0	1	1	2
Riego	1	1	1	3

Fuente: autor

Una vez escogidas las unidades a diseñar, se realiza su dimensionamiento usando las metodologías referenciadas en el capítulo 2.

Para la caracterización del agua residual se realizó un muestreo puntual, en una de las viviendas del sector (por cuestiones administrativas del condominio) dicho muestreo se realiza en las coordenadas

⁷ O: Producción de olores

⁸ C: Confiabilidad

⁹ P: Proximidad a la PTAR

¹⁰ D: Disponibilidad del recurso

¹¹ I: Impacto generado por la construcción de la estructura

5°54'17.85"N, 73°36'11.54"O para analizar las características de DQO, DBO, SST, ST, pH, conductividad y temperatura.

Para el caudal de diseño se realiza el cálculo a partir de la metodología dada en el artículo 186 de la resolución 0330 del 2017, teniendo en cuenta únicamente los aportes por infiltración ($0,1 \frac{L}{s \cdot ha}$). El caudal de partida es el de la planta de tratamiento de agua potable, considerando del 30% y un coeficiente de retorno del 85%.

La evaluación de costos se realiza con los costos en valor presente neto (VPN). Para el análisis económico se comparan los costos asociados a la inversión inicial, mantenimiento y gastos fijos de un escenario sin implementar ningún sistema de alimentación FV con:

- Un escenario híbrido, que se alimenta de la red pública en las horas sin sol y de un sistema FV en las horas con luminosidad suficiente.
- Un escenario autónomo, alimentado por un sistema FV y que cuenta un sistema de almacenamiento de energía hasta por 3 días.

2. Resultados

2.1. CONDICIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO

Tabla 4. Condiciones de la zona de estudio

Condominio Campestre la primavera		
Departamento	Boyacá	
Municipio	Moniquirá	
	Coordenadas	
Ubicación	5°54'16.86"N	73°36'13.71"O
Habitantes	335	
Caudal de agua potable	1 L/s Aljibe Las Fuentecitas	
Fuentes de captación	Aljibe NN	

¹² Tabla tomada de la Resolución 631 del 7 de marzo de 2015, para aguas residuales con cargas menores a 625 kg/día DBO₅

Variables meteorológicas

Los datos meteorológicos fueron tomados de la estación del IDEAM con número de identificación 24015020 y cuyo nombre es BERTHA localizada en el municipio de Moniquirá, en el departamento de Boyacá, con coordenadas 5°52'60.00"N, 73°35'60.00"O a una elevación de 1700 m.s.n.m. en la Tabla 5, se pueden observar los datos meteorológicos promedio del condominio.

Tabla 5. Variables meteorológicas.

Variables meteorológica	Unidad	Magnitud
Brillo solar	h/d	4,6 – 6,513
Evaporación	mm/mes	489,9 - 690,1
Humedad relativa	%	70 - 80
Nubosidad	Octas	5
Temperatura	°C	18,3 - 19
Presión atmosférica	mmHg	622,8

Fuente: autor con datos de (IDEAM, 2007)

2.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA PTAR

2.2.1. Caracterización fisicoquímica

La caracterización del agua residual tomada de un vertimiento de una de las viviendas del Condominio tenía las siguientes características:

Tabla 6. Caracterización de agua residual

Parámetro	Método	Valor	Unidad	Resolución 631 de 2015 ¹²
DQO	SM 5220 C	449	mg/L	180
DBO	SM 5210 B	289,5	mg/L	90
SST	SM 2540 D	164	mg/L	90
pH	SM 4500 K C	7,74		6 - 9
Temperatura	SM 2250 B	18,6	°C	-

Fuente: autor

La carga orgánica y los aportes per cápita serán de:

$$68,9 \frac{g DQO}{hab d}$$

$$44,4 \frac{g \text{ DBO}}{\text{Suscriptor} \cdot d}$$

$$25 \frac{g \text{ SST}}{\text{Suscriptor} \cdot d}$$

2.2.2. Caudal de diseño

Según el artículo 186 de la resolución 0330 de 2017, el caudal medio diario estimado debe ser modificado para obtener los siguientes caudales de diseño para las estructuras de la planta:

Tabla 7. Caudales de diseño

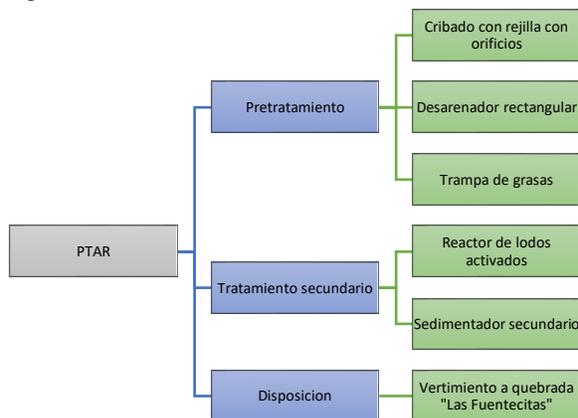
Tipo	Caudal	Estructura
Caudal medio doméstico	0,6 L/s	N/A
Caudal medio diario	1,5 L/s	NA
Caudal máximo horario	6 L/s	<ul style="list-style-type: none"> Desarenador Cribado Trampa de grasa Sedimentador secundario
Caudal máximo diario	4,5 L/s	<ul style="list-style-type: none"> Disposición del afluente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

Fuente: autor

2.2.3. Selección del sistema de tratamiento

Teniendo en cuenta las matrices anteriores se seleccionaron las unidades con un mayor puntaje siendo las más indicadas para el tratamiento con lo cual el tren de tratamiento queda como se expone en la Figura 1.

Figura 1. Tren de tratamiento de la PTAR



Fuente: autor

2.3. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La planta de agua residual tendrá las siguientes características:

2.3.1. Cribado

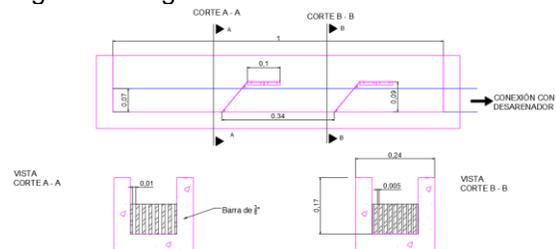
El diseño del cribado se realiza siguiendo la metodología de (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 8. Cribado

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

Fuente: autor

Figura 2. Diagrama de estructura cribado



Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Desarenador

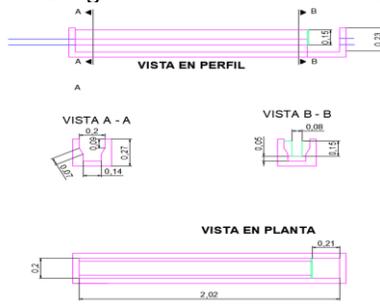
Se realiza el diseño del desarenador siguiendo la metodología propuesta por Romero,(2016).

Tabla 9. Desarenador

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

Fuente: autor

Figura 3. Diagrama del canal de desarenado



Fuente: Elaboración propia

2.3.3. Trampa de grasas

Se realiza el diseño de la trampa de grasas siguiendo la metodología propuesta por (Romero, 2016).

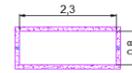
Tabla 10. Trampa de grasas

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

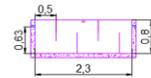
Fuente: Autor

Figura 4. Diagrama trampa de grasas.

VISTA EN PLANTA



VISTA EN PERFIL



Fuente: Autor

2.3.4. Lodos activados

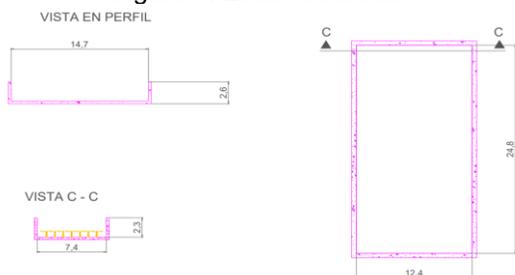
El dimensionamiento de este reactor se basa de la metodología de diseño dada por Metcalf & Eddy, (2014), además de los resultados obtenidos en el laboratorio.

Tabla 11. Lodos activados

Parámetro	Magnitud	Unidad
Volumen en el reactor	216,45	m ³
SSVLM	2500	mg/L
DBO ₅ _SALIDA	30	mg/L
SST_SALIDA	30	mg/L
Caudal de recirculación	98,18	m ³ /d
Relación de circulación	50	%
Carga orgánica volumétrica	288,89	gDBO/m ³ ,d
Relación A/M	0,11	d ⁻¹
Eficiencia	0,896	
Tiempo de retención hidráulico	1	d
Tiempo de retención hidráulico	24	h
Difusores		
Marca	Nopol	
Referencia	KKI 215	
Numero de difusores	42	numero
Potencia de aireación	3,8	kW

Fuente: autor

Figura 5. Lodos activados



Fuente: Autor

2.3.5. Sedimentador secundario

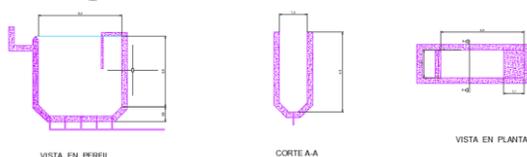
Se realiza el diseño del sedimentador secundario siguiendo la metodología propuesta por (Romero, 2016).

Tabla 12. Tabla resumen sedimentador secundario.

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

Fuente: autor

Figura 6. Sedimentador secundario



Fuente: autor

2.4. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR PARA ALIMENTAR LA PTAR DEL CONDOMINIO CAMPESTRE LA PRIMAVERA.

Según la Tabla 5 en el municipio de Moniquirá se tiene un brillo solar de 4,6 a 6,5 h/d por tanto se utiliza el escenario menos favorable con 4,6 horas, de producción energética. Ese es el tiempo

en el que el sistema FV capturara la energía solar. En la Tabla 13 se muestra la energía requerida por las instalaciones según cada escenario:

Tabla 13. Necesidad energética de la PTAR

Elemento	Instalación híbrida		Instalación autónoma	
	Tf ¹³ (h)	Ct ¹⁴ (Wh)	Tf (h)	Ct (Wh)
Bombillas 6W	0	0	12	1152
Nevera	4,6	368	24	1920
Soplador	4,6	17480	24	91200
Bomba de lodos	4,6	1715,8	24	8952
Termo reactor	2	1288	2	560
Multiparámetro	4,6	27,6	24	144
Espectro fotómetro	2	1104	2	480
Potencia W		21983,4	Potencia W	104408
Potencia kW		21,98	Potencia kW	104,4

Fuente: autor

La Tabla 13 muestra la cantidad de energía que será aportada por los sistemas fotovoltaicos. A estas contribuciones se les aplica un factor de seguridad del 20% para asegurar el correcto suministro energético. La necesidad energética para los sistemas FV son de 26,38 kWh para el sistema híbrido y 125,28 kWh en el sistema autónomo.

Las instalaciones fotovoltaicas serán diseñadas con paneles de celda PERC Monocristalina marca Cheetah HC 72M-V del fabricante Jinko solar, que tienen capacidad de producción entre 380 y 400 v, un voltaje por panel de 49,8 V. Estas celdas tienen una dimensión de 2008 x 1002 mm, (Jinko, 2020).

Adicionalmente, para el sistema autónomo, se plantea utilizar baterías de marca LEOCH Battery series, referencia S12-230, con 12 v y capacidad de 287,5

¹³ Tf: Tiempo de funcionamiento

¹⁴ Ct: Consumo total

A (LEOCH, 2020). El dimensionamiento de cada uno de los sistemas FV se muestra en la Tabla 14:

Tabla 14. Parámetros instalaciones fotovoltaicas

Parámetro	Unidad	I ¹⁵ . hibrido	I. autónomo
Numero de paneles	Paneles	25	215
Área de paneles	m ²	50	430
Almacenamiento	kWh	0	469,83
Numero de baterías	Baterías	0	137

Fuente: autor

2.5. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN CIVIL – ELÉCTRICA

Los costos de inversión inicial y mantenimiento para los dos escenarios de instalación FV se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Costos totales de la instalación de red.

	Instalación híbrida (COP)	Instalación autónoma (COP)
Costo de equipos	34.370.960	358.509.395
Costo de mano de obra	6.240.000	18.240.000
Valor total	40.610.960	376.749.395

Fuente: autor

El periodo de retorno de la inversión inicial deberá tener una duración inferior a 20 años, tiempo en el que se debe plantear un cambio de la infraestructura de la red. En la Tabla 16 se observa la proyección de costos acumulados de gastos fijos, mantenimiento e inversión inicial en VPN de cada escenario:

Tabla 16. Proyección de costos VPN

año	Red Híbrida (millones COP)	Red Autónoma (millones COP)	Red pública (millones COP)
0	40,61	449,71	0,00

¹⁵ I: Instalación fotovoltaica

1	338,22	467,95	369,08
5	1528,66	540,91	1845,40
10	3016,70	632,11	3690,80
15	4504,74	723,31	5536,20
20	5992,79	814,51	7381,59

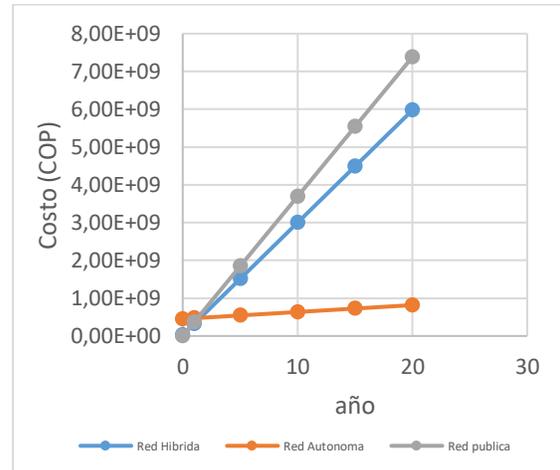
Fuente: autor

Para ambos escenarios se encuentra que el periodo de retorno es menor al tiempo de vida útil, con lo cual una instalación de paneles solares es viable en cualquiera de los dos casos. Son mayores los costos acumulados al final de los 20 años si no se instalaran los sistemas FV.

El condominio podría recibir un beneficio al término de la vida útil de los elementos de 1.388.804.587COP en instalación híbrida o de 6.567.084.753 COP para la instalación con autónoma.

La tendencia de la Tabla 16, se expresa gráficamente en la Figura 7, la cual confronta el tiempo contra el costo económico acumulado para cada escenario.

Figura 7. Comportamiento de costos acumulados en cada escenario



Fuente: autor

Como puede observarse el periodo de retorno para ambos escenarios se da en

menos de 5 años, a su vez el escenario que más ahorro generaría es el escenario autónomo.

CONCLUSIONES

- La planta de tratamiento de agua residual tendrá consumos totales de 125,28 kWh que podrán ser solventados parcialmente por la instalación de 25 paneles solares de 400 V para un escenario donde se tenga un suministro híbrido entre energía solar y energía de la red pública. Por otra parte, con el montaje de 215 celdas fotovoltaicas iguales a las planteadas anteriormente alimentando 137 baterías de 287,5 A puede alimentar la PTAR de forma autónoma sin necesidad de tomar energía de otra fuente.
- La planta de tratamiento alimentada con energía de la red pública puede generar gastos de 7.381.594.148 COP. Se prevé que con una inversión inicial de 40.610.960 COP (para una instalación de paneles solares sin almacenamiento), se tendrá reducción de costos por 1.388.804.587 COP, además el costo inicial será solventado en un tiempo máximo de 1 año.
- Se podrá tener una disminución de gastos por 6.567.084.753 COP (instalación solar con almacenamiento energético) en un tiempo de retorno de 2 años a un costo inicial de 449.709.395 COP.
- La instalación solar con almacenamiento para la PTAR del condominio campestre la primavera es la opción con mayor viabilidad, puesto que ofrece una reducción de costos de 6.567.084.753 COP más que para el escenario sin almacenamiento, aunque el periodo de recuperación inicial es mayor (3 años menos). Por lo cual, la mayor inversión de capital y área provee un mayor margen de ganancias en comparación con una

opción de alimentación mixta o únicamente de la red pública.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que para una PTAR alimentada con energía solar se plantee la instalación de un sistema totalmente autónomo, ya que existe un gran margen de beneficios, no solo económicos si no ambientales, reduciendo la huella de carbono generada por la generación energética.

Trabajos citados

- Aspercol. (1 de 12 de 2020). *Aspercol*. Obtenido de <https://www.aspercol.com/aspersores.php>
- Banco de la republica. (10 de 10 de 2020). *Banco de la republica*. Obtenido de <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indice-precios-consumidor-ipc>
- Bottecchia, O. L. (2009). A fórmula barométrica como instrumento de ensino em Química. *SciELO*, Vol-32 no.7.
- Chan, F., Torres, E., Sánchez, V., Toral, H., & Acosta, R. (2014). Determinación de la vida útil de un Inversor para. *REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN*, vol 12 No 1.
- Chavez, M. A. (8 de Julio de 2013). *Proyecto de Factibilidad para uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica de Electricidad en el Complejo Habitacional "San Antonio" de Riobamba*. Escuela superior politecnica de Chimborazo. Obtenido de Proyecto de Factibilidad para uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica de Electricidad en el Complejo Habitacional "San

- Antonio” de Riobamba.:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2478>
- CIMBALA, J. M., & ÇENGEL, Y. A. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y*. Mexico: McGraw-Hill.
- Condominio campestre La Primavera. (2020). *Memoria técnica del sistema de captación y control*. Moniquirá: Corpoboyacá.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.
- Jinko. (2020). *suncolombia*. Obtenido de <https://www.suncolombia.com/pdf/94.CheetahPerc%20JKM380-400M-72H-V-A1-SP.pdf>
- LEOCH. (7 de 10 de 2020). *SunColombia*. Obtenido de [suncolombia: https://www.suncolombia.com/pdf/39.LPS12-230.pdf](https://www.suncolombia.com/pdf/39.LPS12-230.pdf)
- Lopez Cualla, R. A. (2004). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering : treatment and resource recovery*. New York: McGraw Hill.
- Monsolar. (6 de 12 de 2020). *Monsolar*. Obtenido de <https://www.monsolar.com/inversor-solar-huawei-sun2000-2kw.html>
- MultiPlus. (5 de 12 de 2020). *suncolombia*. Obtenido de [suncolombia.: https://www.suncolombia.com/pdf/91.DatasheetMultiPlus242000.pdf](https://www.suncolombia.com/pdf/91.DatasheetMultiPlus242000.pdf)
- Pérez, R. (2019). *Instalaciones hidrosanitarias, de gas y de aprovechamiento de aguas lluvia en edificaciones*. Bogota: ECOE Ediciones.
- Podder, A., Ahmed, K., Roy, N., & Biswas, P. (2017). a Internacional de 2017 sobre Avances en Ingeniería Eléctrica (ICAEE). *Design and Simulation of an Independent Solar Home System with Battery Backup*. Dhaka, Bangladesh: ICAEE.
- Qasim, S. (1999). *Wastewater treatment plants. Planning, desing and operation*. Technomic Publication.
- Roll. (2020). *Suncolombia*. Obtenido de <https://www.suncolombia.com/pdf/41.S12-160AGM.pdf>
- Romero, J. A. (2016). *Tratamiento de aguas residuales teoria y principios*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Supeservicios. (2018). *Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2014 - 2017*. Bogotá: REPUBLICA DE COLOMBIA.
- Torres, L. (2019). *Diseño conceptual de una planta potabilizadora para condominios campestres con alturas entre 1000 y 2000 m.s.n.m.* (p. 131). p. 131. Tunja: Universidad de Boyacá.
- Unión Europea. (15 de Octubre de 2019). *ec.europa*. Obtenido de https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR
- Wuang, H. (2018). *Dialnet*. Obtenido de Unirioja: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/ctes?codigo=184994>