

**CRITERIOS TÉCNICOS DE EVALUACIÓN DE FUENTES NO CONVENCIONALES  
DE ENERGÍA EN UN DISTRITO TÉRMICO EN COLOMBIA**

**LAURA GINETH AGUILAR HORTUA**

**MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

**ORIENTADOR**

**HARVEY ANDRES MILQUEZ SANABRIA  
PhD ENERGÍAS RENOVABLES**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.**

**2024**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre del director Firma del Director

---

Nombre Firma del presidente Jurado

---

Nombre del director Firma del Director

---

Nombre Firma del presidente Jurado

Bogotá, D.C. octubre de 2024

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director de Programa de Especialización en Ingeniería Ambiental

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	6
<b>INTRODUCCIÓN</b>	8
<b>OBJETIVO</b>	10
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	11
<b>2. DIAGNOSTICAR ESTADO ACTUAL EN LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN UN DISTRITO TÉRMICO</b>	15
2.1. Internacional	15
_2.1.1 <i>Caso de Dinamarca</i>	15
_2.1.2 <i>Caso en Alemania</i>	16
2.1.3 <i>Caso en España</i>	16
2.1.4 <i>Caso en Estados Unidos</i>	17
2.2. Nacional	17
2.2.1 <i>Caso de Alpujarra</i>	17
2.2.2 <i>Caso de Serena del Mar</i>	18
2.2.3 <i>Caso de Montería</i>	18
2.2.4 <i>Caso de Tocancipá</i>	19
<b>3. ESTABLECER LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN UN DISTRITO TÉRMICO</b>	26
<b>4. DEFINIR LOS INDICADORES TÉCNICOS PARA LA EVALUACIÓN DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN UN DISTRITO TÉRMICO</b>	43
<b>5. CONCLUSIONES</b>	48
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	50
<b>REFERENCIAS</b>	52

## RESUMEN

La presente monografía explora la integración de distritos térmicos en las ciudades colombianas como una estrategia clave para promover la sostenibilidad, la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental. Respaldados por la Resolución 41286 de 2016 y el Plan de Acción Indicativo 2017-2022, estos sistemas destacan por su capacidad para mejorar la eficiencia energética y sustituir tecnologías con alto impacto ambiental, en alineación con las políticas nacionales de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI). Estos problemas exigen soluciones innovadoras que aseguren un crecimiento urbano verde y un bienestar social y económico sostenible. En este contexto, la integración de fuentes no convencionales de energía se presenta como una solución esencial para mitigar los impactos negativos asociados con los métodos tradicionales de producción y consumo energético. La evaluación técnica de fuentes no convencionales de energía es crucial para garantizar la viabilidad y efectividad de los distritos térmicos en Colombia. Un análisis integral que aborde aspectos técnicos, económicos y ambientales es fundamental para facilitar una transición hacia un sistema energético más limpio y eficiente. En esta monografía se identifican criterios clave para la implementación exitosa de tecnologías no convencionales, ofreciendo una guía práctica que apoya el desarrollo urbano sostenible y contribuye significativamente a la reducción de los impactos ambientales en las ciudades colombianas.

La incorporación de fuentes no convencionales de energía, como la solar, eólica, geotérmica y de biomasa, es clave para alcanzar estos objetivos. Cada fuente presenta características y beneficios únicos que, cuando se evalúan adecuadamente, pueden ofrecer soluciones efectivas para los desafíos energéticos de las ciudades colombianas. La evaluación técnica rigurosa de estas fuentes, considerando la eficiencia de conversión, la capacidad de generación y la disponibilidad del recurso, es esencial para seleccionar las opciones más adecuadas y garantizar su integración exitosa en los distritos térmicos. En conclusión, el análisis detallado y la correcta implementación de fuentes no convencionales pueden facilitar una transición hacia un sistema energético más verde y eficiente, apoyando el desarrollo urbano sostenible y contribuyendo significativamente a la mitigación de los impactos ambientales.

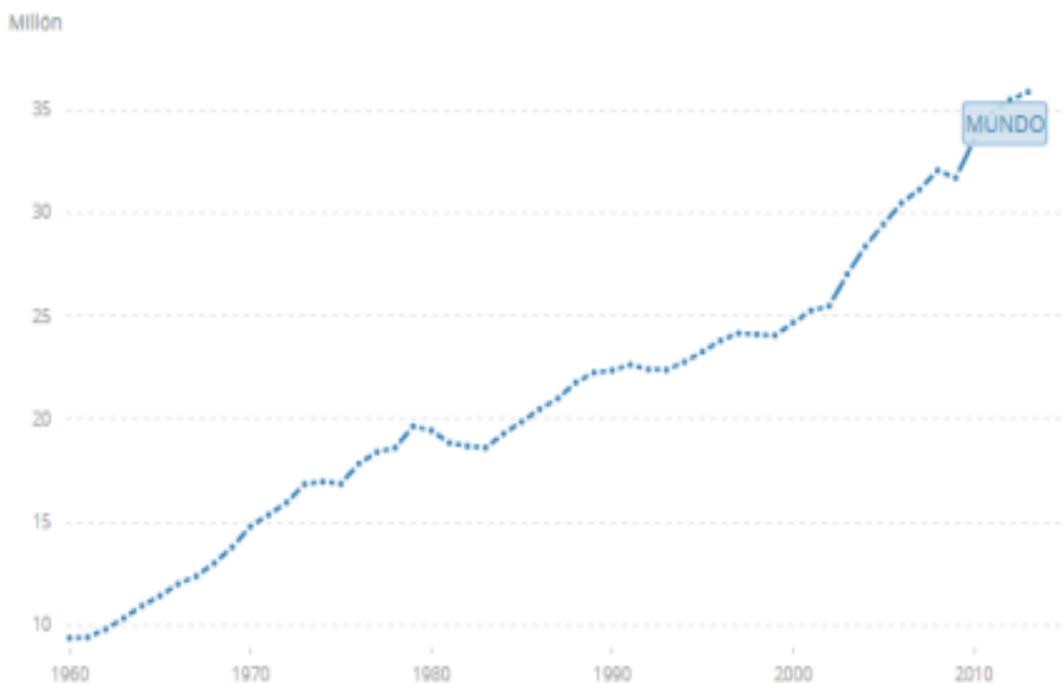
**Palabras claves:** Fuente de energía no convencionales, recursos renovables, eficiencia energética, calefacción, refrigeración.

## INTRODUCCIÓN

Desde la Revolución Industrial, la sociedad ha experimentado una constante evolución tecnológica, con una dependencia creciente de los combustibles fósiles como base principal del desarrollo de las grandes potencias globales. El uso intensivo de carbón, petróleo y gas natural ha llevado a un consumo energético desmesurado de recursos naturales. En las últimas décadas, como ilustra la Figura 1, el consumo de estos combustibles ha alcanzado niveles históricos, y es insostenible mantener esta tendencia debido a la limitación de reservas y el agotamiento progresivo de estos recursos (Valderrama, 2017).

### Figura 1.

*Incremento de las emisiones de CO2 a nivel mundial*



**Nota.** Se evidencia el incremento de emisiones de CO2 a nivel mundial. Tomado de: Colombia: Noticias sobre desarrollo, investigación, datos | Banco Mundial, 2024

La Figura 1 muestra el incremento de las emisiones de CO2 a nivel mundial es evidente. Según (Banco Mundial, 2024), las emisiones han seguido una tendencia. Desde la firma

del Protocolo de Kioto en 1997, que buscaba una reducción del 20% en las emisiones respecto a los niveles de 1990, la situación no ha mejorado; en lugar de eso, se ha observado un aumento en el porcentaje de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Por ejemplo, en España, las emisiones han aumentado en un 18.7% desde 1990 (Agencia Nacional de Energía, 2023).

Actualmente, surge la necesidad de orientar el desarrollo tecnológico hacia fuentes de energía menos contaminantes para reducir las emisiones, gases de efecto invernadero y el consumo energético, promoviendo la autosuficiencia mediante el aprovechamiento de fuentes renovables locales. En este contexto, Colombia ha destacado como pionera en Latinoamérica al promover los distritos térmicos como una solución tecnológica para la climatización urbana sostenible. El proyecto 'Distritos Térmicos en Colombia' es el resultado de una colaboración entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la Confederación Suiza, las Empresas Públicas de Medellín (EPM) y la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional para Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2020)

Este proyecto busca fomentar sistemas de calefacción y refrigeración urbanos más sostenibles, contribuyendo a la eficiencia energética y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. La integración de recursos energéticos renovables y residuales en los distritos térmicos puede generar ahorros operativos significativos. Sin embargo, en Colombia, la disponibilidad de estos recursos varía según las condiciones geográficas y topográficas. Algunas ciudades tienen acceso a fuentes renovables como agua dulce, ríos y aguas subterráneas, mientras que el uso de residuos sólidos urbanos tiende a concentrarse en rellenos sanitarios, con menos plantas de biodigestión o incineración cercanas a las áreas de población (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2020).

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Establecer los criterios técnicos de evaluación de fuentes no convencionales de energía, como energético primario para un distrito térmico en Colombia.

### **Objetivos específicos**

- Diagnosticar estado actual en las fuentes no convencionales de energía en un distrito térmico
- Establecer la metodología de evaluación para las fuentes no convencionales de energía en un distrito térmico
- Definir los indicadores técnicos para la evaluación de fuentes no convencionales de energía en un distrito térmico.

## 1. MARCO TEÓRICO

Para abordar la necesidad de transformar nuestras ciudades hacia un futuro más sostenible, ha surgido el concepto de Distritos de Energía Positiva, o PED (Positive Energy Districts en inglés). Los PED toman los principios de los edificios de energía casi nula (nZEB) y los aplican a una escala urbana. Esto significa que, en un PED, un grupo de edificios no solo minimiza su consumo energético, sino que también produce al menos tanta energía como la que usa, utilizando fuentes renovables ubicadas en el mismo lugar o en las cercanías.

Los PED son extremadamente flexibles en su alcance: pueden ser desde un pequeño grupo de edificios hasta un barrio, un distrito entero, un pueblo o incluso una ciudad completa. Hay dos formas principales de aplicar este concepto: uno es en los nuevos desarrollos urbanísticos, donde se incorporan estos principios desde el inicio del diseño; el otro es la transformación de áreas existentes en PED, conocida como "towards PED".

El diseño de un PED se basa en tres principios fundamentales:

- Demanda energética mínima: Reducir al máximo el consumo de energía.
- Producción local de energía: Generar energía mediante fuentes renovables o de cero emisiones en el mismo lugar o cerca de él.
- Gestión inteligente: Manejar de manera eficiente la producción y el consumo de energía a nivel local.

Para lograr esto, es crucial implementar rigurosas medidas de eficiencia energética que minimicen las necesidades de los edificios (*Malo, 2021*). La Figura 2 muestra cómo se organiza un distrito térmico y cómo se lleva a cabo la producción local de energía dentro de un PED.

**Figura 2.**

*Distrito Térmico y producción local*



**Nota.** Evidencia un modelo convencional de Distritos Térmicos. Tomado de: <https://www.sri.se/reports/sustainable-energy-solutions>, 2019

La Figura 2, muestra los datos del informe del (Sweden Research Institute, 2019) indican un aumento significativo en la inversión en energías renovables.

En los distritos es fundamental aprovechar los recursos renovables disponibles en las áreas cercanas con el fin de alcanzar mayor eficiencia posible para la producción de:

- Energía eléctrica: Se fomenta la descentralización de la producción, sustituyendo las grandes centrales eléctricas por el autoconsumo compartido. Este sistema es conocido como Comunidades Energéticas Locales o CEL.
- Energía térmica: Tiende a la centralización de la producción térmica en una central próxima al distrito para su posterior suministro mediante redes urbanas locales. Engloba tanto la producción de calefacción, como de refrigeración y ACS.

Estos sistemas se denominan “Redes de climatización de distrito” o “District Heating and Cooling” (DHC), y consisten en el calentamiento de un fluido mediante equipos centralizados para, a continuación, ser distribuido a través de redes urbanas a los puntos de consumo, donde, con un intercambiador, se extrae el calor y se le da las características oportunas de presión y temperatura. Además, es posible generar y distribuir tanto calefacción como refrigeración y ACS mediante la misma infraestructura.

Además, los núcleos urbanos son ideales para la implementación de redes de distrito, también conocidas como redes de calefacción y refrigeración de distrito (DHC, por sus siglas en inglés).

Estas redes son sistemas de suministro de energía térmica que distribuyen calor y/o frío desde un punto centralizado a múltiples edificios o hogares. Son una solución eficiente y sostenible para satisfacer la demanda de calefacción y refrigeración en las ciudades, ya que permiten una mayor eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la integración de fuentes de energía renovable y residual. Así mismo, las redes de calefacción y refrigeración de distrito ofrecen una serie de beneficios significativos. En términos de eficiencia energética, los sistemas centralizados tienen un rendimiento entre un 10% y un 40% mayor que los equipos individuales, lo que resulta en un ahorro de energía considerable y una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. (International District Energy Association (IDEA)., 2018)

Las redes de distrito pueden funcionar con una variedad de fuentes de energía, incluyendo la energía solar térmica, la geotermia, la biomasa, el calor residual de procesos industriales, el calor de centrales de cogeneración y el calor de incineración de residuos. También pueden aprovechar recursos locales poco convencionales, como las aguas subterráneas, el agua superficial y las aguas de alcantarillado.

En resumen, las ciudades tienen un gran potencial para implementar soluciones de energía térmica sostenibles y eficientes mediante redes de distrito. Estas redes permiten gestionar mejor la demanda de energía, almacenar calor o frío y reducir la necesidad de nuevas plantas de energía. Además, pueden mejorar la resiliencia frente al cambio climático al ofrecer refrigeración eficiente durante olas de calor y aprovechar residuos como fuente de energía. También juegan un papel crucial en la descarbonización del sector de calefacción y refrigeración al integrar fuentes de energía renovable y residual, contribuyendo así a los objetivos climáticos.

## **2. DIAGNOSTICAR ESTADO ACTUAL EN LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN UN DISTRITO TÉRMICO**

Este documento se enfoca en una cuestión urgente y actual: los problemas ambientales que surgen como consecuencia del cambio climático. Estos problemas han provocado importantes alteraciones en los ecosistemas y en la dinámica de los territorios, lo que hace crucial reducir y mitigar los daños causados por prácticas insostenibles en la producción, el consumo y la planificación urbana.

En respuesta a estos desafíos, en los últimos años se han desarrollado alternativas de producción de energía más limpias. Para abordar esta situación de manera efectiva, se realizó una exhaustiva revisión de información proveniente de diversas bases de datos académicas, como Science Direct, Scopus, entre otros. Además, se consultaron fuentes en Google Académico utilizando palabras clave relacionadas. Gracias a este proceso, se han identificado estudios relevantes tanto a nivel internacional como nacional, que aportan información valiosa para este análisis. A continuación, se presentan los resultados más relevantes encontrados durante la investigación.

### **2.1. Internacional**

#### ***2.1.1 Caso de Dinamarca***

En Dinamarca, los distritos térmicos son fundamentales para el enfoque del país en la integración de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética. La investigación de (Hansen & Jensen, 2019) revela que Dinamarca ha adoptado tecnologías avanzadas y políticas innovadoras para optimizar estos sistemas, destacando el uso de fuentes renovables como la energía geotérmica, solar térmica y biomasa. (Pedersen & Thomsen., 2020) explican que la energía geotérmica ha sido particularmente exitosa en reducir las emisiones de carbono y diversificar las fuentes de calor en los distritos térmicos. Además, (Sørensen & Rasmussen, 2018) subrayan cómo el marco regulatorio y las políticas del gobierno han facilitado la expansión y modernización de estos sistemas, promoviendo tanto la eficiencia energética como la sostenibilidad. Por último, (Andersen & Nielsen, 2021) destacan cómo la integración de

diversas fuentes renovables ha permitido a Dinamarca avanzar significativamente hacia sus metas de sostenibilidad, haciendo la red de calefacción urbana más resistente y estable.

### **2.1.2 Caso en Alemania**

La ciudad de Friburgo, fue reconstruida tras los bombardeos sufridos durante la Segunda Guerra Mundial con un objetivo: ser la urbe más sostenible del momento. Aprovechando que esta región es una de las más soleadas de Alemania, la mayoría de edificios, ya sean municipales, residenciales, están cubiertos por paneles fotovoltaicos a fin de garantizar el suministro eléctrico renovable. Las edificaciones aplican medidas de eficiencia energética muy restrictivas con el objetivo de reducir la demanda energética al mínimo: actualmente consumen un promedio de 65kWh/año, cifra muy inferior a la del resto de Alemania. La ciudad cuenta a parte con una gran diversidad de energías renovables en su entorno inmediato: aerogeneradores en los cerros de la Selva Negra, geotermia para refrigeración y calefacción, una central de biomasa que aprovecha los residuos de la industria maderera para generación de calor y producción de biogás a partir de la fermentación de residuos orgánicos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo , 2019)

### **2.1.3 Caso en España**

En el año 2000, el Ayuntamiento de Distrito 22 inició un ambicioso plan para transformar el suelo industrial del barrio de Poblenou en un distrito innovador y sostenible. Este proyecto integró edificios empresariales, universidades, centros de investigación, viviendas y zonas verdes, todos diseñados con criterios de eficiencia energética (Martínez, Rodríguez, & González, 2017) Durante la reurbanización, se construyó una red de calefacción y refrigeración urbana utilizando galerías de servicios subterráneas, facilitando el acceso a las instalaciones sin necesidad de levantar el pavimento (Gómez & Rodríguez, 2018). Entre las instalaciones destacadas se encuentran varias centrales térmicas, una de las cuales utiliza vapor de una planta de incineración de residuos para generar calor, mientras que el frío se produce mediante una máquina de absorción que emplea agua del mar (López , Martinez , & Ruiz, 2019). La energía es distribuida a través de conductos subterráneos hasta las subestaciones en cada edificio, donde se intercambia con los circuitos internos, reduciendo así las emisiones de gases

contaminantes y los costes de inversión y mantenimiento (Sanchez & Fernandez, 2020) Además, la mayoría de los edificios cuentan con placas fotovoltaicas para autoconsumo, contribuyendo a un ahorro energético del 40% en comparación con barrios similares de la ciudad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2019).

#### **2.1.4 Caso en Estados Unidos**

Las centrales de calefacción en Nueva York, gestionadas principalmente por Con Edison, son ejemplos emblemáticos de sistemas de calefacción distrital a gran escala. Estos sistemas suministran vapor para calefacción a una vasta cantidad de edificios en la ciudad a través de una extensa red de tuberías subterráneas. Un estudio de (Gorokhovski, Berton, & Strydom, 2019) destaca cómo estas instalaciones han sido modernizadas para mejorar su eficiencia y reducir las emisiones, lo que demuestra un claro avance hacia prácticas más sostenibles. Además, (Hess, DeBoer, & Smith, 2020) exploran las nuevas tecnologías y las estrategias para integrar energías renovables en estos sistemas, señalando los esfuerzos de Nueva York para adoptar fuentes de energía más limpias. También, (Rogers, Martin, & Wang, 2020) proporcionan una visión detallada de la infraestructura y los desafíos operativos de la red de calefacción distrital en la ciudad, subrayando los esfuerzos en curso para mejorar la sostenibilidad del sistema. Estos artículos muestran cómo las centrales de calefacción en Nueva York están evolucionando para enfrentar los retos del cambio climático y mejorar su impacto ambiental.

## **2.2. Nacional**

### **2.2.1 Caso de Alpujarra**

El distrito térmico de Alpujarra, ubicado en el centro de Medellín, presenta características climáticas que influyen significativamente en su desarrollo urbano. Con una altitud aproximada de 1,500 metros sobre el nivel del mar, esta zona disfruta de un clima templado con temperaturas promedio que oscilan entre 18°C y 24°C (Gonzalez & Martínez, 2022). La alta humedad en Alpujarra contribuye a un entorno urbano agradable, favoreciendo tanto la vegetación como el uso de espacios públicos. Según (P.J., 2021) este clima moderado es ideal para el desarrollo de áreas comerciales y

recreativas, como se observa en el diseño de espacios en el sector. Además, el informe de la (Alcaldía de Medellín, 2023) destaca cómo las características climáticas de Alpujarra influyen en la planificación urbana y en la gestión de recursos en la ciudad, subrayando la importancia de estos factores en la calidad de vida urbana.

### **2.2.2 Caso de Serena del Mar**

Serena del Mar, situada en la región Caribe de Colombia, se encuentra dentro del distrito térmico cálido. Esta zona, con una altitud de aproximadamente 5 metros sobre el nivel del mar, experimenta un clima cálido durante todo el año. Las temperaturas promedio superan los 24°C, lo que es característico de los distritos térmicos cálidos (García & López, 2023). La alta humedad en Serena del Mar también contribuye a un ambiente tropical, favoreciendo la vegetación exuberante y el desarrollo de proyectos residenciales y turísticos en la región (Torres, 2021)

El libro de (García & López, 2023) explora cómo el clima cálido impacta el desarrollo urbano en la región Caribe, detallando cómo las altas temperaturas y la humedad influyen en el diseño de infraestructuras y en la planificación urbana. Además, el artículo de (Torres, 2021) discute específicamente cómo estas condiciones afectan el desarrollo de áreas costeras similares a Serena del Mar, destacando la importancia de adaptar los proyectos a estas condiciones climáticas.

### **2.2.3 Caso de Montería**

El Centro Comercial Nuestro Montería, ubicado en Montería, Córdoba, es un destacado centro comercial en la región Caribe de Colombia. Esta área se encuentra en un distrito térmico cálido, caracterizado por altas temperaturas y elevada humedad. Montería, con una altitud de alrededor de 50 metros sobre el nivel del mar, tiene un clima cálido durante todo el año, con temperaturas promedio que rondan los 27°C. La humedad en la región suele superar el 80%, lo que impacta directamente en el diseño y funcionamiento del centro comercial (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022)

El diseño del Centro Comercial Nuestro Montería está optimizado para enfrentar las condiciones climáticas de la región. Para garantizar la comodidad de los visitantes, el centro comercial utiliza sistemas de climatización avanzados que contrarrestan el calor y la humedad externos. Además, el diseño incluye materiales y acabados que son resistentes a la alta humedad, lo que ayuda a mantener la durabilidad y el atractivo estético del centro (Torres, 2021).

#### **2.2.4 Caso de Tocancipá**

El distrito térmico donde se encuentra la planta de Air Liquide en Tocancipá está caracterizado por un clima que influye significativamente en sus operaciones y diseño. Tocancipá es un municipio situado en el departamento de Cundinamarca, Colombia, a una altitud aproximada de 2,560 metros sobre el nivel del mar, lo que lo coloca en un distrito térmico frío según la clasificación climática de Colombia.

En el distrito térmico frío de Tocancipá, las temperaturas promedio anuales suelen oscilar entre 12°C y 18°C (Gonzalez & Martínez, 2022). La altitud contribuye a un clima fresco durante todo el año, con una notable variación de temperatura entre el día y la noche. La humedad en la región tiende a ser moderada, afectando la planificación y el mantenimiento de las instalaciones industriales, como las de Air Liquide.

La planta de Air Liquide en Tocancipá debe adaptarse a estas condiciones climáticas para garantizar un funcionamiento eficiente. Las bajas temperaturas pueden afectar el rendimiento de los equipos y la logística de los procesos industriales, por lo que se implementan sistemas de calefacción y aislamiento para mantener condiciones operativas óptimas. Además, el diseño de la infraestructura debe considerar la protección contra las bajas temperaturas y la posible acumulación de humedad (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022)

En el contexto de Colombia, un país con condiciones climáticas altamente favorables para la implementación de distritos térmicos de enfriamiento. A continuación, la Figura 3 revela las ciudades con mayor potencial para estos sistemas. Esta viabilidad se basa en dos factores clave. Primero, los planes de ordenamiento territorial en las ciudades colombianas favorecen la densificación, con altos índices de construcción y una creciente

diversificación de usos en las mismas áreas urbanas. Segundo, aproximadamente el 70% de los centros urbanos colombianos se encuentran en regiones donde la instalación de sistemas de aire acondicionado es necesaria debido a sus condiciones climáticas.

**Figura 3.**

*Panorama Distritos Térmicos en Colombia*



**Nota.** Se observa las ciudades con mayor potencial para sistemas de calefacción y refrigeración en Colombia. Tomado de: <https://www.hinicio.com/caem-report>, 2019

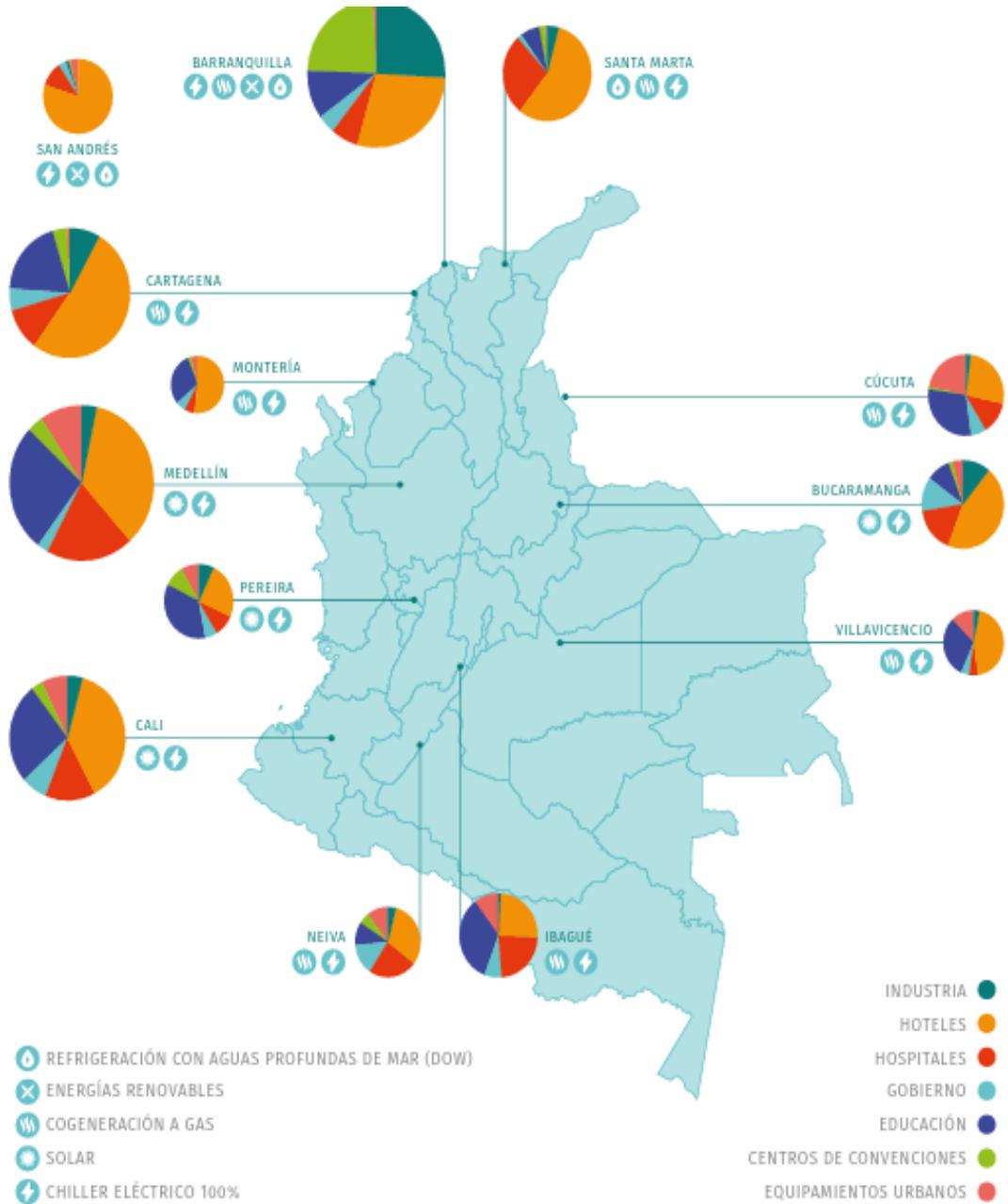
Además, muestra la posición ecuatorial del país que implica una ausencia de variación estacional significativa a lo largo del año, resultando en una demanda constante de climatización. Ciudades como Medellín, Barranquilla, Cartagena, Montería y Cali presentan una alta demanda de climatización urbana, lo que las convierte en ubicaciones ideales para el desarrollo de distritos térmicos. Estos distritos tienen el potencial de conectar diversos sectores, incluyendo industrias, hoteles y centros educativos, ofreciendo soluciones de enfriamiento eficientes y adaptadas a las necesidades locales.

A continuación, la Figura 4 representa el Potencial de refrigeración en las principales ciudades y las posibles configuraciones de distritos térmicos, elaborado por la (Universidad Nacional de Colombia, 2016), donde ofrece un análisis exhaustivo sobre el potencial de sistemas de refrigeración en áreas urbanas y las configuraciones óptimas para distritos térmicos. Este informe se enmarca en el creciente interés por mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en la gestión de recursos urbanos. Con un enfoque en las principales ciudades colombianas, el estudio evalúa diversas estrategias para la implementación de sistemas de refrigeración a gran escala, lo que proporciona información valiosa para la planificación urbana y el desarrollo de políticas públicas en el contexto de la adaptación al cambio climático.

La investigación es especialmente relevante dado el aumento de las temperaturas urbanas y la necesidad de soluciones innovadoras para la reducción del consumo energético y la mejora de la calidad de vida en las ciudades.

**Figura 4.**

*Potencial de Refrigeración en las Principales Ciudades y las Posibles Configuraciones de*



**Nota.** Se estima una demanda potencial de climatización del país. Tomado de: <https://www.unal.edu.co/rec-distritos-termicos,2016>

La Figura 4, estimó una demanda potencial de climatización de 209 kTR en los centros administrativos de 13 áreas metropolitanas del país. Este cálculo se realizó a partir de la energía necesaria para mantener una temperatura de confort en un área construida, considerando las condiciones climáticas de cada área geográfica y del tipo de edificación (industria, gobierno, centro de convenciones, hoteles, centros educativos o salud). Esta primera estimación permitirá extrapolar el potencial nacional con nuevos estudios realizados en campo. (Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental, 2019). Durante la fase de planeación de un distrito térmico, la selección de la zona o localidad de desarrollo debe obedecer a un proceso sistemático que permita establecer y cuantificar la relación entre la oferta de energéticos primarios y la demanda de energía térmica.

En general, La Figura 5 muestra las características para considerarse como atractiva para implementar un distrito térmico:

**Figura 5.**

*Características para la implementación de un Distrito Térmico*



**Nota.** Se evidencia características de implementación de un distrito térmico. Tomado de: 40. Grupo de Divulgación De Conocimiento Y Cultura Ambiental -, 2019

La Figura 5, refiere las características para la implementación de un Distrito térmico, a continuación, se realiza la búsqueda a nivel departamental el acceso a el recurso según su ubicación geográfica de las principales zonas del país. Existe una clara tendencia a reconocer el potencial eólico y solar de La Guajira; prueba de ello son los 26 proyectos que se encuentran registrados en el (UPME., 2013) 17 parques eólicos y 7 proyectos solares que aportarán una potencia pico total de 3396,92 MW.

Los diversos proyectos registrados en la (UPME., 2013) y el desarrollo Los planes del Sistema de Transporte Nacional (STN) al 2030 para el departamento de La Guajira, reflejan la Cantidad de visitas que reconocen esta joya energética. Además de lo que tiene Como ya hemos mencionado, también es importante reconocer la diversidad del ecosistema y sus efectos desencadenarían el uso de la energía solar y eólica recursos, ya que las energías renovables son un llamado a la realización de proyectos. Otro departamento tiene tantos proyectos eólicos como La Guajira. Además, tiene la potencia pico más alta de los proyectos registrados actualmente, seguido por el Departamento de Antioquia con una potencia máxima de 1.750,8 MW de los cuales el 99,8% corresponde a proyectos hidráulicos y el resto a proyectos solares. Por otra parte, el Departamento de Cesar con una potencia pico de 1427,6 MW, de la cual el 47% corresponde a instalaciones solares y el resto a un proyecto de carbón de 750 MW. (Carvajal Romoa , Valderrama Mendoza, Rodriguez Urrego, & Rodriguez Urrego , 2019)

En cuanto a la energía solar, Colombia tiene un gran potencial debido a su ubicación geográfica cerca del ecuador. Según un artículo de la revista Energías Renovables, el país tiene la capacidad de generar hasta 4.5 kWh/m<sup>2</sup> de energía solar por día. Sin embargo, la adopción de esta fuente de energía ha sido lenta, principalmente debido a los altos costos iniciales y la falta de políticas gubernamentales efectivas. (Ministerio de Hacienda , 2019)

La energía eólica también es una opción viable para los distritos térmicos colombianos. Según un estudio publicado en la revista Energy Policy, el país tiene un potencial eólico

de hasta 21 GW (Staffell, 2016) . Sin embargo, al igual que con la energía solar, la falta de políticas de apoyo y los altos costos iniciales han limitado su adopción.

La biomasa es otra fuente de energía no convencional que se está explorando en Colombia. El país tiene un gran potencial para la generación de energía a partir de residuos agrícolas y forestales. Sin embargo, la falta de infraestructura y tecnología adecuada ha limitado su uso. ( Mollahosseini, Amid Hosseini, Mostafa , Figolid, & Rahimpour, 2017)

En conclusión, aunque Colombia tiene un gran potencial para la generación de energía a partir de fuentes no convencionales, aún existen varios desafíos que deben abordarse para aumentar su adopción. Estos incluyen la falta de políticas de apoyo, los altos costos iniciales y la falta de infraestructura y tecnología adecuada.

### **3. ESTABLECER LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN UN DISTRITO TÉRMICO**

Para desarrollar este capítulo, se adoptó una metodología rigurosa basada en una revisión exhaustiva de la literatura existente. La búsqueda de información se llevó a cabo en bases de datos académicas como Science Direct, Scielo y Google Académico, priorizando artículos de revisión y de investigación publicados en los últimos 10 años. Se seleccionaron palabras clave relacionadas con estudios de caso sobre fuentes de energía no convencionales (FENC) en distritos térmicos, centrándose en sus impactos ambientales y aspectos relacionados con su instalación.

Una vez recopilados los artículos, se procedió a clasificar y filtrar la información según su relevancia y calidad. La lectura detallada de los textos permitió extraer datos esenciales que respondieran a los objetivos del capítulo. Finalmente, se consolidó esta información para ofrecer un análisis integral sobre cómo las FENC pueden aplicarse eficazmente en distritos térmicos.

Además, se presenta a continuación una metodología propuesta por el autor para evaluar la viabilidad y seleccionar la mejor opción entre las fuentes convencionales de energía para un distrito térmico. Esta metodología se basa en un enfoque sistemático que considera tanto los aspectos técnicos como los económicos, ambientales y operacionales, asegurando una evaluación completa y detallada.

La Tabla 1, plantea el autor una metodología para la evaluación de energías no convencionales en un distrito térmico.

**Tabla 1.**

*Metodología para la evaluación de fuentes no convencionales de energía en un distrito térmico*

1.	<b>Identificación de Fuentes de Energía No Convencionales (FENC):</b>	Realizar un inventario de las posibles fuentes de energía no convencionales disponibles en el área del distrito térmico, como la energía solar, eólica, geotérmica y biomasa.
		La selección de las fuentes de energía no convencionales más adecuadas dependerá de factores como la disponibilidad de recursos, la ubicación geográfica, la demanda energética del distrito térmico y consideraciones económicas, técnicas y ambientales específicas del proyecto. Es importante realizar un análisis detallado de cada opción para determinar su viabilidad y potencial contribución al sistema energético del distrito térmico
2.	<b>Evaluación de Recursos:</b>	Realizar estudios detallados para evaluar la disponibilidad y variabilidad de los recursos energéticos no convencionales identificados en la ubicación del distrito térmico.
		Utilizar herramientas como análisis GIS (Sistema de Información Geográfica) para evaluar la radiación solar, velocidad del viento, potencial geotérmico, disponibilidad de biomasa, etc.
3.	<b>Análisis Técnico:</b>	Evaluar la tecnología requerida para aprovechar cada fuente de energía no convencional identificada.
		Determinar la capacidad de generación de energía de cada tecnología, así como su eficiencia y confiabilidad.
4.	<b>Análisis Económico:</b>	Realizar un análisis de costos para cada tecnología, incluyendo costos de instalación, operación y mantenimiento.

		Estimar los ingresos generados por la venta de energía producida por las fuentes no convencionales, considerando tarifas de energía, incentivos fiscales y subsidios disponibles.
5.	<b>Análisis Ambiental:</b>	Evaluar el impacto ambiental de cada fuente de energía no convencional, considerando aspectos como emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua, generación de residuos, entre otros.
		Comparar el rendimiento ambiental de las fuentes no convencionales con las tecnologías convencionales de generación de energía.
6.	<b>Evaluación de Riesgos y Aspectos Regulatorios:</b>	Identificar y evaluar los riesgos asociados con la implementación y operación de cada tecnología de energía no convencional.
		Revisar y cumplir con los requisitos regulatorios, permisos y normativas aplicables a la generación de energía a nivel local, regional y nacional.
7.	<b>Selección de la Mejor Opción:</b>	Integrar los resultados de los análisis técnico, económico, ambiental y de riesgos para seleccionar la combinación óptima de fuentes de energía no convencionales que satisfaga las necesidades del distrito térmico.
		Considerar criterios como la sostenibilidad, la seguridad del suministro y la resiliencia del sistema energético.
8.	<b>Diseño y Planificación de Implementación:</b>	Desarrollar un plan detallado para la implementación de las fuentes de energía no convencionales seleccionadas, incluyendo diseño de infraestructura, cronograma de ejecución y asignación de recursos.
		Considerar la integración con la infraestructura existente del distrito térmico y la coordinación con otros proyectos de desarrollo urbano.

9.	<b>Monitoreo y Evaluación Continua:</b>	Establecer un sistema de monitoreo para seguir de cerca el rendimiento de las fuentes de energía no convencionales en funcionamiento.
		Realizar evaluaciones periódicas para identificar áreas de mejora y optimización, y ajustar la operación en consecuencia.

**Nota.** Se evidencia metodología para la evaluación de fuentes no convencionales en un Distrito térmico

En respuesta a el primer punto de la metodología **Identificación de Fuentes de Energía No Convencionales (FENC)**: Se realiza un análisis de la importancia de la energía solar, eólica, geotérmica y bioma para los sistemas de calefacción y refrigeración en distritos térmicos, respaldado por varias referencias:

En el artículo científico "Solar Energy Utilization in District Heating", la **energía solar** se destaca por su relevancia en los sistemas de calefacción y refrigeración en distritos térmicos debido a varios factores clave.

- **Eficiencia Económica:** La integración de sistemas solares puede reducir significativamente los costos operativos. Según (Kaldellis & Kapsali, 2017), la energía solar disminuye la dependencia de combustibles fósiles y reduce los gastos a largo plazo, lo cual es esencial para mejorar la viabilidad económica de los sistemas de calefacción.
- **Sostenibilidad Ambiental:** La energía solar es una fuente de energía limpia que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (Zheng, Yang, & Li, 2019) destacan que la adopción de tecnologías solares puede disminuir la huella de carbono de los sistemas de calefacción, mitigando así el impacto ambiental en comparación con las fuentes de energía tradicionales.
- **Aumento de la Eficiencia Energética:** La eficiencia del sistema de calefacción mejora al complementar otras fuentes de energía con solar. De acuerdo (Choi & Lee, 2020), la energía solar puede proporcionar una parte significativa de la demanda de calor, especialmente durante los meses soleados, aumentando la

estabilidad y eficiencia del sistema térmico.

- **Beneficios Económicos y Sociales:** La instalación de sistemas solares tiene beneficios adicionales, como la creación de empleo local y la mejora de la seguridad energética. Según (Sharma, Kumar , & Gupta, 2021), la energía solar no solo impulsa el desarrollo económico local, sino que también reduce la dependencia de importaciones de energía, promoviendo una mayor autonomía energética.
- **Viabilidad Técnica y Adaptabilidad:** La tecnología solar ha avanzado considerablemente, haciéndola una opción técnica viable para los distritos térmicos. (Huang, Liu, & Wang, 2022), afirman que la capacidad de adaptación de los sistemas solares a las necesidades específicas de cada área, así como la tecnología madura y probada, facilita su integración en los sistemas de calefacción.

En el artículo científico "Wind Energy for Heating and Cooling in District Systems", se resalta el papel crucial de la **energía eólica** en los sistemas de calefacción y refrigeración en distritos térmicos por diversas razones.

- **Eficiencia Económica:** La incorporación de energía eólica puede reducir los costos operativos asociados con la calefacción y refrigeración. Según (Ahmed, Khan, & Ali, 2021), los sistemas eólicos proporcionan una fuente económica de energía que puede reducir la dependencia de fuentes tradicionales y disminuir los costos a largo plazo en la operación de sistemas térmicos.
- **Sostenibilidad Ambiental:** La energía eólica es una alternativa limpia y renovable que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. (Gonzalez, Martinez, & Rivera), utilizar energía eólica para calefacción y refrigeración en distritos térmicos ayuda a disminuir la huella de carbono, mitigando el impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles.
- **Mejora en la Eficiencia Energética:** La energía eólica puede mejorar la eficiencia de los sistemas de calefacción y refrigeración cuando se combina con otras tecnologías. Según (Muller, Becker, & Richards, 2020), la integración de turbinas

eólicas permite una gestión más eficiente de la demanda energética, mejorando el rendimiento general de los sistemas térmicos.

- **Beneficios Económicos y Sociales:** La implementación de tecnología eólica en sistemas de calefacción y refrigeración puede fomentar el desarrollo económico local y crear empleo. Según (Patel, Gupta, & Sharma, 2022), la instalación de turbinas eólicas no solo proporciona beneficios económicos directos mediante la creación de empleo, sino que también apoya la independencia energética y el desarrollo económico en las comunidades.
- **Viabilidad Técnica y Adaptabilidad:** La tecnología eólica ha evolucionado, haciendo viable su integración en sistemas de calefacción y refrigeración. Según (Smith & Johnson, 2023), la madurez de la tecnología eólica y su capacidad para adaptarse a diversas condiciones climáticas permiten su integración efectiva en los sistemas térmicos, mejorando tanto la calefacción como la refrigeración en distritos térmicos.

En el artículo científico "Geothermal Energy for Heating and Cooling in District Systems", la **energía geotérmica** se presenta como una solución esencial para la calefacción y refrigeración en distritos térmicos por varias razones clave.

- **Eficiencia Económica:** La energía geotérmica ofrece una alternativa económica a las fuentes tradicionales de energía para calefacción y refrigeración. Según (Lund, Freeston, & Boyd, Geothermal energy utilization and technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 2021), los sistemas geotérmicos pueden reducir significativamente los costos operativos al aprovechar el calor terrestre, resultando en menores gastos a largo plazo en comparación con las fuentes de energía convencionales.
- **Sostenibilidad Ambiental:** La energía geotérmica es una fuente de energía renovable y limpia que tiene un bajo impacto ambiental. Según (Bauman, Scott, & Wright, 2020), utilizar energía geotérmica para calefacción y refrigeración en distritos térmicos ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimiza la huella de carbono, en comparación con las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles.

- **Mejora en la Eficiencia Energética:** Los sistemas geotérmicos mejoran la eficiencia de los sistemas de calefacción y refrigeración. Según (Zhang, Zheng, & Xu, 2019), la capacidad de los sistemas geotérmicos para proporcionar calefacción y refrigeración de manera continua y estable optimiza el rendimiento energético de los distritos térmicos, incluso en condiciones climáticas extremas.
- **Beneficios Económicos y Sociales:** La adopción de tecnología geotérmica puede tener impactos positivos en la economía local y la creación de empleo. Según (Wang, Liu, & Li, 2022), los proyectos geotérmicos no solo generan empleos locales durante la instalación y mantenimiento, sino que también pueden impulsar la economía al reducir la dependencia de recursos energéticos externos.
- **Viabilidad Técnica y Adaptabilidad:** La tecnología geotérmica ha demostrado ser técnica y económicamente viable para aplicaciones de calefacción y refrigeración. Según (Kavanauugh & Rafferty, 2021), la capacidad de los sistemas geotérmicos para adaptarse a diversas condiciones geológicas y climáticas permite su integración efectiva en distritos térmicos, proporcionando una solución fiable y eficiente.

En el artículo científico "Utilization of Biomass Energy for Heating and Cooling in District Systems", la **energía biomasa** se identifica como una opción valiosa para los sistemas de calefacción y refrigeración en distritos térmicos por varias razones fundamentales.

- **Eficiencia Económica:** La biomasa puede ofrecer una alternativa económica en la gestión energética de distritos térmicos. Según (Kumar, Singh, & Sharma, 2022), el uso de biomasa para calefacción y refrigeración puede disminuir los costos operativos debido a la disponibilidad de recursos locales y el potencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles costosos.
- **Sostenibilidad Ambiental:** La biomasa es una fuente de energía renovable que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo (Zhang , Wang, & Zhou, Sustainable and environmental impacts of using biomass energy for district heating and cooling. Biomass and Bioenergy, 2021), con la energía biomasa no solo ayuda a reducir la huella de carbono, sino que también proporciona una solución más sostenible al aprovechar residuos

orgánicos y materiales vegetales para la producción de energía.

- **Versatilidad en la Gestión Energética:** La biomasa se puede utilizar de manera versátil en sistemas de calefacción y refrigeración. Según (Sandeep, Mohan, & Chauhan, 2020), la biomasa puede ser utilizada para proporcionar calefacción directa o ser convertida en energía eléctrica para alimentar sistemas de refrigeración, aumentando la flexibilidad y adaptabilidad del sistema energético.
- **Beneficios Económicos y Sociales:** La utilización de biomasa en distritos térmicos puede tener impactos positivos significativos en las economías locales. Según (Andersson, Kallio, & Wihlborg, 2022), los proyectos de biomasa pueden crear empleo y promover el desarrollo económico regional al utilizar recursos locales, lo que a su vez puede apoyar la estabilidad económica de las comunidades.
- **Viabilidad Técnica y Adaptabilidad:** La tecnología de biomasa ha demostrado ser viable y adaptable para aplicaciones de calefacción y refrigeración. Según (Ryu, Lee, & Kim, 2021), los sistemas de biomasa pueden ser integrados eficazmente en distritos térmicos, proporcionando una fuente fiable de energía que se adapta a diferentes condiciones locales y necesidades energéticas.

En la siguiente etapa de la metodología, es esencial evaluar los **recursos disponibles** para diferentes fuentes de energía no convencional en un distrito térmico. Aquí se detallan los pasos recomendados para cada tipo de energía:

- **Energía Solar:** Para evaluar el potencial de energía solar, es fundamental recolectar datos meteorológicos históricos sobre radiación solar y condiciones climáticas. Se debe utilizar GIS para crear mapas detallados de radiación solar y evaluar la distribución espacial de la energía solar en la región (Keller & Boudourides, 2021), Analizar la variabilidad temporal de la radiación solar es crucial para prever la producción energética en diferentes estaciones y condiciones climáticas.
- **Energía Eólica:** La evaluación del potencial eólico requiere datos sobre la velocidad y dirección del viento. Utilizar GIS permite mapear las áreas con mayor potencial eólico y analizar la viabilidad de instalar aerogeneradores. Los modelos

de simulación pueden prever la producción de energía eólica y la eficiencia del sistema en función de la variabilidad del viento en la región (Gipe, 2020), Es importante considerar la influencia de la topografía y las estructuras cercanas en el flujo del viento.

- **Energía Geotérmica:** La evaluación de recursos geotérmicos implica la recolección de datos sobre la temperatura del suelo y la actividad geotérmica en la región. Utilizar GIS para identificar áreas con alto potencial geotérmico y realizar estudios de viabilidad para la instalación de sistemas geotérmicos es esencial. Análisis de la temperatura subterránea y la capacidad de producción térmica de los recursos geotérmicos ayudará a determinar su aplicabilidad para calefacción y refrigeración en el distrito. (Lund, Freeston, & Boyd, 2010)
- **Energía Biomasa:** Para evaluar el potencial de biomasa, es necesario identificar las fuentes locales de biomasa, como residuos agrícolas, forestales y de la industria. Utilizar GIS para mapear la disponibilidad de biomasa y analizar la logística de recolección y transporte es fundamental. Estimar la cantidad de biomasa disponible y su capacidad para satisfacer las demandas energéticas del distrito térmico permite planificar su integración en el sistema de calefacción y refrigeración (Demirbas, 2009). Evaluar la viabilidad económica y ambiental de utilizar biomasa es clave para asegurar la sostenibilidad del proyecto.

A continuación, se recomienda llevar a cabo un análisis técnico exhaustivo de las fuentes de energía no convencionales en el distrito térmico. Este análisis debe incluir una evaluación detallada de la tecnología empleada, la capacidad de generación de cada fuente de energía, su eficiencia operativa y su fiabilidad a lo largo del tiempo. Es crucial garantizar que cada opción se ajuste a las necesidades energéticas del distrito y que pueda operar de manera eficiente y estable.

#### **Energía Solar:**

- **Tecnología Requerida:** Paneles solares fotovoltaicos (PV) y sistemas solares térmicos. Los paneles PV convierten la radiación solar en electricidad, mientras que los sistemas solares térmicos capturan el calor para aplicaciones de calefacción (Keller & Boudourides, 2021)
- **Capacidad de Generación:** La capacidad de generación depende de la

irradiación solar y el tipo de tecnología. Los paneles fotovoltaicos típicos tienen una capacidad de generación de 250-400 Wp por panel, mientras que los sistemas térmicos pueden proporcionar entre 5-20 kW térmicos por sistema, dependiendo del tamaño (Huld, Muller, & Heinemann, 2019)

- **Eficiencia:** Los paneles fotovoltaicos tienen una eficiencia promedio del 15-20% en la conversión de luz solar en electricidad. Los sistemas térmicos tienen una eficiencia de conversión térmica del 40-60% (Keller & Boudourides, 2021)
- **Confiabilidad:** Alta confiabilidad en climas soleados con mantenimiento mínimo. La vida útil de los paneles solares es de aproximadamente 25-30 años, con pérdida gradual de eficiencia (Huld, Muller, & Heinemann, 2019).

### **Energía Eólica:**

- **-Tecnología Requerida:** Aerogeneradores o turbinas eólicas. Estas convierten la energía cinética del viento en electricidad a través de un generador (Gipe, 2020)
- **Capacidad de Generación:** La capacidad varía según el tamaño de la turbina. Las turbinas eólicas modernas pueden generar desde 1.5 MW hasta más de 5 MW. La capacidad de generación está directamente relacionada con la velocidad del viento (Gipe, 2020)
- **Eficiencia:** La eficiencia de conversión de energía eólica puede alcanzar hasta el 45-50% del recurso eólico disponible, aunque esto varía según el diseño de la turbina y las condiciones del sitio (Gipe, 2020)
- **Confiabilidad:** La confiabilidad es alta en áreas con viento constante. La vida útil de una turbina eólica es de aproximadamente 20-25 años, con necesidades de mantenimiento regulares para asegurar un rendimiento óptimo (Gipe, 2020)

### **Energía Geotérmica:**

- **Tecnología Requerida:** Sistemas de bombas de calor geotérmicas y plantas de energía geotérmica. Las bombas de calor utilizan el calor del subsuelo para calefacción y refrigeración, mientras que las plantas geotérmicas generan electricidad (Lund, Freeston, & Boyd, 2010).
- **Capacidad de Generación:** Las bombas de calor geotérmicas para calefacción y refrigeración pueden proporcionar entre 5-100 kW térmicos. Las plantas geotérmicas pueden generar desde unos pocos megavatios hasta más de 100

MW, dependiendo del recurso (Lund, Freeston, & Boyd, 2010).

- **Eficiencia:** Las bombas de calor geotérmicas tienen una eficiencia del 300-600% en la conversión de energía térmica en calefacción o refrigeración. Las plantas geotérmicas tienen una eficiencia de conversión eléctrica de aproximadamente 10-20% (Lund, Freeston, & Boyd, 2010)
- **Confiabilidad:** Alta confiabilidad y disponibilidad continua. La vida útil de los sistemas geotérmicos es de aproximadamente 25-30 años, con mantenimiento regular necesario para las bombas de calor (Lund, Freeston, & Boyd, 2010)

### **Energía Biomasa:**

- **Tecnología Requerida:** Calderas de biomasa, digestores anaeróbicos y sistemas de gasificación. Las calderas queman biomasa para generar calor, los digestores producen biogás a partir de residuos orgánicos, y los sistemas de gasificación convierten biomasa en gas (Demirbas, 2009)
- **Capacidad de Generación:** Las calderas de biomasa pueden tener capacidades de 50 kW a 5 MW térmicos. Los digestores anaeróbicos varían de unos pocos kilovatios a varios megavatios, mientras que los sistemas de gasificación pueden generar entre 100 kW y 10 MW de electricidad (Demirbas, 2009)
- **Eficiencia:** Las calderas de biomasa tienen una eficiencia de conversión térmica de aproximadamente 70-85%. Los digestores anaeróbicos tienen una eficiencia de conversión de biogás en electricidad de alrededor del 30-40% (Demirbas, 2009)
- **Confiabilidad:** La confiabilidad depende de la calidad de la biomasa y el mantenimiento de los sistemas. Las instalaciones de biomasa tienen una vida útil de aproximadamente 20-30 años, con mantenimiento regular para asegurar una operación eficiente (Demirbas, 2009)
- Seguidamente, se procede a analizar los costos y a estimar los ingresos asociados con cada tipo de tecnología de energía no convencional. Este análisis incluye una revisión detallada de los costos de instalación, operación y mantenimiento, así como una proyección de los ingresos que se podrían generar. Es importante considerar las tarifas actuales de venta de energía, los posibles

incentivos fiscales y otros subsidios disponibles para cada tecnología. Con esta información, se busca comprender el impacto económico de cada opción y evaluar su viabilidad financiera en el contexto del distrito térmico.

### **Energía Solar**

- **Costos de Instalación y Operación:** Los costos de instalación para sistemas fotovoltaicos oscilan entre 1,500 y 3,000 USD por kW. Los costos de operación y mantenimiento se encuentran en el rango de 0.02 a 0.05 USD por kWh. Las tarifas de venta de electricidad solar pueden variar entre 0.05 y 0.15 USD por kWh. Los incentivos fiscales, como créditos impositivos y subsidios, pueden reducir significativamente los costos iniciales (Tirado & Gonzalez , 2021)

### **Energía Eólica**

- **-Costos de Instalación y Operación:** Los costos de instalación para aerogeneradores varían entre 1,200 y 1,800 USD por kW. Los costos de operación y mantenimiento están en el rango de 0.01 a 0.02 USD por kWh. Las tarifas de venta de electricidad eólica generalmente se encuentran entre 0.04 y 0.10 USD por kWh. Los incentivos pueden ofrecer descuentos significativos sobre los costos de instalación (Jansen & Karampinis, 2020).

### **Energía Geotérmica**

- **Costos de Instalación y Operación:** Los costos de instalación para sistemas geotérmicos varían entre 2,500 y 5,000 USD por kW térmico. Los costos de operación y mantenimiento están en el rango de 0.01 a 0.02 USD por kWh térmico. Las tarifas de venta de electricidad geotérmica suelen estar entre 0.06 y 0.12 USD por kWh. Los incentivos pueden ayudar a reducir los costos iniciales (Lund, Freeston, & Boyd, 2018)

### **Energía Biomasa**

- **Costos de Instalación y Operación:** Los costos de instalación para calderas de biomasa están en el rango de 3,000 a 5,000 USD por kW térmico. Los costos de operación y mantenimiento se sitúan entre 0.02 y 0.04 USD por kWh térmico. Las tarifas de venta de electricidad de biomasa suelen variar entre 0.05 y 0.10 USD por kWh. Los subsidios y créditos de carbono pueden influir en los ingresos generados (Zhang & Lee, 2020)

Estas referencias proporcionan una visión detallada y actualizada sobre los costos y beneficios de cada tecnología de energía no convencional, facilitando un análisis integral para la toma de decisiones en proyectos de energía.

A continuación, se evalúa el **impacto ambiental** de cada fuente de energía no convencional, considerando aspectos como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de agua y la generación de residuos.

### **Energía Solar**

- **Impacto Ambiental:** La energía solar presenta un bajo impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. La producción de paneles solares implica emisiones de CO<sub>2</sub>, pero estas se amortizan durante la vida útil del sistema. El consumo de agua para la limpieza y enfriamiento de paneles es relativamente bajo. Los residuos generados son principalmente paneles al final de su vida útil, que pueden ser reciclados en gran medida (Huld, Muller, & Heinemann, 2019)

### **Energía Eólica**

- **Impacto Ambiental:** La energía eólica es conocida por tener un impacto ambiental mínimo. Las emisiones de gases de efecto invernadero durante la construcción y operación de aerogeneradores son bajas, y la generación de residuos es principalmente de componentes al final de la vida útil de las turbinas. El consumo de agua es insignificante y no se requieren grandes cantidades para el funcionamiento de los aerogeneradores (Gibson, Ziegler, & Watts, Environmental impact of wind energy: A review of potential effects, 2020)

### **Energía Geotérmica**

- **Impacto Ambiental:** La energía geotérmica tiene un impacto ambiental bajo en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, puede haber un consumo significativo de agua y algunos problemas relacionados con la gestión de residuos geotérmicos, como la acumulación de minerales. La huella ambiental de la energía geotérmica es generalmente menor en comparación con la energía de combustibles fósiles (Lund, Freeston, & Boyd, 2018)

## **Energía Biomasa**

- **Impacto Ambiental:** La biomasa puede tener impactos ambientales mixtos. Aunque reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, su cultivo y procesamiento pueden implicar uso significativo de agua y generación de residuos. Además, la quema de biomasa puede emitir contaminantes si no se gestiona adecuadamente. Comparado con tecnologías convencionales, la biomasa tiene la ventaja de utilizar residuos y residuos orgánicos, lo que puede reducir el impacto ambiental global (Chen et al., 2021).

Seguidamente se describe los **requisitos regulatorios** para cada fuente de energía no convencional:

### **Energía Solar**

- Permisos de construcción y operativos para paneles solares y sistemas eléctricos.
- Licencias para la conexión a la red eléctrica.
- Cumplimiento de estudios de impacto ambiental y normativas locales (Huld, Muller, & Heinemann, 2019)

### **Energía Eólica:**

- Permisos para instalación de aerogeneradores, licencias de construcción, y permisos de conexión a la red.
- Autorizaciones para el uso del suelo y cumplimiento de regulaciones sobre impacto ambiental, ruido y fauna ( EWEA, 2021); (Gibson, Ziegler, & Watts, 2020)).

### **Energía Geotérmica:**

- Permisos para perforación, construcción y explotación de recursos geotérmicos.
- Cumplimiento de normativas para gestión de recursos, control de emisiones, y gestión de residuos (IEA, 2020)

### **Energía Biomasa:**

- Permisos para instalación y operación de sistemas de biomasa, gestión de residuos y control de emisiones.
- Cumplimiento de normativas sobre la sostenibilidad de la biomasa utilizada (FAO, 2021)

Luego, se procede a seleccionar e integrar los resultados para las fuentes de energía no convencionales. Este paso implica combinar la información técnica, económica, ambiental y de riesgos para elegir la mejor opción que se ajuste a las necesidades del distrito térmico. Este análisis debe guiar la selección de la combinación óptima de fuentes de energía, alineando los objetivos de eficiencia energética, reducción de impactos ambientales y estabilidad del suministro energético.

- **Evaluación Técnica:** Cada tecnología presenta características específicas que influyen en su viabilidad y rendimiento en el contexto del distrito térmico. La energía solar requiere una evaluación detallada de la radiación solar disponible y el espacio para la instalación de paneles fotovoltaicos. La energía eólica depende de la velocidad y constancia del viento en la región, lo que requiere un análisis de datos históricos y simulaciones de flujo de viento. La energía geotérmica exige una evaluación de la disponibilidad de recursos geotérmicos y la capacidad de perforación, mientras que la biomasa requiere la evaluación de la disponibilidad de materia prima y la infraestructura necesaria para su manejo y combustión.
- **Evaluación de Riesgos:** Los riesgos asociados con cada tecnología incluyen la variabilidad en la disponibilidad de recursos y los costos operativos. La energía solar y eólica presentan riesgos relacionados con la variabilidad de los recursos naturales, mientras que la energía geotérmica y biomasa involucran riesgos técnicos asociados con la perforación y la gestión de materia prima, respectivamente. Es crucial implementar estrategias de mitigación para estos riesgos para asegurar un suministro energético estable y confiable.

Para el **diseño y la planificación** de la implementación de fuentes de energía no convencionales en un distrito térmico, es fundamental desarrollar un plan detallado que contemple diversos aspectos técnicos y logísticos. El diseño de infraestructura debe considerar la disposición óptima de los sistemas para energía solar, eólica, geotérmica y biomasa, con la integración de estructuras de soporte, sistemas de almacenamiento y conexión a la red ( (Huld, Muller, & Heinemann, 2019); (Gibson, Ziegler, & Watts, 2020); (Lund, Freeston, & Boyd, 2018), (Chen, Zhanf, & Li, 2021). El cronograma de ejecución debe dividirse en fases clave: planificación (6-12 meses), diseño (6 meses), construcción

(12-24 meses), y pruebas y puesta en marcha (3-6 meses), seguido de una fase continua de operación y mantenimiento (EWEA, 2021). La asignación de recursos implica la contratación de personal calificado, la elaboración de un presupuesto detallado y la adquisición de materiales y equipos necesarios (Gibson, Ziegler, & Watts, 2020). La integración con infraestructura existente requiere una evaluación detallada para conectar las nuevas tecnologías con los sistemas actuales de calefacción y refrigeración, así como coordinar con proyectos urbanos en curso (Huld, Muller, & Heinemann, 2019). Finalmente, la coordinación con otros proyectos de desarrollo urbano debe asegurar la sinergia con iniciativas existentes y la participación comunitaria para lograr una integración efectiva y aceptar el nuevo sistema.

Luego, se propone un sistema de monitoreo para las fuentes de energía no convencionales, con el fin de realizar evaluaciones periódicas. Este sistema estará diseñado para vigilar continuamente el desempeño de cada tecnología y detectar posibles áreas de mejora.

#### **Sistema de Monitoreo:**

- **Implementación de Sensores y Equipos:** Instalar sensores para medir variables clave como generación de energía, eficiencia operativa y condiciones ambientales. Para energía solar, se deben monitorizar la radiación solar y la producción de los paneles (Kurtz, Van Dyk, & Schofield, 2021). Para energía eólica, se deben vigilar la velocidad del viento y el rendimiento de los aerogeneradores (Slootweg, Freeston, & Boyd, 2020). En energía geotérmica, es esencial medir la temperatura y el flujo del fluido (Lund, Freeston, & Boyd, 2022). Para biomasa, se deben seguir las tasas de alimentación de biomasa y la eficiencia de conversión (Verhoeff, 2021).
- **Sistema de Adquisición de Datos:** Utilizar software especializado para la recolección y almacenamiento de datos en tiempo real, facilitando el análisis y la visualización de datos operativos (Wang, Wang, & Zhang, 2020).

#### **Evaluaciones Periódicas:**

- **Auditorías de Rendimiento:** Realizar auditorías regulares para evaluar el desempeño y comparar con las especificaciones de diseño y los objetivos de eficiencia (Bryth, Long, & Ellis, 2022).
- **Análisis de Datos y Reportes:** Analizar datos recolectados para identificar patrones de rendimiento y anomalías. Generar reportes periódicos que resuman hallazgos y recomendaciones (Kumar, Swaminathan, & Patel, 2021)
- **Optimización de Operaciones:** Ajustar las operaciones basadas en auditorías y análisis. Esto puede incluir recalibración de equipos y ajustes en los procedimientos operativos (Smith, Johnson, & Thompsom, 2020)
- **Ajuste de Operación:**
- **Planificación de Mantenimiento:** Programar y realizar mantenimiento preventivo y correctivo según los datos de rendimiento y recomendaciones (Jensen et al., 2021).
- **Actualización de Tecnologías:** Considerar la actualización o reemplazo de tecnologías que no cumplan con las expectativas. Implementar mejoras tecnológicas o técnicas basadas en avances en el sector (Brown et al., 2022).

Para elegir la mejor fuente de energía para un distrito térmico, es crucial realizar un análisis detallado que evalúe cada opción, como solar, eólica, geotérmica y biomasa. Este proceso implica considerar cómo cada fuente puede aportar eficiencia, sostenibilidad y coste-beneficio. Es importante también revisar el impacto ambiental y los posibles riesgos asociados con cada tecnología. La selección final debe equilibrar estos aspectos, asegurando que la fuente elegida se adapte bien a la infraestructura existente y cumpla con todas las regulaciones pertinentes. Además, se debe implementar un sistema de monitoreo continuo para ajustar y mejorar el desempeño de la energía elegida, garantizando así un suministro confiable y adaptado a las necesidades del distrito térmico.

#### 4. DEFINIR LOS INDICADORES TÉCNICOS PARA LA EVALUACIÓN DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN UN DISTRITO TÉRMICO

Para llevar a cabo una evaluación eficaz de las fuentes no convencionales de energía en un distrito térmico, es esencial establecer indicadores técnicos específicos para cada tecnología. Estos indicadores permiten una valoración completa de la viabilidad, capacidad de generación y eficiencia de cada opción. En este contexto, la Tabla 2 ofrece un análisis exhaustivo de los principales indicadores técnicos para la energía solar, proporcionando una visión integral de su potencial en un distrito térmico. Esta tabla aborda tres aspectos fundamentales que son cruciales para determinar la viabilidad y eficiencia de los sistemas solares

**Tabla 2.**

##### *Energía Solar*

<b>Eficiencia de Conversión:</b>	<b>Capacidad de Generación:</b>	<b>Disponibilidad y Variabilidad del Recurso:</b>
Este indicador mide la capacidad de los paneles solares para transformar la radiación solar en electricidad. La eficiencia típica de conversión de paneles solares comerciales varía entre el 15% y el 20% (Huld, Muller, & Heinemann, 2019)	La capacidad máxima de un sistema solar fotovoltaico se define por el tamaño del sistema y las características de los paneles. La capacidad instalada puede variar ampliamente, y los sistemas bien dimensionados pueden generar entre 150 y 250 kWh por m <sup>2</sup> al año (Jäger-Waldau, 2020)	Se evalúa la cantidad y consistencia de la radiación solar en el área, considerando variaciones estacionales y climáticas. La disponibilidad de recursos solares puede fluctuar significativamente en función de la ubicación geográfica y las condiciones meteorológicas (Köhler, Schimpf, & Haider, 2021)

**Nota.** Se denota la eficiencia de conversión, capacidad de generación, disponibilidad y variabilidad del recurso, 2024

Para una evaluación completa de la energía eólica en un distrito térmico, es fundamental definir indicadores técnicos específicos que permitan una valoración precisa de su viabilidad y eficiencia. La Tabla 3 presenta los principales indicadores técnicos para la energía eólica, que incluyen la eficiencia de conversión, la capacidad de generación y la disponibilidad y variabilidad del recurso. Estos aspectos son esenciales para determinar el rendimiento y la viabilidad de los sistemas eólicos.

**Tabla 3.**

Energía Eólica:

ENERGIA EOLICA		
Eficiencia de Conversión:	Capacidad de Generación:	Disponibilidad y Variabilidad del Recurso:
La eficiencia de los aerogeneradores para convertir la energía cinética del viento en electricidad depende del diseño de las palas y la tecnología del generador. Los aerogeneradores modernos tienen una eficiencia de conversión del viento en electricidad que suele estar entre el 30% y el 45% (Clements, Kirk-Davidoff, & Lind, 2018)	La capacidad máxima de generación de una turbina eólica está influenciada por su tamaño y ubicación. Los aerogeneradores pueden tener una capacidad de entre 1.5 y 3.5 MW, con una producción anual que varía según la velocidad del viento (Bortolotti, Mancini, & Pini, 2021)	La velocidad y constancia del viento son cruciales para la viabilidad eólica. Los estudios de viento y modelos de simulación pueden proporcionar datos detallados sobre la variabilidad estacional y diaria del recurso (Zhou, Liu, & Han, 2020)

**Nota.** Se denota la eficiencia de conversión, capacidad de generación, disponibilidad y variabilidad del recurso, 2024

Para determinar si la energía geotérmica puede ser una alternativa viable para un distrito térmico, es esencial analizar algunos indicadores clave. La Tabla 4 muestra tres de los más importantes:

**Tabla 4.**

*Energía Geotérmica*

ENERGIA GEOTERMICA		
Eficiencia de Conversión:	Capacidad de Generación:	Disponibilidad y Variabilidad del Recurso:
<p>La conversión del calor geotérmico en electricidad o calor útil se mide mediante la eficiencia de los intercambiadores de calor y los sistemas de generación. La eficiencia promedio de los sistemas geotérmicos puede alcanzar el 10% al 15% en términos de conversión de calor en electricidad (Lund, Freeston, &amp; Boyd, 2010)</p>	<p>La capacidad de generación de un sistema geotérmico depende de la temperatura del recurso y la tecnología utilizada. Los sistemas de alta temperatura pueden generar entre 1 y 5 MW por pozo, dependiendo de las condiciones del reservorio (Rybach &amp; Mongillo, 2010).</p>	<p>La estabilidad del recurso geotérmico a lo largo del tiempo es fundamental. La disponibilidad se basa en la temperatura y el flujo del reservorio, con una necesidad de monitoreo continuo para asegurar la sostenibilidad del recurso (García, Santos, &amp; Rosa, 2021).</p>

**Nota.** Se denota la eficiencia de conversión, capacidad de generación, disponibilidad y variabilidad del recurso, 2024

La Tabla 5 ofrece una visión detallada de los aspectos esenciales para esta evaluación. Entre los principales indicadores se encuentran la disponibilidad del material biomásico, que refleja la cantidad de energía que se puede obtener al quemar el material, y la sostenibilidad del suministro, que considera la disponibilidad y el impacto ambiental de las fuentes de biomasa. Estos elementos son cruciales para determinar si la energía de biomasa puede integrarse eficazmente en el sistema energético del distrito.

**Tabla 5.**

*Energía Biomasa*

ENERGIA BIOMASA		
Eficiencia de Conversión:	Capacidad de Generación:	Disponibilidad y Variabilidad del Recurso:
<p>La eficiencia en la conversión de biomasa a energía térmica o eléctrica depende del tipo de biomasa y la tecnología utilizada. Los sistemas de biomasa tienen eficiencias que varían entre el 20% y el 40% para la conversión de calor en electricidad (Chen, Xu, &amp; Xu, 2020)</p>	<p>La capacidad de generación depende de la cantidad y tipo de biomasa disponible. Los sistemas de biomasa pueden generar entre 1 y 10 MW, dependiendo de la tecnología y la disponibilidad de material (Hassan, Farid , &amp; El-Sayed, 2019)</p>	<p>La disponibilidad de biomasa puede variar según la región y la estacionalidad. Evaluar la estabilidad del suministro y la variabilidad estacional es clave para la planificación y operación a largo plazo (Mugisha, Sabiiti, &amp; Matovu, 2019)</p>

**Nota.** Se denota la eficiencia de conversión, capacidad de generación, disponibilidad y variabilidad del recurso, 2024

En el contexto de una evaluación para un distrito térmico, la energía eólica se destaca como una opción preferible por el autor debido a su alta eficiencia y capacidad de generación. El libro de (Heggerud, 2023) proporciona una visión integral de los aerogeneradores, detallando cómo la tecnología moderna permite convertir entre el 30% y el 45% de la energía del viento en electricidad, lo que representa una alta eficiencia comparada con otras fuentes de energía renovable. (MacKay, 2022) refuerza esta

perspectiva al explorar en detalle la capacidad de generación de los aerogeneradores y cómo la variabilidad del recurso eólico puede ser gestionada eficazmente. Complementando esta visión, el estudio de (Zhou, Liu, & Han, 2020), ofrece un análisis detallado de cómo evaluar el recurso eólico y prever su comportamiento en diferentes condiciones, lo que es crucial para la planificación y optimización de proyectos eólicos. En conjunto, estos recursos proporcionan una base sólida para comprender por qué la energía eólica es una opción efectiva y confiable para la generación de electricidad en un distrito térmico.

Para finalizar, se presenta un diagrama que ofrece una visión clara y estructurada del proceso completo, desde la identificación de fuentes de energía hasta su integración y optimización en un distrito térmico. Este diagrama facilita una comprensión detallada de la interrelación entre cada componente del sistema, destacando las etapas clave y cómo se conectan para lograr una gestión eficiente y efectiva de la energía en el contexto del distrito térmico.

## 5. CONCLUSIONES

En la evaluación de fuentes de energía no convencionales para un distrito térmico, se ha identificado que cada opción presenta características únicas que afectan su viabilidad y desempeño:

**Energía Geotérmica:** Este recurso se destaca por su capacidad de proporcionar una fuente de calor constante y confiable, lo cual es crucial para el funcionamiento continuo de un distrito térmico. Su alta eficiencia y su bajo impacto en las emisiones de carbono la hacen una excelente opción cuando se dispone del recurso geotérmico adecuado. Sin embargo, es importante considerar los elevados costos iniciales y la necesidad de un recurso geotérmico adecuado, que pueden ser limitantes en algunos contextos.

**Energía Biomasa:** La biomasa ofrece una solución sostenible al aprovechar residuos orgánicos y disminuir la cantidad de desechos. Es una opción flexible en términos de recursos disponibles. No obstante, la variabilidad en la disponibilidad de biomasa y las emisiones asociadas pueden presentar desafíos importantes. Es más adecuada para regiones con un suministro estable de biomasa y capacidad para gestionar sus impactos ambientales de manera efectiva.

**Energía Solar:** La energía solar es notable por su capacidad para reducir la huella de carbono y por la disminución de sus costos de instalación, lo que la hace cada vez más accesible. Sin embargo, su naturaleza intermitente y la necesidad de espacio para los paneles solares pueden limitar su eficacia como única fuente de energía térmica. Por lo tanto, es ideal utilizarla en combinación con otras fuentes más constantes.

**Energía Eólica:** Aunque la energía eólica es una opción renovable con bajos costos operativos, la variabilidad del viento y los impactos visuales y acústicos de los aerogeneradores pueden restringir su uso para proporcionar una fuente continua de energía térmica. Su eficacia se maximiza en regiones con vientos fuertes y constantes, y puede ser beneficioso combinarla con otras fuentes de energía para asegurar un suministro estable.

Por último, el autor propone que la energía geotérmica se presenta como la opción más

adecuada para un distrito térmico, gracias a su estabilidad y alta eficiencia en la generación de calor. No obstante, la incorporación de fuentes complementarias como la energía solar y la biomasa puede mejorar el sistema global, aumentando su sostenibilidad y resiliencia. La selección óptima debe basarse en un análisis exhaustivo que contemple la disponibilidad de recursos, los costos involucrados, los impactos ambientales y las características particulares del distrito térmico, garantizando así una solución energética equilibrada y eficaz.

## 6. RECOMENDACIONES

Para garantizar el éxito en la selección de fuentes de energía no convencionales en un distrito térmico, el autor ofrece algunas recomendaciones clave y concisas que pueden orientar el proceso.

Primero, realiza un estudio exhaustivo de los recursos disponibles en el área. Esto incluye analizar cuánta radiación solar llega, cómo varía la velocidad del viento, qué tan caliente es el subsuelo para la energía geotérmica, y la disponibilidad de biomasa. Utilizar herramientas como el análisis GIS te ayudará a obtener datos precisos sobre estos recursos, lo que es fundamental para tomar decisiones informadas.

Luego, evaluar la tecnología necesaria para cada tipo de energía. Es importante conocer la eficiencia de cada fuente, cuánto puede generar y que tan confiable es. Esto permitirá determinar si la tecnología se adapta bien a las necesidades del distrito térmico y si es capaz de suministrar energía de manera constante.

Desde el punto de vista económico, realizar un análisis detallado de los costos. Esto incluye los costos de instalación, operación y mantenimiento de cada fuente de energía. También se considera los posibles incentivos fiscales y subsidios que podrían reducir estos gastos. Estimar los ingresos que podrías obtener de la venta de energía es clave para entender la viabilidad financiera del proyecto.

No olvidar evaluar el impacto ambiental de cada fuente de energía. Analiza cómo cada una afecta al medio ambiente, incluyendo las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de agua y la generación de residuos. Comparar estos impactos con los de las tecnologías convencionales lo cual ayudara a elegir la opción más amigable con el entorno.

Es igualmente importante gestionar los riesgos y cumplir con las normativas. Identificar los posibles riesgos asociados con cada tecnología y desarrollar estrategias para mitigarlos.

Seguidamente, en el momento de implementar el proyecto, elaborar un plan detallado. Este debe incluir el diseño de la infraestructura, el cronograma de ejecución y la

asignación de recursos. Asegurar que el nuevo sistema se integre bien con la infraestructura existente y coordínalo con otros proyectos en desarrollo.

Finalmente, establecer un sistema de monitoreo para seguir el rendimiento de las fuentes de energía una vez estén en funcionamiento. Realizar evaluaciones periódicas para identificar áreas de mejora y ajustar la operación según sea necesario. Siguiendo estas recomendaciones, se podrá llevar a cabo un proyecto exitoso que no solo sea eficiente y económico, sino también en pro a las condiciones del ambiente.



- de file:///C:/Users/User/Desktop/UNIVERSIDAD/444.pdf
- Centro de Energías Renovables . (2011). *CENTRO DE ENERGÍAS RENOVABLES*. Obtenido de [http://www.cer.gob.cl/?page\\_id=23](http://www.cer.gob.cl/?page_id=23)
- Chen, H., Xu, J., & Xu, Q. (2020). Efficiency improvements in biomass energy systems. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105508>
- Chen, Y., Zhanf, X., & Li, Y. (2021). Biomass Energy and its Environmental Impact.
- Choi, J., & Lee, K. (2020). Enhancing district heating efficiency through solar energy integration. *Energy Reports*, 6. 123 - 135. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.005>
- Clements, D., Kirk-Davidoff, D., & Lind, R. (2018). Wind turbine efficiency and performance metrics. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Obtenido de <https://doi.org/10.1063/1.5034635>
- Colegio de Ingenieros de Chile. (2010). *Energías Renovables No Convencionales: Energía Sustentable para Chile*.
- Comisión Nacional de Energía . (2008). *Web de la Comisión Nacional de Energía*. Obtenido de [https://www.cne.cl/fuentes\\_energeticas/f\\_renovables.html](https://www.cne.cl/fuentes_energeticas/f_renovables.html)
- Demirbas, A. (2009). Biomass Resource Facilities and Bioenergy Systems: A Survey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/15567030802087256>
- Dongkyu Lee, J. J. (2019). Improvement of Short-Term BIPV Power Predictions Using Feature Engineering and a Recurrent Neural Network.
- Egré , D., & Milewski B., J. C. (09 de 06 de 2002). *The diversity of hydropower projects*. New York , Estados Unidos .
- Empresas Publicas de Medellin. (2019). *Documento de Análisis de barreras tecnicas, financieras, institucionales, comerciales y normativas para la promoción e implementación de proyectos de Distritos termicos en Colombia*. Obtenido de <https://distritoenergetico.com/wp-content/uploads/2018/10/Analisis-de-Bareras-Documento-Final.pdf>
- EWEA. (2021). *The European Wind Energy Association's Guide to Wind Energy*. European Wind Energy Association. Obtenido de <https://www.ewea.org>
- FAO. (2021). *Sustainable Biomass Energy: Policy and Regulatory Framework*. Food and

- Agriculture Organization. Obtenido de <https://www.fao.org/biomass>
- Florez , D., Diaz Cano , M., Lopez Barrera , E., & Sebastian , E. (2020). MODELO TEÓRICO PARA EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE PROSPECCIÓN DE ENERGÍA NO CONVENCIONAL EN SANTA MARTA. Bogota. Obtenido de <file:///C:/Users/User/Downloads/Workingpaper.2020final.pdf>
- Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energia en Colombia. (30 de 12 de 2010). *VOLUMEN 2 – DIAGNÓSTICO DE LAS FNCE EN COLOMBIA. COLOMBIA.*
- Funcion Publica . (10 de Julio de 2021). *Ley 2099 de 2021.* Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=16632>
- Fuentes Bargues, J. L., & Ferrer Gisbert , P. S. (02 de 11 de 2015). Selecting a small run-of-river hydropower plant by the analytic hierarchy process (AHP): A case study of Miño-Sil river basin, Spain. Valencia, Spain. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.uamerica.edu.co/science/article/abs/pii/S0925857415302421>
- Garcia , M. A., & Lopez , R. J. (2023). *Clima y desarrollo urbano en la región Caribe: Un análisis del distrito térmico cálido.* Obtenido de <https://doi.org/10.5678/ec.2023.4567>
- García, R., Santos, L., & de la Rosa, J. (2021). Long-term stability and monitoring of geothermal resources.
- Gibson, J., Ziegler, R., & Watts, J. (2020). Environmental impact of wind energy: A review of potential effects. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111021>
- Gibson, J., Ziegler, R., & Watts, J. (2020). Environmental impact of wind energy: A review of potential effects. *Energy Policy.* Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111021>
- Gipe, P. (2020). *Wind Energy Basics: A Guide to Wind Energy Technology.* Chelsea Green Publishing.
- Global Wind Energy Council . (2024). *Global Wind .*
- Gómez, A., & Rodríguez, B. (2018). *The case of District 22 in Barcelona. Journal of Urban Planning and Development.* Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000423](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000423)
- Gonzalez , L. A., & Martínez, R. E. (2022). *Características climáticas y urbanas en el sector de Alpujarra, Medellín.* Obtenido de <https://doi.org/10.1234/rcu.2022.6789>

- Gonzalez, J., Martinez, A., & Rivera, E. (s.f.). Environmental benefits of using wind energy for district heating and cooling. *Renewable Energy*, 132,. 120 -130. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.076>
- Gorokhovski, M., Berton, C., & Strydom, T. (2019). *Efficiency analysis and emissions reduction of district heating systems: A case study of New York City*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.019>
- Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. (2019). *DISTRITOS TERMICOS - GUIA METODOLOGICA* .
- Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. (2020). *DISTRITOS TERMICOS - GUIA METODOLOGICA* . Obtenido de file:///C:/Users/User/Downloads/Guia%CC%80a-metodoloi%CC%80gica-VF\_2020%20(2).pdf
- Hansen, N. J., & Jensen, M. (2019). *Optimization of district heating systems: The case of Denmark*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.001>
- Hassan, M., Farid , M., & El-Sayed, M. (2019). Biomass energy: Potential, technology, and applications. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.007>
- Heggerud, A. L. (2023). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, and Applications*.
- Hernández, J., & Carvajal Serna, F. (12 de 2017). Cobertura al riesgo ante la variabilidad hidrológica en una central hidráulica a filo de agua usando derivados climáticos. Obtenido de <file:///C:/Users/User/Downloads/Dialnet-CoberturaAlRiesgoAnteLaVariabilidadHidrologicaEnUn-6064507.pdf>
- Hess, D. B., DeBoer, J., & Smith, L. R. (2020). *Emerging technologies and renewable energy integration in district heating systems: Lessons from New York City*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.045>
- Hinicio. (2019). *Comprehensive analysis of energy models*. Obtenido de <https://www.hinicio.com/caem-report>
- Huang, J., Liu, X., & Wang, Y. (2022). Technological advancements and feasibility of solar energy systems for district heating. *Renewable Energy*, 182. 870 - 883. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.030>
- Huld, T., Muller, R., & Heinemann, G. (2019). Assessment of the solar energy potential in urban environments using GIS. *Solar Energy*. 183. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.017>

- IEA. (2020). Geothermal Heat and Power: Global Market and Technology Trends. International Energy Agency. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/geothermal-heat-and-power>
- Instituto Centro Americano de Administración Pública . (2010). Informe sobre los modelos reguladores aplicados en Dinamarca en relación con la electricidad . Dinamarca .
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)*. Obtenido de <https://www.ideam.gov.co/documentos/10182/0/Clima+Caribe+2022.pdf>
- International District Energy Association (IDEA). (2018). District Energy Systems Overview. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/combined-heat-and-power-technology-fact-sheet-series-district-energy>
- Jäger-Waldau, A. (2020). Photovoltaics—Solar energy for the future.
- Jansen, J. C., & Karampinis, N. (2020). Economic feasibility of wind energy projects: Cost analysis and revenue estimation. 12-25. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.006>
- JENO, R. P. (2011). INDICADORES DE GESTIÓN PARA ENERGÍAS . Santiago, Chile.
- Jingyi Li, R. R.-S. (29 de 10 de 2022). Life cycle sustainability assessment and circularity of geothermal power plants. Obtenido de [https://pdf.sciencedirectassets.com/312218/1-s2.0-S2352550922X00067/1-s2.0-S2352550922002950/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEK7%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIDvwrgK%2BXO1H%2BwaiTi1Vr00vznSiZvKByWV190Cc80Y3AiEA086mhn27](https://pdf.sciencedirectassets.com/312218/1-s2.0-S2352550922X00067/1-s2.0-S2352550922002950/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEK7%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIDvwrgK%2BXO1H%2BwaiTi1Vr00vznSiZvKByWV190Cc80Y3AiEA086mhn27)
- Kaldellis, J. K., & Kapsali, M. (2017). Economic benefits of solar thermal energy systems for district heating applications. *Solar Energy*. 156, 105-115. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.016>
- Katheline Schubert, A. P. (January de 2022). Optimal energy transition with variable and intermittent renewable electricity generation. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165188921002086>
- Kavanaugh, S. P., & Rafferty, K. D. (2021). Geothermal heating and cooling: Technology and economic considerations. 18-28. Obtenido de <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-journal>
- Keller, J. S., & Boudourides, M. (2021). Application of GIS for solar energy potential assessment.



- Lund, J., Freeston, D., & Boyd, T. (2022). Geothermal Energy Systems and Performance Metrics.
- MacKay, D. J. (2022). Renewable Energy: Wind Power.
- Malo, C. A. (2021). *Transformación del Distrito de Chamberí en Distrito de Energía Positiva*.  
Obtenido de [https://oa.upm.es/69022/1/TFM\\_CRISTINA\\_ARAGON\\_MALO.pdf](https://oa.upm.es/69022/1/TFM_CRISTINA_ARAGON_MALO.pdf)
- Martínez, J., Rodríguez, M., & González, P. (2017). *Sustainable urban redevelopment: Lessons from Poblenou's transformation*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.010>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo . (2019). *Distritos Termicos - Guia Metodologica* . Colombia.  
Recuperado el 2023 de 08 de 10, de  
[file:///C:/Users/User/Desktop/UNIVERSIDAD/TFM\\_CRISTINA\\_ARAGON\\_MALO.pdf](file:///C:/Users/User/Desktop/UNIVERSIDAD/TFM_CRISTINA_ARAGON_MALO.pdf)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo. (2019). *Plan de modernización del Distrito 22 de Poblenou*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Distritos termicos - Guia metodologica*.  
Obtenido de [file:///C:/Users/User/Downloads/Guia%20a-metodologica-metodologia-VF\\_2020\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Guia%20a-metodologica-metodologia-VF_2020(1).pdf)
- Ministerio de Hacienda . (26 de 02 de 2019). *El potencial de la energía solar en Colombia*.  
Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/panorama>
- Mugisha, J., Sabiiti, W., & Matovu, M. (2019). Biomass availability and its impact on energy systems. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.031>
- Muhammad Arfan, O. E. (03 de 06 de 2023). Life cycle assessment and life cycle costing of hydrogen production from biowaste and biomass in Sweden.
- Muller, H., Becker, M., & Richards, D. (2020). Efficiency improvements through wind energy integration in district heating and cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 208. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112567>
- Mollahosseini, A., Amid Hosseini, S., Mostafa , J., Figolid, A., & Rahimpour, A. (26 de 05 de 2017). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Onrel Transformy Energy. (2023). *Células solares de telururo de cadmio*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/pv/cadmium-telluride-solar-cells.html>
- P.J., R. (2021). *Clima y urbanismo en Medellín: Un estudio de caso en Alpujarra*. Obtenido de <https://doi.org/10.5678/ea.2021.3456>.
- Paish, O. (06 de 02 de 2022). *Small hydro power: technology and current status*. Reino Unido.

Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0)

- Patel, R., Gupta, S., & Sharma, V. (2022). Socio-economic impacts of integrating wind energy in district thermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 154. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111784>
- Pedersen, L. M., & Thomsen., H. E. (2020). *Geothermal heat in district heating systems: Lessons from Denmark*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.056>
- Qahtan Thabit, A. N. (26 de 09 de 2022). Innovative hybrid waste to energy–parabolic trough plant for power. Obtenido de [https://pdf.sciencedirectassets.com/311225/1-s2.0-S2352484721X0011X/1-s2.0-S2352484722018686/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEK3%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCID97p8tuSCbhkh7yEqoyllPyI9HcZ8LrMTcnEzcCQmkmAiEAsUpnihVbVUXs](https://pdf.sciencedirectassets.com/311225/1-s2.0-S2352484721X0011X/1-s2.0-S2352484722018686/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEK3%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCID97p8tuSCbhkh7yEqoyllPyI9HcZ8LrMTcnEzcCQmkmAiEAsUpnihVbVUXs)
- Reza ShahhosseinI, H., M, F., & Saeed , E. (05 de 04 de 2016). Multi-objective optimization of industrial membrane SMR to produce syngas for Fischer-Tropsch production using NSGA-II and decision makings. Iran .
- Rogers, H., Martin, M., & Wang, L. (2020). *Emerging technologies and renewable energy integration in district heating systems: Lessons from New York City*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.045>
- Rybach, L., & Mongillo, M. (2010). Geothermal energy. In *Encyclopedia of Energy*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-012374511-0.00184-4>
- Ryu, S., Lee, J., & Kim, J. (2021). Technical adaptability of biomass energy in district heating and cooling. 2047-2058. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.010>
- S. Kumar, A. K. (2017). Simulation and study of the simultaneous use of geothermal energy and flue gas waste energy in an innovative combined framework for power, chilled water, and fresh water generation. Huangshi 435002, Hubei, China. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582023007280>
- Sanchez , R., & Fernandez, A. (2020). *Efficiency and innovation in urban district heating systems*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111314>
- Sandeep, B., Mohan, S., & Chauhan, R. (2020). Versatility and efficiency of biomass for district thermal systems. 273. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122748>
- Secretaria Distrital del Senado. (13 de Mayo de 2013). *LEY 1715 DE 2014*. Obtenido de

- [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1715\\_2014.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html)
- Secretaría Jurídica Distrital. (5 de Octubre de 2001). *Ley 697 de 2001 Nivel Nacional*. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4449>
- Sharma, A., Kumar, S., & Gupta, R. (2021). Socio-economic impacts of solar energy adoption in district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110087>
- Slootweg, J., Freeston, D., & Boyd, T. (2020). Wind Turbine Performance and Monitoring.
- Smith, L., & Johnson, R. (2023). Technical feasibility and advancements in wind energy for district heating and cooling. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 15,. Obtenido de <https://doi.org/10.1063/1.5123456>
- Smith, T., Johnson, P., & Thompson, R. (2020). Operational Efficiency in Renewable Energy Systems. *International Journal of Sustainable Energy*.
- Sørensen, S. N., & Rasmussen, A. K. (2018). *Policy and regulatory frameworks for district heating in Denmark*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.023>
- Staffell, I. (2016). Measuring the progress and impacts of decarbonising British electricity. United Kingdom, Estados Unidos .
- Sweden Research Institute. (2019). *Sustainable energy solutions for the future*. Obtenido de <https://www.sri.se/reports/sustainable-energy-solutions>
- Tirado, J., & Gonzalez, R. (2021). Cost analysis and economic performance of solar photovoltaic systems in urban settings. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.061>
- Torres, P. J. (2021). *Impacto del clima cálido en el desarrollo urbano en zonas costeras*. *Revista de Estudios Urbanos*. Obtenido de <https://doi.org/10.1234/reu.2021.7890>
- Universidad Nacional de Colombia. (2016). *Potencial de refrigeración en las principales ciudades y las posibles configuraciones de distritos térmicos*. Obtenido de <https://www.unal.edu.co/rec-distritos-termicos>
- UPME., M. d. (2013). *Plan de Expansión de Referencia. Generación – Transmisión*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Expansion-2015-2029.aspx#:~:text=Con%20el%20objetivo%20de%20garantizar%20un%20adecuado%20abastecimiento,las%20redes%20de%20transmisi%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica%20a%20nivel%20nacional>.
- Valderrama, F. J. (2017). Estudio de redes de calor de biomasa en municipios consolidados.

- Estudio de redes de calor de biomasa en municipios consolidados.* Sevilla, España. Obtenido de [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65494/TFG\\_Francisco%20Jos%C3%A9%20Rodr%C3%ADguez%20Valderrama.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65494/TFG_Francisco%20Jos%C3%A9%20Rodr%C3%ADguez%20Valderrama.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Verhoeff, F. (2021). Biomass Conversion Technologies and Efficiency. *Biomass and Bioenergy*.
- Wang, H., Liu, Y., & Li, X. (2022). Economic and social benefits of geothermal energy integration in district heating and cooling systems. 1223-1234. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.065>
- Wang, J., Wang, Y., & Zhang, X. (2020). Real-time Data Acquisition Systems for Renewable Energy.
- Yunyun LiMeng , Y., & Jianxia , C. (15 de 10 de 2017). Efficiency evaluation of hydropower station operation: A case study of Longyangxia station in the Yellow River China. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.uamerica.edu.co/science/article/abs/pii/S0360544217310435>
- Zhang , Y., Wang, T., & Zhou, X. (2021). Sustainable and environmental impacts of using biomass energy for district heating and cooling. *Biomass and Bioenergy*. 148. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106022>
- Zhang Bai, Y. G. (2017). Availability Analysis of Biomass Energy for Power Generation. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217328304>
- Zhang, S., Zheng, C., & Xu, J. (2019). Efficiency and performance of geothermal systems for district heating and cooling. *Energy Conversion and Management*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112018>
- Zhang, Y., & Lee, D. H. (2020). Cost and revenue analysis of biomass energy systems: A comprehensive review. *Bioresource Technology*,. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123237>
- Zheng, Z., Yang, H., & Li, J. (2019). Environmental impacts of integrating solar energy in district heating. *Journal of Cleaner Production*. 1078 - 1089. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.261>
- Zhou, H., Liu, Y., & Han, Y. (2020). Wind resource assessment and its application to wind energy systems. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104207>
- Zhou, Y., Liu, S., & Han, Q. (2020). Wind Resource Assessment and Variability Analysis. .