



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO EN UN CENTRO POBLADO DE LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS DE LA REGIÓN CARIBE

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

John Harvey González Gómez

Genny Carolina Pinzón Agredo

Dirección:

Andrés Mauricio Pérez Gordillo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro en mi carrera profesional a mis hijos, Samuel David y Samantha Gonzalez, como un ejemplo a seguir y una meta alcanzable para ellos en el futuro.

John González

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que ha tenido conmigo. También quiero expresar mi agradecimiento a mi madre, quien me brindó la vida y me proporcionó una educación sólida que me ha permitido llegar hasta donde estoy hoy. Pero, sobre todo, quiero dar las gracias a mi familia, a mi esposa Alejandra Rodríguez y mis hijos, Samuel David y Samantha Gonzalez; su apoyo, paciencia y comprensión han sido fundamentales para que lograra completar este importante hito en mi carrera profesional.

Por último, pero no menos importante, quisiera reconocer y agradecer a mi compañera Genny Agredo por su compromiso y dedicación en todo momento. Su ayuda y apoyo han sido invaluable en este camino hacia el éxito.

John González

A Dios, mis padres Hernando Pinzón y Oliva Agredo por todo su apoyo y a mi compañero John por su ayuda en el desarrollo de este proyecto.

Genny Pinzón Agredo

RESUMEN

Los centros poblados de la región Caribe colombiana en su mayoría hacen parte de las Zonas No Interconectadas (ZNI) del país, es decir, no cuentan con conexión a la red de distribución eléctrica, por lo que no se tiene acceso continuo a la electricidad e incluso en muchos lugares no se cuenta con este servicio.

Una de las soluciones a este problema es la puesta en marcha de proyectos de generación eléctrica a partir del uso de fuentes renovables no convencionales como el sol o el viento, aprovechando el potencial que tiene la región de estos recursos, sin embargo, existe una limitante en cuanto al tiempo de disponibilidad de la generación de energía eléctrica, por lo que es necesario para garantizar un suministro continuo de electricidad la incorporación de un sistema de almacenamiento.

A través de este proyecto se busca analizar la viabilidad técnica de la implementación de un sistema de almacenamiento térmico de energía (TES) que garantice a los usuarios del centro poblado Nazareth el acceso continuo a la electricidad. Para el desarrollo de este análisis es necesario (i) definir la demanda de energía de la zona, (ii) identificar los tipos de TES con sus principales parámetros de operación, los avances que se tiene a nivel mundial de esta tecnología de almacenamiento a mediana y pequeña escala, (iii) seleccionar la mejor opción a ser usada en el sistema de generación de electricidad en este centro poblado, (iv) a partir de estas definiciones realizar el dimensionamiento del sistema de almacenamiento térmico.

ABSTRACT

Most of the populated centers of the Caribbean region of Colombia fall under the Non-Interconnected Zones category of the country, characterized by the absence of an electric distribution network. These areas do not have continuous access to electricity and some places even lack the service completely.

One of the solutions to this problem is the execution of projects related to electric energy generation from non-conventional renewable sources, such as sunlight or wind, relying on the resource potential of the region. Nevertheless, there is limiting time availability for electric power generation, and thus, to ensure uninterrupted power supply there is a need to incorporate an energy storage system.

This Project aims to analyze the technical variability in developing a thermal energy storage system (TES) that guarantees continuous access to electricity for residents of Nazareth, a populated center within the Caribbean region of Colombia. In order to execute the analysis, there is a need to (i) define the energy demands of the area; (ii) identify different types of TES, their main operating parameters and global advancements in small and medium-scale technologies; (iii) select the most suitable TES option for electricity generation in the selected populated center; and (iv) base on the previous framework, develop a sizing plan of an appropriate thermal storage system.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	2
Capítulo 2 OBJETIVOS	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	5
Planteamiento del problema.....	5
Justificación	6
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
4.1 Zonas no interconectadas.....	7
4.2 Condiciones generales de la Región Caribe.....	8
4.2.1 Condiciones Climáticas Región Caribe	8
4.2.2 Potencial Solar en el Caribe Colombiano	8
4.3 Sistemas de Almacenamiento de Energía.....	9
4.3.1 Sistemas de Almacenamiento Térmico de Energía – TES	10
4.3.2 Baterías de Carnot.....	12
Capítulo 5 METODOLOGÍA	14
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
6.1 Perfil de Carga	15
6.1.1 Caso estudio Nazareth – La Guajira	15
6.1.2 Curva de demanda.....	16
6.1.3 Curva de generación fotovoltaica	17
6.2 Selección de tecnología.....	18
6.2.1 Tipos de tecnología en Sistemas de Almacenamiento Térmico de Energía TES	18

6.2.1.1 Almacenamiento de calor sensible -SHS	18
6.2.1.2 Almacenamiento de calor latente o cambio de fase – LHS	19
6.2.1.3 Almacenamiento termoquímico – TCS o termoquímico de calor – THS.....	19
6.2.2 Características de las tecnologías TES	19
6.2.3 Funcionamiento de un Sistemas TES	20
6.2.4 Criterios de selección del sistema TES	22
6.3. Dimensionamiento del sistema TES	24
6.3.1 Cálculos del Ciclo Rankine.....	26
6.3.1.1 Turbina.....	26
6.3.1.2 Bomba.....	28
6.3.1.3 Eficiencia Térmica.....	28
6.3.2 Ciclo de Sal Fundida.....	30
6.3.2 Eficiencia Completa del Sistema	34
Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	35
REFERENCIAS.....	36
APÉNDICE.....	38
ANEXOS	39

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Condiciones de irradiación solar en La Guajira.	9
<i>Tabla 2.</i> Densidad de almacenamiento energía de los sistemas TES.	11
<i>Tabla 3.</i> Equipos del sistema de generación Eléctrico.	16
<i>Tabla 4.</i> Parámetros de las tecnologías TES.].	19
<i>Tabla 5.</i> Ventajas y desventajas de las tecnologías TES.	20
<i>Tabla 6</i> Comparación de parámetros en los arreglos de Baterías de Carnot.	21
<i>Tabla 7.</i> Materiales de almacenamiento por calor sensible y latente.	22
<i>Tabla 8.</i> Matriz de selección tecnología TES.	23
<i>Tabla 9.</i> Matriz de selección ciclo termodinámico.	23
<i>Tabla 10.</i> Parámetros de la turbina tomados del datasheet.	27
<i>Tabla 13.</i> Datos tipos de nitratos utilizados para almacenamiento termico.	31
<i>Tabla 14.</i> Registro de excedentes de energía promedio.	31
<i>Tabla 15.</i> Sal requerida por el método 1.	32
<i>Tabla 16.</i> Resultado flujo másico y masa de sal según el tipo de nitrato.	33
<i>Tabla 17.</i> Masa sal requerida método 2.	33
<i>Tabla 18.</i> Masa total de sal requerida.	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución ZNI en el territorio nacional	7
Figura 2. Niveles de radiación solar horizontal en el Caribe Colombiano	9
Figura 3. Posibles configuraciones de una batería de Carnot	13
Figura 4. Esquema de una batería de Carnot	13
Figura 5. Metodología del proyecto.....	14
Figura 6. Sistema eléctrico actual en Nazareth y Puerto. Estrella – La Guajira	15
Figura 7. Curva de carga promedio diaria mensual	16
Figura 8. Perfiles horarios promedio	17
Figura 9. Curva de generación fotovoltaica.....	18
Figura 10. Esquema de un sistema TES.....	21
Figura 11. Esquema del almacenamiento térmico y generación eléctrica.	25
Figura 12. Esquema del ciclo Rankine	26
Figura 13. Ciclo de sal Fundida	30

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La transición energética a la que se está apuntando a nivel global, busca reemplazar los combustibles fósiles para suplir la demanda energética con el uso de fuentes de energía renovables no convencionales aprovechando los recursos naturales como el sol, el viento, los mares, los ríos, la geotermia y la biomasa, dándole a los países la oportunidad de aprovechar estos recursos y generar energías más limpias para así cumplir con los compromisos ambientales enfocados a frenar el cambio climático reduciendo las emisiones de gases efecto invernadero como el dióxido de carbono CO₂ y el metano CH₄.

Sin embargo la intermitencia de la potencia disponible en las fuentes de energía no convencionales ha evidenciado la necesidad del desarrollo de tecnologías de almacenamiento de la energía que favorezcan la integración de estas fuentes no convencionales, siendo los sistemas de Almacenamiento Térmico de Energía (TES) una de las opciones de uso a mediana y pequeña escala, ya que tienen la capacidad de manejar potencias entre los 0,001 MW hasta 10 MW [1] lo cual permitirá suplir las necesidades energéticas de la población sin fluctuaciones durante los periodos de tiempo en que las fuentes de energía renovables no convencionales tengan variaciones o esté fuera de línea.

En la región Caribe colombiana conformada por ocho departamentos se tiene un amplio potencial en energías renovables no convencionales, especialmente la solar fotovoltaica tiene condiciones favorables, por lo que en esta región están concentrados alrededor de 122 proyectos de generación eléctrica a partir de energías renovables no convencionales [2], sin embargo en esta región existen zonas no interconectadas (ZNI) a la red de distribución eléctrica, lugares a los cuales la electricidad no ha llegado o se presentan intermitencias, por lo que incorporar un sistema de almacenamiento térmico (TES) alimentado por un sistema fotovoltaico local, es una alternativa que permitirá corregir las falencias en el suministro de energía eléctrica en estos sectores de la región, dando acceso a las familias a un abastecimiento constante de electricidad durante las horas en las que la fuente solar no esté funcionando.

Para el desarrollo de este proyecto se tomará como caso de estudio el corregimiento de Nazareth perteneciente al municipio de Uribia ubicado en el departamento de la Guajira. Este corregimiento cumple con tres características fundamentales: (1) su sistema eléctrico cuenta con un sistema de telemetría y por lo cual es posible conocer la curva de consumo de electricidad, (2) la generación de energía se constituye por la configuración de un sistema híbrido conformado por un sistema fotovoltaico, dos generadores a diesel y un banco de baterías; y (3) pertenece a la región Caribe Colombiana. La información es presentada por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) y es fuente de consulta de libre acceso.

Otro capítulo del proyecto se enfocará en la identificación y descripción de las tecnologías de almacenamiento térmico (TES), sus principales parámetros y los diferentes materiales existentes para almacenar energía en forma de calor, lo cual permitirá seleccionar el sistema TES que pueda ser usado en el corregimiento de estudio. Posterior a partir la carga, la selección de la tecnología TES y el material de almacenamiento se harán los cálculos para el dimensionamiento del sistema TES y se finalizará el documento con las recomendaciones y conclusiones del estudio.

Capítulo 2

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la viabilidad técnica para la implementación de un Sistema de Almacenamiento Térmico en el centro poblado Nazareth, zona no interconectada de la Región Caribe.

Objetivos específicos

- Estimar el perfil de carga que deberá ser respaldado por el sistema de almacenamiento térmico.
- Seleccionar la tecnología TES aplicable al proyecto.
- Dimensionar el sistema de almacenamiento térmico de energía seleccionado.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Planteamiento del problema

Con la transición energética se busca reemplazar el uso de combustibles fósiles para suplir la demanda de energía a través de la incorporación de fuentes de energía renovables no convencionales aprovechando los recursos naturales como el sol, el viento, los mares, los ríos, la geotermia y la biomasa, sin embargo la inestabilidad en la generación eléctrica de estas fuentes ha evidenciado la necesidad de la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía que favorezcan la integración de estas al sistema eléctrico en cada país, siendo los sistemas de Almacenamiento Térmico de Energía (TES) una de las posibles tecnologías para ser implementadas a mediana y pequeña escala con el fin de suplir las necesidades energéticas de la población, solucionando las fluctuaciones durante los periodos de tiempo en los que el recurso renovable presente variaciones o este fuera de línea.

La Costa Caribe Colombiana tiene un amplio potencial en energías renovables, especialmente la solar fotovoltaica, por lo que en esta región están concentrados la mayoría de los proyectos de este tipo en el país. Si bien hay gran potencial en cuanto a la instalación de plantas fotovoltaicas, es conocido que hay lugares a donde la electricidad no ha llegado o se presentan intermitencias, especialmente en los sectores rurales.

Contar con un sistema TES que tenga gran capacidad de almacenamiento y que sea compatible con los proyectos que se están desarrollando en la región Caribe es un avance importante para terminar con los problemas de desabastecimiento eléctrico en los sectores apartados de la región.

En este proyecto se busca identificar cuál de los tipos de TES es el que mejor se adapta a las necesidades del consumidor final y que sea compatible con la instalación local de un sistema fotovoltaico, en los sectores pertenecientes a las Zonas No Interconectadas – ZNI de la región.

Justificación

El Caribe colombiano actualmente cuenta con un alto potencial en temas energéticos, se tienen alrededor de 122 proyectos de energías renovables entre parques eólicos y plantas fotovoltaicas ubicados estratégicamente en los ocho departamentos que la conforman [2], además por políticas nacionales y departamentales se están desarrollando proyectos de electrificación en las zonas no interconectadas a la red de distribución eléctrica nacional, sin embargo en la mayoría de estos proyectos no se cuenta con un sistema de almacenamiento que garantice la continuidad del servicio de electricidad en las horas de la noche por los altos costos que significa tener un banco de baterías lo que no hace viable económicamente el proyecto, por lo que se tienen sistemas híbridos que incorporan una planta de generación a base de Diesel.

A través de los sistemas TES para garantizar la continuidad del servicio, por lo tanto, se podría sustituir el uso de baterías e incluso de las plantas generadoras a base de combustibles fósiles que contaminan el ambiente por las altas emisiones de CO₂. La energía proveniente del sistema solar fotovoltaico se almacenará en el sistema TES y cuando sea necesario esta se transformará en energía eléctrica para su uso local.

Con este proyecto se busca evaluar la viabilidad técnica de la implementación de un sistema TES para ser usado en los hogares de las zonas no interconectadas de la Región Caribe, inicialmente desarrollado para el corregimiento de Nazareth. Como trabajo futuro se plantea realizar el análisis en otros sectores de la región y del país, ya que es una solución que puede garantizar el suministro continuo de electricidad cuando se tiene como origen de generación las fuentes de energía renovables no convencionales.

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hará la descripción de los conceptos que se tendrán en cuenta para el desarrollo del proyecto, iniciando por las zonas no interconectadas, caracterización general de las condiciones climáticas de la región Caribe colombiana y por último una definición de las baterías de Carnot y los sistemas TES.

4.1 Zonas no interconectadas

La ley 855 de 2003 en el artículo 1 se define una zona no interconectada así: *“Para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectadas al Sistema Interconectado Nacional, SIN.”* [3]. En la Figura 1, se observa la distribución de las ZNI en el mapa del territorio nacional, las cuales corresponden al 53% del total del territorio nacional, donde el 79% corresponde a zonas rurales, las ZNI están distribuidas en 18 departamentos, 77 municipios y 16 áreas no municipalizadas, para un total aproximado de 403 millones de viviendas sin servicio de energía eléctrica [4].



Figura 1. Distribución ZNI en el territorio nacional. Fuente: tomado de [4]

4.2 Condiciones generales de la Región Caribe

4.2.1 Condiciones Climáticas Región Caribe

En general, la región Caribe colombiana se caracteriza por tener un clima cálido tropical con una temperatura promedio entre los 20°C en épocas de invierno y los 30°C en épocas de verano, estas condiciones provocan que se tengan huracanes y tormentas tropicales y entre los meses de mayo y octubre se presenta grandes precipitaciones con niveles que pueden alcanzar hasta los 178 mm/mes [5].

También existe una zona de la región, en la península de La Guajira donde se presenta un clima árido y seco con altas temperaturas que se promedian en los 29°C [6]. Además, en la Sierra Nevada de Santa Marta se tiene temperaturas de 0°C en el pico de la sierra y de 30°C en la zona baja. En esta zona se presentan dos periodos de lluvias diferentes, uno entre mayo a junio, y el otro, entre septiembre a noviembre [5].

4.2.2 Potencial Solar en el Caribe Colombiano

La región Caribe colombiana tiene alto potencial energético de fuentes renovables no convencionales como la eólica y solar, teniendo esta última una expansión considerable en los últimos años gracias a las horas sol efectivas en el día y los altos niveles de irradiación solar directa, la cual que está entre 3,72 kWh/ m² y 5,77 kW/m² según datos tomados de Global Solar Atlas [7]. Actualmente se están instalando 100 MW y alrededor de 220 proyectos con capacidad de generación de 2800 MW están en proceso de aprobación por parte de las autoridades [8].

El departamento de La Guajira tiene quizás el mayor potencial solar de la región, en la Figura 2, se aprecia gráficamente los altos niveles de irradiación solar horizontal que oscilan entre 5 kWh/ m² y 6 kWh/ m² [9], a demás en la Tabla 1, se muestran datos adicionales tomados de la página Global Solar Atlas de irradiación en este departamento.

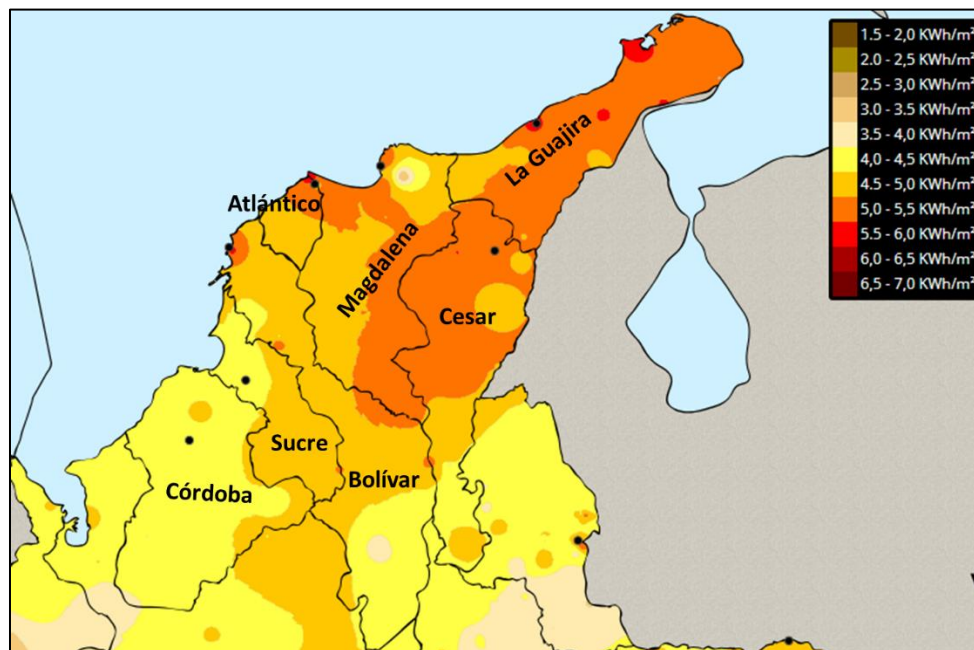


Figura 2. Niveles de radiación solar horizontal en el Caribe Colombiano. Fuente: Tomado de [9]

Salida de potencia fotovoltaica específica	3,37 – 5,10 kWh/kWp
Irradiación normal directa	2,45 – 6,07 kWh/m ²
Irradiación horizontal global	4,12 – 6,35 kWh/m ²
Irradiación horizontal difusa	1.95 - 2.57 kWh/m ²

Tabla 1. Condiciones de irradiación solar en La Guajira. Fuente: Tomado de [7]

4.3 Sistemas de Almacenamiento de Energía

Estos sistemas almacenan la energía para posteriormente entregarla el momento que sea requerida, generalmente involucra un proceso de conversión ya sea químico o térmico para transformar la energía almacenada en energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en capturar y acumular la energía excedente generada en el momento que la demanda es baja y luego la libera a la red eléctrica cuando la demanda es alta, esta acción ayuda a estabilizar la red y permite la disponibilidad de la energía eléctrica en todo momento.

A través de los años se han desarrollado diferentes tecnologías de almacenamiento entre ellas las centrales hidroeléctricas, baterías electroquímicas, supercondensadores, superconductores

(SEMS), volantes de inercia, almacenamiento por aire comprimido (CAES), celdas de combustible, baterías de Carnot [10] entre otros.

4.3.1 Sistemas de Almacenamiento Térmico de Energía – TES

Los Sistemas de Almacenamiento Térmico (TES) hacen parte de las nuevas tecnologías en proceso de desarrollo que permitirían solucionar la intermitencia de suministro energético en los periodos en que las fuentes solar o eólica no estén en funcionamiento. Un sistema TES permite almacenar energía térmica en un medio a altas o bajas temperaturas por un periodo determinado de tiempo [11] para luego ser usada para la calefacción, refrigeración o generación de electricidad [1].

Algunos de los beneficios de los sistemas TES es que no generan emisiones de CO₂, bajos costos de mantenimiento, flexibilidad en la operación, capacidad de almacenamiento a temperatura constante y superior por unidad de peso, sin embargo, la eficiencia de estos sistemas es baja y puede presentar altas pérdidas térmicas [11] si no se cuenta con un aislamiento del medio adecuado.

La energía térmica puede ser almacenada de tres formas: aprovechando el calor sensible de los cuerpos, por calor latente al cambiar de fase un material o por medio de una reacción química conocido como almacenamiento termoquímico [12]. En el almacenamiento por calor sensible se eleva la temperatura del material ya sea líquido o sólido durante la fase de carga y en la etapa de descarga la temperatura decrece, en este sistemas en el periodo de almacenamiento se tienen pérdidas de calor [12] [13]. El almacenamiento por calor latente (PCM por sus siglas en inglés) usa el cambio de fase del material para almacenar la energía térmica, en el proceso de carga y descarga la temperatura permanece constante, sin embargo, se pierde energía en la etapa de almacenamiento [13] [12], por último el almacenamiento termoquímico usa el calor captado para generar una reacción química endotérmica reversible [14], al ser reversible la energía térmica se recupera mediante la reacción inversa [15].

En la Tabla 2, se presenta una comparación de las densidades de almacenamiento de energía de los tres sistemas TES.

Sistema TES	Medio de almacenamiento	Densidad de almacenamiento (MJ/m³)
Calor Sensible	Agua a 50°C	104.5
Calor Latente	Hidratos (20-150 °C)	~ 350
	Fluoruros (500-1000 °C)	~ 1300
Termoquímico	Temperaturas superiores a 600 °C	~ 3500

Tabla 2. Densidad de almacenamiento energía de los sistemas TES. Tomado de [12].

A lo largo de los años se ha venido realizando diferentes investigaciones que permitan evaluar la factibilidad del uso de este tipo de tecnología de almacenamiento de energía en los sistemas de generación eléctrica a base de fuentes de no renovables, para el almacenamiento por calor latente estudios analíticos mostraron que el uso en cascada de sistemas PCM a diferentes rangos de temperatura pueden mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas de energía en la fase de carga, mostrando que el uso de PCMs es una solución para un eficiente almacenamiento térmico de energía y permiten aplicar técnicas para mejorar la capacidad de almacenamiento de energía [16]. Otros autores tomaron un sistema de energía integrado por subsistemas de colectores de energía solar (CSP), almacenamiento térmico por calor sensible y de generación de energía a través del Ciclo Rankine Orgánico (ORC), conectados por un fluido de transferencia de calor, y mediante simulación en MATLAB y Aspen HYSYS, determinaron el diseño óptimo del proceso, usando diferentes fluidos de trabajo y se obtuvo una mejora la eficiencia térmica del subsistema OCR entre el 11.2% y 18.7% y del sistema general entre 6.9% y 12% y que el tolueno como fluido de trabajo es la mejor opción [17]. Si bien el almacenamiento termoquímico es el menos usado se ha realizado estudios para identificar cuáles son las combinaciones de materiales con mayor potencial para este tipo de almacenamiento, se identificó que la reacción química sólido – gas entre el amoníaco NH₃ y el sulfato de cobre (CuSO₄) tiene los mejores rendimientos en reversibilidad y en contenido energético con una densidad de almacenamiento de energía [18].

Por otra parte se tienen investigaciones que permiten a nivel de laboratorio dimensionar y optimizar el funcionamiento de plantas combinadas de calor y energía (CHP) y unidades, evidenciando que la inclusión de una unidad TES en una planta CHP mejora la capacidad de

funcionamiento de esta al aumentar el número de horas de trabajo y mejora los beneficios financieros [19], otros autores desarrollaron un modelo termodinámico y a través de System Advisor Model realizaron la simulación para determinar el óptimo tamaño de una central solar de torre de 50 MW con sal fundida como sistema TES tomando los valores de la irradiación anual de Delingha y Yushu, evidenciando que las horas de almacenamiento óptimas están determinadas por la correcta selección de la irradiancia normal directa (DNI), la disponibilidad del recurso solar y el adecuado diseño del colector solar [20].

4.3.2 Baterías de Carnot

El modelo de una batería de Carnot es una opción que existe actualmente para el almacenamiento ya que permite hacer la transformación de energía eléctrica en energía térmica y viceversa, a través de diferentes arreglos usando el ciclo Brayton o el ciclo Rankine (Figura 3).

El funcionamiento de una Batería de Carnot (CB) se basa en la inyección de energía eléctrica al sistema para ser almacenada como energía térmica y posteriormente ser aprovechada dicha energía en la generación de trabajo mecánico. En la Figura 4 se muestra el esquema básico de funcionamiento, a través de la bomba de calor se genera una diferencia de temperatura entre los dos reservorios; entre A y B se tiene una expansión isotérmica con el primer reservorio a una temperatura alta T_1 , entre B y C se tiene una expansión adiabática realizando un trabajo convirtiendo energía térmica en energía mecánica, entre C y D se tiene el segundo reservorio con una temperatura baja T_2 donde se tiene una compresión isotérmica y finalmente entre D y A se tiene una compresión adiabática con una bomba de calor que aumenta la presión y la temperatura [21].

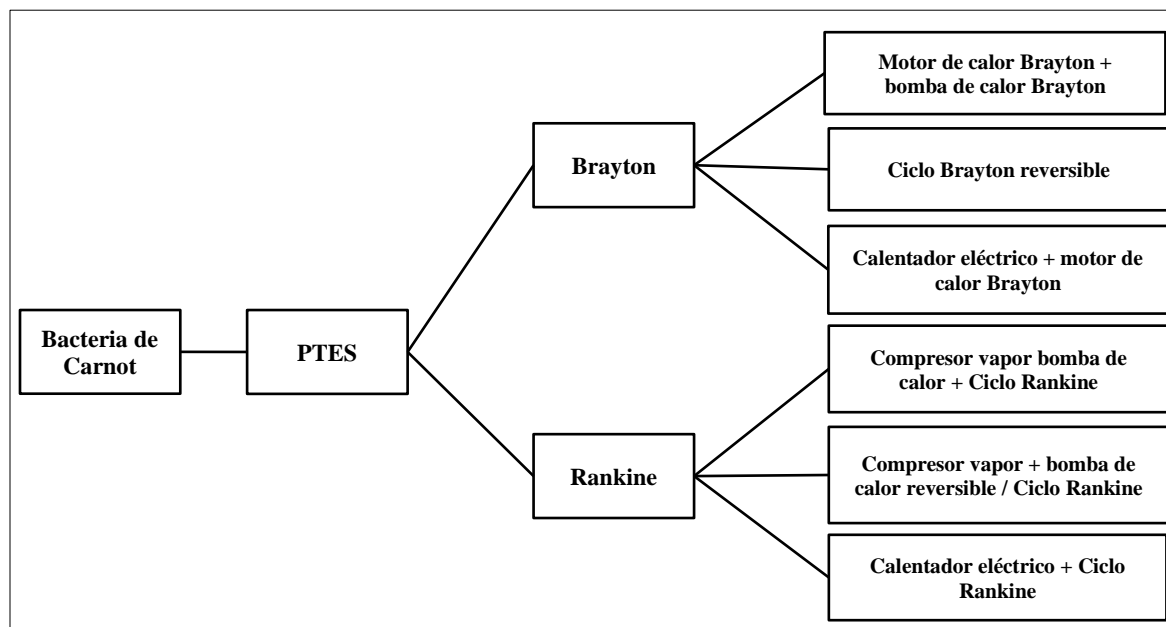


Figura 3. Posibles configuraciones de una batería de Carnot. Fuente: Tomado de [22]

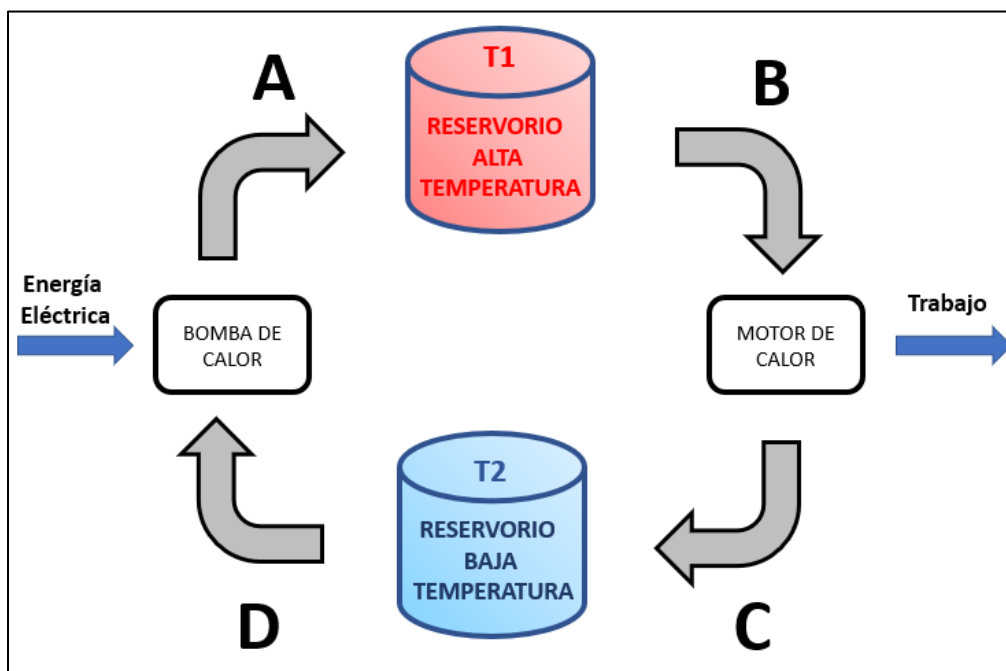


Figura 4. Esquema de una batería de Carnot. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5

METODOLOGÍA

Durante el desarrollo de este proyecto se realizará una investigación de tipo exploratorio que permitirá conocer y analizar las condiciones climáticas, potencial de irradiación solar, generación y consumo de energía, del corregimiento de Nazareth en el departamento de La Guajira a través de la revisión de diversas fuentes de información, y con estos datos modelar la curva de carga de la zona.

Para el cumplimiento del segundo objetivo es necesario hacer una revisión documental a partir de estudios realizados por diferentes autores que permitan conocer los avances tecnológicos del almacenamiento térmico de energía (TES), la eficiencia de estos sistemas para la generación de energía tomado como base variables tales como la temperatura de trabajo, los materiales de almacenamiento y las propiedades de los de estos, ya que con base en esta información se hará la selección de la tecnología TES para el dimensionamiento.

Finalmente, se realizará el dimensionamiento del sistema de almacenamiento, tomando como base la información identificada de las condiciones de trabajo de los diferentes equipos que componen el sistema, del ciclo termodinámico seleccionado para la descarga, la generación de energía, calculando variables como temperaturas de trabajo, presiones, flujo másico, trabajo generado, calor transferido, eficiencia térmica del sistema y demás que permitan analizar la viabilidad técnica de implementar este sistema de almacenamiento de energía en el lugar de estudio. En la Figura 5, se muestra el paso a paso de la metodología del proyecto.

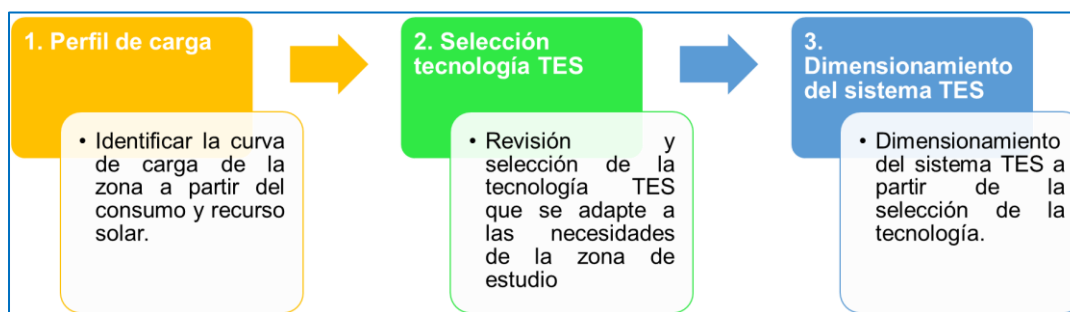


Figura 5. Metodología del proyecto. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Perfil de Carga

6.1.1 Caso estudio Nazareth – La Guajira

Nazareth es un corregimiento del municipio de Uribia ubicado en el departamento de La Guajira, aproximadamente a 8 horas por carretera desde Riohacha, capital del departamento. Las coordenadas geográficas son latitud $12^{\circ} 20' 52.14''$ N, longitud $71^{\circ} 16' 8.80''$ O y Puerto Estrella latitud $12^{\circ} 20' 52.14''$ N y $71^{\circ} 18' 45.76''$ O. [23]

La electricidad en el corregimiento es proporcionada por un sistema de generación híbrido, que cuenta de un sistema fotovoltaico, dos generadores Diesel y un banco de baterías, en la Tabla 3 se muestran las capacidades de los equipos y en la Figura 6 se presenta el esquemático de la conexión del sistema eléctrico en sitio, el cual se comparte con el corregimiento de Puerto Estrella.

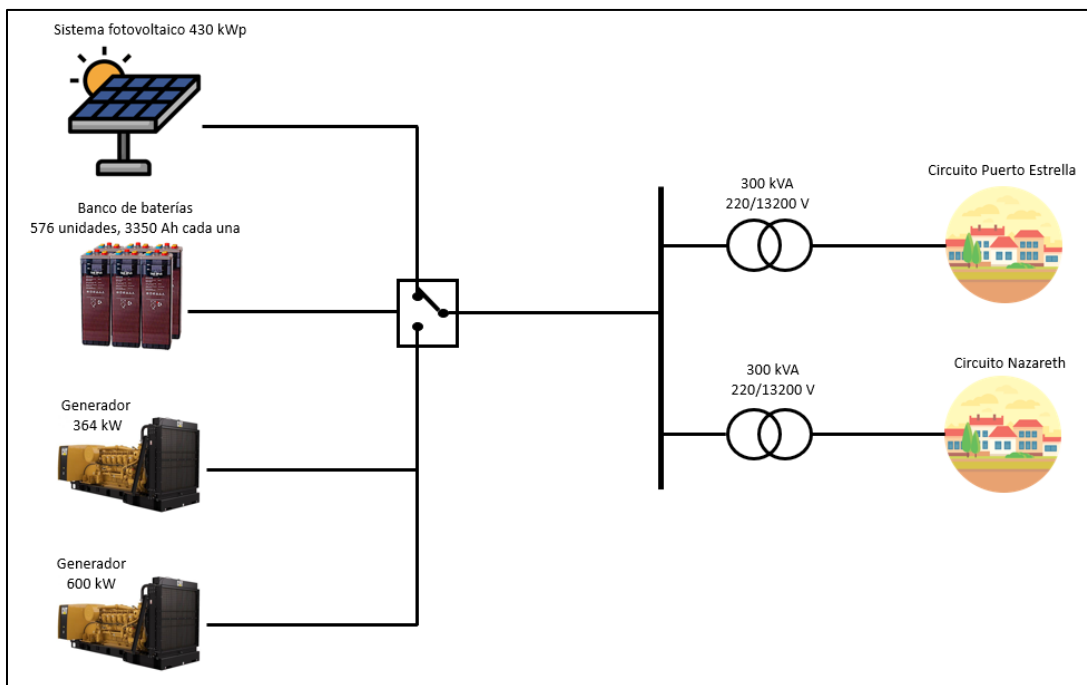


Figura 6. Sistema eléctrico actual en Nazareth y Puerto. Estrella – La Guajira. Fuente: Tomado de [23]

Sistema de Generación	
Equipo	Capacidad
Sistema fotovoltaico	429,36 kWp
Generador SDMO	364 kW
Generador Caterpillar	600 Kw
Banco de baterías (576 baterías)	3350 Ah 2V

Tabla 3. Equipos del sistema de generación Eléctrico. Fuente: Tomado de [23]

6.1.2 Curva de demanda

La curva de demanda de energía de la Figura 7 se construyó a partir del promedio diario generado para el mes de agosto del 2022 según el reporte de telemetría presentado por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) para la localidad de Nazareth en el municipio de Uribia. La curva incluye el consumo de los dos corregimientos: Nazareth y Puerto Estrella [23]. Para etapas posteriores en el desarrollo de ingeniería, se podrá hacer un análisis de la curva de demanda registrada durante el año para validar la potencia requerida para los diferentes equipos.

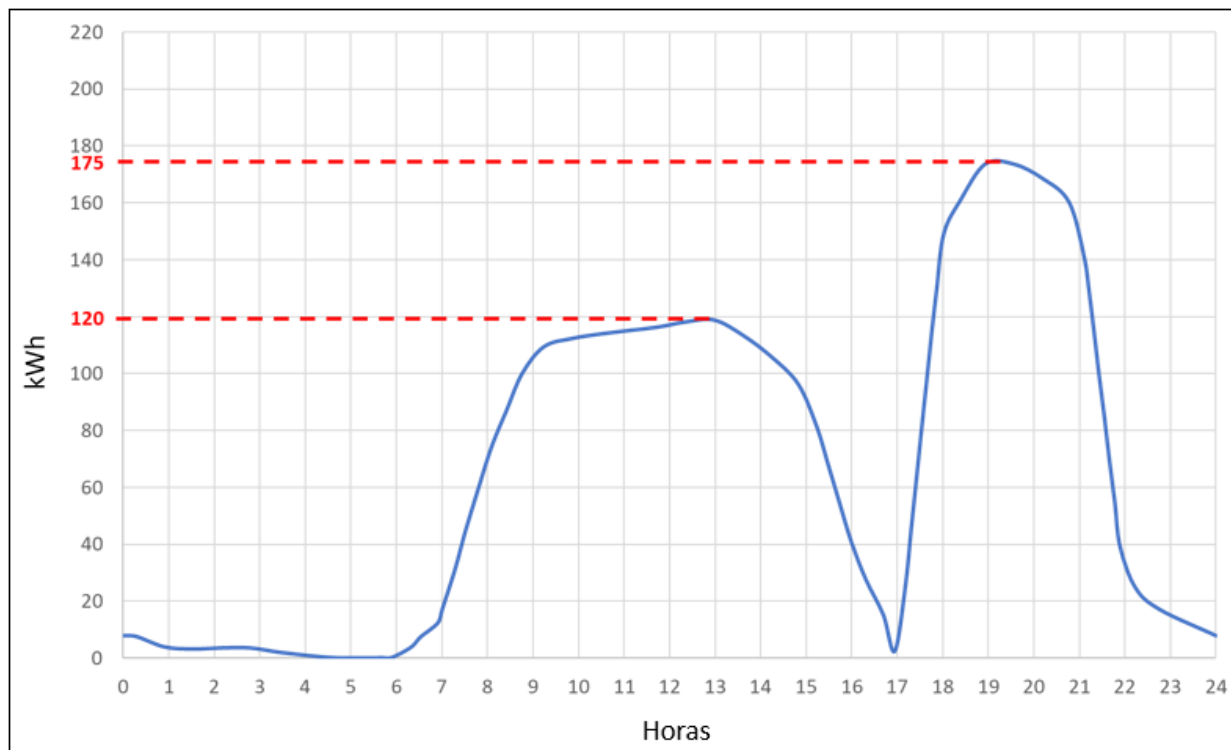


Figura 7. Curva de carga promedio diaria mensual. Fuente: Tomado de [23]

Como se observa la demanda se divide en tres ciclos: el primero entre las 6:00 a.m. hasta 5:00 p.m. corresponde a la generación de energía a través de un sistema fotovoltaico de 430 kWp y alcanza un consumo máximo de 120 kWh, el segundo ciclo entre las 5:00 p.m. hasta las 10:00 p.m. soportado por las plantas de generación de 600 kW y 364 kW, a las 7:00 p.m se observa el pico más alto de consumo para esta población el cual llega a los 175 kW y el tercer ciclo entre las 10:00 p.m. hasta las 6:00 a.m. donde la demanda cae a valores entre 2 kW a 8 kW.

6.1.3 Curva de generación fotovoltaica

Para determinar la curva de generación fotovoltaica en el corregimiento de Nazareth, se utilizó la plataforma Global Solar Atlas, allí se simuló el sistema fotovoltaico instalado de 430 kWp con un montaje en piso a gran escala, se tomaron ángulos de azimut e inclinación de los paneles de 180° y 12°, respectivamente. Ver Anexo 1.

En la Figura 8, se muestran los perfiles horarios promedio que se tendrían en la zona según los parámetros anteriormente planteados. El mes con el menor promedio de generación de energía es diciembre con un total de 1580 kWp, tomando este escenario para construir la curva de generación.

Potencia fotovoltaica total producida [kWh]												
	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6			0	1	3	3	2	1	1	1	1	0
6 - 7	12	13	21	27	32	31	29	30	35	39	31	19
7 - 8	66	67	71	72	76	81	82	88	97	101	91	75
8 - 9	122	122	124	120	124	137	145	158	165	162	146	129
9 - 10	168	170	169	157	163	182	199	212	216	208	187	169
10 - 11	205	210	210	191	196	216	238	251	251	240	215	201
11 - 12	228	242	241	218	224	253	273	275	268	250	227	214
12 - 13	238	257	251	231	226	246	273	282	268	239	224	219
13 - 14	230	251	240	219	212	230	254	264	247	215	200	206
14 - 15	197	218	209	186	179	195	214	222	203	173	162	174
15 - 16	148	167	156	135	126	138	153	158	140	115	106	122
16 - 17	74	91	83	67	63	71	80	79	64	46	39	51
17 - 18	9	dieciséis	dieciséis	13	14	18	21	18	9	2	1	2
18 - 19					0	0	0	0				
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Suma	1,699	1,826	1,791	1,638	1,637	1,800	1,962	2,037	1,964	1,790	1,629	1,580

Figura 8. Perfiles horarios promedio. Fuente Tomado de [7]

A partir los datos anteriores se construyó la curva de generación y demanda como se muestra en la Figura 9, ésta incluye el exceso de energía generada por la planta solar, la cual es la energía disponible para almacenar en el en sistema TES.

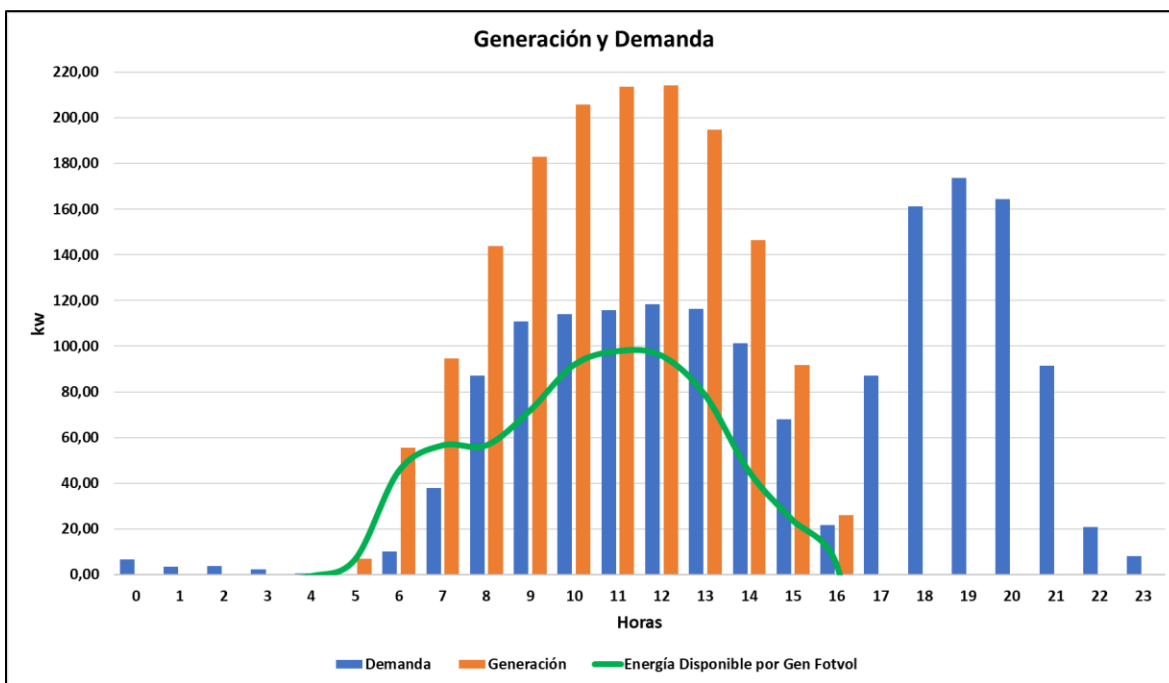


Figura 9. Curva de generación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

6.2 Selección de tecnología

6.2.1 Tipos de tecnología en Sistemas de Almacenamiento Térmico de Energía TES

Las tecnologías TES se dividen en tres: almacenamiento por calor sensible, almacenamiento por calor latente y almacenamiento termoquímico.

6.2.1.1 Almacenamiento de calor sensible -SHS

Se basa en el almacenamiento de energía térmica aprovechando la capacidad calorífica al calentar o enfriar un material ya sea líquido o sólido, los más comunes son agua, arena, sales fundidas, rocas, concreto o ladrillo [11] [1] [12] [13].

6.2.1.2 Almacenamiento de calor latente o cambio de fase – LHS

El almacenamiento térmico se hace en un proceso de cambio de fase de sólido a líquido a temperatura constante [11] [1]. Los materiales de cambio de fase (PMC) almacenan el calor latente durante el cambio de fase de sólido a líquido y lo liberan en el proceso opuesto. Los PMCs pueden ser orgánicos como parafinas o ácidos grasos, inorgánicas por ejemplo sales hidratadas y eutécticos que es la combinación de los orgánicos e inorgánicos [11]. El LHS tiene una alta densidad de almacenamiento de energía y que es un proceso isotérmico [1] [13] .

6.2.1.3 Almacenamiento termoquímico – TCS o termoquímico de calor – THS

El THS consiste en almacenar o liberar calor mediante una reacción química endotérmica/exotérmica reversible. Consta de 3 procesos carga, almacenamiento y descarga. Durante la carga un material A absorbe el calor ocasionando una reacción que lo divide en 2 productos B + C, los cuales se pueden almacenar por separado hasta la descarga donde se vuelven a unir a condiciones adecuadas de presión y temperatura para liberar la energía almacenada [11] [1] [15]. Con los THS debido a la alta entalpía de reacción las densidades de almacenamiento son mayores que en los SHS y LHS al igual que los tiempos de almacenamiento [11] [14].

6.2.2 Características de las tecnologías TES

En la Tabla 4, se presenta los principales parámetros de las diferentes tecnologías TES, donde se evidencia que las mayores eficiencias y capacidades están en los THS, pero tienen los menores periodos de almacenamiento y el rango de las temperaturas de trabajo no superan al de la tecnología de almacenamiento por calor sensible. En la Tabla 5 se presentan algunas ventajas y desventajas de estas tecnologías de almacenamiento.

Tecnología TES	Capacidad (kWh)	Potencia (MW)	Eficiencia (%)	Periodo de almacenamiento	Rango de temperatura (°C)
Calor sensible SHS	10-50	0,001 - 10	50 - 90	Días/meses	50 - 600
Calor latente LHS	50-150	0,001 - 1	75 - 90	Horas/meses	20 - 80
Termo químico THS	120-250	0,01 - 10	75 - 100	Horas/días	20 - 200

Tabla 4. Parámetros de las tecnologías TES. Fuente: Tomado de [1] [12] [18].

Tecnología TES	Ventajas	Desventajas
Calor sensible SHS	<ul style="list-style-type: none"> + Estable a altas temperatura. + Materiales de bajo costo (excepto metales líquidos y aceites térmicos). + Fácil disponibilidad. + Tecnología madura a escala industrial. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto punto de congelación (100°C) que conduce a pérdidas de calor. -Estabilidad de temperatura durante el proceso de descarga. -Menor densidad de almacenamiento y calor específico que los LHS. -Se requiere gran volumen.
Calor latente LHS	<ul style="list-style-type: none"> + No toxicidad de los PCM. + La densidad de almacenamiento cerca de la temperatura de cambio de fase es muy alta. + No se produce un aumento de temperatura durante el proceso. + Volúmenes reducidos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja conductividad térmica. -Los PCM orgánicos son inflamables. -Los PCM inorgánicos son corrosivos.
Termo química THS	<ul style="list-style-type: none"> +Densidad de almacenamiento de energía térmica alta. + No hay pérdida térmica durante el almacenamiento ya que se almacenan a la temperatura ambiente. + Almacenamiento de energía altamente compacto. + Los reactivos se almacenan durante mucho tiempo sin provocar ninguna degradación del calor almacenado. 	<ul style="list-style-type: none"> -Velocidad de la reacción de deshidratación lenta. -Alto costo. -Baja confiabilidad. -Toxicidad potencial. -Baja vida útil del sistema. -Problemas de reciclabilidad.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de las tecnologías TES. Fuente: Tomado de [11] [12] [13]

6.2.3 Funcionamiento de un Sistemas TES

En un sistema TES por calor latente o sensible, el principio para la carga y descarga de la energía almacenada está basado en el funcionamiento de una batería de Carnot, donde se recibe energía en forma de electricidad la cual se transforma en energía térmica y se almacena en el material seleccionado, finalmente cuando es requerido mediante una conversión a través del ciclo termodinámico seleccionado se entrega electricidad, en la Figura 10 se presenta un esquema de funcionamiento básico para un sistema TES.

Ya que los sistemas TES funcionan como una batería de Carnot, en la Tabla 6, se presentan para los ciclos Brayton y Rankine los parámetros más importantes de este tipo de arreglo, incluyendo valores de salida, eficiencias, rangos de temperatura y presión, tiempo de descarga y madurez de la tecnología evaluada según la escala TLR por sus siglas en inglés (Technology

Readiness Level), la cual consta de 9 niveles bajo un enfoque sistémico de medición que permite evaluar la madurez de una tecnología. La escala inicia con el nivel 1 donde la tecnología presenta una forma científica muy básica, en el nivel 6 se tiene un prototipo y progresa hasta llegar a 9 donde la tecnología ha sido probada con éxito en un entorno real [24].

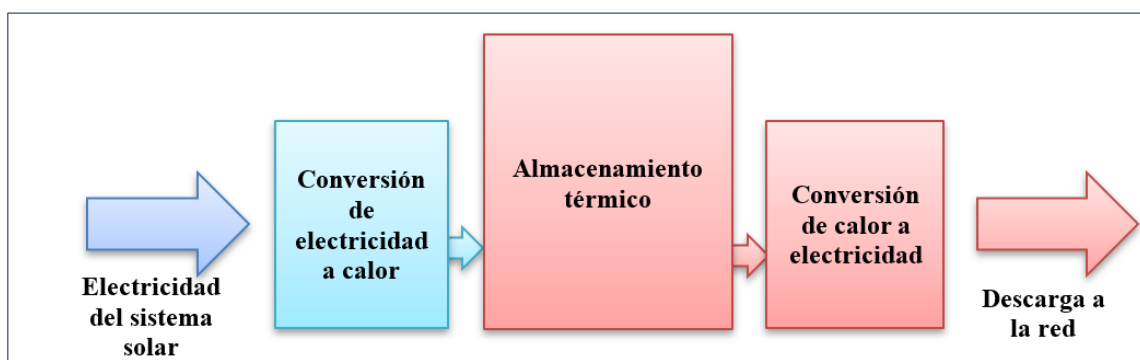


Figura 10. Esquema de un sistema TES. Fuente: Elaboración propia

Ciclo	Brayton	Rankine
Potencia salida (MW)	3 - 10	0.05 - 50
Tiempo de descarga (h)	2 - 8	2 - 8
Capacidad (MWh)	3 - 80	0.1 - 35
Densidad de energía (kWh/m ³)	10 - 30	3 - 15
η_{rt} (%)	52 - 70	45 - 65
Rango de Temperatura (°C)	-150 - 600	-5 - 200
Rango de Presión (bar)	1 - 30	0 - 200
Madurez de la tecnología TRL	5	9
Fluidos típicos	Argón y Aire	Agua
Precio (\$/kW)	395 - 875	~376
Precio (\$/kWh)	55 - 198	~94
Autodescarga	Medio	Muy bajo

Tabla 6 Comparación de parámetros en los arreglos de Baterías de Carnot. Fuente: Tomado de [22].

Como se observa, en un ciclo Rankine se tiene un mayor rango de potencia tanto de entrada como de salida, sin embargo, con un ciclo Brayton la eficiencia de roundtrip (η_{rt}) es mayor, oscilando entre el 50% y 70%, el rango de temperatura también es más amplio. En cuanto a la madurez de la tecnología y según la escala TLR las baterías que usan ciclo Rankine están más avanzadas con prototipos probados en diferentes condiciones operativas, mientras que con el ciclo Brayton están en la etapa de simulación y listos para ser probados [24], el precio por energía o potencia es mayor cuando se usa el ciclo Brayton.

Por otra parte, el material de almacenamiento juega un papel importante ya que este conservará la energía térmica requerida para el funcionamiento del sistema. En la Tabla 7 se muestran los materiales usados en el almacenamiento para sistemas TES por calor sensible y por calor latente.

	Material	Rango temperatura (°C)	Densidad (Kg/m³)	Calor específico (J/(kg.K))
Almacenamiento por Calor Sensible	Arena	200 -300	1555	800
	Roca	200 -300	2560	879
	Ladrillo	200 – 700	1600	840
	Concreto	200 – 400	2240	880
	Granito	200 – 400	2640	820
	Aluminio	200 – 400	2707	896
	Hierro fundido	200 – 400	7900	837
	Sal (NaCl)	200 – 500	2160	879
	Agua	0 – 100	1000	4190
	Material	Temperatura de fusión (°C)	Entalpia de fusión (MJ/m³)	
Almacenamiento por Calor Latente	Soluciones Agua-Sal	-100 – 0	200 – 300	
	Agua	0	330	
	Clatratos	-50 – 0	200 – 300	
	Parafinas	-20 – 100	150 – 250	
	Hidratos de sal	-20 – 80	200 – 600	
	Alcoholes de azúcar	20 – 450	200 – 450	
	Nitratos	120 – 300	200 – 700	
	Hidróxidos	150 – 400	500 – 700	
	Cloruros	350 – 750	550 – 800	
	Carbonatos	400 – 800	600 – 1000	
	Fluoruros	700 – 900	> 1000	

Tabla 7. Materiales de almacenamiento por calor sensible y latente. Fuente: Tomado de [1].

6.2.4 Criterios de selección del sistema TES

Para la selección del sistema TES, se realizó una matriz de decisión tomando como base los requerimientos del proyecto y se hace la valoración de los sistemas de almacenamiento por calor sensible y latente tomando como base la información presentada en la Tabla 4. Para desarrollos posteriores de ingeniería, si la curva de demanda cambia, lo que puede suceder por un incremento de carga, se deberá realizar el análisis nuevamente.

Los criterios por evaluar para el sistema TES son: potencia, rango de temperatura y periodo de almacenamiento, los cuales tendrán un porcentaje de peso de 25%, 50% y 25% respectivamente, el rango de ponderación en esta matriz es de cero (0) y uno (1), dándole el mayor valor a la tecnología TES que cumpla con los requerimientos, en la Tabla 8 se muestra el resultado obtenido.

	Potencia requerida (kW) 25%	Rango de temperatura (°C) 50%	Periodo de almacenamiento 25%	Total
Requerimiento del proyecto	180	120 - 600	Días/meses	-
Calor Sensible	1	1	1	1
Calor Latente	1	0	0	0.25

Tabla 8. Matriz de selección tecnología TES. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al ciclo termodinámico para la generación de energía en la Tabla 9 se presenta la matriz de decisión, en este caso los criterios a evaluar son potencia, rango de temperatura, madurez de la tecnología según la escala TLR y precio del kWh. Los porcentajes de peso son de 25% para cada uno, y la valoración que se le dará es de cero (0) para el que no cumpla y uno (1) para el ciclo que cumpla con los requerimientos, la información de los ciclos se tomará de los datos reportados en la Tabla 5.

	Potencia (MW) 25%	Rango de Temperatura (°C) 25%	Madurez de la tecnología – Escala TLR 25%	Precio del kWh (\$/kWh) 25%	Total
Requerimiento del proyecto	0,18	120 - 600	9	Bajo	-
Ciclo Rankine	1	0	1	1	0,75
Ciclo Brayton	0	1	0	0	0,25

Tabla 9. Matriz de selección ciclo termodinámico. Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las matrices anteriores permiten hacer la selección de la tecnología y del ciclo termodinámico que mejor se adapte a las necesidades de almacenamiento de energía en el corregimiento de Nazareth. Para el caso de estudio, en cuanto al sistema TES se usará el almacenamiento por calor sensible el cual obtuvo la valoración mayor, el ciclo termodinámico con la puntuación más alta es el Rankine, por lo tanto, se tomará éste para el dimensionamiento con

agua como fluido de trabajo. Una vez definido el sistema TES y el ciclo termodinámico, ahora se selecciona como material de almacenamiento la sal fundida, esta decisión se toma teniendo en cuenta las tendencias actuales a nivel mundial donde las sales especialmente los nitratos, son los más usados en las plantas de captación de energía solar por su bajo costo y alta densidad de almacenamiento, además tiene presiones de vapor inferiores a las del agua [25] y un alto rango de temperaturas de trabajo que oscilan entre 200 °C - 600 °C [1].

6.3. Dimensionamiento del sistema TES

Equipos principales:

- Ciclo de sal fundida: reservorio de almacenamiento de sal a alta y baja temperatura, bomba de recirculación y resistencia eléctrica.
- Ciclo Rankine: turbina – generador, condensador, bomba de agua e intercambiador de calor.

Funcionamiento del sistema:

La Figura 11 muestra el esquema del sistema TES, presentando los dos ciclos que lo componen y sus diferentes procesos:

Ciclo de sal: El funcionamiento del ciclo de sal consiste en aprovechar el exceso de energía generada por la planta fotovoltaica para calentar la sal almacenada en el reservorio de alta temperatura, esta transferencia de energía se realiza a través de una resistencia eléctrica ubicada dentro del reservorio (proceso 8-5) y la temperatura alcanzada llega a estar alrededor de los 425°C que es la máxima temperatura de la sal seleccionada según lo que se observa en la Tabla 16. El proceso de almacenamiento se realizaría durante el día, cuando se requiera generar electricidad el calor acumulado en la sal pasa al intercambiador de calor del ciclo Rankine (proceso 5-6) y para esto se utiliza una bomba para mantener la presión deseada; posteriormente, al ocurrir la transferencia de calor la sal sale del intercambiador y se almacena en el reservorio de baja temperatura a aproximadamente los 125 °C (proceso 6-7). La bomba de recirculación se utiliza para transferir la sal fundida del reservorio de baja al de alta temperatura (proceso 7-8), esta

transferencia de fluido se haría durante las noches después de finalizar el periodo de generación de energía.

Ciclo Rankine: Al intercambiador de calor se le inyecta agua en estado de líquido comprimido y por la transferencia de calor de la sal fundida llega al punto de vapor sobrecalentado, el cual pasa a la succión de la turbina (proceso 4-1). En la turbina el vapor se expande (proceso 1-2) generando movimiento en los álabes que mueven el eje y generan energía mecánica, luego sale en estado de vapor sobrecalentado (también puede salir en estado de vapor saturado con un porcentaje de mezcla) por la descarga de la turbina, y pasa al condensador donde el vapor cambia de estado a agua líquida a temperatura ambiente (proceso 2-3). A la salida del condensador, el agua pasa a la succión de la bomba donde se le aumentara la presión para que vuelva nuevamente al intercambiador de calor (proceso 3-4) y se inicie el ciclo.

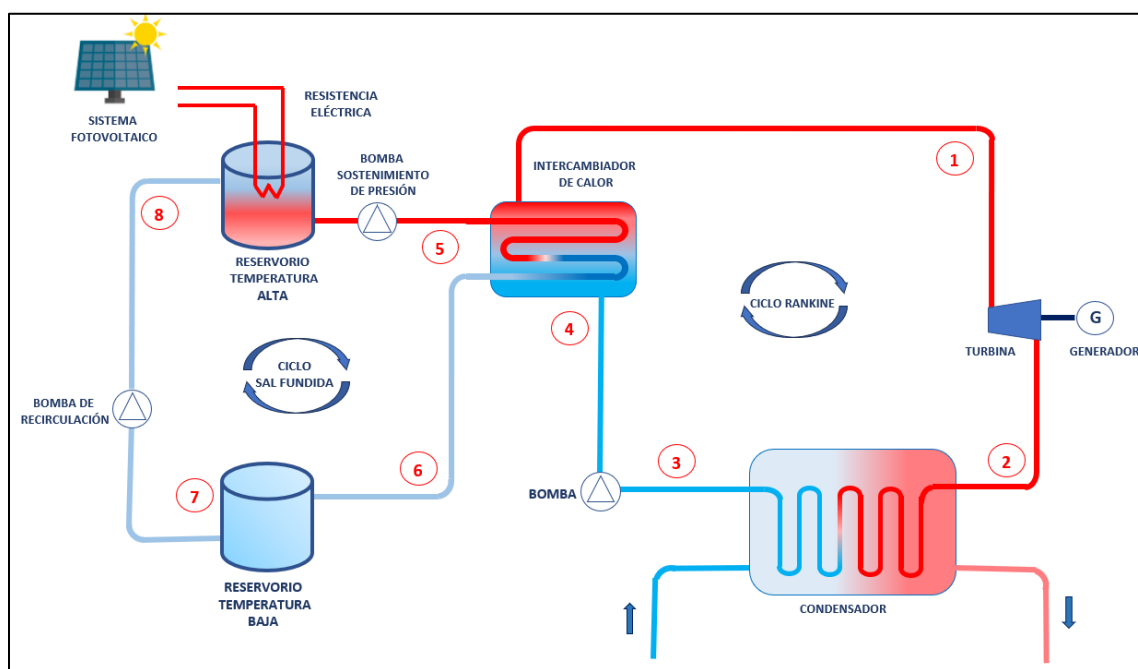


Figura 11. Esquema del almacenamiento térmico y generación eléctrica. Fuente: Elaboración propia

6.3.1 Cálculos del Ciclo Rankine

La Figura 12, muestra el ciclo Rankine y los equipos que lo componen. A continuación, y para efectos de este proyecto se presentan los cálculos realizados en la turbina y en el intercambiador de calor.

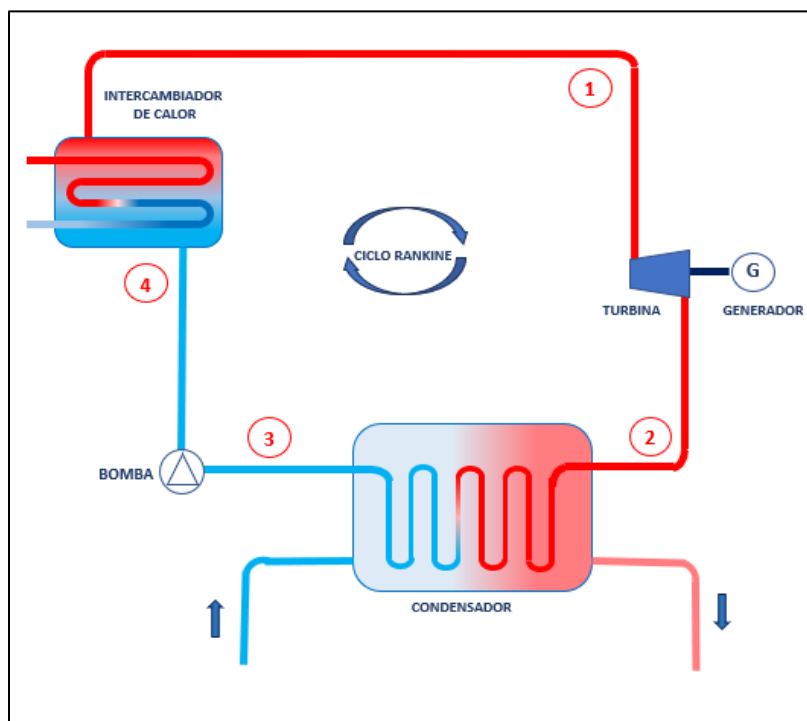


Figura 12. Esquema del ciclo Rankine. Fuente: Elaboración propia

6.3.1.1 Turbina

Como se observa en la Figura 7, la demanda máxima (P_{DEM}) se registra a las 19:00 horas y es de alrededor de 175 kW efectivos. Con este dato inicial se estima la potencia definitiva que tendrá el conjunto de máquinas Turbogenerador, ya que es la máxima potencia registrada.

La potencia efectiva (P_{EF}) es de 228,76 kW, cálculo se hace a través de la ecuación (1), tomando como eficiencia de la turbina (η_T) = 85% [26] y eficiencia mecánica del turbogenerador (η_{TG}) 90%.

$$P_{EF} = \dot{W}_T = \frac{P_{DEM}}{\eta_T * \eta_{TG}} \quad [1]$$

Parámetros de entrada turbina de vapor.

En la Tabla 10, se presentan los parámetros de entrada de una turbina de vapor, la información se toma del fabricante Siemens y su referencia SST-040. Este tipo de turbinas de baja potencia son aplicables a sistemas que requieran recuperación de calor, pequeñas centrales de cogeneración y en plantas solares descentralizadas [27].

Equipo	Potencia (kW)	Presión de entrada (MPa)	Presión de salida (MPa)	Temperatura entrada del vapor (°C)
Turbina	75 ~ 300	0,2~ 4	0,01 ~ 0,7	400

Tabla 10. Parámetros de la turbina tomados del datasheet. Fuente: Tomado de [17]

Para efectos de este proyecto la potencia de salida de la turbina es 300 kW ya que es el valor comercial que más se acerca a las necesidades. Los parámetros asumidos en la turbina para los cálculos son: presión en la succión: 4 MPa, presión a la descarga: 0.7 MPa y temperatura de entrada: 400°C. [27]

Trabajo de la turbina

El trabajo real (W_{TR}) realizado por la turbina y el trabajo ideal (W_{TS}) se calculan usando las ecuaciones (3) y (4) respectivamente, estos están en función de las entalpías a la entrada (h_1), la entalpia a la salida (h_2) y la entalpia isoentropica (h_{2s}), así:

$$\eta_T = \frac{W_{TR}}{W_{TS}} \quad [2]$$

Donde:

$$W_{TR} = (h_1 - h_2) \quad (kJ/kg) \quad [3]$$

$$W_{TS} = (h_1 - h_{2s}) \quad (kJ/kg) \quad [4]$$

Flujo másico de vapor

Al conocer la potencia efectiva de la turbina (\dot{W}_T), la cual es de 300 kW, se realiza el cálculo del flujo másico de vapor requerido para el funcionamiento a partir de la ecuación (6).

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{H_2O} * W_{TR} \quad (kJ/s) \quad [5]$$

$$m_{H_2O} = \frac{\dot{W}_T}{W_{TR}} \quad (kg/s) \quad [6]$$

Flujo de calor en el intercambiador

El flujo de calor \dot{Q}_{IN} en el intercambiador se calcula con la ecuación (8), la cual está en función del flujo másico (\dot{m}_{H_2O}) y del calor de entra en el ciclo Rankine (Q_{IN}) para el cual se debe conocer las entalpías a la entrada (h_4) y salida (h_1) de los estados 4 y 1 respectivamente. El intercambiador de calor se asume como un sistema adiabático que trabaja con una presión constante:

$$Q_{IN} = (h_1 - h_4) \quad (kJ/kg) \quad [7]$$

$$\dot{Q}_{IN} = \dot{m}_{H_2O} * Q_{IN} \quad (kJ/s) \quad [8]$$

6.3.1.2 Bomba

Para la selección de la bomba de recirculación de agua, se deberá garantizar una presión a la descarga de 4 Mpa (580 PSI) y una eficiencia (η_B) = 65% [28].

$$\eta_B = \frac{W_{BS}}{W_{BR}} \quad [9]$$

Donde:

$$W_{BS} = -V_{f4} (P_4 - P_3) \quad (kJ/kg) \quad [10]$$

$$W_{BR} = \frac{-V_{f4} (P_4 - P_3)}{\eta_B} \quad (kJ/kg) \quad [11]$$

6.3.1.3 Eficiencia Térmica

La eficiencia térmica se calcula a continuación:

$$\eta_{Ter} = \frac{W_N}{Q_{IN}} \quad [12]$$

Donde:

$$W_N = W_{TR} - W_{BR} \quad [13]$$

A continuación, en las tablas 11 y 12 se presentan los resultados de los cálculos realizados, tanto para los estados de ciclo Rankine como los parámetros de trabajo, calor y flujo másico.

Propiedad	Unidad	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
P	kPa	4000	700	700	4000
T	°C	400	206.63	164.95	250.35
h	$\frac{kJ}{kg}$	3214,5	2878,83	697	1087,4
h_s	$\frac{kJ}{kg}$	-	2818,59	-	697
S	$\frac{kJ}{kg * °C}$	7,30	7,46	-	-
V_f	$\frac{m^3}{kg}$	-	-	-	0.001108

Tabla 11. Resultado de los Parámetros en Cada Estado. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	W_{BR}	W_{TR}	W_N	W_{TS}	m_{H2O}	Q_{IN}	\dot{Q}_{IN}	η_{Ter}
Unidad	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kg}{s}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{s}$	%
Resultado	6.09	335,67	330,04	394,91	0,89	2127,1	1.893,1	15.5

Tabla 12. Resultados Parámetros a Partir del Ciclo Rankine. Fuente: Elaboración propia

6.3.2 Ciclo de Sal Fundida

En la Figura 13, se muestra el ciclo que debe seguir la sal como material de almacenamiento térmico, el cual fue explicado al detalle en el ciclo Rankine.

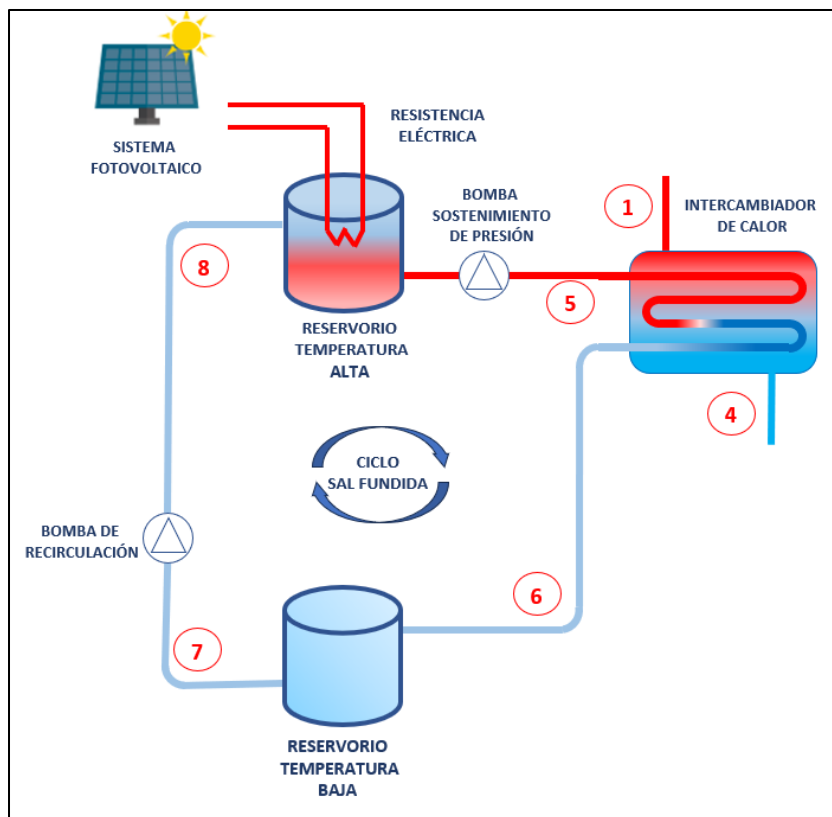


Figura 13. Ciclo de sal fundida. Fuente: Elaboración propia

La sal seleccionada para el dimensionamiento es una mezcla de nitrato de sodio, nitrato de potasio y nitrato de calcio; los nitratos son los más económicos del mercado y tienen alta densidad lo que se traduce en alta densidad de almacenamiento de energía [25], las propiedades físicas de esta se muestran en la Tabla 13.

El cálculo de la cantidad de sal necesaria en el almacenamiento térmico se hará desde dos métodos, el primero tomando como punto de partida el exceso de energía que produce la planta solar y el segundo teniendo en cuenta la potencia efectiva de la turbina, con estos cálculos se puede identificar al hacer la comparación si con la capacidad instalada se puede generar lo demandado.

Nitrato Número	1	2	3	4
Composición química (%)	$NaNO_3$ (15%) KNO_3 (43%) $Ca(NO_3)_2$ (42%)	$NaNO_3$ (60%) KNO_3 (40%)	$NaNO_3$ (7%) KNO_3 (53%) $NaNO_2$ (40%)	$NaNO_3$ (18%) KNO_3 (45%) $LiNO_2$ (37%)
Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ en función de la temperatura $[\text{°C}]$	$\rho = 2240 - 0,827T$	$\rho = 2090 - 0,63T$	$\rho = 2269,4 - 0,9T$	$\rho = 2051 - 0,6639T$
Calor específico $\left[\frac{kJ}{\text{°C}\cdot kg}\right]$ en función de la temperatura $[\text{°C}]$	$C_p = 1,542 - 0,000322T$	$C_p = 1,5404 - 3,0924 \cdot 10^{-5}T$	$C_p = 1,55 - 0,0001T$	$C_p = 1,5395 - 0,0003T$
Rango de temperatura de operación $[\text{°C}]$	$125 < T_{sal} < 425$	$238 < T_{sal} < 600$	$141 < T_{sal} < 450$	$120 < T_{sal} < 600$

Tabla 11. Datos tipos de nitratos utilizados para almacenamiento termico . Fuente: Tomado de [29]

Método 1: Cálculo de sal fundida requerida a partir del exceso de energía generada por la planta fotovoltaica.

Como se presentó en Figura 9, la curva de generación de energía a partir de la planta fotovoltaica es mayor que la curva de demanda que se presenta en el corregimiento, esto excesos de energía se muestran en la siguiente Tabla 14.

Hora	5 a.m.	6 a.m.	7 a.m.	8 a.m.	9 a.m.	10 a.m.	11 a.m.	12 m	1 p.m.	2 p.m.	3 p.m.	4 p.m.	Energía total (E_{PF})
kWh	6,68	45,43	56,59	56,6	71,94	91,81	97,86	95,86	78,45	45,12	23,71	4,35	674.4

Tabla 12. Registro de excedentes de energía promedio. Fuente: Elaboración propia

Por transferencia de energía, el calor a almacenar es la misma energía sobrante de la planta fotovoltaica por el tiempo medido en horas, y se presenta por la ecuación (14):

$$\Delta Q = M_{sal} * \int_{T_1}^{T_2} C_p \partial T \quad (\text{kJ o kWh}) \quad [14]$$

Donde:

$$\Delta Q = E_{PF} \quad (\text{kJ o kWh}) \quad [15]$$

Reemplazando y despejando la masa de sal (M_{sal}):

$$M_{sal} = \frac{E_{PF}}{\int_{T_1}^{T_2} C_p \partial T} \quad (\text{kg}) \quad [16]$$

Utilizando las ecuaciones anteriores, se calcula la cantidad de sal requerida según el tipo de nitrato, los resultados se presentan a continuación en la Tabla 15.

Nitrato Número	1	2	3	4
$M_{sal} \text{ (kg)}$	5565	4387	5165	3531

Tabla 13. Sal requerida por el método 1. Fuente: Elaboración propia

Método 2: Cálculo de la sal requerida partiendo de la potencia efectiva que se requiere a la salida: 175 kW.

En primer lugar, se realiza el cálculo del flujo masico de la sal (m_{sal}) que es requerido para calentar el agua y convertirla en vapor, según los datos de calor requerido en el intercambiador hallado con la ecuación (8).

$$\dot{Q}_{IN} = \dot{Q}_{sal} \quad (\text{kJ/s}) \quad [17]$$

$$\dot{Q}_{sal} = m_{sal} * \int_{T_1}^{T_2} C_p \partial T \quad (\text{kJ/s}) \longrightarrow m_{sal} = \frac{\dot{Q}_{sal}}{\int_{T_1}^{T_2} C_p \partial T} \quad (\text{kg/s}) \quad [18]$$

La masa requerida de sal (M_{sal}) se calcula multiplicando el flujo masico por el tiempo medido en horas

$$M_{sal} = m_{sal} * \text{hora} \quad (\text{kg}) \quad [19]$$

Reemplazando los valores se obtienen los siguientes resultados del flujo masico y la masa requerida de sal para la máxima potencia demandada del sistema en espacio de 1 hora (Tabla 16).

Parámetro	Unidad	Nitrato 1	Nitrato 2	Nitrato 3	Nitrato 4
m_{sal}	$\frac{kg}{s}$	4,34	3,42	4,03	2,76
M_{sal}	kg	15.624	12.323	14.506	9.918

Tabla 14. Resultado flujo másico y masa de sal según el tipo de nitrato. Fuente: Elaboración propia

Se selecciona el nitrato número 4: $NaNO_3 / KNO_3 / LiNO_2$ con una composición química (18/45/37) %, ya que se tiene el mayor delta de temperatura de trabajo: 480 °C y la masa de sal requerida es 9.918 kg para la máxima potencia y una hora de operación.

El cálculo de la masa de sal para el tiempo restante cuando la demanda de potencia del sistema no es la máxima estimada, se plantea como porcentaje de masa requerida en su potencia máxima sin que este valor esté por debajo del 60% como factor de seguridad para evitar daños en la turbina por baja carga [30], por lo cual solo se podría suplir por seis (6) horas con el sistema de generación fotovoltaica, en la Tabla 17, se presentan los resultados.

Hora	Potencia demandada (kW)	Equivalente de sal calculado	Equivalente de sal requerido	Masa de Sal (kg)
5 p.m.	87,0	50%	60% (*)	5.951
6 p.m.	161,3	93%	93%	9.224
7 p.m.	173,7	100%	100%	9.918
8 p.m.	164,5	95%	95%	9.422
9 p.m.	91,4	53%	60% (*)	5.951
10 p.m.	21,0	12%	-	-
11 p.m.	8,0	5%	-	-
12 p.m.	6,6	4%	-	-
1 a.m.	3,3	2%	-	-
2 a.m.	3,7	2%	-	-
3 a.m.	2,2	1%	-	-
4 a.m.	0,7	0%	-	-
Total				40.466

Tabla 15. Masa sal requerida método 2. Fuente: Elaboración propia

(*) Como la potencia demanda es menor al 60% requerido como factor de seguridad, se podría plantear la instalación de bancos de carga resistivos que completen el faltante de carga.

En la Tabla 18, se tienen el resultado del cálculo de la cantidad de masa requerida por los dos métodos.

Tipo de sal	Cantidad	
	Método 1	Método 2
$NaNO_3 / KNO_3 / LiNO_2$	3.531 kg	40.466 kg

Tabla 16. Masa total de sal requerida. Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia en los resultados, la cantidad de energía disponible para almacenar no es suficiente para generar la energía demandada en este corregimiento, con este exceso sólo se cubriría alrededor del 8,72 % de lo necesitado.

6.3.2 Eficiencia Completa del Sistema

La eficiencia del sistema es de aproximadamente 14%, el cálculo de esta se realizó con la ecuación [20] y teniendo en cuenta las eficiencias de equipo turbo – generador 90% y la eficiencia térmica del ciclo Rankine 15,5% .

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{Ter} * \eta_{TG} \quad [20]$$

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas de almacenamiento térmico – TES son una opción para el aprovechamiento de los excesos de energía generada por las fuentes renovables no convencionales, y pueden llegar a sustituir los sistemas de almacenamiento convencionales.

Estas nuevas soluciones de almacenamiento de energía han llevado a las industrias a desarrollar equipos de generación como las turbinas de capacidades menores a 1MW, que se puedan usar en plantas de generación de pequeña escala.

Los excedentes de energía que se tiene en el corregimiento de Nazareth provenientes de la planta fotovoltaica instalada así se almacenen no son suficientes para suplir la demanda energética en las horas de noche.

Este tipo de sistemas de almacenamiento térmico es viable cuando se tienen plantas de generación grandes diseñadas con capacidades que suplan la demanda y además almacenen energía.

En el caso de estudio para suplir las 6 horas de energía durante la noche según los cálculos realizados en el método 2, es necesario repotenciar la planta de generación fotovoltaica a 2.4 MW.

Para las horas donde la potencia demandada es inferior al 60% de la capacidad de la turbina se deberá completar la carga faltante a través de bancos de resistencias.

Se recomienda que en próximos estudios se evalúe la viabilidad económica de incluir estos sistemas de almacenamiento en los proyectos de generación, comparando el consumo de las plantas de generación a diesel con el CAPEX del proyecto, teniendo en cuenta una vida útil de la planta fotovoltaica y sistema TES de 25 años.

Según los cálculos realizados para el sistema TES propuesto la eficiencia máxima que alcanzaría sólo llega al 14%.

REFERENCIAS

- [1] I. Sarbu y C. Sebarhievici, «A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage,» *Sustainability*, vol. 10, n° 1, p. 191, Enero 2018.
- [2] L. Mariño Espinosa, «Hay más de 122 proyectos de energía solar y eólica avanzando siete departamentos,» 20 05 2021. [En línea]. Available: <https://www.larepublica.co/especiales/el-poder-del-caribe-2021/hay-mas-de-122-proyectos-de-energia-solar-y-eolica-avanzando-siete-departamentos-3172704>. [Último acceso: 08 10 2022].
- [3] CREG, «Zonas No Interconectadas,» [En línea]. Available: <https://www.creg.gov.co/sectores-que-regulamos/energia-electrica/zonas-no-interconectadas-0/zonas-no-interconectadas>. [Último acceso: 09 10 2022].
- [4] IPSE, «Caracterización ZNI,» [En línea]. Available: <https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/>. [Último acceso: 09 10 2022].
- [5] J. Montaña, «Lifeder,» 16 08 2022. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/clima-region-caribe/>. [Último acceso: 08 10 2022].
- [6] «TODA COLOMBIA,» 21 02 2019. [En línea]. Available: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/la-guajira/clima.html#2>. [Último acceso: 08 10 2022].
- [7] The World Bank & International Finance Corporation, «Global Solar Atlas,» 2023. [En línea]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>.
- [8] J. J. Cabello Eras, «Región Caribe: protagonista de la transición energética en Colombia,» *Semana*, 24 10 2021.
- [9] IDEAM, «Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia,» [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>. [Último acceso: 11 Junio 2023].
- [10] J. V. Nuñez, «Sistemas de Almacenamiento,» de *Diseño de un Sistema de Control para el Acondicionamiento de la Máquina de Reluctancia Conmutada de un Sistema de Almacenamiento Cinético para la Mejora de la Eficiencia en la Edificación*, Sevilla, p. 20.
- [11] D. Enescu, G. Chicco, R. Porumb y G. Seritan, «Thermal Energy Storage for Grid Applications: Current Status and Emerging Trends,» *Energies*, vol. 13, p. 340, Enero 2020.
- [12] H. Predes, J. Ambriz, G. Espinosa y A. Fernández, «Almacenamiento de la Energía,» *Ciencia*, 2010.
- [13] S. Kuravi, J. Trahan, Y. Goswami, M. Rahman y E. Stefanakos, «Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, 2013.
- [14] D. Bravo, «Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica,» *Ingeniería*, vol. 23, 2018.
- [15] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba y L. Cabeza, «State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part1—Concepts, materials and modellization,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, 2010.

- [16] H. Jouharaa, A. Zabnienska, N. Khordehgaha, D. Ahmada y T. Lipinskib, «Latent thermal energy storage technologies and applications: A review,» *International Journal of Thermofluids*, vol. 5, 2020.
- [17] H. Yu, H. Helland, X. Yu, T. Gundersen y G. Sin, «Optimal design and operation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system driven by solar energy with sensible thermal energy storage,» *Energy Conversion and Management*, 2121.
- [18] D. Müller, C. Knoll, G. Gravogl, C. Jordan, E. Eitenberger, G. Friedbacher, W. Artner, J. Welch, A. Werner, M. Harasek, R. Miletich y P. Weinberger, «Medium-temperature thermochemical energy storage with transition metal ammoniates – A systematic material comparison,» *Applied Energy*, vol. 285, 2021.
- [19] P. Benalcazar, «Sizing and optimizing the operation of thermal energy storage units in combined heat and power plants: An integrated modeling approach,» *Energy Conversion and Management*, vol. 242, 2021.
- [20] R. Chen, Z. Rao, S. Liao, G. Liu y D. Li, «Analysis and optimization the size of heliostat field and thermal energy storage for solar tower power plants,» *Energy Procedia*, vol. 158, 2019.
- [21] T. Liang, A. Vecchi, K. Knobloch, A. Sciacovelli, K. Engelbrecht, Y. Li y Y. Ding, «Key components for Carnot Battery: Technology review, technical barriers and selection criteria,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 163, 2022.
- [22] O. Dumont, G. F. Frate, A. Pillai, S. Lecompte, M. De paepe y V. Lemort, «Carnot battery technology: A state-of-the-art review,» *Energy Storage*, vol. 32, 2020.
- [23] IPSE, «INFORME TELEMETRÍA MENSUAL DE AGOSTO,» 2022.
- [24] J. Quintanar, «Nivel de madurez tecnológico (TRL) de la tecnología de secado solar en México,» *REIA*, vol. 4, pp. 65-69, 2018.
- [25] D. Bravo, «A Survey of Materials for Solar Thermal Energy Storage,» *Ingeniería*, vol. 23, n° 2, pp. 144-164, 2018.
- [26] L. Méndez, A. Bonilla y R. Lugo, «Análisis Termodinámico de las Turbinas de Vapor para los Ciclos Ultracríticos, Supercríticos, Subcríticos y Geotérmicos,» *Información Tecnológica*, n° 4, 210.
- [27] SIEMENS, *Predesigned Steam Turbine SST-040*, 2023.
- [28] Goulds Water Technology, *Introducción a las curvas de las bombas*, New York, 2012.
- [29] A. Giaconia, A. C. Tizzoni, S. Sau, N. Corsaro, E. Mansi, A. Spadoni y T. Delise, «Assessment and Perspectives of Heat Transfer Fluids for CSP Applications,» *Energies*, vol. 14, n° 22, 9 Noviembre 2021.
- [30] A. Zaragoza Garcias, «Análisis de las desviaciones en el comportamiento termodinámico en las turbinas de vapor,» Queretaro - Mexico, 2005.
- [31] Y. A. Cengel y M. A. Boles, de *Termodinámica*, Ciudad de Mexico, McGraw Hill, 2012, pp. 914-922.

APÉNDICE

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
η_T	Eficiencia Isoentrópica de la turbina	%
η_{TG}	Eficiencia turbogeneradora	%
η_B	Eficiencia bomba	%
η_{Ter}	Eficiencia térmica	%
η_{TOTAL}	Eficiencia total del sistema	%
$P_{\#}$	Presión del fluido según su estado (#)	kPa
$V_{\#}$	Volumen especifico del fluido según su estado (#)	m ³ /kg
$h_{\#}$	Entalpia del fluido según su estado (#)	kJ/kg
$S_{\#}$	Entropía del fluido según su estado (#)	kJ/kg * °C
$T_{\#}$	Temperatura del fluido según su estado	°C o °K
W_{TR}	Trabajo de la turbina real	kJ/kg
W_{TS}	Trabajo de la turbina ideal	kJ/kg
W_{BR}	Trabajo de la bomba real	kJ/kg
W_{BS}	Trabajo de la bomba ideal	kJ/kg
W_N	Trabajo neto	kJ/kg
Q_{IN}	Calor de entrada	kJ/kg
\dot{Q}_{IN}	Flujo de calor	kg/s
M	Masa	kg
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
V_f	Volumen especifico liquido saturado	m ³ /kg
P_{EF}	Potencia Efectiva	kW
C_p	Calor específico	kJ/kg * °C

ANEXOS

GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

Uribia

12.175492°,-071.282303°

Carrera 3, Uribia, La Guajira, Colombia

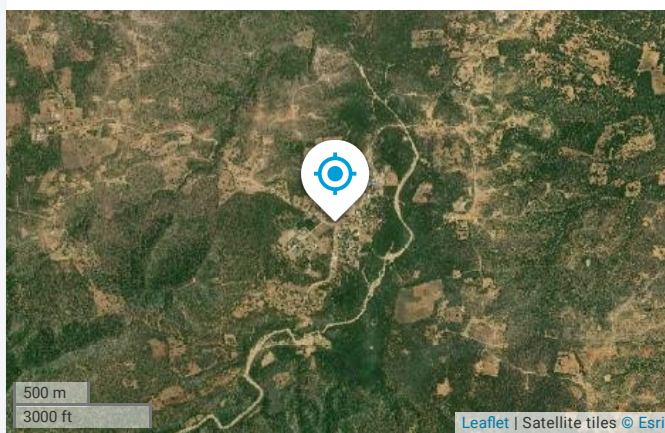
Time zone: UTC-05, America/Bogota [COT]

🕒 Report generated: 24 Feb 2023

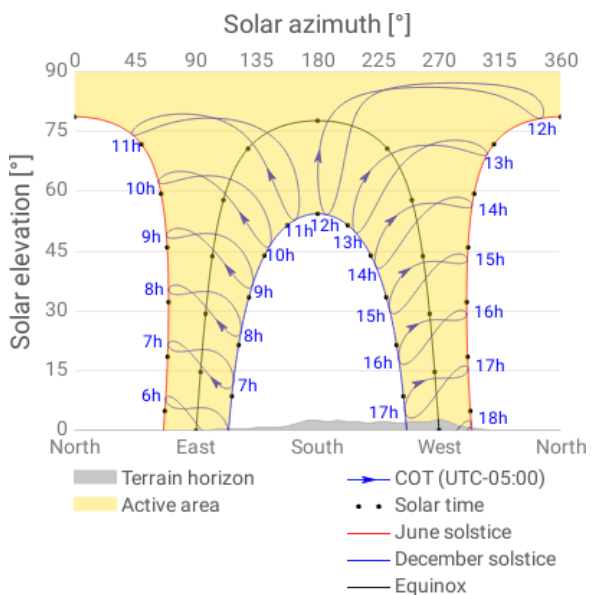
SITE INFO

Map data		Per year	
Direct normal irradiation	DNI	1336.5	kWh/m ²
Global horizontal irradiation	GHI	1876.7	kWh/m ²
Diffuse horizontal irradiation	DIF	918.8	kWh/m ²
Global tilted irradiation at optimum angle	GTI _{opta}	1909.3	kWh/m ²
Optimum tilt of PV modules	OPTA	12 / 180	°
Air temperature	TEMP	26.9	°C
Terrain elevation	ELE	86	m

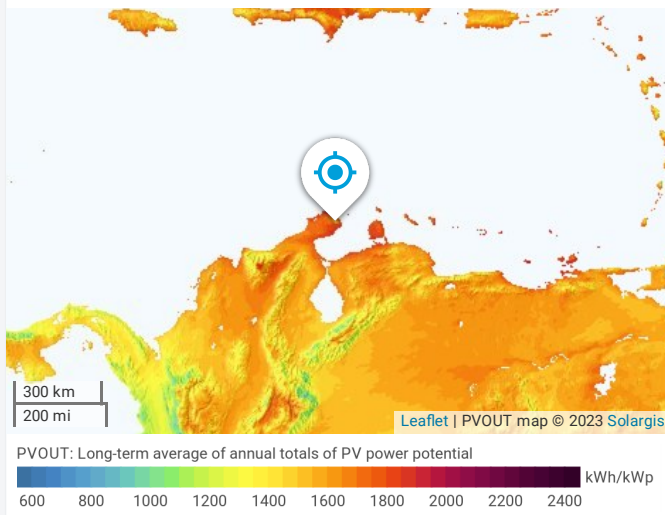
Map



Horizon and sunpath



PVOUT map



GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

PV ELECTRICITY AND SOLAR RADIATION

PV system configuration



PV system: **Ground-mounted large scale**

Azimuth of PV panels: **Default (180°)**

Tilt of PV panels: **12°**

Installed capacity: **430 kWp**

Annual averages

Total photovoltaic power output and Global tilted irradiation

649.476

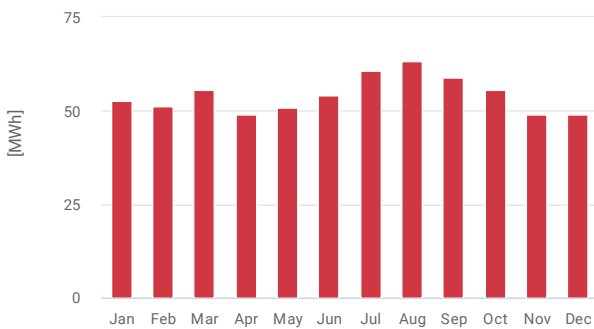
MWh per year

1896.8

kWh/m² per year

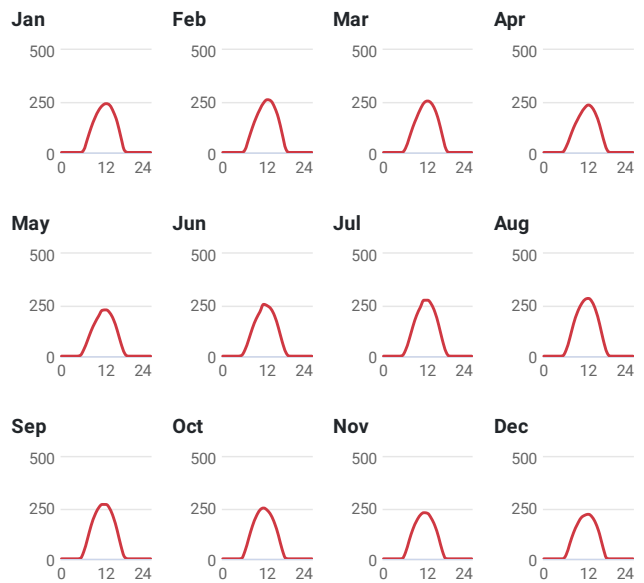
Monthly averages

Total photovoltaic power output



Average hourly profiles

Total photovoltaic power output [kWh]



UTC-05

Average hourly profiles

Total photovoltaic power output [kWh]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6			0	1	3	3	2	1	1	1	1	0
6 - 7	12	13	21	27	32	31	29	30	35	39	31	19
7 - 8	66	67	71	72	76	81	82	88	97	101	91	75
8 - 9	122	122	124	120	124	137	145	158	165	162	146	129
9 - 10	168	170	169	157	163	182	199	212	216	208	187	169
10 - 11	205	210	210	191	196	216	238	251	251	240	215	201
11 - 12	228	242	241	218	224	253	273	275	268	250	227	214
12 - 13	238	257	251	231	226	246	273	282	268	239	224	219
13 - 14	230	251	240	219	212	230	254	264	247	215	200	206
14 - 15	197	218	209	186	179	195	214	222	203	173	162	174
15 - 16	148	167	156	135	126	138	153	158	140	115	106	122
16 - 17	74	91	83	67	63	71	80	79	64	46	39	51
17 - 18	9	16	16	13	14	18	21	18	9	2	1	2
18 - 19					0	0	0	0				
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	1,699	1,826	1,791	1,638	1,637	1,800	1,962	2,037	1,964	1,790	1,629	1,580

GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

PV ELECTRICITY AND SOLAR RADIATION

Annual averages

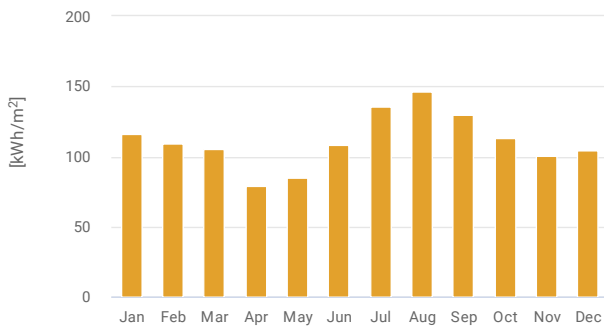
Direct normal irradiation

1332.6

kWh/m² per year

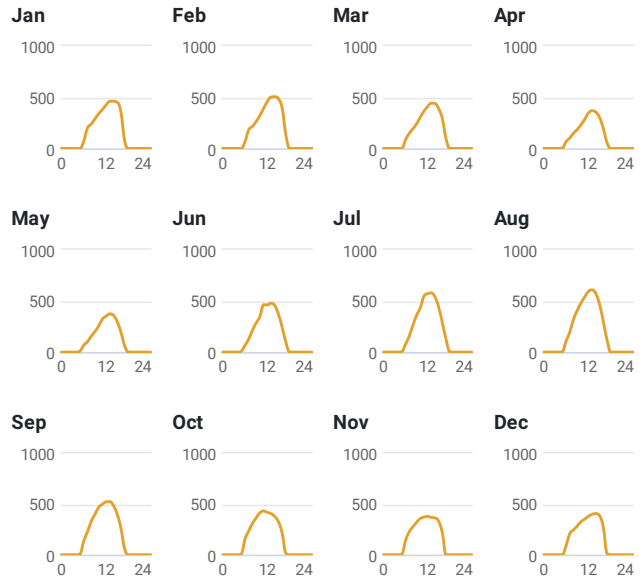
Monthly averages

Direct normal irradiation



Average hourly profiles

Direct normal irradiation [Wh/m²]



UTC-05

Average hourly profiles

Direct normal irradiation [Wh/m²]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6				4	11	10	6	5	8	8	5	
6 - 7	70	67	84	66	68	66	78	109	137	155	141	93
7 - 8	199	182	146	102	102	128	155	196	227	235	227	208
8 - 9	237	215	191	149	155	214	263	322	329	309	276	245
9 - 10	288	264	240	184	200	285	359	406	397	364	320	283
10 - 11	339	321	305	231	254	346	432	479	467	414	357	326
11 - 12	378	390	362	283	321	462	546	538	498	432	371	350
12 - 13	424	457	408	346	351	461	570	593	521	417	378	379
13 - 14	459	501	441	368	373	477	577	607	523	406	368	399
14 - 15	460	504	438	354	359	455	539	570	484	377	363	406
15 - 16	450	484	388	302	297	370	439	466	399	325	330	384
16 - 17	355	391	290	196	195	241	287	299	262	212	216	275
17 - 18	77	130	96	57	62	95	127	119	58	13		15
18 - 19							4					
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	3735	3905	3389	2642	2750	3611	4382	4711	4311	3666	3351	3363

GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

GLOSSARY

Acronym	Full name	Unit	Type of use
DIF	Diffuse horizontal irradiation	kWh/m ² , MJ/m ²	Average yearly, monthly or daily sum of diffuse horizontal irradiation (© 2021 Solargis)
DNI	Direct normal irradiation	kWh/m ² , MJ/m ²	Average yearly, monthly or daily sum of direct normal irradiation (© 2021 Solargis)
ELE	Terrain elevation	m, ft	Elevation of terrain surface above/below sea level, processed and integrated from SRTM-3 data and related data products (SRTM v4.1 © 2004 - 2021, CGIAR-CSI)
GHI	Global horizontal irradiation	kWh/m ² , MJ/m ²	Average annual, monthly or daily sum of global horizontal irradiation (© 2021 Solargis)
GTI	Global tilted irradiation	kWh/m ² , MJ/m ²	Average annual, monthly or daily sum of global tilted irradiation (© 2021 Solargis)
GTI_opta	Global tilted irradiation at optimum angle	kWh/m ² , MJ/m ²	Average annual, monthly or daily sum of global tilted irradiation for PV modules fix-mounted at optimum angle (© 2021 Solargis)
OPTA	Optimum tilt of PV modules	°	Optimum tilt of fix-mounted PV modules facing towards Equator set for maximizing GTI input (© 2021 Solargis)
PVOUT_total	Total photovoltaic power output	kWh, MWh, GWh	Yearly and monthly average values of photovoltaic electricity (AC) delivered by the total installed capacity of a PV system (© 2021 Solargis)
PVOUT_specific	Specific photovoltaic power output	kWh/kWp	Yearly and monthly average values of photovoltaic electricity (AC) delivered by a PV system and normalized to 1 kWp of installed capacity (© 2021 Solargis)
TEMP	Air temperature	°C, °F	Average yearly, monthly and daily air temperature at 2 m above ground. Calculated from outputs of ERA5 model (© 2021 ECMWF, post-processed by Solargis)

ABOUT

This pdf report (the “Work”) is automatically generated from the Global Solar Atlas online app (<https://globalsolaratlas.info/>), prepared by Solargis under contract to The World Bank, based on a solar resource database that Solargis owns and maintains. It provides the estimated solar resource, air temperature data and potential solar power output for the selected location and input parameters of a photovoltaic (PV) power system.

Copyright © 2021 The World Bank
1818 H Street NW, Washington DC 20433, USA

The World Bank, comprising the International Bank for Reconstruction and Development (IBRD) and the International Development Association (IDA), is the commissioning agent and copyright holder for this Work, acting on behalf of The World Bank Group. The Work is licensed by The World Bank under a Creative Commons Attribution license (CC BY 4.0 IGO) with a mandatory and binding addition (please refer to the GSA website for full terms and conditions of use <https://globalsolaratlas.info/support/terms-of-use>).

The World Bank Group disclaims all warranties of any kind related to the provision of the Work.

The Work is made available solely for general information purposes. Neither the World Bank, Solargis nor any of its partners and affiliates hold the responsibility for the accuracy and/or completeness of the data and shall not be liable for any errors, or omissions. It is strongly advised that the Work be limited to use in informing policy discussions on the subject, and/or in creating services that better educate relevant persons on the viability of solar development in areas of interest. As such, neither the World Bank nor any of its partners on the Global Solar Atlas project will be liable for any damages relating to the use of the Work for financial commitments or any similar use cases. Solargis has done its utmost to make an assessment of solar climate conditions based on the best available data, software, and knowledge.

Sources: Solar database and PV software © 2021 Solargis

Pre-designed Steam Turbine SST-040

Power Output: 75-300 kW

The newly developed pre-designed steam turbine SST-040 is a generator drive specially designed for the 75-300 kW power range. This favorably priced turbine features a simple, extremely compact design, short start-up times and a high degree of operational reliability.

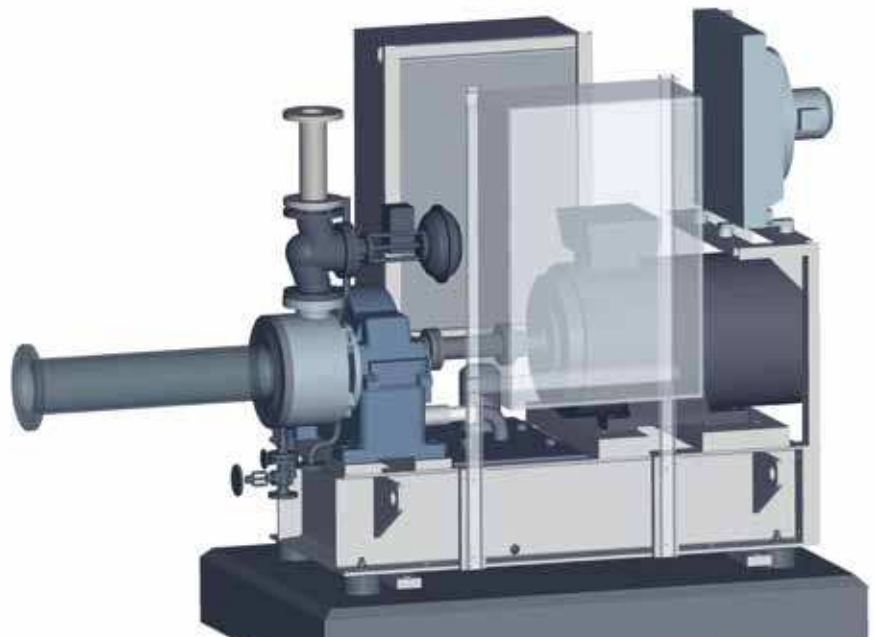


The SST-040 is used as a condensing turbine in decentralized solar facilities or for waste-heat recovery, e.g. used behind gas engines and biogas engines. As a back-pressure turbine it is used in small combined heat and power (CHP) plants as well as in decentralized plants to generate process heat and electrical power. The turbine is capable of rapid-starting i.e. it can be started from cold without preheating. When not enough live steam is supplied anymore or the live steam supply ends, the turbine will switch off automatically.

Application area

- Waste-heat recovery
- Small CHP plants
- Decentralized solar facilities

Pre-designed steam turbine SST-040



Industrial Steam Turbines

Answers for energy.

SIEMENS

Turbine design

The SST-040 is a single-stage impulse turbine. The inlet steam flow is directed onto the turbine rotor blades, where mechanical power is generated when the steam flow direction changes. The resulting impulse spins the rotor, and the power is transferred from the turbine via the gear to the generator.



The SST-040 steam turbine is delivered as a pre-tested turbo generator package-unit.



The control and operating unit with a 12-inch touch panel covers all necessary monitoring functions.

Turbine

The turbine casing is centrally slide-mounted on the bearing casing to permit free radial movements under influence of different temperatures. The vertical split allows easy access to the rotor disk. The quick acting inlet valve for steam control and quick-stop is opened and closed by a pneumatically controlled servomotor. The casing is thermally insulated by zinc-coated mineral wool lagging.

Gear

The design of the integral gear, manufactured in our Siemens workshop, was chosen to fit perfectly to the design of the turbine. The gear box includes the pressure-lubricated sleeve bearings and the gearwheels. Ground gearing and tooth contact pattern adjustment during assembly guarantee extremely low vibration levels and low noise.

Oil unit

The integrated oil supply consists of an auxiliary oil pump with electric start-motor, a mechanically driven main oil pump, an exchangeable duplex oil filter and air-cooled oil cooler.

Generator

A highly efficient low-voltage motor is used for power generation in generator mode. Optimally adjusted to a particular power range, mechanical power is converted into electrical power. For protection, thermocouples or electronic resistance temperature detectors (RTDs) monitor the temperature of the bearings and windings.

Monitoring and power circuit breaker

The control and protection unit covers all necessary monitoring functions. A clearly arranged 12-inch touch panel shows all relevant data. For data transmission to an existing external control system, the control and protection unit is equipped with a Profibus interface.

The circuit breaker with motor drive and subvoltage release establishes the connection with the power network.

Base frame

The SST-040 steam turbine is delivered as a pre-tested package-unit with turbine, gear, generator, oil unit, control and protection unit as well as circuit breaker, built upon a base frame. The lightweight turbine package has a space requirement of approx. 1.5m x 2.5m x 2m (breadth x length x height) and a weight of around 4,500 kg.

Technical Data



Technical Data

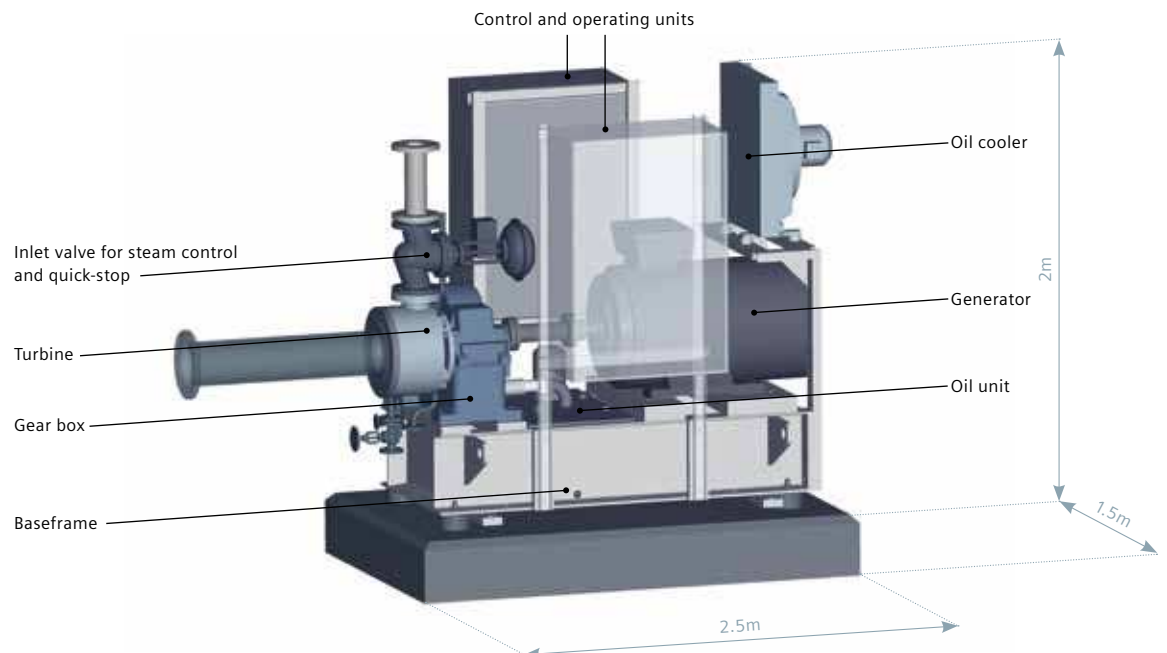
- Power output : 75–300 kW (e)
- Inlet pressure: 2 up to 40 bar (a)
- Inlet temperature: dry saturated steam up to 400°C
- Exhaust pressure: max. 7 bar (a)
up to 0,1 bar (a) condensation
- Dimensions: 1.5m x 2.5m x 2m
(breadth x length x height)
- Weight: approx. 4,500 kg



Advantages

- Minimal foundation work thanks to small and compact design
- Largely maintenance-free due to stalwart, robust construction
- High availability thanks to resilient and sure technology
- Quick start without preheating of the turbine due to minimized gyrating masses
- Favorably priced thanks to proven components
- Quick development and commissioning due to production-orientated design

The turbine casing is heat-insulated and centrally slide-mounted on the bearing casing.



Installation, control and maintenance

Our processes in the areas of sales, development, production, commissioning and service are specially planned and structured so that we can install the unit in the shortest possible time.

The SST-040 turbogenerator package is completely approved and installed in the Siemens test bay, enabling easy, problem-free installation on a base plate or small concrete foundation.

The installation and the connection to the steam pipes and to the electrical grid can be carried out by our customers themselves with the help of our guidelines. A Siemens technician will put the turbine into operation a few days later. The complete unit is designed to be simple and reliable, so that power generation can normally begin only six months after placing the order with Siemens.

Service

Customer Service is for us more than just a concept, it is a way of life. If you have any questions about your unit, modification requirements or if you should experience an operational disturbance, Siemens Frankenthal is at your service around the clock with its hotline +49 171 51 82 610 – wherever the location of your unit.



The installation of the turbine can be carried out by the customers themselves.

Criteria for capital investment decision

Siemens has been manufacturing predesigned steam turbines in Frankenthal for more than 80 years. These turbines are known worldwide for the best quality at reasonable prices. With the new, reliable steam turbine SST-040 customers are able to use "hidden" power sources like small amounts of waste heat.

Important reasons for planning own power generation:

- Increased efficiency of biogas plants by using the waste heat of the gas engine for additional power generation (combined cycle)
- Generation of CHP in breweries, in dairies, in paper industry or for drying processes
- Stabilization of the power provision by using peak current
- Allocation of governmental cogeneration subsidies in certain countries for fuel input and power output
- Utilization of small amounts of waste-heat (1000 up to 3000 kW thermal) with low exhaust gas temperatures (from 150°C) for power generation

Speak to us, and we will gladly advise you:

Siemens Frankenthal
Telefon: +49 6233 85-22 91
Telefax: +49 6233 85-26 60
E-Mail: turbines.frt.energy@siemens.com

Published and copyright © 2011:
Siemens AG
Energy Sector
Freyeslebenstrasse 1
91058 Erlangen, Germany

Siemens AG, Energy Sector
Oil & Gas Division
Wolfgang-Reuter-Platz
47053 Duisburg, Germany

Siemens Turbomachinery Equipment GmbH
Heßheimer Straße 2
67227 Frankenthal (Pfalz), Germany

For more information, please contact our
Customer Support Center.

Phone: +49 180 524 70 00
Fax: +49 180 524 24 71
(Charges depending on provider)
E-mail: support.energy@siemens.com

Oil & Gas Division
Order No. E50001-W410-A113-X-4A00
Printed in Germany
Dispo 34806, c4bs 7477 bdk 110034
P WS 05112.5

Printed on elementary chlorine-free
bleached paper.

All rights reserved.
Trademarks mentioned in this document are
the property of Siemens AG, its affiliates
or their respective owners.

Subject to change without prior notice.
The information in this document contains
general descriptions of the technical options
available, which may not apply in all cases.
The required technical options should therefore
be specified in the contract.