Diseño de un Sistema Ecológico de Purificación de Agua Basado en Colectores Solares de Bajo Costo de Fabricación y Asequibles para Comunidades de Escasos Recursos en Regiones con Deficiencia en la Calidad del Agua

Jose Alejandro Corzo Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Sergio Ismael Blanco Vásquez

PhD. Ingeniería.

Codirector

Jorge Andrés Gutiérrez Cifuentes

PhD. Química.

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mis padres María Helena Rodríguez Vargas y Virgilio Corzo Guerrero, por apoyarme en todo mi proceso de formación y ser mi fuente de motivación.

A mi mascota Luna por ser mi apoyo emocional durante más de 12 años y seguir aquí conmigo para verme entrar en una nueva etapa de mi vida.

A los compañeros que me fueron acompañando durante todo este camino, dándonos apoyo mutuo y un espacio en nuestras vidas.

A todos los profesores de la Universidad industrial de Santander quienes aportaron su grano de arena en mi proceso de formación tanto profesional como personal, siendo ejemplos a seguir; por último y no menos importante, a mí yo del pasado por nunca haberse rendido y seguir siempre adelante ante toda adversidad.

Agradecimiento

A la Universidad Industrial de Santander, por abrirme sus puertas y apoyarme en la culminación de esta etapa en mi camino profesional.

Al programa de Ser pilo paga 2 y jóvenes en acción por cargar en gran medida con los gastos económicos durante todo mi proceso académico de pregrado.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por cobijarme durante toda mi etapa de estudio y brindarme toda su disposición para seguir mi camino.

Al docente Sergio Ismael Blanco Vásquez por sus ideas, su guía, confianza, paciencia y apoyo en este proyecto de investigación, que partió de la idea de poder ayudar a muchas personas y seguir con esta línea de estudio en futuros trabajos.

Al semillero de investigación en Recubrimientos Multifuncionales por acogerme y ser un apoyo para la elaboración de este proyecto de grado, dándonos una mejor idea de lo que significa ser un ingeniero.

A mi novia Shirley Lucero Rojas Caicedo por apoyarme tanto moralmente como en muchos otros aspectos técnicos en la elaboración de este proyecto.

Tabla de contenido

Pag

Introducción 12
1. Objetivos 14
1.1. Objetivo General 14
1.2. Objetivo Especifico 14
2. Marco referencial 15
2.1. Antecedentes 15
2.2. Delimitaciones 17
2.3. Fundamentos teóricos 18
2.3.1. Sol 18
2.3.1.1. Efectos terrestres sobre la radiación solar. 19
2.3.2. Agua 22
2.3.2.1. Tratamiento de agua 23
2.3.2.1.1. Desalinización 23
2.3.2.1.2. Depuración 23
2.3.2.1.3. La potabilización 23
2.3.2.2. Índice de riesgo para la calidad del agua potable (IRCA) 24
2.3.2.3. Abastecimiento de agua 25
2.3.2.4. Nuevas tecnologías en el tratamiento de agua 25
2.3.3. Gas 26
2.3.4. Entorno 28
2.3.5. Destiladores solares 29
2.3.5.1. Antecedentes históricos 30
2.3.5.2. Partes de un destilador 31
2.3.5.3. Condiciones que favorecen el uso de destiladores solares. 32
2.3.5.4. Variables de diseño 32
2.3.5.5. Calidad del agua producida por los destiladores Solares 33
2.3.5.6. Clasificación de los destiladores solares 33

2.3.5.7. Tipos de destiladores 33
2.3.5.7.1. Sistemas auxiliares 33
3. Marco metodológico 34
3.1. Generación de conceptos 34
3.2. Población 34
3.2.1. Método de selección 35
3.2.2. Poblaciones elegidas 36
3.2.2.1. Localización 1 36
3.2.2.2. Localización 2 36
3.3. Radiación incidente 37
3.3.1. Modelo 37
3.3.2. Consideraciones 38
3.3.3. Resultados 39
3.4. Diseño 39
3.4.1. Determinación de diseño 40
3.4.2. Prototipo 40
3.4.3. Funcionamiento 41
3.4.4. Balance de materia y energía 42
3.4.5. Análisis dimensional 42
3.4.6. Modelo 43
3.5. Materiales 43
3.6. Costos 45
4. Conclusiones 46
5. Recomendaciones 47
Referencias Bibliográficas 48

Lista de Tablas

Tabla 1 *Clasificación del nivel de riesgo y acciones según IRCA por muestra e IRCA mensual* 24

Lista de Figuras

Figura 1 *Sistema tierra – Sol* 18

Figura 2 *Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre*..... 20

Figura 3 *Escenarios de demanda nacional de gas natural*..... 27

Figura 4 *Proyección de precios de suministro de gas natural UPME* 27

Figura 5 *Mapa de la pobreza multidimensional en Colombia*..... 28

Figura 6 *Diagrama de un destilador solar de una sola cuenca de pendiente única* 30

Figura 7 *Irradiación solar en las localizaciones 1 y 2* 39

Figura 8 *Corte transversal del diseño preliminar*..... 41

Figura 9 *Plano de la vista lateral del equipo con cotas* 43

Figura 10 *Gráfica de precio contra la transparencia para el material de la cúpula*..... 44

Figura 11 *Gráfica de precio contra el módulo de elasticidad para el material de la estructura*. 44

Figura 12 *Gráfica de precio contra la conductividad térmica para el material aislante*..... 45

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Partes, descripción y materiales de un destilador solar.

Apéndice B. Tipos de destiladores solares, ventajas y desventajas.

Apéndice C. Resultados del estudio poblacional.

Apéndice D. Características de las poblaciones beneficiadas.

Apéndice E. Ecuaciones para el cálculo de la radiación solar incidente sobre superficie inclinada.

Apéndice F. Programa para calcular la irradiación sobre una superficie inclinada.

Apéndice G. Resultados del estudio de la radiación solar para las localizaciones 1 y 2.

Apéndice H. Comparativa cualitativa de los tipos de destiladores solares.

Apéndice I. Partes del equipo.

Apéndice J. Irradiación solar en el equipo.

Apéndice K. Ciclo del agua del equipo.

Apéndice L. Medidas del equipo.

Apéndice M. Balance de calor del equipo.

Apéndice N. Balance de materia y energía para el prototipo de destilador.

Apéndice O. Análisis dimensional del prototipo de destilador solar.

Apéndice P. Programa para calcular el balance, producción y almacenamiento del equipo.

Apéndice Q. Piezas y ensamble 3D del equipo.

Glosario

Ángulo acimut de la superficie (γ): este ángulo depende directamente de la superficie del equipo y se define como la desviación de la proyección de la normal de esta sobre un plano horizontal y el meridiano local.

Ángulo de inclinación (β): es el ángulo conformado entre el plano horizontal a la superficie y la cúpula receptora transparente.

Colector solar: pieza encargada de recibir la radiación proveniente del sol, además de que puede cumplir la función de recipiente del fluido, con el fin de elevar la temperatura del líquido a destilar; se caracterizan por tener una alta absorción y por ser de tonalidades oscuras.

Coordenadas terrestres: son un sistema de referencia que permite establecer una ubicación específica en la superficie terrestre por medio de la latitud, la longitud y la altitud.

Destilación: es el proceso físico para la separación de componentes o sustancias de una mezcla líquida con distintos puntos de evaporación mediante el uso de la evaporación y la condensación.

Horas del sol al día (hSD): promedio de horas efectivas de sol al día en las que se recibe radiación directa.

Horas sin sol al mes (hsSM): número de días al mes sin brillo solar obtenidos al contabilizar los días en que se obtuvieron valores de hSD entre 0.0 a 0.5.

Índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA): es la medida con la cual se evalúan los resultados de los análisis de muestras de agua para consumo humano en Colombia.

Pobreza multidimensional: es una medida de la pobreza que refleja una población con múltiples carencias en aspectos no solo económicos.

Resumen

Título: Diseño de un Sistema Ecológico de Purificación de Agua Basado en Colectores Solares de Bajo Costo de Fabricación y Asequibles para Comunidades de Escasos Recursos en Regiones con Deficiencia en la Calidad del Agua*

Autor: Jose Alejandro Corzo Rodriguez **

Palabras claves: Potabilización, Destilador, Radiación solar, Colector solar, Sostenibilidad.

Descripción: La radiación solar es considerada una de las alternativas más viables, ecológicas y con más futuro para suplir la demanda energética mundial, remplazando el uso de los combustibles fósiles y Colombia cuenta con una ubicación geográfica privilegiada, que benefician su implementación. Utilizar la energía suministrada por el Sol como sustituyente energético en procesos de potabilización, como posible solución a una problemática de salud pública, debido a las enfermedades gastrointestinales producidas al beber agua contaminada, por medio de la implementación de un equipo unifamiliar y asequible de destilación solar que trate el recurso hídrico para su consumo, empleando el principio del ciclo hidrológico, pensado directamente para las características ambientales y sociales de regiones con escasez y baja calidad del agua potable. En este proyecto se realizará un amplio estudio territorial para determinar dos regiones con la mayor factibilidad para su implementación, teniendo en cuenta cuatro aspectos fundamentales basados en irradiación solar, calidad de agua, gas natural y pobreza multidimensional, junto con la revisión de las características de 11 diseños de destiladores solares orientados hacia su posterior utilización en la construcción de un prototipo eficiente, económico y de fácil fabricación. El acceso al agua potable es un derecho que todo individuo debe tener.

---

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería Metalúrgica. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez. PhD. Ingeniería. Codirector: Jorge Andrés Gutiérrez Cifuentes. PhD. Química.

Abstract

Title: Design of an Ecological Water Purification System Based on Solar Collectors of Low Manufacturing Cost and Affordable for Communities with Scarce Resources in Regions with Deficient Water Quality*

Author: Jose Alejandro Corzo Rodriguez **

Key Words: Drinking water, Distiller, Solar radiation, Solar collector, Sustainability

Description: Solar radiation is considered one of the most viable, ecological, and future alternatives to meet global energy demand, replacing the use of fossil fuels and Colombia has a privileged geographical location, which benefits its implementation. Use the energy supplied by the Sun as an energy substitute in purification processes, as a possible solution to a public health problem, due to gastrointestinal diseases caused by drinking contaminated water, through the implementation of a single-family and affordable solar distillation equipment. that treats the water resource for consumption, using the principle of the hydrological cycle, designed directly for the environmental and social characteristics of regions with scarcity and low quality of drinking water. In this project, an extensive territorial study will be carried out to determine two regions with the greatest feasibility for its implementation, taking into account four fundamental aspects based on solar irradiation, water quality, natural gas, and multidimensional poverty, together with the review of the characteristics of 11 solars still designs oriented towards their subsequent use in the construction of an efficient, economical and easy-to-manufacture prototype. Access to drinking water is a right that every individual should have.

---

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. Metallurgical Engineering. Director: Sergio Ismael Blanco Vasquez. PhD. Engineering. Codirector: Jorge Andrés Gutiérrez Cifuentes. PhD. Química.

Introducción

El agua es un recurso fundamental para el sustento de la vida en el planeta tierra y aunque el 70% de su superficie está cubierta por agua, del total que hay en el planeta, tan solo un 2,5 % es agua dulce y de esa cantidad, solo el 0,03% está disponible para consumo humano (Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS], s. f.). Además, 1 de cada 3 personas en el mundo no tiene acceso a agua potable (Arora, 2019) y de acuerdo con la Organización Mundial de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura UNESCO (2020) en su informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos la demanda mundial de agua aumenta en un 1% anualmente.

Al mismo tiempo se ve incrementada la contaminación de las fuentes hídricas por factores no naturales, como consecuencia directa del inadecuado manejo de este recurso por parte del ser humano (UNESCO, 2021 p. 3). Esto genera un mayor gasto de energía requerido para los procesos de potabilización y abastecimiento ante el constante aumento de la demanda, lo que contribuye de manera negativa al cambio climático (ACCIONA, 2020).

Colombia es un país que es considerado potencia hídrica mundial, con más de seis nevados y 48.000 humedales (Fondo Mundial para la Naturaleza [WWF], s. f.), posicionándose como uno de los nueve territorios del mundo con mayores recursos hídricos (Banco mundial, 2020); pero cuenta con una deficiente red de distribución y alcantarillado, una mala política de gestión, regulación y cuidado de las fuentes de agua (Grupo Banco Mundial, 2020). Además, cada año los ríos reciben casi un millón de toneladas de materia orgánica no biodegradable (WWF, s. f.), esto lo lleva a tener 94 municipios en 17 departamentos con un índice de riesgo para la calidad del agua IRCA calculado como riesgo alto y con alta incidencia de enfermedades diarreicas agudas EDA según el Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano INCA (2019).

Con el fin de mitigar el impacto ambiental de los métodos tradicionales y de mejorar la calidad del agua de fuentes ya contaminadas, se han venido implementando una serie de acciones, entre ellas el uso de energías renovables en sistemas de obtención y tratamiento de agua que no generan gases de efecto invernadero, de bajo costo, unifamiliares y amigables con el medio ambiente (Almar Water Solutions, 2017).

La radiación solar es una fuente de energía renovable. la cual aprovecha las partículas electromagnéticas procedentes del Sol. En Colombia debido a su posición geográfica cuenta con una gran disponibilidad de energía solar que varía entre el 4.5 al 3,5 [kWh/m^2] por día durante todo el año. Por lo que su implementación sobre el territorio colombiano es muy viable, debido a que presenta una radiación solar alta y estable durante la mayor parte del año (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2015).

Por lo mencionado anteriormente se hace factible el empleo constante de colectores solares como sistema que capta la radiación solar y la transforma en energía térmica, con el fin de elevar la temperatura de un medio para su aprovechamiento (Arvind Thakur, 2021). Los sistemas de colectores solares orientados a procesos de tratamiento de agua con tecnologías ecológicas, basados en la implementación de diferentes fenómenos como lo son la desinfección, la desalinización solar por medio de la destilación o la fotocatálisis solar, entre otros procesos, han presentado una alternativa favorable para el ser humano y el ambiente (Ying Zhanga et al, 2018).

Teniendo en cuenta esta información, en el presente proyecto se plantea el diseñar un sistema de tratamiento de agua ecológico, basado en la energía solar por medio de colectores solares que sean fáciles de ensamblar y que se puedan construir con materiales de bajo costo además de fácil acceso para personas que viven en las regiones más vulnerables, en donde estos mismos son más requeridos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de tratamiento de agua eficiente, económico y de fácil fabricación que aproveche la energía solar por medio de colectores solares.

1.2. Objetivo Específico

Realizar un reconocimiento de las poblaciones de bajos recursos que presentan una deficiencia en la calidad del agua potable.

Diseñar un sistema ecológico de tratamiento de agua, basado en el uso de la radiación solar como fuente de alimentación, selección de materiales y esquema de funcionamiento.

Analizar el impacto social y económico de la implementación de los sistemas de tratamiento de agua en posibles poblaciones beneficiadas.

2. Marco referencial

2.1. Antecedentes

La demanda de recursos por parte de la población mundial es cada día mayor y esta problemática no solo se ve orientada al abastecimiento del agua sino también a la generación de energía y Colombia no es la excepción (WWF, 2012). Dado que el país tiene un buen nivel de radiación solar en su territorio durante todo el año, es posible aprovechar esta fuente de energía, mediante el empleo de diferentes equipos y tecnologías, en campos como el agropecuario, transporte y el industrial, entre otros. (Universidad Santo Tomás y Gómez Ramírez, 2016)

En cuanto a las aplicaciones más utilizadas de la energía solar en Colombia, se encuentra el calentamiento de agua, la generación de electricidad, el secado solar en agricultura y la destilación solar de fuentes de agua no potables (Rodríguez Murcia, 2009). Con respecto a la cobertura territorial de este tipo de alternativa energética se han dirigido principalmente a zonas remotas o rurales, debido a los altos costos de producción, operación y mantenimiento de sistemas de generación a base de combustibles fósiles. (Universidad Santo Tomás y Gómez Ramírez, 2016).

La implementación de la energía solar en Colombia comenzó hace varios siglos en el sector agrícola para el secado del café y otros productos, ya a mediados del siglo pasado se comenzó a usar la energía térmica para calentadores solares en Santa Marta donde fueron instalados en las casas de los empleados de las bananeras (Rodríguez Murcia, 2009). En los años ochenta comenzó una tendencia hacia la implementación de las energías renovables principalmente orientadas a la energía solar, sin embargo, en los años noventa se detuvo su desarrollo debido a la problemática social que comenzó a predominar en la década (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2014)

Algunas implementaciones se vieron en la academia como en la Universidad Industrial de Santander en donde se instalaron calentadores solares domésticos, con el fin de estudiar su comportamiento y viabilidad de implementación en futuros proyectos urbanos, otras instituciones que también investigaron el uso de estos equipos fueron la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional en Bogotá, la Universidad del Valle, entre otras y fueron quienes propusieron las bases para posteriores trabajos; lo que permitió que en los años ochenta se comenzaran a ver los primeros sistemas de gran envergadura en el país, como lo fueron la instalación masiva de calentadores en urbanizaciones de Medellín (Villa Valle de Aburrá) y Bogotá (Ciudad Tunal, Ciudad Salitre) en donde fueron instalados miles de calentadores, también se instalaron un número considerable de equipos solares domésticos y grandes sistemas de calentamiento de agua para uso en centros de servicios comunitarios como hospitales, instituciones religiosas y algunas cadenas hoteleras como Dann Carlton, entre otros (Rodríguez Murcia, 2009).

Este tipo de tecnología sufrió una gran caída debido a la aparición de métodos más baratos para la generación de energía, como el gas natural, lo que desplazó completamente esta industria desde mediados de los noventa. En la actualidad se ha visto de nuevo un nacimiento en el interés sobre esta alternativa debido a la creciente preocupación en el medio ambiente y al incremento en los precios de los combustibles fósiles (Caballero y Reinstein, 2003).

Este cambio de tendencia no ha sido suficiente para que las personas, las empresas y los gobiernos se motiven a destinar recursos en estas tecnologías, debido al alto costo inicial, al mantenimiento y a la falta de conocimiento sobre su funcionamiento (Universidad Santo Tomás y Gómez Ramírez, 2016). Hoy en día, la industria de la energía fotovoltaica está en auge, aunque la de calentadores solares en el país sigue deprimida a la espera de una nueva crisis en el precio de los combustibles fósiles (Rodríguez Murcia, 2009).

2.2. Delimitaciones

Desde el comienzo del proyecto se tenía en claro el tipo de población que queríamos beneficiar y que requerimientos se podrían tener además de sus posibles características. Para realizar el diseño del equipo se deben de considerar varios aspectos que influyen en gran medida en su efectividad y que no son directamente técnicos, sino que son aspectos orientados más a factores sociales, económicos y ambientales.

El equipo está pensado para beneficiar a una familia de 3 personas conformada por 2 adultos y un niño, por lo cual se hace indispensable que el equipo pueda producir el agua potable necesaria para su subsistencia. Con base en datos suministrados por la Organización Mundial de la Salud OMS, se establece que una persona adulta consume aproximadamente 2 litros de agua diarios, aunque este valor puede variar debido a factores como el clima, el nivel de actividad y la alimentación, por lo que se establece un valor promedio en donde se incluye las necesidades de hidratación y de incorporación a los alimentos de 7.5 litros de agua por persona al día (Water, Sanitation, Hygiene and Health, 2017).

Teniendo en cuenta la información anterior, se establece que el equipo debe producir como mínimo un valor aproximado de 15 litros de agua al día, teniendo en cuenta un promedio de 6 litros de agua potable al día para cada adulto y 3 litros de agua para un niño, con el único fin de hidratarse y de preparar alimento, esto en búsqueda de disminuir las enfermedades por el consumo de aguas contaminadas.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta es el económico, dado que la población que se busca beneficiar es de escasos recursos monetarios, por lo que el equipo no debe tener altos costos de fabricación, debe ser de fácil elaboración y no debe ser difícil de transportar, por lo que se debe utilizar materiales en su construcción de fácil acceso, económicos y ligeros.

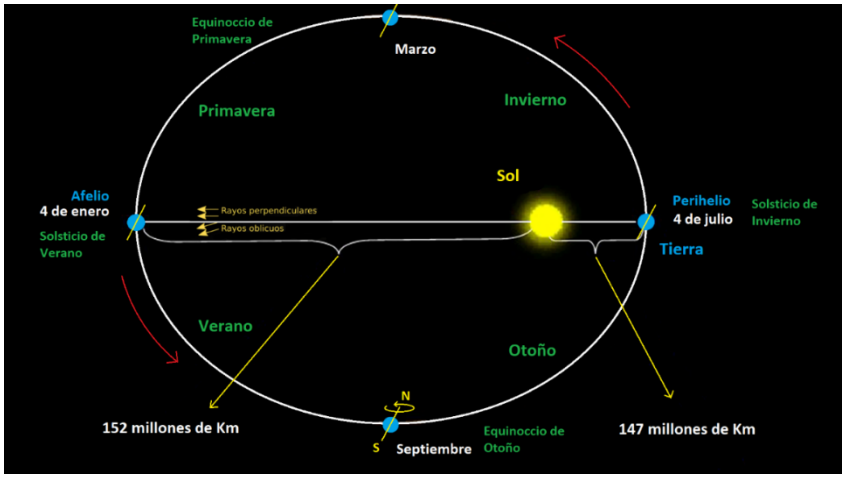
2.3. Fundamentos teóricos

2.3.1. Sol

El sol, la estrella más próxima a nuestro planeta tierra, con un diámetro aproximado de 1.390.000 [km] y una masa de $1.99x10^{30}$ [kg]. Está compuesto principalmente de hidrógeno y helio, junto a otros elementos más pesados, alcanzando temperaturas de alrededor de los 5.500 Kelvin [K] en su superficie y más de 15 millones de Kelvin [K] en su núcleo, donde se produce la mayor parte de su energía por medio de reacciones de fusión, por lo que es considerado un gigante reactor de fusión nuclear, que cada segundo transforma en energía una masa aproximada de 5 millones de toneladas [Tn] en $3,86X10^{26}$ [W]. Se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros "Unidad astronómica [U.A]" en un sistema de órbita elíptica con una excentricidad del 1.7% y en rotación inclinada 23° con respecto al eje de la tierra (Ver figura 1), lo que genera un cambio en la intensidad de la radiación incidente en la tierra además de que la inclinación crea el fenómeno de las estaciones. (IDEAM y UPME, 2005)

Figura 1

Sistema tierra – Sol.



Nota: Representación de la órbita terrestre. Basado en Planetario de Montevideo y Barbato.

Nuestro Sol es relativamente estable, condición que permanecerá por miles de millones de años, un tiempo inmensurable con respecto a la escala de la vida humana, por lo que se puede considerar como una fuente de energía renovable e inagotable para la Tierra (Garay, 2019). Teniendo en cuenta las características indicadas, queda claro que la cantidad de energía suministrada por el sol solamente en el exterior de la tierra es abundante y aproximadamente estable, debido a que cerca al trópico no presenta grandes variaciones durante el año, por lo que se puede establecer la radiación solar extraterrestre como un valor constante conocido como constante solar [CS] (Garay, 2020).

El valor que se utiliza actualmente es de 1.370 [W/m^2] y se mide como la cantidad de energía proveniente del Sol que incide perpendicularmente sobre una superficie de un metro cuadrado colocada fuera de la atmósfera terrestre. Las partículas electromagnéticas emitidas por el astro se propagan en todas direcciones, una pequeña parte de esta energía ingresa al planeta tierra e incide sobre su superficie en forma de radiación solar y se convierte en su principal fuente de energía. Esta energía se mide de manera instantánea como el cociente entre la cantidad de energía solar incidente en watt [W] o vatio “Potencia” entre una unidad de área en metros cuadrados [W/m^2], conocida como radiación o integrada durante un periodo de tiempo [kWh/m^2] por día conocida como irradiación. (IDEAM y UPME, 2018)

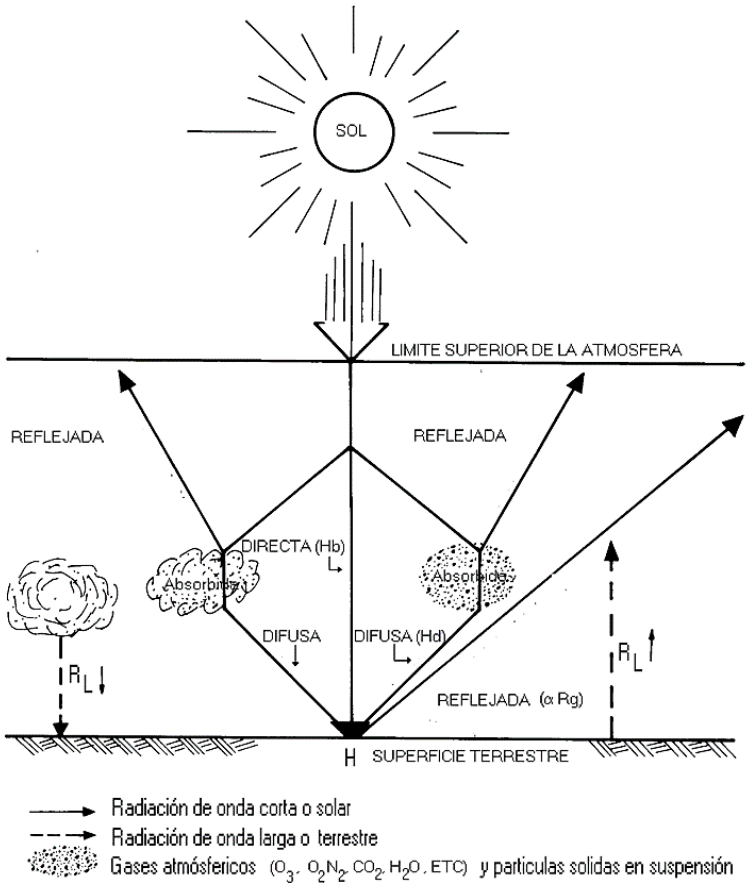
2.3.1.1. Efectos terrestres sobre la radiación solar. Para determinar la viabilidad de un proyecto basado en energía solar se debe de tener en cuenta las características del ambiente circundante, debido a la presencia de muchas variables dependientes de la localización, que pueden afectar en gran medida la radiación solar que incide en un territorio. A continuación, se presentan los procesos de atenuación que sufre la radiación solar en su ingreso en la tierra (EPHYSLAB y Universidad de Vigo, s. f.)

El primer obstáculo al que se enfrenta la radiación solar al ingresar a la tierra es la atmósfera terrestre, porque al pasar por esta sufre un proceso de debilitamiento y descomposición. La radiación solar dentro de la atmósfera se divide en tres componentes principalmente, la radiación directa, la difusa y la reflejada (Ver figura 2). La suma de estos tres tipos se conoce como la radiación global (IDEAM y Universidad nacional de Colombia, 2018).

De la radiación total incidente el 30% es reflejado al espacio exterior y no influye en la tierra, el otro 70% restante calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos o es absorbida en la evaporación del agua. Relativamente, poca energía es la que termina estando disponible para ser usada, pero aun así sigue siendo suficiente para su aprovechamiento energético (IDEAM. s. f.).

Figura 2

Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.



Nota: Diagrama de la separación de la radiación. Tomado del Atlas de radiación solar, 2005.

El segundo aspecto que más afecta la disponibilidad de la radiación solar dentro de la atmósfera terrestre son las condiciones climáticas, estos factores se vuelven difíciles de predecir por las múltiples variables que los influyen de manera poco predecible como lo es la nubosidad, el viento y la contaminación, que pueden disminuir en gran medida la presencia de la radiación directa. Otros factores que también influyen es la localización geográfica (latitud, longitud, elevación), el relieve o estructuras altas cerca de la zona de aplicación y el tipo de terreno, entre otros (Chiron de la Casinière y Cachorro Revilla, 2008).

Todos estos factores pueden ser determinados con menor o mayor grado de exactitud dependiendo de la cantidad de variables que se tengan en cuenta y de las consideraciones aplicadas, esto con el fin de generar una estimación de la cantidad de radiación solar en [W/m^2] disponible en una ubicación específica en el globo terrestre, por medio de modelos matemáticos que parte de la constante solar como lo es el Modelo isotrópico difuso de Liu y Jordan (1963) utilizado en este caso. (Duffie y Beckman, 1980)

Otra forma de estimar la energía proveniente de sol sobre una superficie es por medio de las mediciones de la irradiación solar promedio recibida al día [Wh/m^2], del promedio de horas de sol al día [hSD] y de los días sin brillo solar al mes [dsSM]. Colombia cuenta con una red nacional de medición de amplio rango, sostenida por varias organizaciones públicas o privadas, encabezadas por el IDEAM, los cuales por medio de las estaciones automáticas o convencionales ubicadas en todo el territorio nacional y con el uso de sensores como actinógrafos, piranómetro, heliógrafos, pirheliómetro y el radiómetro entre otros posibles, logran cuantificar la magnitud de la radiación y su variación presente a lo largo del día (IDEAM y UPME, 2018). Por medio de estos valores se puede determinar la viabilidad de un proyecto orientado al aprovechamiento de este tipo de recurso renovable.

2.3.2. Agua

El agua es un recurso fundamental para el sustento de la vida biológica en el planeta tierra y aunque gran parte de la superficie terrestre está cubierta por este valioso líquido, solo una pequeña parte de esa cantidad, alrededor del el 0,3% del total está en condiciones viables para su consumo humano, lo cual no la vuelve apta para el mismo y por lo que aún es necesario realizar procesos de tratamiento de agua, destinados a eliminar patógenos o contaminantes (Jáuregui y Milliet, 2008). Esta situación hace que sea necesario la búsqueda de nuevas fuentes hídricas de captación y de mejorar la calidad del agua de fuentes ya contaminadas con métodos que no influyan negativamente en el medio ambiente.

La calidad del agua en la cuenca de captación se puede considerar como una medida de la idoneidad de esta, la cual depende tanto de factores naturales como humanos. Al no contar con la presencia humana la calidad del agua vendría a ser determinada por los sólidos disueltos y por los compuestos biológicos en el medio (Cordy, 2001). Sumado a esto, la presencia del ser humano genera factores más contaminantes que ponen en peligro la cuenca de captación como lo son todos los productos a base de hidrocarburos, sustancia de naturaleza química, metales pesados, aceites entre otros productos que se descargan a diario (Nathanson, 2020).

El aumento diario de la demanda mundial de este valioso líquido, destinado no solo para el consumo, sino también para diferentes sectores económicos, industriales, agrícolas, entre otros, ha provocado que se genere un sobre estrés hídrico, originado por el exceso de consumo y el desabastecimiento (Arora, 2019). Por estos motivos se debe recurrir a fuentes de menor calidad, más lejanas y de difícil acceso, junto a la aplicación de tecnologías que consumen más energía para su tratamiento, lo que incurre directamente a una mayor generación de contaminación al medio ambiente. (UNESCO, 2020).

2.3.2.1. Tratamiento de agua. Bajo todas las condiciones mencionadas, tanto de escasez como de contaminación y demanda, se vuelve indispensable la implementación de operaciones dirigidas al tratamiento de agua, que consiste en un grupo secuencial de procesos de distintos tipos (físico, químico, fisicoquímico o biológico) que buscan la reducción y eliminación de contaminantes o de las características no deseables (Lanfair et al, 2018). Estos procesos obtienen agua con propiedades adecuadas según las características de la fuente y del uso al que esté destinada; los tratamientos se pueden dividir en procesos de desalinización, depuración y potabilización (Camacho, 2011).

2.3.2.1.1. Desalinización. La desalación del agua o desalinización es un proceso de tratamiento del agua basado en la separación de sales de una disolución salobre (agua salobre o agua de mar) para convertirlas en agua potable, adecuada para el consumo humano y accesible para población con mayores dificultades de acceso al agua dulce y que se encuentren cerca de las costas marítimas, también es utilizada en otros sectores de la industria o la agricultura (Desalinización del agua de mar y salobre, s. f.)

2.3.2.1.2. Depuración. Las aguas residuales son un producto de las actividades del ser humano y proceden principalmente de los desechos producidos por las industrias o de las ciudades. Este proceso tiene como objetivo principal el recolectar las aguas contaminadas y eliminar las sustancias no deseadas y peligrosas para posteriormente ser devuelta al ciclo del agua (Camacho, 2011).

2.3.2.1.3. La potabilización. Es un proceso que consiste en eliminar sustancias que resultan tóxicas, como el plomo, el cromo o el zinc entre otros metales, así como arenas, bacterias y virus, que pueden estar presentes en el agua, con el objetivo de convertirla en apta para su consumo (Zarza, 2020).

2.3.2.2. Índice de riesgo para la calidad del agua potable (IRCA). El recurso hídrico hace parte fundamental de la sustentabilidad de las poblaciones en el territorio Colombiano, sin embargo, es claro que la gran mayoría no es apta para el consumo humano, por ello, el Gobierno Nacional de Colombia, con el fin de reglamentar la salubridad de esta, crea una clasificación sobre la potabilidad bajo los parámetros de la calidad de agua y el nivel de riesgo que se genera al momento de su consumo, determinando si existe una falencia en las características físicas, química y microbiológicas; siendo vigiladas por el SIVICAP (Sistema de Información para la Vigilancia de la Calidad del Agua Potable), bajo la resolución 811 de 2008, en donde se establece que su finalidad principal es producir una alerta temprana, sobre eventos o situaciones de emergencia debidas al riesgos que sufren ciertas población al consumir agua contaminada (Ministerio de vivienda, ciudad y desarrollo, 2019).

Tabla 1

Clasificación del nivel de riesgo y acciones según IRCA por muestra e IRCA mensual

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra (notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	IRCA mensual (acciones para mejora de la calidad)
80,1 -100	INVIABLE SANITARI-AMENTE	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, Minsalud, INS, Minvivienda, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35,1 - 80	ALTO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14,1 - 35	MEDIO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5,1 – 14	BAJO	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 – 5	SIN RIESGO	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Nota: Según Resolución 2115 de 2007, Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Tomado del Ministerio de vivienda, ciudad y desarrollo, 2019.

2.3.2.3. Abastecimiento de agua. El gobierno tiene como objetivo llevar el servicio de agua potable y saneamiento a todos los hogares y según datos suministrados por el ministerio de vivienda en el año 2021, el 93% de los colombianos ya contaban con el servicio de acueducto (Ministerio de vivienda, 2021). Por medio de los datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística podemos evidenciar que este porcentaje aplica solo para los cascos urbanos y no en las zonas rurales (DANE, s. f.).

2.3.2.4. Nuevas tecnologías en el tratamiento de agua. En los últimos años, surgió la necesidad de innovar en los procesos tradicionales de potabilización de agua comunales basados en la filtración, sedimentación o en agentes químicos, hacia la implementación de métodos que no contribuyan al cambio climático y que mejoren la deficiencia ambiental de los procesos convencionales de purificación de agua; con tratamientos de bajo costo, unifamiliares y amigables con el medio ambiente, como lo son los métodos basados en el aprovechamiento de energías alternativas (Almar Water Solutions, 2017).

La utilización de la energía solar ha tomado fuerzas en la última década como una alternativa, con un fuerte potencial para el mejoramiento de la calidad de vida de los seres humanos. Orientado hacia los procesos de potabilización de agua, se han realizado importantes avances en tecnologías innovadoras, con 100% de utilización de energía solar limpia. Los sistemas de colectores solares orientados a la aplicación de los procesos de tratamiento de agua con tecnologías ecológicas, basados en la implementación de diferentes fenómenos, como lo son la desinfección solar, que por medio de una exposición prolongada permite que los patógenos transmitidos en el agua sean inactivados por la radiación, o la desalinización solar por medio de la destilación, o la fotocatálisis solar, entre otros procesos, han presentado una alternativa favorable para el ser humano y el ambiente (Ying Zhanga et al, 2018).

2.3.3. Gas

El gas natural es una de las más importantes fuentes de energía no renovables actualmente, es de origen fósil y se obtiene al extraer del subsuelo un compuesto de gases ligeros formado por metano, etano, propano, butano, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio, argos, entre otros elementos, además se le agrega un odorizante llamado mercaptano que le permite ser detectado en cualquier momento (Nieto, 2020).

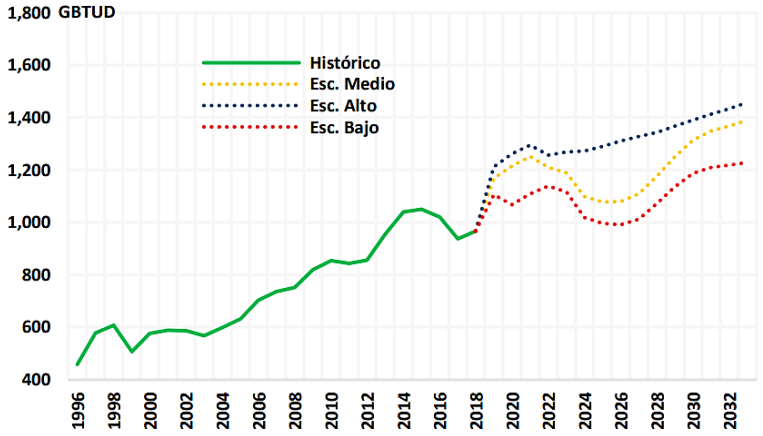
Este combustible surgió posteriormente al uso del petróleo, ya que estos se encontraban juntos en los yacimientos, aunque al principio no se pudo aprovechar, luego de sobrepasar problemas de almacenamiento y transporte se popularizó su consumo en todo el mundo. Su distribución se realiza a través de gasoductos subterráneos de acero y polietileno, que llevan el gas directamente a los hogares, comercios e industrias (Fondo de la industria nuclear española, 2020).

Durante las últimas 2 décadas la demanda mundial y nacional de gas natural ha ido creciendo con rapidez y en una mayor medida en comparación con los otros combustibles fósiles como el petróleo y el carbón, con una tasa próxima del 3.3 % anual y aunque en los últimos años se ha ido mitigando, su aumento no se detiene (Ver figura 3). Mientras su demanda aumenta, junto a la dificultad para obtenerlo, almacenarlo y transportarlo, han hecho que aumente considerablemente su precio (UPME y Ministerio de energías, 2019).

Entre tanto, la tendencia creciente del precio del gas (Ver figura 4), que se espera se mantenga a futuro conforme a las proyecciones y la prevista disminución en la oferta, hará que nazca una dependencia a la importación a partir del momento en que la demanda supere la oferta, lo cual se espera que suceda en los próximos años. Por lo cual se hace factible considerar volver al desarrollo de alternativas como la tecnología solar térmica, para desplazar su uso en diferentes ámbitos energéticos (UPME y Ministerio de energías, 2019).

Figura 3

Escenarios de demanda nacional de gas natural

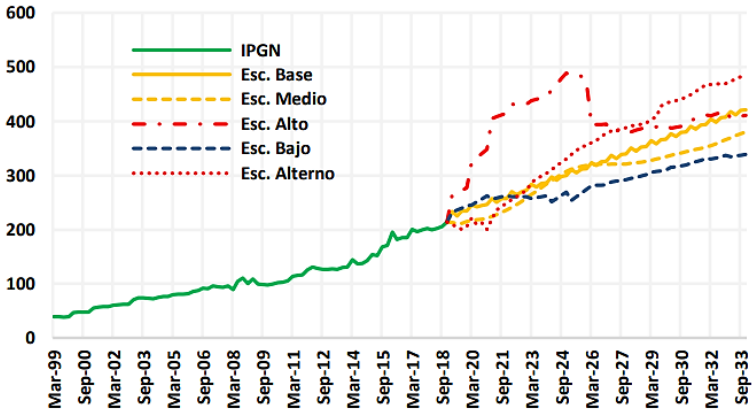


Nota: Tomado de UPME, Chevron, Ecopetrol, Concentra 2018.

La energía solar térmica tuvo un gran auge a principios de los años ochenta, en tecnologías puntuales como lo era el calentamiento de agua; pero fue la introducción de un energético más barato, el gas natural, lo que desplazó del mercado esta naciente industria desde mediados de los noventa hasta la actualidad (Rodríguez Murcia, 2009). Aún se considera rentable la utilización de estos equipos en casos puntuales, en los que no se cuenta con acceso a redes de gas natural y en su lugar se utilizan la energía eléctrica o el GLP para el calentamiento de agua. (UPME, 2014)

Figura 4

Proyección de precios de suministro de gas natural



Nota: Tomado de UPME, 2019.

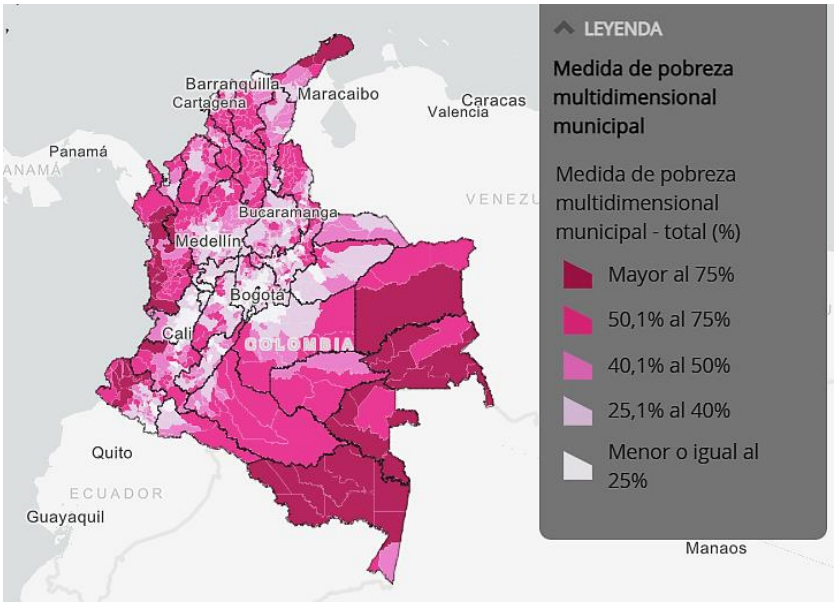
2.3.4. Entorno

En Colombia es posible visualizar una diferencia muy marcada en la distribución de la riqueza, encontrando áreas con muy altos niveles de pobreza y zonas en las que se concentra una gran cantidad de recursos (DANE, 2021). Entre las entidades gubernamentales han buscado determinar un índice que permita esclarecer el estado socioeconómico a nivel nacional, con el fin de contrarrestar la situación de vulnerabilidad de diversas poblaciones, para ello, junto con el DANE, quien por medio de un censo, ha caracterizado y recolectado los datos suficientes como para determinar este índice, basándose en aspectos como la calidad de vida y la carencia de los hogares, estableció 15 indicadores para tener en cuenta.

Los últimos datos obtenidos en Colombia nos indican que la mayor parte de medida de pobreza multidimensional municipal total mayor a un 75 % se encuentra agrupadas en el Sur, Sureste y en menor medida en el Oeste, siendo las regiones de Orinoquía-Amazonía y Pacífica las más afectadas (Red de pobreza multidimensional, 2021).

Figura 5

Mapa de la pobreza multidimensional en Colombia



Nota: Tomado de Medida de pobreza multidimensional municipal de fuente censal, DANE 2021.

2.3.5. Destiladores solares

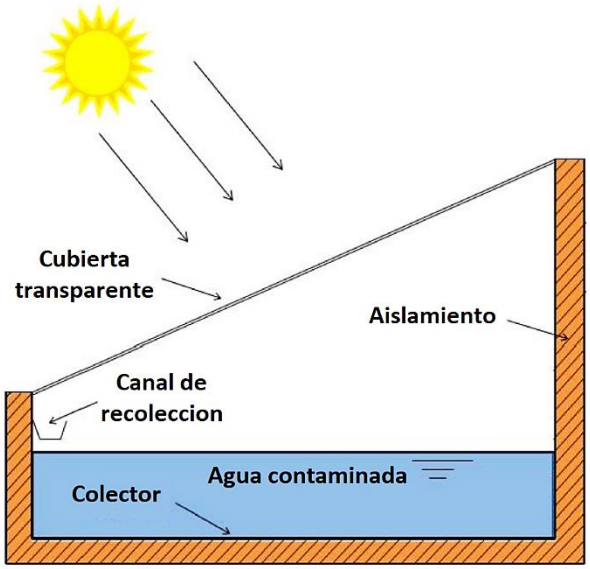
Como ya se había definido anteriormente, la desalinización consiste en la separación de sales de una disolución salobre, pero para lograr que este proceso ocurra se requiere ingresar en el sistema una gran cantidad de energía, por esto mismo estos procesos se consideran de un alto costo (Desalinización del agua de mar y salobre, s. f.). Por medio de la desalinización solar, la energía solar que ingresa a la tierra en forma de radiación supliría este alto requerimiento energético, sin que se produjera un impacto ambiental en su obtención (IDEAM y UPME, 2018).

Básicamente, el proceso de destilación no solo puede separar la sal del agua, también sirve para eliminar contaminantes que tengan un punto de ebullición mayor al del agua, produciendo agua potable y de mejor calidad; teniendo esto en cuenta se han desarrollado dos procesos para destilar el agua con componentes no deseados, usando energía solar, el primero consiste en simular el ciclo hidrológico a pequeña escala; en la segunda forma, la energía solar se captura y se concentra en un punto, para aumentar la temperatura en un intercambiador de calor o en colector, para transformarlo en otro tipo de energía (Ying Zhanga et al, 2018).

El dispositivo más simple, económico y efectivo que puede simular el ciclo del agua, es el destilador solar de estanque de una sola vertiente, siendo su uso también el más común. Consiste en un recipiente poco profundo que contiene el agua a tratar y sobre el cual se coloca una lámina transparente de vidrio o plástico, esta tapa está inclinada y debajo de su extremo inferior se extiende un canal receptor o depósito de almacenamiento. La radiación solar atraviesa la cúpula y luego es absorbida por el aire, el agua y el colector dentro del equipo, lo que calienta todo el sistema provocando que el agua se evapore, para luego ser condensado el vapor en la superficie interior de la cúpula transparente y finalmente se desliza el agua hasta llegar a donde será almacenada. Un ejemplo de este equipo se puede observar en la (figura 6) (Arvind Thakur, 2021)

Figura 6

Diagrama de un destilador solar de una sola cuenca de pendiente única.



Nota: Tomado de Ying Zhanga et al, 2018.

2.3.5.1. Antecedentes históricos. El principio de funcionamiento del equipo está presente en la misma naturaleza, en el ciclo hidrológico del agua o ciclo del agua, en donde está circula entre los distintos elementos que forma la hidrosfera terrestre. Por esto mismo, la humanidad utilizo este mismo principio de una manera casera para mejorar la calidad del agua, pero se podría afirmar que el periodo moderno de la destilación solar inicio con la construcción de un gran destilador de estanque cerca de Las Salinas, en el norte de Chile. Durante la Segunda guerra mundial se emplearon destiladores solares inflables como complemento de los equipos de rescate del ejército de los Estados Unidos. Después de esta época de guerra comenzó a crecer la investigación en el desarrollo de tecnologías más centradas en la eficiencia y en la disminución de la contaminación, entre los que estaba incluido la destilación solar, aunque aún se daba una gran prioridad a procesos que usaban combustibles fósiles, debido a que eran más fácil de aplicar y mucho más rentables (de la Gándara, 2006).

Cuando la Universidad de California comenzó su investigación sobre la desalinización en los años cincuenta, se vio incrementada la popularidad de este método. En esta época se probaron varias configuraciones de destiladores, tratando de mejorar la eficiencia y reducir los costos de fabricación, pero se llegó a la conclusión de que los destiladores solares de estanque no podían competir económicamente contra los combustibles fósiles. Otras investigaciones realizadas en Estados Unidos, Grecia, Argelia, Australia, entre otros, llegaron a las mismas conclusiones que la Universidad de California (Fendrich, M et al., 2018).

2.3.5.2. Partes de un destilador. Existen muchos tipos de variantes de destiladores solares, los cuales cuentan con diferentes formas y componentes, pero en gran medida todos al seguir el mismo principio de funcionamiento comparten características más o menos semejantes. En el apéndice A se presenta una tabla descriptiva con datos sobre en qué tipo de equipos están presentes estas partes, cuáles son sus características y que materiales se recomiendan para su fabricación (Saettone, E. 2015).

1. Estructura de soporte.
2. Aislamiento térmico.
3. Colector solar.
4. Condensador.
5. Concentradores.
6. Cúpula o cubierta.
7. Depósitos.
8. Canales.
9. Conectores.
10. Sistemas auxiliares.

2.3.5.3. Condiciones que favorecen el uso de destiladores solares. El proceso de evaporación del agua consume una gran cantidad de energía en forma de calor, aproximadamente 2300 [kJ] por cada litro de agua tratada. Por esta misma alta exigencia energética, es necesario que se estudie la viabilidad de su aplicación y que se instale los equipos con la mayor optimización posible, para que de esta manera los equipos se sitúen en ubicaciones con gran incidencia de radiación solar, sea diseñados con una alta eficiencia y en donde la demanda de agua potable no sea grande (Salinas, A et al. 2019). Los principales factores que benefician la aplicación de los destiladores solares son:

1. No se dispone de agua dulce, pero sí de agua salada.
2. Solo se necesitan pocos litros de agua al día.
3. Altos niveles de radiación solar.
4. Difícil adquisición y altos precios de los combustibles fósiles.
5. Bajo nivel de precipitaciones.
6. Altos costos del transporte de agua.
7. Se dispone de fuentes de agua cercanas pero contaminadas.
8. Las zonas en donde se sitúan los destiladores no siempre poseen energía eléctrica.
9. Mano de obra calificada.

2.3.5.4. Variables de diseño. En el apéndice A también se puede observar varias recomendaciones que se deben tener a la hora de plantearse la instalación de un equipo de destilación solar; entre las recomendaciones se encuentran, aumentar en gran medida la temperatura del líquido antes de ingresar al proceso, manejar altos deltas de temperatura, disminuir la distancia entre el condensador y el colector, el uso de aislante, sellos herméticos entre otra serie de consejos (Duffie y Beckman, 1980).

2.3.5.5. Calidad del agua producida por los destiladores Solares. El particular sabor del agua después de pasar por el proceso de destilación se debe a las perdidas producidas en su pH. El agua que se produce en un destilador solar proviene de un fenómeno similar al que se produce en la tierra de evaporación y condensación, el cual origina la lluvia. Por lo que se obtiene como resultado agua con un mejor valor de pH y de excelente calidad, además de que puede remover con facilidad sales, solidos disueltos y microorganismos nocivos, entre otros (Dutta, P et al, 2021).

2.3.5.6. Clasificación de los destiladores solares. Los destiladores solares se pueden clasificar en sistemas pasivos y activos. En los equipos pasivos no se tiene ninguna otra entrada de calor que sea absorbida por el equipo, mientras que los activos, el agua recibe una cantidad adicional de energía térmica, la cual puede provenir de colectores solares o del calor desechado por motores y procesos industriales. También se puede clasificar en el tipo de radiación que captan, ya sea directa o difusa y en función de la temperatura de trabajo (Thakur, A. 2021).

2.3.5.7. Tipos de destiladores. Existe una amplia variedad de equipos de destilación solar con una gran diversidad de diseños, que varían en complejidad, tamaño, eficiencia y campo de aplicación. En esta sección se muestran ejemplos de los tipos de destiladores más comunes (Apéndice B) (Thakur, A. 2021).

2.3.5.7.1. *Sistemas auxiliares.* Muchos destiladores solares se ven en la necesidad de aumentar su eficiencia, ya sea porque la zona de aplicación no cuenta con la cantidad óptima de radiación, por una alta demanda de producción o para compensar alguna deficiencia del modelo. Para solucionar este problema surgen los sistemas auxiliares que conforma un ensamble aparte que puede cumplir diferentes funciones, pero siempre con el objetivo de mejorar el desempeño del equipo (Esteban, C et al., 2005).

3. Marco metodológico

3.1. Generación de conceptos

En el diseño de un equipo desde el ámbito ingenieril, es fundamental llevar una organización de las hipótesis e ideas planteadas en los objetivos y de los conceptos recopilados en el marco referencial, para poder desenglobar de manera efectiva todo el proceso requerido para completar las ideas propuestas, dando una solución a la problemática que motivo el proyecto.

Se realizó entonces un planteamiento de ideas, que nos permitiera entender la problemática desde varios puntos de vista y de ahí expandir conceptos que nos facilitaran entender como influyen estos en el entorno de estudio y que se necesita para poder contrarrestarlo. La idea principal es conseguir un diseño competente, económico y seguro, por lo que se parte primero de reconocer el entorno más viable para su ejecución y posteriormente determinar las variables más importantes para desarrollar un modelo óptimo, generado a partir de criterios de selección.

3.2. Población

Colombia en toda su extensión de territorio cuenta con una gran riqueza en recursos naturales, en gran medida por su ubicación tan privilegiada y por sus características territoriales, pues posee altas cordilleras, una geografía diversa, junto a un clima muy variado (IDEAM y UNAL, 2018). Toda esta gran variabilidad genera que el territorio sea muy divergente y sus condiciones varíen mucho entre regiones y desde un punto de vista social, las características de la población también sufren de esta heterogeneidad (DANE, 2021). Teniendo en cuenta estos factores se vuelve evidente que se deben abordar muchas características correspondientes al entorno a la hora de querer realizar un proyecto que cuente con proyección social. Por lo cual se tomaron las siguientes consideraciones para el estudio de las posibles regiones beneficiadas:

- El principal aspecto que evalúa es la intensidad promedio de la irradiación solar en [Wh/m^2] porque es la fuente energética del equipo y se empleará datos estadísticos suministrados por el IDEAM en la última entrega del Atlas de radiación solar ultravioleta y ozono de Colombia (2018).
- El segundo enfoque estará relacionado con la calidad del agua y será evaluado por medio del índice de riesgo para la calidad del agua potable IRCA utilizando el informe nacional de calidad del agua para consumo humano INCA (2019) junto a la base de datos del DANE que se utilizará para determinar el porcentaje de cobertura de acueducto.
- El gas natural es el tercer aspecto, porque es la alternativa más usada para los procesos de destilación o tratamiento casero del agua y se determina con el porcentaje de cobertura en el servicio de gas determinado por el DANE.
- El último aspecto por evaluar fue la pobreza multidimensional municipal, que tiene en cuenta 15 indicadores sociales determinados por el DANE.

Este estudio se evaluará a partir de 4 variables fundamentales, que fueron establecidas en los conceptos previos, incidencia de la radiación solar, calidad y abastecimiento de agua, abastecimiento de gas y pobreza multidimensional. Para determinar la mejor zona se partió de tener como sector inicial a todo el país “Colombia”.

3.2.1. Método de selección

Se empleó un método de etapas con eliminación, determinadas con la media de los datos, para establecer los que presentaban mejores características para cada variable e ir descartando los que están por debajo de esta (Apéndice C). Al ser la incidencia de la radiación solar sobre la superficie el factor más determinante y al solo contar con datos muy aproximados por regiones, se inició evaluando a los 32 departamentos.

3.2.2. Poblaciones elegidas

Se eligieron dos poblaciones municipales distintas con el fin de tener un área más amplia de aplicación. Las dos poblaciones que presentaron una mejor viabilidad para la ejecución del proyecto fueron (Apéndice D):

3.2.2.1. Localización 1. El municipio de Tiquisio, este municipio hace parte del departamento del sur de Bolívar, el cual se encuentra ubicado en el norte de Colombia, en la región de la Costa Atlántica; su territorio comprende un total de 762 [km^2] de superficie. Su cabecera municipal Puerto Rico se encuentra localiza en las coordenadas Latitud Norte de 8° 55´07´´ y con Longitud Oeste de 74° 27´54´´, su altura sobre el nivel del Mar es de 300 metros, con una temperatura promedio de 28 °C (cálido/ húmedo), maneja una topografía plana, encontrándose quebradas, ciénagas y caños, durante época de lluvia 25.000 hectáreas hacen parte de la Depresión Momposina por inundaciones, permitiendo a su población dedicarse a la agricultura, minería y pesca (Cabecera Municipal Puerto Rico, 2020).

3.2.2.2. Localización 2. El municipio de Cumaribo, este lugar según La alcaldía de Cumaribo (2017) establece su municipio en el Departamento de Vichada, ubicado en el Oriente de Colombia, su territorio ocupa aproximadamente 65.193 [km^2] de superficie, posee una altitud de 125 metros a nivel del mar, y su Latitud Norte es de 04° 26´28 ‘’ junto con su Longitud Oeste de 69° 48´32´´; su territorio está compuesto por sabanas en tres cuartas partes y el resto se considera selva, con presencia de terrazas y cerros, adicional a esto cuenta con tres grupos de ríos, los cuales son: el Orinoco, el Meta y el Guaviare; presenta una temperatura de 27 °C (cálido/seco), la población se dedica a la agricultura, producción de traspatio, Ganadería equina, ovina, bufalino y avícola, también se evidencia producción de alimentos y manufactura (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016).

3.3. Radiación incidente

La irradiación sobre el territorio de Colombia es en promedio 4 [Wh/m^2] al día, un valor muy bueno en comparación con la media mundial, lo que nos indica que tenemos bastante abundancia en este recurso, además de que al encontrarse cerca al trópico la variabilidad de esta no es tan evidente como en países con mayor cercanía a los polos, pero aun así la gran diversidad ambiental del país genera que no sea uniforme a lo largo de su territorio (IDEAM y UPME, 2018).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2018) es el encargado de medir, calcular y suministrar los datos sobre la cantidad de radiación solar promedio sobre el territorio, entre otras variables. Aunque en los últimos años el IDEAM aumento en más del doble los sensores que miden la radiación solar, se hace evidente que el alcance que posee esta organización para realizar las mediciones en el país están muy por debajo de las requeridas, dado que al revisar la cantidad de estaciones y equipos de medición se nota la escasez, por el hecho de que cuenta con 240 estaciones y solo en Colombia hay 1103 municipios, por esta falta de cobertura nació la necesidad de poder calcular la radiación incidente en una ubicación determinada para cualquier momento, por medio de la aplicación de un modelo matemático (Colombia CO, 2020).

3.3.1. Modelo

Se estableció en el año de 1963 el modelo isotrópico difuso de Liu y Jordan, en él se asume que toda la atmosfera terrestre es un medio isotrópico y despejado. Con esta suposición, la suma de la radiación difusa del cielo y la reflejada en el suelo es la misma, independientemente de la orientación y la radiación total en la superficie inclinada es la suma de sus tres componentes, la directa, la difusa y la reflejada, con la que se calcula la irradiación sobre una superficie inclinada de un metro cuadrado (Apéndice E) (Duffie y Beckman, 1980. p109).

$$I_T = (I_r \times R_r) + I_f \times \left(\frac{1 + cos\,\beta}{2}\right) + I \times \left(\frac{1 - cos\,\beta}{2}\right) \times \rho_g$$

3.3.2. Consideraciones

1. Asumimos la atmosfera como isotrópica y que la temperatura de esta y su densidad son constante.
2. Tomamos un cielo despejado.
3. La tierra es totalmente redonda, por lo que no varía su diámetro; esta misma gira con velocidad constante y el año tiene exactamente 365 días.
4. Se tomará el número de horas con sol brillante hSD como parte de los datos suministrados por el IDEAM.
5. El cálculo tiene límite de altura hasta los 2500 [m] sobre el nivel del mar y entre +60 a -60 grados en latitud.
6. No tenemos en cuenta la interferencia de montañas, edificios o árboles altos que opaquen la radiación solar en las primeras y últimas horas del día.
7. Asume la constante solar en 1367 [w/m^2]
8. Tomamos meses de 30 días.

En este modelo se tiene en cuenta como factores dependientes de la localización la Latitud [$\boldsymbol{\phi}$], Longitud [λ], Altitud [Ht], Meridiano del país [Lp], Número de horas con sol [hSD], y como factores que depende de las características del equipo están el Ángulo acimut de la superficie [γ] y la Inclinación [β], también pudiendo calcular la radiación para una hora y un día determinado con la fecha y la Hora [TSM]. Se evaluó 55 datos entre variables y constantes (Apéndice E).

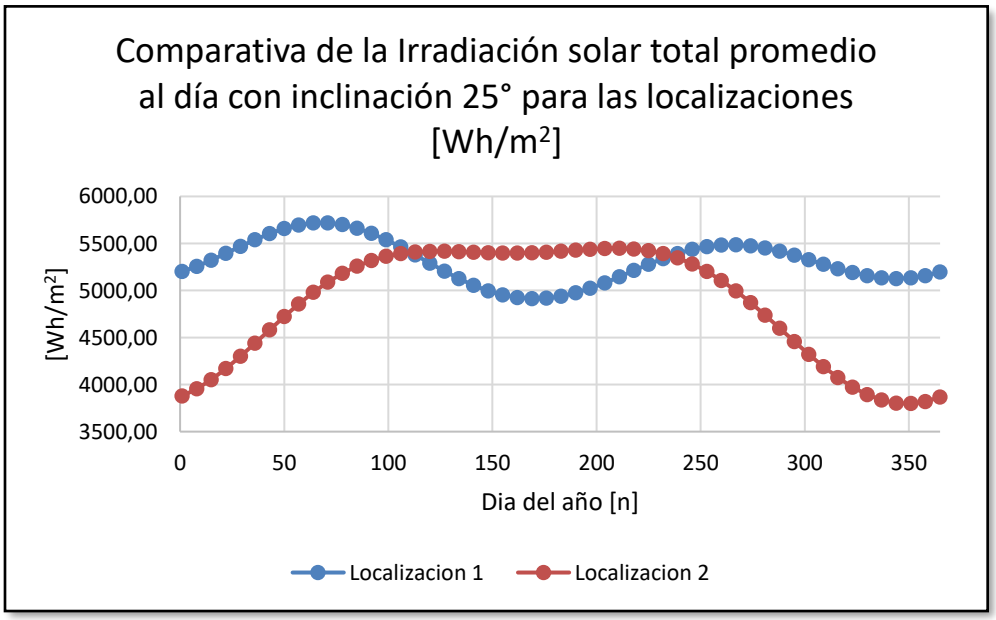
Por medio de la ejecución de los cálculos del modelo y de sus ecuaciones derivadas, podemos determinar la Irradiación solar total diaria en superficie inclinada [ITd], la Radiación total sobre una superficie inclinada [IT] y sus componentes, las Horas con luz de día [N], la hora de amanecer y atardecer (Apéndice F).

3.3.3. Resultados

Se calculó el promedio anual de la radiación solar total al día en superficie inclinada 25° por semanas. en ambas localizaciones y con un promedio de 846.21 [W/m^2] (Apéndice G).

Figura 7

Irradiación solar en las localizaciones 1 y 2



3.4. Diseño

Los equipos orientados a la destilación solar pueden ser muy variados en su forma y sus componentes, pero la gran mayoría al compartir el mismo principio de funcionamiento se asemejan entre sí. Siguiendo la línea de ideas planteadas en la revisión bibliográfica de la cual se partió del modelo más simple de equipo, el de caseta de una vertiente hasta los equipos compuestos y con ensambles auxiliares (Apéndice B). Determinando comparativamente sus beneficios y desventajas, se realizó una caracterización cualitativa, porque no hay estudios que abarquen todos los modelos de una manera cuantitativa, además que las condiciones ambientales influyen drásticamente en el desempeño del equipo y estás mismas son difíciles de predecir por las múltiples variables que intervienen en su desempeño.

3.4.1. Determinación de diseño

Para la selección de la mejor alternativa se emplea un método cualitativo, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, debido a que no es muy preciso comparar la eficiencia o la producción entre ellos mismo o con otros modelos, pero los estudios si nos dan evidencia de que aspectos podemos mejorar en cada uno de los diseños, sus ventajas y las falencias que llegan a tener. Tomando como guía las ventajas y desventajas de cada destilador solar, se determinarán nueve parámetros de selección, otorgándoles un peso de valoración equivalente a un número del uno al cinco, siendo uno insuficiente y cinco excelente. Después, se calcula la suma de todas estas variables para los once diferentes modelos de equipos que se van a comparar y se clasifican respecto a la puntuación máxima que pueden alcanzar (Apéndice H).

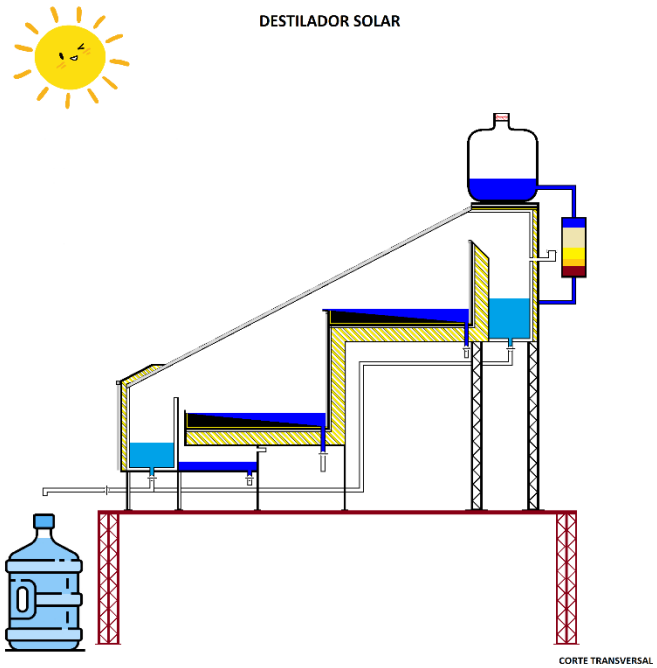
Teniendo en cuenta la puntuación mínima de 9 y la máxima 45, se obtuvo que los equipos denominados caseta, reflectores y condensador pasivo obtuvieron una puntuación excelente y los denominados de casita y cascada consiguieron una puntuación sobresaliente, por lo que se tendrá en cuenta las cualidades de estos 5 diferentes modelos para la creación de prototipo (Apéndice H).

3.4.2. Prototipo

Partiendo del modelo más básico, el de tipo caseta, el cual sobresalió en todos los aspectos menos en la producción, pues es un modelo simple de construir y de mantener debido a su simpleza. Los otros modelos se caracterizan por ser una variante del tipo caseta, por lo cual se adquirió la cualidad más sobresaliente de cada uno para ser integrada. Se incluyo en el modelo estructural básico dos concentradores solares fijos y uno móvil, un condenador pasivo aislado, dos bandejas colectoras inclinadas a diferente altura, dos depósitos para agua tratada y un depósito de emergencia destinado a evitar la contaminación de los depósitos, el sobrellenado del equipo y el desperdicio de agua (Ver figura 8) y (Apéndice I).

Figura 8

Corte transversal del diseño preliminar



Nota: diseño combina los equipos de tipo caseta, cascada, reflectores y de condensador pasivo.

3.4.3. Funcionamiento

El equipo seguirá el funcionamiento básico del ciclo hidrofóbico, la radiación del sol ingresa por la cúpula transparente y eleva la temperatura del aire, el agua y de las bandejas colectoras, además de que se verá incrementada su intensidad debido a los concentradores (Apéndice J). El agua sin tratar ingresa al tanque de almacenamiento a través de un filtro de malla y de arena para que posteriormente ingrese al equipo en la bandeja superior, ya al llenar la primera bandeja colectora comenzará el llenado de la segunda y en caso de sobrecarga se tiene un depósito de emergencia; posteriormente el agua que se evapora se condensa y se almacena (Apéndice K). Las medidas del equipo se establecieron teniendo en cuenta dos bandejas de 50 [cm] de fondo, una altura del equipo inferior a 100 [cm], un ángulo de 26° para la cúpula y un fondo inferior a los 140 [cm], las dimensiones de fondo y alto son constante, por lo cual se varía el ancho (Apéndice L).

3.4.4. Balance de materia y energía

En el sistema comprendido por el equipo y el medio ambiente circundante se presentan fenómenos de transferencia de calor por convección, evaporación y radiación. La convección y radiación gobiernan el intercambio de energía entre la cúpula y el ambiente, mientras que la conducción se manifiesta en las pérdidas de calor desde las paredes y el fondo del destilador, pero su efecto en el sistema es muy bajo debido a la presencia del aislante. El flujo de calor por la evaporación del agua depende de la convección, porque debido a este, el vapor formado en la superficie del agua se desplaza hasta los condensadores. Se evaluó 83 variables (Apéndice N).

Balance de calor de la cúpula transparente (g)

$$m_g \cdot C_{p(g)} \cdot \frac{dT_g}{dt} = \left(q_e + q_{cv(w-g)} + q_{r(w-g)} + \alpha_g \cdot I_T \cdot A_g\right) - \left(q_{cv(g-a)} + q_{r(g-a)}\right)$$

Balance de calor de la superficie del agua (w)

$$m_w \cdot C_{p(w)} \cdot \frac{dT_w}{dt} = \left(q_{cv(b-w)} + \alpha_w \cdot \tau_g \cdot I_T\right) - \left(q_{cv(w-g)} + q_{r(w-g)} + q_e\right)$$

Balance de calor de bandeja colectora (b)

$$m_b \cdot C_{p(b)} \cdot \frac{dT_b}{dt} = \left(\alpha_b \cdot \tau_w \cdot \tau_g \cdot I_T\right) - \left(q_{cv(b-w)} + q_p\right)$$

3.4.5. Análisis dimensional

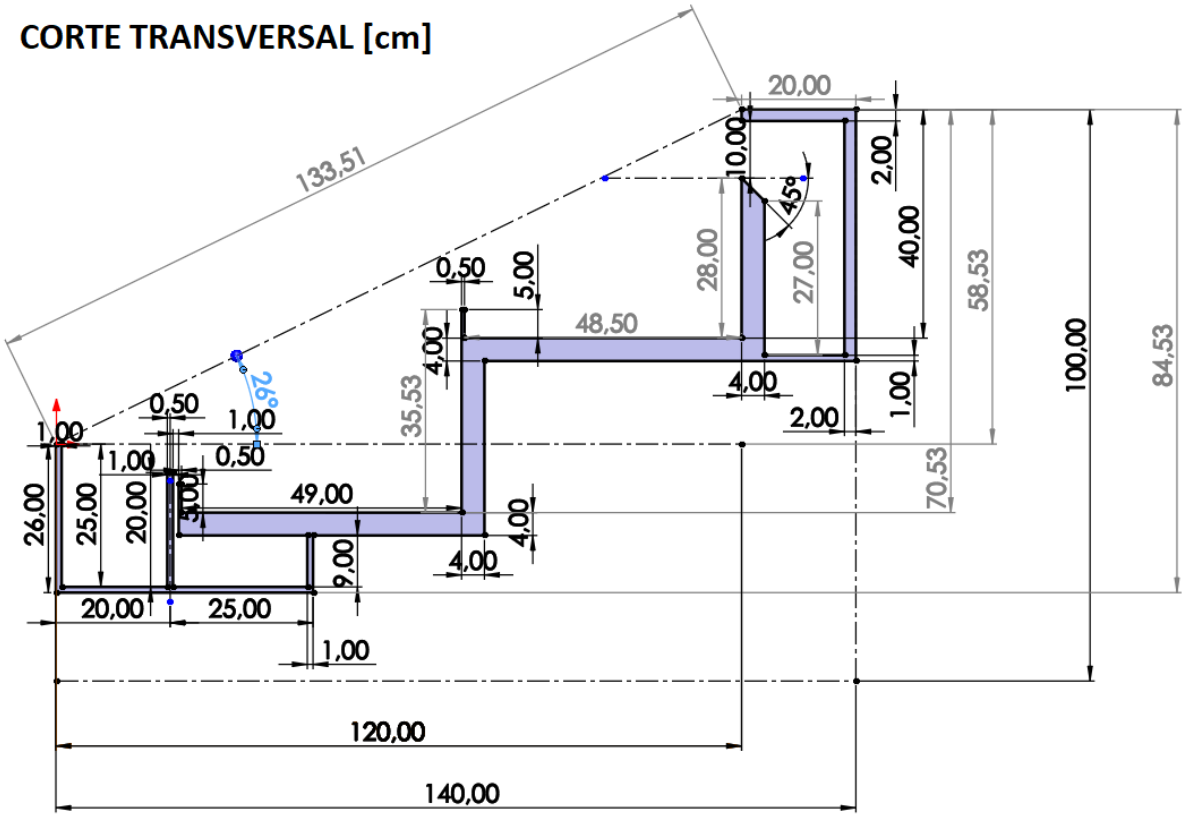
Ya establecido el promedio de las condiciones ambientales que afectan el diseño del equipo para ambas localizaciones, las temperaturas de trabajo y el dimensionamiento en dos dimensiones, junto al objetivo de producir 15 litros de agua al día; se obtuvo que era necesario que el equipo midiera 150 [cm] de ancho, con una eficiencia del 32.98% y con una capacidad de almacenamiento de 153 litros (Apéndice P).

3.4.6. Modelo

El equipo cuenta con 6 componentes, tiene una medida de 100 [cm] de alto, contando desde la base de los apoyos por 140 [cm] de fondo que incluye ambos depósitos de agua tratada y de ancho tiene 150 [cm] aproximadamente, con una cúpula de cristal a 26° de inclinación y 1 [cm] de espesor, además de aislante en diferentes zonas con grosores de hasta 3 [cm] (Apéndice Q).

Figura 9

Plano de la vista lateral del equipo con cotas



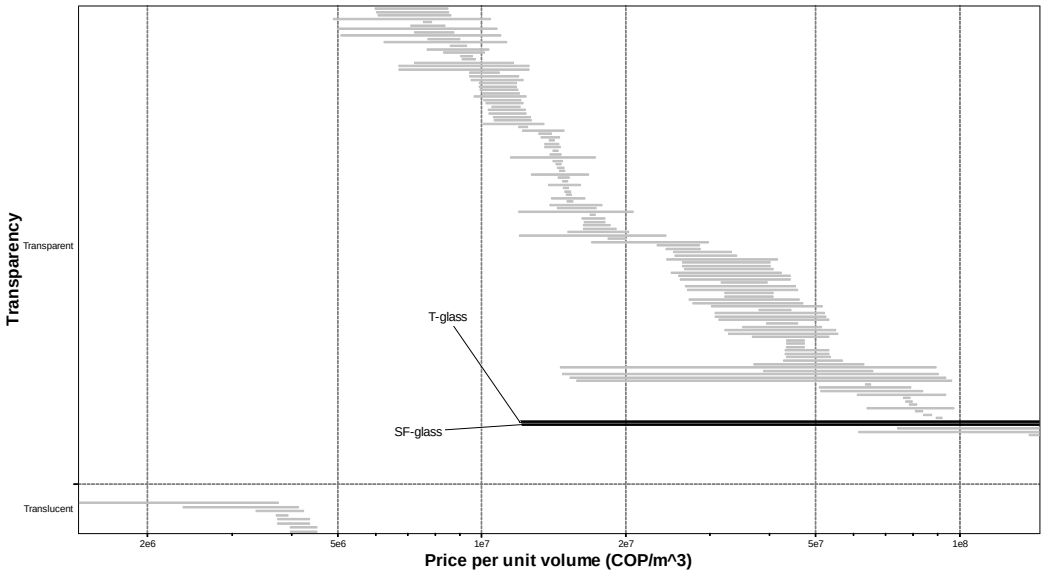
Nota: Imagen del corte en las dimensiones de fondo por alto (Solidworks, 2022).

3.5. Materiales

Para evaluar los materiales con los que se debería construir el equipo se tuvieron en cuenta las características de las 3 piezas más importantes y de mayor tamaño, la cúpula, la estructura de soporte y el aislante que recubre el equipo en contraste con el precio por unidad de volumen.

Figura 10

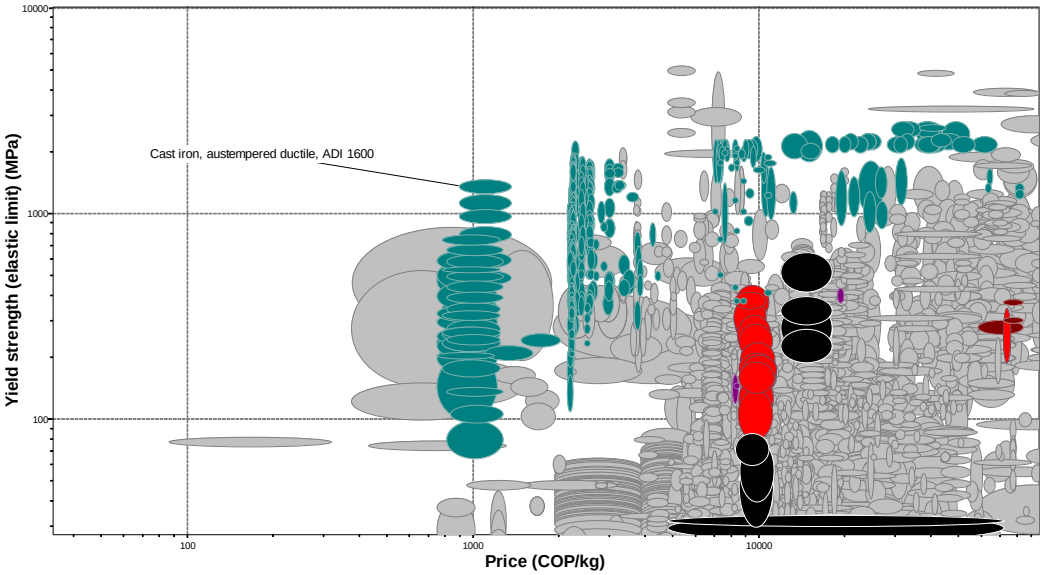
Gráfica de precio contra la transparencia para el material de la cúpula



Nota: El material seleccionado fue el vidrio y se usaron filtros de resistencia al agua dulce, salada y a la radiación UV. (CES Edupack, 2019).

Figura 11

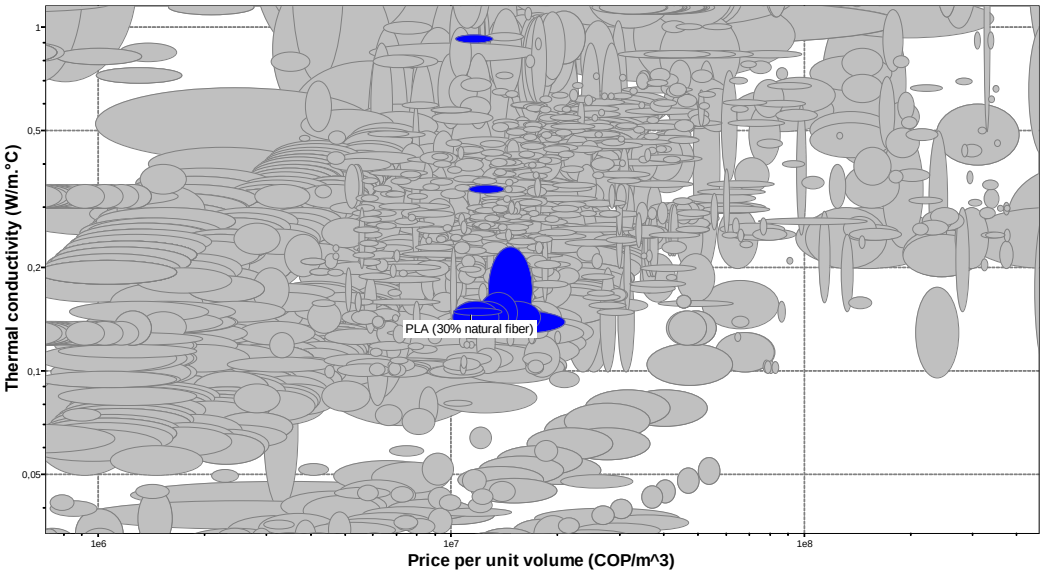
Gráfica de precio contra el módulo de elasticidad para el material de la estructura



Nota: El material seleccionado fue ADI 1600, se usaron los filtros de resistencia al agua dulce y salada, a la radiación UV y temperatura de trabajo superior a 100 °C. (CES Edupack, 2019).

Figura 12

Gráfica de precio contra la conductividad térmica para el material aislante



Nota: El material seleccionado fue el PLA con 30% de fibra natural con conductividad 0.14 [W/m°c], se usaron los filtros de resistencia al agua y reciclable. (CES Edupack, 2019).

3.6. Costos

Ante la necesidad del organismo de consumir agua para mantener un nivel adecuado de hidratación y junto a la dificultad en muchas zonas del país para conseguir agua potable, las personas han optado por el uso de agua embotellada, debido a la practicidad de transporte, adicionalmente se considera que es de alta calidad y óptima para el consumo humano por lo que se ha popularizado como la mejor opción para el consumo directo o para la preparación de alimentos. (González, P. 2020).

En Bucaramanga el coste de estos productos varía dependiendo de la empresa, material y los litros o mililitros de agua que el comprador quiera llevar, teniendo la botella de 600 [ml] con un precio de entre $1,750 hasta $4,600 pesos colombianos (Jumbo, 2021). Para suplir la producción esperada por el equipo de destilación al día se debería invertir, en el rango más bajo $ 43.750 mil pesos dieron para adquirir 15 litros de agua.

4. Conclusiones

Se reconocieron las características nacionales de radiación solar, calidad y cobertura del agua potable, cobertura de gas y pobreza multidisciplinaria, para determinar las dos localizaciones que eran más viables para una posterior implementación.

Se generó un nuevo tipo de diseño para los destiladores solares, sin presencia previa en la literatura, basado en las cualidades de los 5 mejores modelos y se evaluó su eficiencia junto a su producción.

Se logró diseñar un equipo que cumpliera los requisitos mínimos de agua potable diarios de 15 litros de agua al día para una familia de tres integrantes, manteniéndose dentro de los rangos requeridos.

La destilación solar térmica es favorable para satisfacer las necesidades de agua de uso doméstico (específicamente para la preparación de alimentos) de pequeñas comunidades o grupos aislados que no disponen de fuentes de agua potable.

Generación de modelos 3D y esquemas de funcionamiento del equipo de destilación solar para el tratamiento de aguas contaminadas en zonas de alta incidencia de radiación y que poseían una problemática de salud provocada por la calidad del agua o por la falta de abastecimiento por parte de un acueducto.

Evaluación de posibles materiales para la construcción del equipo, teniendo en cuenta como principal factor el económico, junto con ayuda del software experto en materiales Granta EduPack, el cuál a partir de informes técnicos y gráficas comparativas proporcionó información acorde a la posible fabricación del modelo generado.

5. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los materiales de construcción, calcular el precio equivalente a la producción de cada equipo, establecer procesos de mantenimiento y sus costos, para contrarrestarlos con el precio del agua de acueducto y en botella.

Por medio de un prototipo de prueba, evaluar la calidad del agua producida, además de establecer la durabilidad de los materiales en un periodo determinado de tiempo y mejorar la precisión del modelo matemático de balance de materia y energía con temperaturas reales de operación, además de determinando el porcentaje de error con los datos teóricos.

Se recomienda realizar un estudio más profundo sobre la influencia en la producción de los condensadores pasivos y de los concentradores, dependiendo de sus características y de su área.

Investigar recubrimientos que puedan mejorar las cualidades de los materiales de la placa absorbente e implementarlo en el destilador, de tal forma que se evite problemas de levantamiento de la capa negra, que deben tener el fondo de los depósitos de agua.

Referencias Bibliográficas

ACCIONA. (2020, 24 enero). *¿Qué es el ciclo urbano del agua en ACCIONA agua?* iAgua. https://www.iagua.es/noticias/acciona-agua/que-es-ciclo-urbano-agua-acciona-agua

Alcaldía de Cumaribo. (2017). Nuestro municipio. Cumaribo, Colombia. http://www.cumaribo-vichada.gov.co/

Almar Water Solutions. (2017, 27 noviembre). *Nuevas tecnologías en aguas residuales*. iAgua. https://www.iagua.es/noticias/almar-water-solutions/nuevas-tecnologias-aguas-residuales

Arora, A. (2019, 29 diciembre). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene, 2000–2017*. UNICEF DATA. https://data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-hygiene-2019/

Arvind Thakur. (2021, 3 mayo). *Development and usability of solar thermal collectors in different fields: An overview*. ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321030030

Banco Mundial. (2020, 2 septiembre). *Colombia: Rica en agua, pero con sed de inversiones*. World Bank. https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2020/09/02/colombia-water-security

Caballero, C., y Reinstein, D. (2003). Obstáculos para el desarrollo del gas natural en Colombia. https://repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/815/WP_2004_No_25.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cabecera Municipal Puerto Rico. (2020). Localización geográfica del municipio de Tiquisio Bolívar, Tiquisio, Colombia. http://www.tiquisio-bolivar.gov.co/

Camacho, N. C. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Ingeniería industrial, (29), 153-170. https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428495008.pdf

CES edupack. (2019). Educación – Ansys Granta. https://www.grantadesign.com/es/education/

Chiron de la Casinière, A., y Cachorro Revilla, V. E. (2008). La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/42812/EdUVa-Radiacion-solar.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cordy, G. E. (2001, 1 marzo). A primer on water quality. USGS Science for a Changing World. https://pubs.usgs.gov/fs/fs-027-01/pdf/FS-027-01.pdf

De la Gándara, J. L. O. (2006). Notas para la historia de la destilación. Editorial Tebar. https://afly.co/7gp7

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2021). *Medida de pobreza multidimensional municipal de fuente censal - Indicadores*. Story Map Journal. DANE. Recuperado 9 de marzo de 2022. https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=54595086fdd74b6c9effd2fb8a9500dc

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (s. f.). *Story Map Series*. Servicios públicos. DANE Recuperado 9 de marzo de 2022. https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=2749922ca5f8469db9990986c02b1b93

Desalinización del agua de mar y salobre. (s. f.). ACCIONA. Recuperado 8 de marzo de 2022.

https://www.acciona.com/es/tratamiento-de-agua/desalacion/?_adin=11551547647

Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (1980). Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley. https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/SolarPowerForAfrica/Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Photovoltaics%20and%20Wind.pdf

Dutta, P, Begum, S, Jangid, H., Goswami, A, Doley, T., Bardalai, M. y Dutta, PP (2021). Modelado y evaluación del rendimiento de un pequeño colector solar cilindro parabólico (PTC) para la posible depuración de aguas drenadas. Materiales hoy: Actas, 1-9. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321034143

EPHYSLAB y Universidad de Vigo. (s. f.). *Balance energético de la tierra.* Ephyslab.uvigo. Recuperado 4 de octubre de 2021. https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2019/05/Tema3_Balance_energ%C3%A9tico.pdf

Esteban, C., Franco, J. y Faulo, A. (2005). Construcción y funcionamiento de un destilador solar asistido. Desalinización, 1-7. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001191640400721.

Fendrich, M, Quaranta, A., Orlandi, M., Bettonte, M. y Miotello, A. (2018). Solar Concentration for Wastewaters Remediation: A Review of Materials and Technologies. Applied sciences, 1-26. https://www.mdpi.com/2076-3417/9/1/118

Fondo de la industria nuclear española. (2020, 7 mayo). *¿Qué es el gas natural y qué usos tiene?* Foro Nuclear. https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-gas-natural-y-que-usos-tiene/

Fondo Mundial para la Naturaleza. (2012). Planeta vivo, biodiversidad, biocapacidad y propuestas de futuro. Informe 2012. WWF. https://www.wwf.org.co/?204940/informeplanetavivo2012

Fondo Mundial para la Naturaleza. (s. f.). *Agua*. WWF. Recuperado 3 de junio de 2021. https://www.wwf.org.co/que_hacemos/agua/#:%7E:text=con%20seis%20nevados%20y%20m%C3%A1s,solo%20se%20encuentran%20en%20Colombia

Garay, C. C. (2019, 4 julio). *Espacio: Todo lo que querías saber sobre las estrellas*. National Geographic. https://www.nationalgeographicla.com/espacio/2019/07/todo-lo-que-querias-saber-sobre-las-estrellas

Garay, C. C. (2021, 1 septiembre). *¿Cómo afectarán a la tierra los cambios en la actividad del Sol?* National Geographic. https://www.nationalgeographic.es/espacio/2021/08/como-afectaran-a-la-tierra-los-cambios-en-la-actividad-del-sol

González, P. (2020). ¿Estamos entrando en una nueva era del consumo de agua embotellada? Análisis del impacto de las medidas anti-plástico y de alternativas de embotellado más sostenibles en Europa, 6-12. https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/42996/TFG%20-%20Anok%20Gonzalez%2c%20Paloma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Grupo Banco Mundial. (2020, septiembre). Colombia - un cambio de rumbo: *seguridad hídrica para la recuperación y crecimiento sostenible*. https://documents1.worldbank.org/curated/en/100341598987538912/pdf/Policy-Brief.pdf

Informe nacional de calidad del agua para consumo humano (2019). *Vigilancia de la calidad del agua*. Instituto nacional de salud, ministerio de vivienda, ciudad y territorio. https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/inca-2019.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Universidad nacional de Colombia. (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C. UNAL. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Unidad de Planeación Minero-Energética. (2005). *Repositorio UPME: Atlas de radiación solar de Colombia*. Biblioteca UPME. https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1236

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Unidad de Planeación Minero-Energética. (2018). *Repositorio UPME: Atlas de radiación solar ultravioleta y ozono de Colombia*. Biblioteca UPME. http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72007220/PDF_ATLAS/83b33ddd-09ef-4fa6-9419-cdf8b26db260

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). *Atlas climatológico de Colombia "interactivo"*. IDEAM. http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s. f.). *GENERALIDADES DEL SOL*. IDEAM. Recuperado 5 de octubre de 2021. http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-del-sol

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2016). Cumaribo, uno de los municipios del Vichada en los que renacerá la paz. Cumaribo, Colombia. https://igac.gov.co/es/noticias/cumaribo-uno-de-los-municipios-del-vichada-en-los-que-renacera-la-paz

Jáuregui, C. F., y Milliet, A. C. (2008). El agua, recurso único. El derecho humano al agua: situación actual y retos del futuro". Icaria. Pág, 19-38. http://www.wasa-gn.net/private/admin/ficheiros/uploads/5102a7ddd4479d58dc78d4aeaf17683a.pdf

Jumbo. (2021). Agua embotellada 600 ml. Jumbo cencosur. https://www.tiendasjumbo.co/buscar/?q=agua%20embotellada%20600%20mo&page=3

Lanfair, J. K., Ambulkar, Archis and Schroth, Stephen T. (2018, June 18). Water purification. Encyclopedia Britannica. https://www.britannica.com/topic/water-purification

Ministerio de vivienda, ciudad y desarrollo. (2019). Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano. INCA 2019. (Pág. 16, 18,19, 80-91). Gobierno de Colombia. https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/inca-2019.pdf

Ministerio de vivienda. (2021, 24 agosto). *Colombia potencia en agua: El 93% de los colombianos ya cuentan con acceso a este servicio | Minvivienda*. GOV.CO. Recuperado 9 de marzo de 2022. https://minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/colombia-potencia-en-agua-el-93-de-los-colombianos-ya-cuentan-con-acceso-este-servicio

Nathanson, J. A. (2020, 22 de diciembre). Contaminación del agua. Enciclopedia Británica.

https://www.britannica.com/science/water-pollution

Nieto, G. (2020, 12 junio). *¿Qué es el gas natural?* Grupo Vanti. Recuperado 8 de marzo de 2022. https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Organización de las Naciones Unidas-Agua. (2020, 19 junio). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: *Agua y Cambio Climático*. París, UNESCO. https://es.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2020

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Organización de las Naciones Unidas -Agua. (2021, marzo). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: *El valor del agua, datos y cifras*. Paris, UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_spa

Planetario de Montevideo, y Barbato, A. G. (s. f.). *El próximo sábado 4 de julio a las 8:34 la Tierra alcanzará su máxima distancia al Sol*. Planetario de Montevideo. Recuperado 4 de octubre de 2021. https://planetario.montevideo.gub.uy/actividades/el-proximo-sabado-4-de-julio-las-834-la-tierra-alcanzara-su-maxima-distancia-al-sol

Red de pobreza multidimensional. (2021). Índice de pobreza multidimensional en Colombia. MPPN. University of Oxford. Recuperado 9 de marzo de 2022. https://mppn.org/es/paises_participantes/colombia/

Rodríguez Murcia, H. (2009, 15 enero). *Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas*. Scielo. Recuperado 7 de marzo de 2022.

http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a12.pdf

Saettone, E. (2016). Análisis comparativo entre diferentes destiladores solares de agua marina. In XXII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXII SPES). http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2016/07/Analisis-Comparativo-entre-diferentes-Destiladores-Erich-Saettone.pdf

Salinas, A., Pérez, O., y Rodríguez, S. (2019). Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos. ION, 1-14. https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/download/9900/10719?inline=1

Servicio Geológico de los Estados Unidos. (s. f.). *The fundamentals of the water cycle*. Water Science School, USGS Science for a Changing World, Recuperado 2 de febrero de 2022. https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/fundamentals-water-cycle?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.

Solidworks. (2022). *Dassault Systèmes SolidWorks Corporation*. https://www.solidworks.com/

Thakur, A. (2021). Development and usability of solar thermal collectors in different fields: An overview. Materials Today, 1-6. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321030030

Unidad de Planeación Minero-Energética y Ministerio de energías. (2019, marzo). *Proyección de gas natural en Colombia 2019 - 2033*. UPME. http://www.sipg.gov.co/Portals/0/Demanda/Proyeccion_Demanda_GN_Mar_2019.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2014). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. UPME Editores S.A.

http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Universidad Santo Tomás, y Gómez Ramírez, J. (2016, agosto). La energía solar fotovoltaica en Colombia: Potenciales, antecedentes y perspectivas. Facultad de Ingeniería Mecánica. https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10312/G%C3%B3mez2018.pdf

Water, Sanitation, Hygiene and Health. (2017, 24 abril). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Organización mundial de la salud. Recuperado 7 de marzo de 2022. https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950

Ying Zhanga, Muttucumaru Sivakumara, Shuqing Yanga, Keith Enevera, y Mohammad Ramezanianpourb. (2018, 15 febrero). Application of solar energy in water treatment processes: A review. ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916416318756

Zarza, L. F. (2020, 6 octubre). *¿Cómo se potabiliza el agua?* iAgua. https://www.iagua.es/respuestas/como-se-potabiliza-agua