

Diseño de un sistema de condensación de la humedad del aire alimentado con paneles solares en la ciudad de Cali

Manuela Victoria Ramón¹
Manuela.victoria00@usc.edu.co

Juan Manuel Hernández G¹
Juan.hernandez11@usc.edu.co

Iván Darío Ruiz Hidalgo³
Ivan.ruiz01@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de ingeniería en energías. (1)

Resumen

Se presenta el desarrollo de un sistema para condensar la humedad del aire y obtener agua en zonas rurales de Cali, utilizando refrigeración por compresión para abastecer comunidades sin acceso al recurso hídrico. Se determinó inicialmente la cantidad de agua requerida (346 l/día) y las condiciones ambientales basadas en datos de la NASA y del IDEAM (79% de humedad relativa y 23.3°C). Se seleccionaron componentes constitutivos del sistema para posteriormente establecer la demanda energética del mismo. Luego, a través de cálculos analíticos y usando software PVsyst se realizó el cálculo del sistema fotovoltaico para lograr una independencia de la red eléctrica. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de costos para evaluar la viabilidad económica del proyecto dando como resultado que, si bien hay una viabilidad técnica, la viabilidad económica es cuestionable.

Palabras Clave: Refrigeración por compresión, Sistema fotovoltaico, condensación del agua, PVsyst

Abstract

The development of a system to condense air moisture and procure water in rural Cali areas is presented, employing compression refrigeration to serve communities lacking access to water resources. Initially, the required water amount (346 liters/day) and environmental conditions based on NASA and IDEAM data (79% relative humidity and 23.3°C) were determined. System components were selected to establish its energy demand. Subsequently, through analytical calculations and the use of PVsyst software, the photovoltaic system was calculated to achieve grid independence. Finally, a cost analysis was carried out to assess the economic feasibility of the project, indicating technical feasibility but questionable economic feasibility.

Keywords: Compression refrigeration, Photovoltaic system, Water condensation, PVsyst

1. INTRODUCCIÓN

En 2015, la ONU estableció los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030, que incluyen la gestión sostenible del agua, abordando desafíos como la escasez y la contaminación (Naciones Unidas, 2018). Colombia, a pesar de su rica diversidad hídrica, enfrenta desigualdades significativas en el acceso al agua. Según la Superintendencia de Servicios Públicos 2023, de 1101 municipios, solo 660 tienen acueducto y 537 tienen alcantarillado, revelando deficiencias en el abastecimiento en varias poblaciones (Superservicios, 2023). Un ejemplo destacado es Cali, donde solo el 21,8% de las áreas rurales tienen acceso a acueducto (Superservicios, 2023), subrayando la urgencia de soluciones para satisfacer estas necesidades.

Tecnologías como la obtención de agua atmosférica mediante ciclos de refrigeración por compresión de vapor podrían ser clave. Estos sistemas incluyen componentes como condensador, compresor, evaporador y dispositivo de expansión, con un proceso de filtración integrado. Los sistemas de condensación de agua a partir del ambiente han sido ampliamente investigados. Shahrokhi y Esmaili (Shahrokhi & Esmaili, 2022a), de la Islamic Azad University, optimizaron la humedad relativa y las propiedades de transferencia de calor para un generador termoelectrónico de agua, demostrando que un aumento de la humedad atmosférica a temperatura constante incrementa la producción de agua. En su experimento, lograron una producción de 82 ml/h. Por su parte, Michiel Raaphorst (SunGlacier - Glacier builders since 2010, s. f.), arquitecto holandés fundador de SunGlacier Technologies, diseñó dispositivos que condensan el vapor de agua del aire, con unidades capaces de recolectar cientos de litros de agua por día. En la Expo 2020 en Dubái, su tecnología se utilizó para riego y refrigeración.

También es posible destacar el proyecto WarkaWater (Warka Water – Every Drop Counts, 2022), liderado por Arturo

Vittori, el cual aprovecha la gravedad, condensación y evaporación para recolectar agua de la atmósfera en áreas rurales con problemas de acceso al agua potable. Su diseño más conocido es el Warka Tower, inspirado en símbolos y características de grupos étnicos etíopes. Así mismo, Raveesh, Goyal y Tyagi (Raveesh et al., 2023a) analizaron la generación de agua atmosférica en ciudades indias, destacando que estos sistemas pueden producir más agua con menor consumo energético en condiciones de calor y humedad, incluso a temperaturas altas del medio de enfriamiento. Esto sugiere que la obtención de agua del ambiente podría ser una solución viable para la crisis hídrica en el país.

Por otro lado, Pirouz et al. (Pirouz et al., 2021) Demostraron cómo mejorar la eficiencia de muros y techos verdes mediante sistemas de captación de niebla, que pueden utilizarse para riego no convencional, produciendo entre 1.2-1.8 L/m²/día.

Salek et al. (Salek et al., 2022) proponen un sistema con colector parabólico, ciclo de refrigeración por absorción y unidad de deshumidificación, capaz de producir hasta 400 L/mes de agua en climas tropicales, con un consumo de 3 kWh/L. En una línea similar, Patel et al. (2020) desarrollaron un sistema de ciclo de refrigeración por compresión de vapor, que genera entre 0.28 L/h y 1.78 L/h dependiendo de las condiciones de humedad

Con el objetivo de abordar las dificultades de acceso al agua en ciertas áreas de Cali, se propone diseñar un sistema de condensación de la humedad del aire. El estudio se centró en caracterizar las condiciones climáticas locales para adecuar el diseño del sistema a estas condiciones. Además, se implementó un sistema de filtración del agua y se dimensionó un sistema fotovoltaico para su alimentación. Finalmente, se llevó a cabo un análisis financiero del proyecto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

Para el diseño total del sistema, fue estudiando en tres fases: El diseño termodinámico, el Diseño solar y el Análisis de Costos tal y como se describe a continuación.

2.1 Diseño termodinámico.

El objetivo del estudio es diseñar un sistema de condensación de humedad atmosférica en Cali, Colombia, empleando energía solar generada por paneles fotovoltaicos para abastecer agua en áreas con escasez del recurso. Para esto, se llevó a cabo un análisis detallado de las condiciones climáticas de Cali, considerando la humedad específica (w), que es la relación entre la masa de vapor de agua (m_w) y la masa del aire seco (m_a) (Wang, 2000). Además, se utilizó la humedad relativa, medida comúnmente por meteorólogos para describir las condiciones ambientales, indicando la proporción de humedad presente en el aire respecto a la máxima que puede contener a esa temperatura (Cengel & Boles, 2006).

Para encontrar la humedad relativa de diseño se estimó utilizando herramientas de acceso libre proporcionadas por la NASA, basándose en el valor mínimo registrado entre 2000 y 2022. Para estimar la temperatura, se utilizaron datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Posteriormente, se determinó la cantidad de agua que el sistema debe producir, considerando la producción comercial de tres compañías diferentes. Se eligió un promedio diario de generación de agua de varios modelos y se consultó el informe "Criterios de Diseño para Redes de Acueducto" para establecer una producción diaria en litros adecuada para satisfacer la demanda mínima de una residencia unifamiliar.

Para determinar la capacidad frigorífica, se utilizaron los datos iniciales de temperatura y humedad relativa para obtener valores psicrométricos del lugar. Se empleó la carta psicrométrica del aire para obtener los valores de entalpía (h) y humedad específica (w) en el punto de entrada (punto 1). Posteriormente, se calculó la temperatura en el punto de salida del sistema (punto 2), considerando un factor de bypass de 0.25 y una temperatura superficial del intercambiador de vapor de 1°C para evitar la congelación, utilizando la ecuación 1.

$$FB = \frac{T_{air\ leaving} - T_{adp}}{T_{entering} - T_{adp}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

FB = Factor bypass.

$T_{air\ leaving}$ = Temperatura de salida del aire °C (cuando entra en contacto con el intercambiador)

$T_{entering}$ = Temperatura de entrada del aire °C

T_{adp} = Temperatura de contacto °C

Adicionalmente, se debe reconocer que los flujos másicos, por conservación de masa se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

\dot{m}_a = Flujo masico del aire.

\dot{m}_{a1} =Flujo masico del aire de ingreso.

\dot{m}_{a2} =Flujo masico del aire de salida.

Así mismo al realizar un balance de masa en el evaporador se puede obtener la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a(w_1 - w_2) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

\dot{m}_w = Flujo másico del agua.

\dot{m}_a =Flujo másico del aire.

w_1 =Vapor de agua contenido en el punto uno.

w_2 =Vapor de agua contenido en el punto dos

El flujo másico de agua calculado a partir de la ecuación 3, puede ser utilizado para obtener los valores de calor sensible Q_s mediante la ecuación 4 y el calor latente Q_l con la ecuación 5.

$$Q_s = C_{paire} * \dot{m}_a * (T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 4}$$

En los componentes de la ecuación:

C_{paire} = Calor especifico del aire.

T_1 =Temperatura punto uno °C.

T_2 = Temperatura punto dos °C.

$$Q_l = h_{fg} * \dot{m}_a * (w_1 - w_2) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

h_{fg} = Valor de entalpia del agua Kj/gramo.

$$T_s = \frac{T_1 - T_2}{2} \quad \text{Ecuación 6}$$

En los términos de la ecuación

T_s = Temperatura superficial del intercambiador de calor.

T_1 = Temperatura entrada del refrigerante.

T_2 = Temperatura salida del refrigerante.

Tras estos cálculos, se seleccionaron los componentes adecuados para el ciclo termodinámico del sistema, considerando el refrigerante utilizado y la capacidad frigorífica. Se llevaron a cabo simulaciones en el programa CoolPack para dimensionar el ciclo de refrigeración y así elegir el refrigerante correcto, así como los componentes del sistema condensador.

2.2 Diseño solar

Una vez definidos los componentes, se diseñó el sistema de filtración del agua y se eligió el tanque de almacenamiento adecuado. Se estableció un sistema de bombeo para la recirculación del agua. Además, se desarrolló el diseño del sistema

fotovoltaico para alimentar el sistema de condensación. Se realizaron cálculos teóricos utilizando la ecuación 7 para determinar la cobertura del sistema, la ecuación 9 para calcular el número necesario de paneles solares, y la ecuación 11 para seleccionar el inversor adecuado. Estos datos se corroboraron con el programa PVsyst para dimensionar correctamente el sistema fotovoltaico y garantizar un suministro confiable de energía.

Para conocer el cubrimiento del sistema se debe hacer uso de la siguiente ecuación:

$$E_c (Wh) = E * 1.2 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

E_c = Total energía a cubrir a la instalación.

E = Demanda total de energía en Wh.

Cantidad de energía que genera el panel:

$$\text{Energía panel} = P_p * H_{sp} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

H_{sp} = Hora sol pico para el sitio de instalación.

P_p = Potencia máxima de panel (W)

La cantidad de paneles requeridos para cubrir el consumo diario de energía:

$$N = \text{round} \left(\frac{\text{Energía diaria (Wh/día)}}{\text{Energía panel (w)}} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

El cálculo para la inclinación del panel (β_{opt}) esta descrita por la siguiente ecuación:

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.60 * |\phi| \quad \text{Ecuación 10}$$

$|\phi|$ = representa la latitud para la ciudad de Cali.

Para encontrar la potencia de inversor (P_{inv}):

$$P_{inv} = F_s * P_{inst} \quad \text{Ecuación 11}$$

F_s = Factor de simultaneidad.

P_{inst} = Potencia instalada Kw.

Para calcular la capacidad necesaria de baterías se debe conocer: Energía diaria y días de autonomía:

$$C_B = \frac{\text{Energía diaria (Wh)} * A}{V_{instalacion}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

C_B = Capacidad batería (Ah)

A = Autonomía en días

$V_{instalacion}$ = Voltaje del sistema (V)

2.3 Análisis de costos.

Finalmente se presenta un diseño del sistema junto con un análisis de costos que considera todos los elementos, incluyendo los componentes del sistema de condensación, el sistema fotovoltaico, la mano de obra y los costos de ingeniería. Se evalúa la rentabilidad del proyecto en su conjunto.

Para determinar el costo promedio del servicio se aplicó la siguiente fórmula:

$$CS = \frac{CO}{NS} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

CS = Costo del servicio. (\$COP)

CO = Costo operación anual. (\$COP)

NS = Numero suscriptores.

El valor mensual (CM) que cada suscriptor debe pagar se calcula con la siguiente ecuación:

$$CM = \frac{CS}{12} \quad \text{Ecuación 14}$$

Para evaluar la tasa de retorno de la inversión (ROI), se utilizó la siguiente ecuación:

$$ROI = \frac{\text{Ingresos} - \text{Valor de la inversion}}{\text{Valor de la inversion}} * 100 \quad \text{Ecuación 15}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para diseñar el sistema de condensación operado eléctricamente mediante un sistema fotovoltaico autónomo, se implementó un ciclo de compresión mecánica simple, donde se reduce la temperatura de una corriente de aire al entrar en contacto con un refrigerante. Este proceso involucra la absorción de calor latente, necesario para cambiar el estado de la sustancia, y calor sensible, que afecta la temperatura sin cambiar el estado físico del material.

3.1 Caracterización de los parámetros para el sistema generador de agua.

3.1.1 Condiciones climáticas.

El sistema generador de agua atmosférico alimentado por paneles solares fue diseñado específicamente para la ciudad de Cali. Es crucial comprender claramente las variables pertinentes en esta región, siendo la humedad relativa y la temperatura del sitio los puntos de partida mencionados anteriormente.

Para obtener información sobre la humedad del aire en Cali, se utilizó la recopilación de datos realizada por la NASA, calculando un promedio anual. La Tabla 2 muestra la variación de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera durante el período 2000-2022 en Cali. Se observa que el valor mínimo registrado corresponde a un 79%.

Tabla 1. Humedad relativa anual 2000-2022.

Datos Nasa			
Año	Promedio Anual Humedad relativa %	Año	Promedio Anual Humedad relativa %
2000	85.19	2012	85.12
2001	78.88	2013	84.5
2002	79.44	2014	84.12
2003	81.12	2015	81.0
2004	81.06	2016	82.94
2005	82.25	2017	86.06
2006	82.56	2018	85.31
2007	81.19	2019	84.56
2008	85.44	2020	84.12
2009	82.19	2021	85.94
2010	82.94	2021	85.94
2011	86.44	2022	86.44

Nota. Esta tabla muestra el promedio anual en la ciudad de Cali periodo 2000-2022. Elaboración propia. Fuente: Adaptado de (NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources, s. f.)

El valor mínimo registrado corresponde a un 79%. Cuando la humedad relativa alcanza el 100%, se produce el proceso de condensación, donde el vapor de agua pasa de estado gaseoso a líquido. La temperatura específica en la que esto ocurre se denomina temperatura de rocío, o punto de rocío. Este punto indica la temperatura a la cual el aire debe enfriarse para que el vapor de agua comience a condensarse y formar líquido (S&P, 2019). Estas temperaturas fueron obtenidas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, según se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Promedio temperatura anual 2000-2022.

Datos Estación meteorológica aeropuerto Alfonso Bonilla			
Año	Promedio Anual temperatura °C	Año	Promedio Anual temperatura °C
2000	23.5	2011	23.9
2001	24.2	2012	24.3
2002	24.3	2013	24.5
2003	24.2	2014	24.8
2004	24.2	2015	25.2
2005	24.3	2016	24.6
2006	24.1	2017	24.3
2007	24.0	2018	23.8
2008	23.6	2019	24.1
2009	24.7	2020	24.0
2010	24.2	2021	23.3
2011	23.9	2022	23.0

Nota. Esta tabla muestra el promedio de temperatura media del aire registrada en la estación meteorológica aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón periodo 2000-2022. Elaboración propia. Fuente: Adaptado de (CLIMA - IDEAM, s. f.)

3.1.2 Producción de agua.

La cantidad de agua que debe producirse, es un requerimiento de diseño importante, por lo que se tomaron tres diferentes empresas comercializadores de estos equipos y los modelos que ofrecen una menor producción de agua. Cada modelo posee una capacidad de producción diferente de agua diaria. A continuación se presenta un resumen de las capacidades de producción diaria de los modelos destacados: Empresa Aquaer generator: Modelo COTTIDIANE: 300 l/día, modelo PLUVIAE: 500 l/día. Empresa WaterGen: Modelo GEN-M11: 220 l/día, modelo GEN-M-PRO: 800 l/día. Empresa Genaq: Modelo STRATUS S50: 50 l/día, modelo STRATUS S200: 200 l/día, modelo nimBUS n500: 500 l/día, modelo cumulus c50: 50 l/día y modelo cumulus c500: 500 l/día. Promediando la producción de los equipos mencionados se obtuvo una producción de diseño de 346 l/día.

Adicionalmente EMCALI (EMCALI EICE ESP, 2023) considera que la cantidad de agua asignada a una población o a un individuo para su consumo durante un período determinado, para la ciudad de Cali es de 150 lt/hab-día. Por lo que teniendo en cuenta una producción de 346 l/día se tendrá una cobertura de agua diaria para un hogar unifamiliar compuesto por dos adultos y un menor.

3.2 Diseño del sistema de condensación.

Para el diseño se utilizó el ciclo de refrigeración basado en la compresión de vapor, que facilita el cálculo de la potencia necesaria para cada componente del sistema: compresor, condensador y evaporador. Es fundamental disponer de datos psicrométricos específicos del sitio de estudio, detallados en la Tabla 3. Se emplearon las condiciones mínimas de temperatura (23.3 °C) y humedad relativa (79%) de la ciudad como entrada inicial para los cálculos, considerando un promedio de producción diaria de agua de 346 l/día.

Tabla 3. Valores Psicométricos en el punto uno.

Variable	Valor	Unidad
Presión barométrica	1013.3	hPa
Presión de vapor	22.61	hPa
Presión de vapor saturación	28.62	hPa
Temperatura de bulbo seco (T_s)	23.3	°C
Temperatura de bulbo húmedo (T_h)	20.65	°C
Temperatura del punto de rocío (T_r)	19.5	°C
Gramos de agua por kilogramos de aire seco	14.196	g/kg
Entalpia específica (h)	59.54	kJ/kg
Densidad	1.181	Kg/m ³

Fuente: Elaboración Propia

Así, partiendo de una temperatura de 23.3°C y una humedad relativa del 79%, se planteó determinar la temperatura en el punto dos. Es crucial asegurar que dentro del intercambiador de calor de vapor no ocurra congelación, manteniendo su temperatura superficial por encima de 0°C. Se consideró una temperatura superficial de 1°C en el intercambiador de calor

y un factor de bypass del 0.25. Aplicando la ecuación 1 y sustituyendo los valores correspondientes, se obtiene $T_2 = 6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Con esta información se obtuvo los valores psicométricos en el punto dos (tabla 4):

Tabla 4. Valores Psicométricos en el punto dos.

Variable	Valor	Unidad
Presión barométrica	1013.3	hPa
Presión de vapor	9.75	hPa
Presión de vapor saturación	9.75	hPa
Temperatura de bulbo seco (T_s)	6.6	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de bulbo húmedo (T_h)	6.6	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura del punto de rocío (T_r)	6.6	$^{\circ}\text{C}$
Gramos de agua por kilogramos de aire seco	6.043	g/kg
Entalpia específica (h)	21.83	kJ/kg
Densidad	1.257	Kg/m^3

Fuente: Elaboración Propia

Por consiguiente, se realizó el cálculo del flujo másico del aire requerido en el sistema utilizando la ecuación 2, logrando obtener $\dot{m}_a = 0.49\text{ kg}_{as}/\text{s}$. Con este resultado fue posible determinar los valores correspondientes al calor sensible Q_s (ecuación 4), latente Q_l (ecuación 5) y total.

Ahora se plantea la transformación psicométrica del aire cuando está en contacto con el intercambiador de calor, resultados que se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Calor necesario para condensar el aire.

Calor sensible (Q_s)	Calor latente (Q_l)	Calor total (Q_t)
8.22 kW	9.02 kW	17.24 kW

Nota: La tabla ilustra la cantidad de calor requerido durante el proceso de enfriamiento y des humidificación del flujo del aire que entra en el sistema. Fuente: Elaboración propia

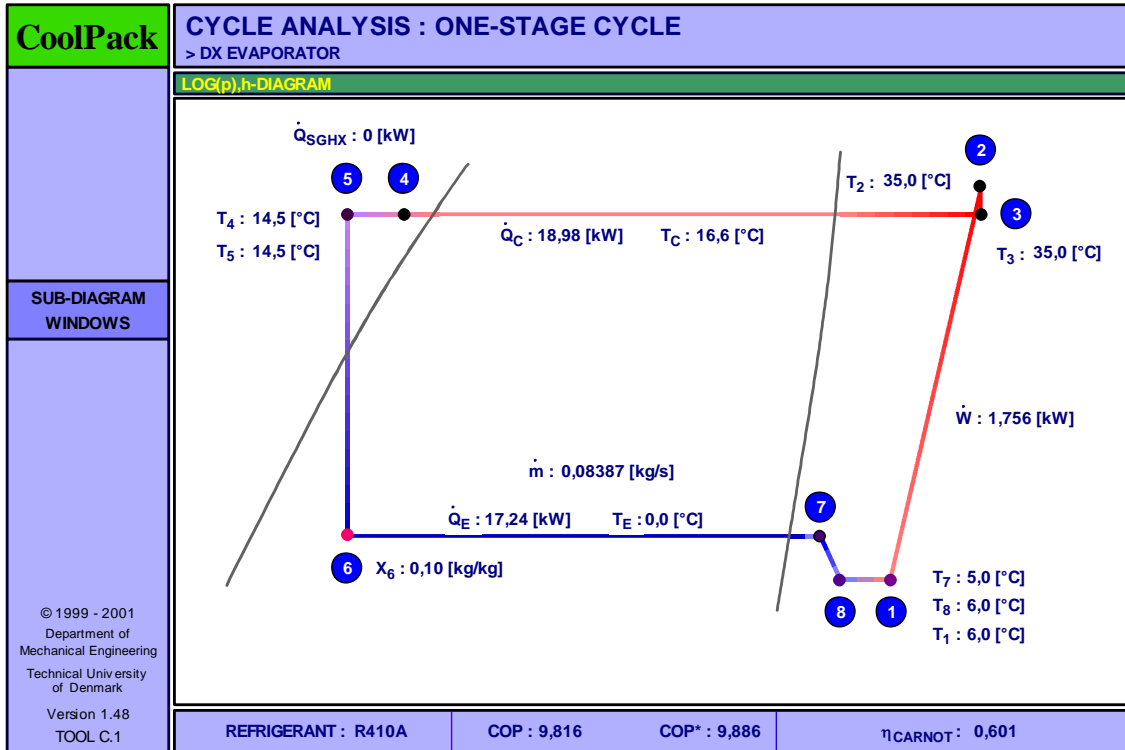
3.2.1 Selección del refrigerante

Se han identificado diversos refrigerantes clasificados según su grupo de seguridad, considerando aspectos de toxicidad, inflamabilidad y explosividad. Los refrigerantes del grupo A1 son los más seguros, siendo los menos tóxicos, inflamables y no explosivos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Basándose en esta clasificación, se considerarán los refrigerantes R134a, R404, R410A y R407.

Es fundamental asegurar una transferencia eficaz de calor entre el fluido refrigerante y el medio donde ocurre el intercambio térmico. Para lograr esto, se debe mantener una diferencia de temperatura en el rango de 5 a 10 $^{\circ}\text{C}$ (Cengel & Boles, 2006). Si el aire a la salida del evaporador tiene una temperatura de 6.6 $^{\circ}\text{C}$ y posteriormente pasa al condensador, se debe considerar el peor caso con una diferencia de temperatura de 10 $^{\circ}\text{C}$, lo que establece una temperatura máxima de 16.6 $^{\circ}\text{C}$ que debe alcanzar el condensador en su diseño.

Para poder realizar la simulación de cada refrigerante se utilizó el programa CoolPack ampliamente utilizado en el diseño y análisis de sistemas de refrigeración. A continuación, se presentan las simulaciones efectuadas para los refrigerantes R134a (Anexo 1 – Figura 1), R404 (Anexo 1 – Figura 2), R407 (Anexo 1 – Figura 3) y R410A (Figura 1).

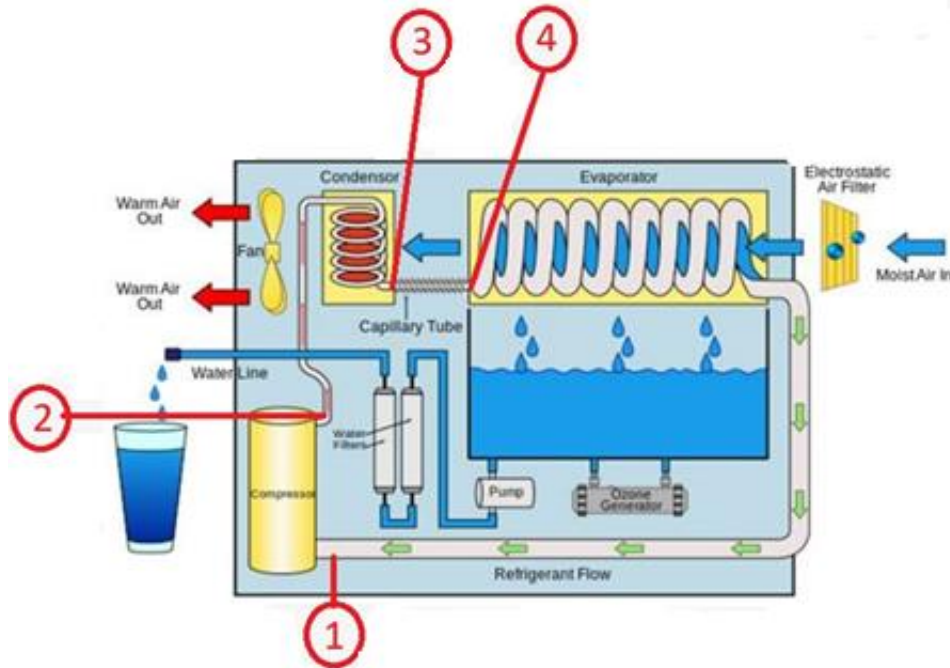
Figura 1. Simulación Refrigerante R410a.



Según la información de la Figura 1, el ciclo del refrigerante R410A comienza cuando entra al compresor como vapor saturado a 14.5°C (punto 1). El compresor realiza una compresión isentrópica, elevando la temperatura del refrigerante hasta 35.0°C y convirtiéndolo en vapor sobrecalentado (punto 2). Este vapor sobrecalentado luego pasa al condensador, donde libera calor al ambiente, condensándose y saliendo como líquido saturado a 16.6°C (punto 3).

Posteriormente, el refrigerante líquido saturado atraviesa una válvula de expansión, experimentando una caída de presión y temperatura, y entra al evaporador como vapor húmedo a 14.5°C (punto 4). Dentro del evaporador, el refrigerante absorbe calor del entorno, evaporándose completamente y retornando al compresor como vapor saturado a 14.5°C, completando así el ciclo (punto 5), ver figura 2.

Figura 2. Diagrama sistema generador de agua atmosférica.



En la tabla 6, se pueden contrastar los factores que influyen en la elección del refrigerante, los cuales fueron obtenidos a partir de las simulaciones previas

Tabla 6. Resultados de las simulaciones CoolPack.

Refrigerante	Desplazamiento Volumétrico m_3/h	Potencia compresor kW
R134a	30.84	1.71
R404	17.91	1.77
R410A	13.09	1.75
R407	20.98	1.73

Fuente: Elaboración Propia

El refrigerante R410A muestra un desplazamiento volumétrico menor, lo que lo hace parecer la opción más adecuada. Un menor desplazamiento volumétrico en un refrigerante implica una mayor eficiencia, lo cual permite reducir el tamaño del compresor, optimizar el diseño del sistema y disminuir costos operativos.

3.2.2 Ciclo termodinámico.

Con la información recopilada anteriormente, se puede desarrollar un modelo para el ciclo termodinámico en el cual operará el sistema, lo que facilitará la selección de sus componentes. Se sabe que la temperatura a la entrada del evaporador es de 23.3°C, y considerando una variación de 10°C, se determinó que la temperatura a la salida del evaporador es de 13.3°C. A continuación, se utiliza la ecuación 6, las temperaturas a la entrada y salida del refrigerante en el intercambiador de calor.

$$1^{\circ}C = \frac{13.3 + T_2}{2}$$

$$T_1 = -11.29^{\circ}C$$

De esta forma se obtuvo la tabla 7 la cual resume los valores del diagrama termodinámico

Tabla 7. Resultados del ciclo termodinámico.

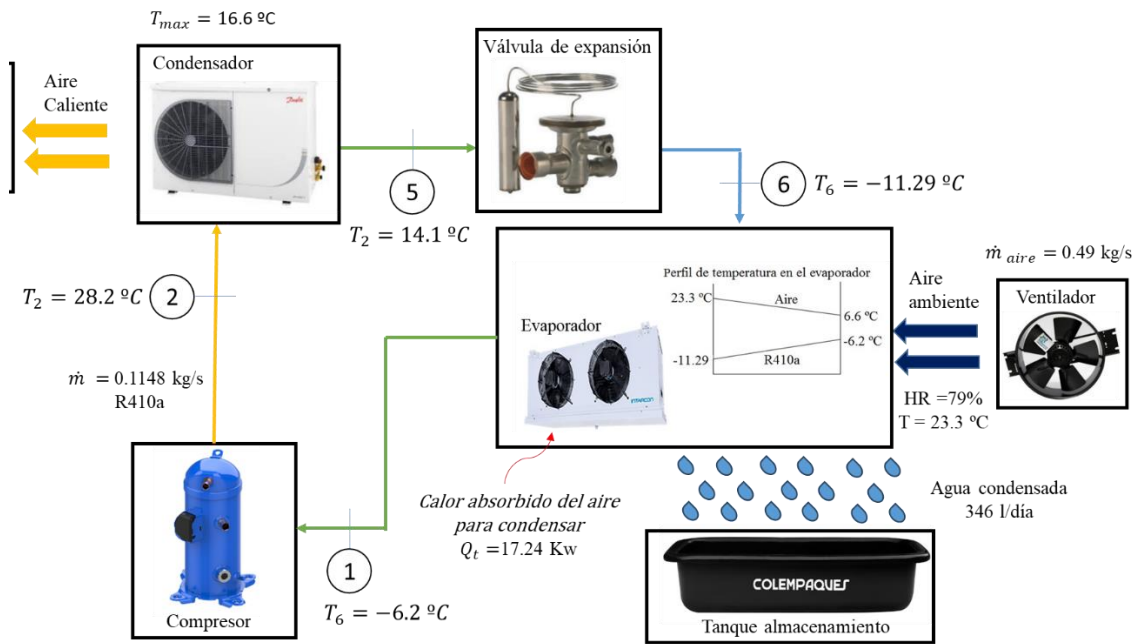
Punto	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Entalpía kJ/kg	Entropía kJ/kg
1	-6.211	5.510	423.82	1.857
2	35.623	13.067	448.43	1.857
3	16.461	13.066	226.55	1.093

4	11.414	13.066	218.21	1.064
5	-11.414	5.509	218.21	1.072
6	-11.235	5.509	419.70	1.841

Nota.: La figura representa la simulación del ciclo termodinámico realizado en el programa CoolPack. Fuente: Elaboración propia.

En el anexo 2, se muestra el procedimiento y los parámetros importantes para la selección de las partes estándar del dispositivo diseñado. Adicionalmente en la figura 3 se encuentra un resumen de los resultados del diseño termodinámico a manera de un diagrama de bloques don de se especifican las principales características del sistema planteado. Es importante mencionar que para este diseño se supuso generación de entropía muy baja tal y como lo muestra en la tabla 7. Esto hace que algunas suposiciones y cálculos tengan que ser ajustados posteriormente para tener en cuenta las generaciones de entropía que pueden ocasionarse en los elementos del sistema.

Figura 3. Diagrama de flujo sistema termodinámico.



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Diseño del sistema fotovoltaico.

En esta etapa se realizaron cálculos teóricos para proporcionar energía al sistema de condensación de la humedad del aire. Además, se empleó el software de simulación PVsyst (Ver Anexo 3) para el diseño fotovoltaico, facilitando la selección de componentes disponibles comercial

3.3.1 Análisis de cargas.

Como punto inicial, es crucial realizar un análisis detallado de la energía consumida por cada elemento eléctrico que formará parte del sistema. En la Tabla 8 se detallan las características de cada componente, lo que facilitará esta evaluación.

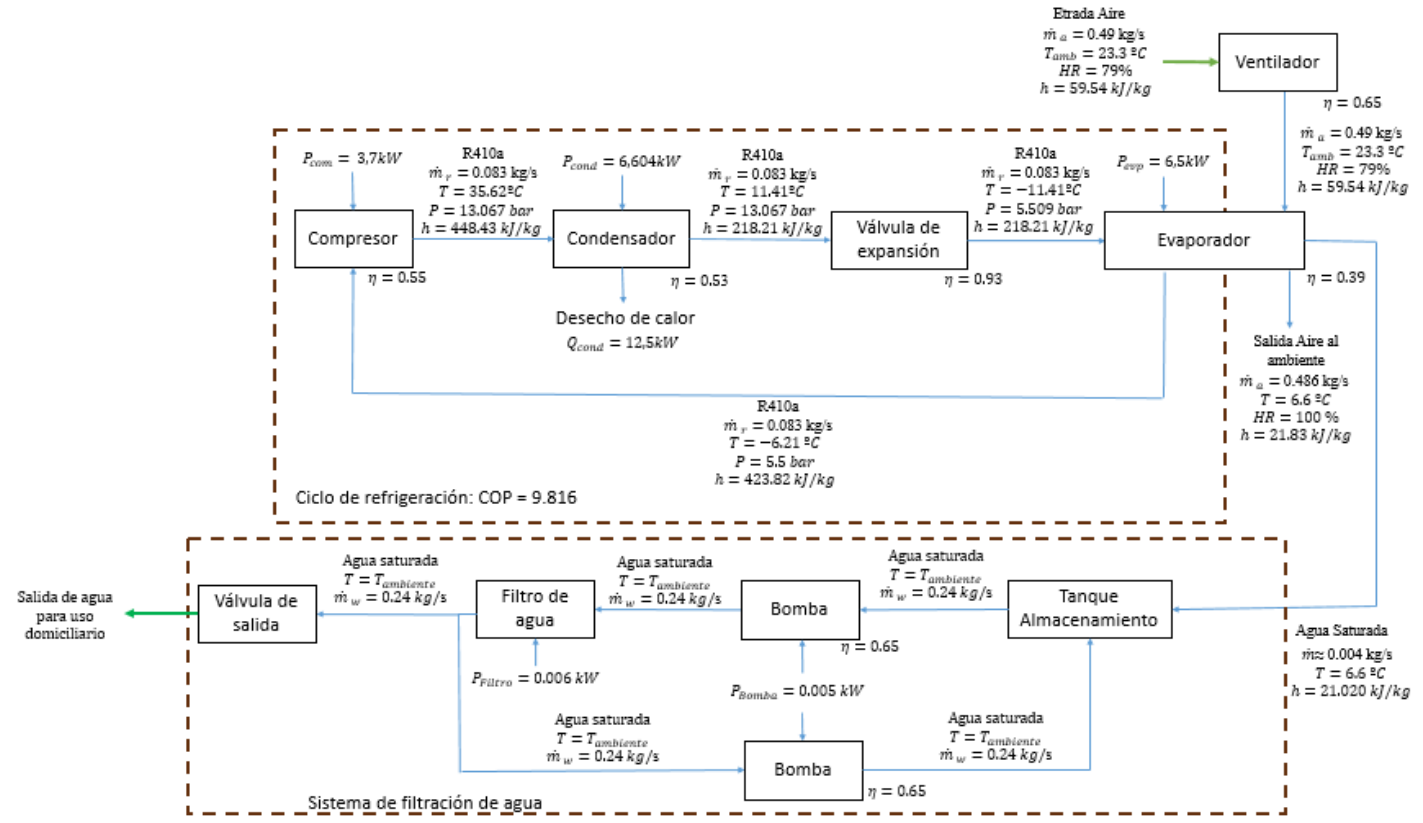
Tabla 8. Cuadro de cargas.

Elemento	Cantidad	Potencia W	Horas de uso diario	Horas de uso mes
Compresor	1	3750	7	210
Evaporador	1	650	7	210
Condensador	1	6604	7	210
Extractor	1	60	7	210
Ventiladores refrigerantes	3	60	24	720
Filtro de agua	1	6	24	720

Bombas de agua	2	5	24	720
Otros	1	200	24	729

A continuación, la Figura 4 presenta un diagrama de bloques del sistema propuesto, detallando las condiciones de entrada y salida de cada elemento seleccionado, incluyendo el consumo de energía eléctrica y la eficiencia operativa de cada componente. Se observa que la entrada al proceso es aire en condiciones promedio, mientras que la salida total del sistema consiste en agua destinada al uso en una residencia unifamiliar.

Figura 4. Diagrama de bloques del sistema termodinámico.



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Cubrimiento del sistema

El consumo diario de energía es de 86952 Wh/día. Se dimensiona el sistema con un factor de seguridad del 20% para considerar las pérdidas, lo que aumenta la demanda requerida. Se utilizó la ecuación 7 para calcular la energía necesaria del sistema.

$$E_c = 86952 \text{ Wh/día} * 1.2$$

$$E_c = 104342.4 \text{ Wh- día}$$

3.3.3 Cáculo de paneles.

Para el cálculo teórico de paneles solares, se utiliza el dato del sol pico de 3.7 horas diarias obtenido de la NASA para diciembre de 2021. Se considera una potencia máxima del panel de 665 W, comúnmente utilizada comercialmente. La cantidad de paneles necesarios dependerá de la energía requerida y la potencia máxima del panel seleccionado. La energía generada por cada panel se determina con la ecuación 8.

$$Energia \text{ panel} = 665 \text{ W} * 3.7 \text{ h} = 2460.5 \text{ Wh}$$

La cantidad de paneles requeridos para cubrir el consumo diario de energía se calculó utilizando la ecuación (9).

$$N = \frac{104342.4}{2460.5} = 43$$

Adicionalmente el cálculo para la inclinación del panel (β_{opt}), se utilizó la ecuación 10:

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.60 * 3.4025 = 5.74^{\circ}$$

3.3.4 Cáculo Controlador.

Para seleccionar el regulador adecuado, es necesario buscar uno en el mercado que opere a una tensión de 48V y que pueda manejar las condiciones de corriente de cortocircuito (I_{sc}) y circuito abierto (V_{oc}) del panel seleccionado. Según las simulaciones realizadas (Ver anexo 3-Figura 11) se obtiene 36 paneles con 6 controladores.

3.3.5 Cáculo Inversor

Para calcular la potencia del inversor (P_{inv}), se considerará un factor de simultaneidad del 100%, lo que implica que se contempla la posibilidad de que todos los elementos puedan funcionar de manera simultánea. La tensión de la instalación es de 48 V, por lo tanto, el inversor debe ser capaz de operar con esta tensión. A continuación, se presenta el procedimiento utilizando la ecuación 11:

$$P_{inv} = 1 * 11.46 \text{ kW}$$

$$P_{inv} = 11.465 \text{ kW}$$

También se debe considerar un factor de seguridad, que en este caso es del 20% por lo que la potencia del inversor debe ser de 13752 W.

Por lo tanto, se debe buscar que el inversor cubra la carga total, se sugiere el modelo Victron Phoenix 48/5000 el cual posee una potencia de salida de 5000 W y un rango de tensión adecuado, por lo que para todo el sistema se podrían utilizar 3.

3.3.6 Cáculo almacenamiento.

Se requiere elementos de almacenamiento para conservar energía en momentos donde no esté disponible la luz solar. Para calcular la capacidad necesaria de baterías se debe conocer: Energía diaria, días de autonomía que para este caso serán 2 y la tensión de la instalación (48) V. Por lo que se hace uso de la ecuación 12. Según las simulaciones realizadas (Ver anexo 3-Figura 12) se obtiene 5 módulos de baterías.

$$C_B = \frac{104343 \text{ Ah} * 2}{48 \text{ V}}$$

$$C_B = 4347.6 \text{ Ah}$$

3.4 Diseño conceptual estructural.

En la siguiente sección, se presenta la organización de los componentes del sistema termodinámico dentro de la estructura, siendo el color negro la estructura metálica que contenga los equipo, dicho diseño se realiza con la ayuda del programa Blender (ver Anexo 4-Figura 13).

3.5 Análisis financiero.

Para realizar un análisis detallado de costos de una instalación de sistema de condensación de humedad del aire, es crucial examinar cuatro etapas principales: Costos de Ingeniería (planificación del proyecto) (ver Anexo 5-Tabla1), Costos de los Elementos del Sistema de condensación (incluyendo filtración y tanque) (ver Anexo 5-Tabla2), Costos del Sistema Fotovoltaico (ver Anexo 5-Tabla 3), Costos de Infraestructura y Mano de Obra (ver Anexo 5-Tabla 4), y Costos construcción del proyecto (ver Anexo 5-Tabla 5)

3.5.1 Costo operación.

El consumo eléctrico complementario se estima en 104,343 kWh por día, equivalente a 38,085.2 kWh anuales considerando 365 días. A un costo promedio de 670 COP por kWh, el costo anual estimado de este consumo sería de \$25,517,084 COP. Este aspecto es crucial al evaluar los costos operativos totales del sistema. Además, se prevé un costo de mantenimiento del 15% sobre los costos de operación, equivalente a \$3,827,563 COP anuales.

$$CS = \frac{25.517.084}{2,3 \text{ suscriptor/año}} = \frac{11.094.384,4}{\text{suscriptor/año}}$$

3.5.2 Análisis de costos

Para evaluar la factibilidad del proyecto, centrado en resolver una necesidad social, se realiza un análisis de costos y efectividad para demostrar su rentabilidad a posibles inversores. El estudio de costos implica determinar los siguientes aspectos clave del proyecto: Costos de Ingeniería, Costos del sistema de condensación, Costos del sistema fotovoltaico, Costos de materiales, Costos de operación y mantenimiento. Se utilizará la ecuación 13 para calcular el costo promedio del servicio como punto de partida.

$$CS = \frac{25.517.084}{2,3 \text{ suscriptor/año}} = \frac{11.094.384,4}{\text{suscriptor/año}}$$

El valor mensual a pagar por cada suscriptor será de 924.532,03 pesos (COP). Esto se calculó con la ecuación 14.

A continuación se busca evaluar la tasa de retorno de la inversión (ROI), considerando tanto el costo de inversión inicial como el costo del servicio que se obtendrá de 2.3 habitantes para la ciudad de Cali durante un año de actividad. Se hace uso de la ecuación 15.

$$ROI = \frac{25.517.084 - 322.163.746}{322.163.746} * 100$$

$$ROI = -92.1$$

Los resultados del cálculo de la tasa de retorno de la inversión indican que esta opción no es viable debido a un retorno negativo, lo cual significa que los beneficios obtenidos son inferiores a los costos invertidos. En resumen, implementar un sistema fotovoltaico no resulta rentable financieramente para el proyecto.

4. CONCLUSIONES

El sistema de condensación en Cali considera las condiciones climáticas locales para determinar la producción de agua necesaria. Utiliza un ciclo de refrigeración por compresión y está diseñado para satisfacer las necesidades de un hogar unifamiliar (dos adultos y un menor). Incluye subsistemas como el térmico para la condensación, el de alimentación con un ventilador extractor, el de almacenamiento con un tanque para el agua condensada, y el de filtración para purificar el agua. La eficiencia del diseño depende de las condiciones ambientales; en áreas con temperaturas y humedad elevadas, se produce más agua, optimizando así el rendimiento del condensador.

Se realizó el cálculo teórico y la simulación en PVsyst para dimensionar el sistema fotovoltaico. Se llevó a cabo un análisis económico para estimar los costos del prototipo y evaluar su viabilidad. Según los cálculos, los beneficios económicos actuales indican que no es rentable implementar un sistema fotovoltaico debido a que los ingresos generados son menores que los costos de inversión. Se sugiere considerar estudios futuros sobre la viabilidad económica de utilizar paneles solares para alimentar parcialmente el sistema o explorar sistemas híbridos para satisfacer la demanda energética del dispositivo.

REFERENCIAS

- Cengel, Y. A., & Boles, M. (2006). *Termodinámica—5ta Edición*. McGrawHill/Interamericana editores.
- CLIMA - IDEAM. (s. f.). Recuperado 31 de mayo de 2024, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/clima>
- EMCALI EICE ESP. (2023). *CRITERIOS DE DISEÑO PARA REDES DE ACUEDUCTO*. GUENA – EMCALI EICE ESP. <https://www.emcali.com.co/documents/107516/125178/NDI-SE-DA-013.pdf>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2014). *Manual de buenas practicas en refrigeracion*.
- Naciones unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*.
- NASA POWER | *Prediction Of Worldwide Energy Resources*. (s. f.). Recuperado 18 de septiembre de 2023, de <https://power.larc.nasa.gov/>
- Patel, J., Patel, K., Mudgal, A., Panchal, H., & Sadasivuni, K. K. (2020). Experimental investigations of atmospheric water extraction device under different climatic conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100677. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100677>
- Pirouz, B., Palermo, S. A., & Turco, M. (2021). Improving the Efficiency of Green Roofs Using Atmospheric Water Harvesting Systems (An Innovative Design). *Water*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/w13040546>
- Raveesh, G., Goyal, R., & Tyagi, S. K. (2023a). Parametric analysis of atmospheric water generation system and its viability in Indian cities. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, 101682. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101682>
- Raveesh, G., Goyal, R., & Tyagi, S. K. (2023b). Parametric analysis of atmospheric water generation system and its viability in Indian cities. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, 101682. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101682>
- Salek, F., Eshghi, H., Zamen, M., & Ahmadi, M. H. (2022). Energy and exergy analysis of an atmospheric water generator integrated with the compound parabolic collector with storage tank in various climates. *Energy Reports*, 8, 2401-2412. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.178>
- Shahrokhi, F., & Esmaeili, A. (2022a). Optimizing relative humidity based on the heat transfer terms of the thermoelectric atmospheric water generator (AWG): Innovative design. *Alexandria Engineering Journal*, 67, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.003>
- Shahrokhi, F., & Esmaeili, A. (2022b). Optimizing relative humidity based on the heat transfer terms of the thermoelectric atmospheric water generator (AWG): Innovative design. *Alexandria Engineering Journal*, 67, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.003>
- SunGlacier—Glacier builders since 2010*. (s. f.). SunGlacier. Recuperado 12 de marzo de 2024, de <https://sunglacier.nl>
- Superservicios. (2023). *Informe Nacional de Coberturas de los Servicios Públicos de Acueducto, Alcantarillado Y Aseo*. <https://superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-coberturas-AAA-2022.pdf>
- Tripathi, A., Tushar, S., Pal, S., Lodh, S., Tiwari, S., & Desai, R. S. (2016). *Atmospheric Water Generator*. 5(4).
- Wang, S. K. (2000). *Handbook of air conditioning and refrigeration* (2nd ed). McGraw-Hill.
- Warka Water – Every Drop Counts*. (2022). <https://warkawater.org/>
- warkawater. (2022). *Warka Water – Every Drop Counts*. <https://warkawater.org/>
- Zhou, X., Lu, H., Zhao, F., & Yu, G. (2020). Atmospheric Water Harvesting: A Review of Material and Structural Designs. *ACS Materials Letters*, 2(7), 671-684. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.0c00130>