

COMPARACIÓN DE DOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS
AL VACIO EN CLIMA TROPICAL, PARA OBTENER EL MEJOR RESULTADO DE
EFICIENCIA

CARLOS ANDRES FORERO SIERRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA-SANTANDER

2023

COMPARACIÓN DE DOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS
AL VACIO EN CLIMA TROPICAL, PARA OBTENER EL MEJOR RESULTADO DE
EFICIENCIA

CARLOS ANDRES FORERO SIERRA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

JULIAN E. JARAMILLO IBARRA

PhD en ingeniería térmica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA-SANTANDER

2023

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por brindarme salud y sabiduría durante todos estos años.

También a mi abuelita quien fue ese angelito que desde el cielo siempre me acompaño y fortaleció todo el tiempo.

A mi padre que fue ese motor que me impulso desde niño a querer ir por el camino del bien y superarme cada vez más.

A mi mamita que con tanto esfuerzo siempre soñó con ver a su hijo salir adelante y verlo convertido en una persona profesional.

Igualmente, a mis hermanos que siempre estuvieron cuando más los necesite.

Por último, a mi nana quien fue una de las primeras personas que conocí cuando inicié esta carrera y siempre estuvo hay para mí.

AGRADECIMIENTOS

Quiero primeramente agradecerle a la universidad industrial de Santander por formarme como persona y como todo un profesional.

También agradecerle al profesor Julián Jaramillo quien con sus conocimientos y dedicación me ayudo en todo el proceso de investigación.

Igualmente, al personal educativo y administrativo de la escuela de ingeniería mecánica por brindarme el apoyo y los conocimientos durante toda la carrera universitaria.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. JUSTIFICACIÓN	18
4. MARCO TEÓRICO.....	20
4.1 Antecedentes de investigación.....	20
4.1.1 Internacional.....	21
4.1.2 Nacional	24
4.1.3 Local.....	28
4.2 Referentes.....	29
4.2.1 Colector solar.	30
4.3 Clasificación de los colectores solares.....	30
4.3.1 Colector solar de placa plana.	30
4.3.1.2 Colector solar de tubos al vacío.	31
4.4 Energía hidráulica.	32
4.4.1 Energía térmica (obtenida a partir de combustibles fósiles).....	33
4.4.2 Energía solar.	34
4.5 Normas aplicadas.....	36
5. DISEÑO METODOLÓGICO	38
5.1 Población.....	39
5.1.1 Marco geográfico.....	39

5.1.2 Estado del arte	41
5.2 Estrategias	42
6. PROCESO DE BÚSQUEDA E INSTALACION DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.....	43
6.1 Materiales y componentes.....	43
6.2 Características finales del colector.....	45
6.3 Circuito hidráulico.....	46
6.4 Parámetros del colector solar seleccionado.....	50
7. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA	52
7.1 Montaje del colector solar de placa plana	52
7.2 Medida de la eficiencia del colector solar de placa plana.....	66
7.3 Resultados finales de la eficiencia del colector solar de placa plana	73
8. MODELO MATEMÁTICO E INSTALACIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACIO	79
8.1 Modelo matemático del colector solar de tubos al vacío	79
8.2 Cálculo de la radiación en la parte inferior de la aleta.....	83
8.2.1 Cálculo de la radiación en la parte superior de la aleta	86
8.2.2 Incidencia de la radiación solar sobre el colector	86
8.3 Cálculo del valor neto de entrada.....	87
8.4 Cálculo de las pérdidas de calor del colector	88
8.5 Cálculo de la radiación total absorbida.....	88
8.6 Balance de energía en la aleta absorbidora y la pared del evaporador	88
8.7 Cálculo del calor transferido a través del tubo de calor.....	89
8.8 Cálculo de la temperatura del condensador	91
8.9 Cálculo en el tanque de almacenamiento.....	92

9. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACIO	95
9.1 Mantenimiento correctivo y montaje del colector solar de tubos al vacío	95
9.2 Resultados finales de la eficiencia del colector solar de tubos al vacío	101
10. COMPARACIÓN DE LOS COLECTORES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS AL VACIO	108
10.1 Ventajas y desventajas del colector solar de tubos al vacío.....	109
10.2 Ventajas y desventajas del colector solar de placa plana	110
10.3 Consumo y emisiones de los colectores solares	110
11. CONCLUSIONES.....	112
12. RECOMENDACIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	114
ANEXOS	117

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Colector solar de placa plana	30
Figura 2. Colector solar de tubos al vacío	31
Figura 3. Mapa geográfico de Bucaramanga Santander	40
Figura 4. Promedio multianual de sol al día	41
Figura 5. Evolución de la utilización de la luz solar como fuente de energía	42
Figura 6. Materiales y componentes	44
Figura 7. Radiación solar	45
Figura 8. Circuito hidráulico del colector solar de placa plana	48
Figura 9. Componentes del sistema	49
Figura 10. Componentes del sistema vista de detalle	50
Figura 11. Ingreso del colector solar de placa plana	52
Figura 12. Instalación del colector solar de placa plana	53
Figura 13. Base de soporte	54
Figura 14. Base de soporte vista lateral	54
Figura 15. Tanque de almacenamiento de agua	55
Figura 16. Tanque de almacenamiento de agua vista lateral	56
Figura 17. Bomba de agua del colector solar de placa plana	57
Figura 18. Bosquejo del colector solar de placa plana	58
Figura 19. Entrada de válvula de seguridad o ventosa	59
Figura 20. Tapón o registro de drenaje	60
Figura 21. Entrada de agua	61
Figura 22. Vista de conexiones	62
Figura 23. Vista de conexiones al protoboard	62
Figura 24. Vista de conexiones al arduino mega	63
Figura 25. Salida de agua	64
Figura 26. Montaje final	65
Figura 27. Montaje final vista lateral	66

Figura 28. Máxima radiación solar obtenida.....	71
Figura 29. Especificaciones del colector solar de placa plana	71
Figura 30. Eficiencia vs tiempo 11 de Agosto de 2023.....	75
Figura 31. Diferencia de temperaturas T_s y T_e , 11 de Agosto de 2023	76
Figura 32. Radiación solar del 11 de Agosto de 2023.....	77
Figura 33. Flujo de agua del 11 de Agosto de 2023.....	78
Figura 34. Diseño final del colector solar de tubos al vacío	79
Figura 35. Modelo 3D del prototipo del colector solar	80
Figura 36. Método de Hottel	84
Figura 37. Radiación transmitida y adsorbida en una superficie	87
Figura 38. Mangueras de conexión	95
Figura 39. Placa del colector solar	96
Figura 40. Tubos en U de cobre y aletas de aluminio	96
Figura 41. Tubos al vacío	97
Figura 42. Vista frontal derecha del montaje del colector solar de tubos al vacío .	98
Figura 43. Vista lateral izquierda del montaje del colector solar de tubos al vacío	98
Figura 44. Vista de detalle 1.....	99
Figura 45. Vista de detalle 2.....	99
Figura 46. Vista frontal del montaje del colector solar de tubos al vacío	100
Figura 47. Vista posterior del montaje del colector solar de tubos al vacío	101
Figura 48. Eficiencia vs tiempo 11 de Agosto de 2023.....	104
Figura 49. Diferencia de temperaturas T_s y T_e , 11 de Agosto de 2023	105
Figura 50. Radiación solar del 11 de Agosto de 2023.....	106
Figura 51. Flujo de agua del 11 de Agosto de 2023.....	107
Figura 52. Colector solar de tubos al vacío vs colector solar de placa plana	108

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Dimensiones del colector solar de placa plana	51
Tabla 2. Resultados obtenidos el 11 de Agosto de 2023	74
Tabla 3. Parámetros geométricos usados en el modelo de transferencia de calor	81
Tabla 4. Parámetros físicos usados en el modelo de transferencia de calor.....	81
Tabla 5. Parámetros físicos usados en el modelo de transferencia de calor (continuación).....	82
Tabla 6. Parámetros geométricos usados en el modelo de transferencia de calor (continuación).....	83
Tabla 7. Longitudes de las cuerdas para el cálculo del factor de visión.....	85
Tabla 8. Resultados obtenidos el 11 de Agosto de 2023	103
Tabla 9. Consumo y emisión de los colectores solares.....	111

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Programación utilizada en el software de arduino para mediante los sensores calcular las variables de las pruebas experimentales.....	117
Anexo B. Resultados obtenidos el día 14 de Agosto al 18 de Agosto del 2023, adicionalmente el promedio general encontrado durante todas las pruebas experimentales en el colector solar de placa plana.....	122
Anexo C. Resultados obtenidos el día 14 de Agosto al 18 de Agosto del 2023, adicionalmente el promedio general encontrado durante todas las pruebas experimentales en el colector solar de tubos al vacío	152

RESUMEN

TÍTULO: COMPARACIÓN DE DOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS AL VACIO EN CLIMA TROPICAL, PARA OBTENER EL MEJOR RESULTADO DE EFICIENCIA*

AUTOR: CARLOS ANDRES FORERO SIERRA**

PALABRAS CLAVE: COLECTOR SOLAR, PLACA PLANA, TUBOS AL VACIO, EFICIENCIA.

DESCRIPCIÓN: En la actualidad el mayor objetivo es obtener una tecnología que nos brinde una energía que no comprometa el medio ambiente, basándonos en la gran evolución de países mayormente avanzados, estos han desarrollado metodologías para el aprovechamiento de energías renovables tales como la energía solar. Una de ella es el uso de colectores solares térmicos, los cuales aprovechan el calor que nos brinda el sol para producir agua caliente, estos dispositivos dependen de varios factores térmicos, geométricos y atmosféricos, por ende, se debe comprender las diferentes variables y las eficiencias térmicas del colector.

En la presente investigación se realiza la comparación de las eficiencias tanto del colector solar de placa plana como del colector solar de tubos al vacío, cuyo análisis se lleva a cabo bajo las condiciones de un clima tropical como lo tiene la ciudad de Bucaramanga Santander Colombia, para realizar esta comparación primero se realiza el diseño del colector solar de placa plana para seguido de esto buscar la empresa que lo fabrique bajo estas condiciones de diseño, para finalmente compararlo con el colector solar de tubos al vacío ubicado en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Industrial de Santander.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

ABSTRACT

TITLE: COMPARISON OF TWO FLAT PLATE AND VACUUM TUBE SOLAR COLLECTORS IN TROPICAL CLIMATE, TO OBTAIN THE BEST EFFICIENCY RESULT*

AUTHOR: CARLOS ANDRES FORERO SIERRA**

KEY WORDS: SOLAR COLLECTOR, FLAT PLATE, VACUUM TUBES, EFFICIENCY.

DESCRIPTION: Nowadays the main objective is to obtain a technology that provides us with energy that does not compromise the environment, based on the great evolution of mostly advanced countries, they have developed methodologies for the exploitation of renewable energies such as solar energy. One of them is the usage of solar thermal collectors, which take advantage of the heat that the sun gives us to produce hot water, these devices depend on various thermal, geometric and atmospheric factors, therefore the different variables and thermal efficiencies of the collector have to be understood.

In the present research, the comparison of the efficiencies of both the flat plate solar collector and the vacuum tube solar collector is carried out, whose analysis is carried out under the conditions of a tropical climate such as the city of Bucaramanga Santander located in Colombia, for carrying out this comparison, the design of the flat plate solar collector is first carried out, followed by the search for the company that manufactures it under these design conditions, to finally compare it with the vacuum tube solar collector located in the renewable energy laboratory of the industrial university of Santander.

*Bachelor Thesis

**Faculty of Physical mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

INTRODUCCIÓN

“Hacer una eficiencia energética y utilización de fuentes de energía renovables, especialmente del recurso solar, es una prioridad en general dada la alta demanda de energía por parte de la sociedad moderna, tanto urbana como rural, causada por el aumento de la muy alta necesidad de servicios, así como por el aumento de los índices de contaminación ambiental, causados por las fuentes finitas de combustibles fósiles y su impacto en el cambio climático y la destrucción del medio ambiente.”¹ Dadas las condiciones medioambientales y las necesidades energéticas actuales, el recurso solar es una fuente limpia y prácticamente ilimitada en comparación con los recursos fósiles, lo que garantiza el suministro a largo plazo. En particular, el rendimiento y la eficiencia de los colectores solares se han convertido en una de las cuestiones fundamentales y muy importantes a nivel mundial y regional.

Dado que la captación de energía se optimiza en general, como demuestran los innumerables estudios e informes recientes sobre sus características, aplicaciones y técnicas para aumentar su eficiencia, el rendimiento y la eficiencia de estos dispositivos solares dependen de diversos factores, como sus características físicas, estructura, materiales utilizados, configuración geométrica, así como su ubicación y posicionamiento astronómico con respecto a la incidencia de la radiación solar. La forma más eficaz de mejorar la eficiencia de estos dispositivos en estos momentos es cambiar el fluido de trabajo, que tradicionalmente ha sido el agua, por fluidos con una alta conductividad térmica. Se cree que los nanofluidos, que son fluidos con nanopartículas sólidas suspendidas en un fluido base y que se han utilizado recientemente, ofrecen una capacidad de transferencia de energía térmica superior a la de los fluidos de transferencia tradicionales.

¹Energías Renovables. Energía Eficiente: Evaluación de proyectos y políticas de colectores solares. Artículo [en línea]. 2013. [citado el 13 de nov de 2023].

En cuanto a la relevancia del presente trabajo, la capacidad y adaptabilidad de los sistemas de medición que han hecho posible los avances tecnológicos, como la instrumentación virtual, no puede despreciarse, ya que satisface con precisión las mediciones y el seguimiento continuo de los parámetros ambientales y operativos de dichos sistemas solares, además de lo anterior, la Cumbre de Copenhague de 2009 ha impulsado la inversión y la investigación en proyectos relacionados con la producción más limpia. Esto ha vuelto a llamar la atención sobre la energía solar como forma de producir agua caliente sanitaria y de proceso de forma técnica y económicamente viable. De hecho, el calentamiento solar de agua para uso doméstico es una alternativa emergente para sustituir a los calentadores convencionales (eléctricos, de gas, entre otros), y se presenta como una opción viable teniendo en cuenta las bajas temperaturas necesarias (40°C a 60°C), así como desde la perspectiva del ahorro energético, ya que en estos sistemas la fuente de calor es la radiación solar (que es gratuita y limpia), que sustituye a la electricidad o a los combustibles fósiles nocivos para el medio ambiente². Los SST (Sistemas Solares Térmicos) instalados han producido a la fecha de los trabajos en la nación un nivel aceptable de satisfacción en los consumidores; sin embargo, aún existe desconfianza entre los usuarios potenciales como consecuencia de errores técnicos cometidos por las corporaciones que los han construido y vendido. Adicionalmente, se promocionan equipos importados sin estar homologados para su uso en territorio colombiano.

²Medida de la Eficiencia de un colector solar de placa plana, mediante un montaje experimental desarrollado con instrumentación virtual. Artículo [en línea]. 2020. [citado el 13 de nov de 2023].

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El impacto medioambiental de la energía eléctrica ha contribuido a un aumento de la contaminación en los últimos años, lo que ha tenido una serie de efectos negativos en el medio ambiente, como emisiones y vertidos, producción de residuos, cambio climático, el deterioro de la capa de ozono, la lluvia ácida, el agotamiento de los recursos, la devastación de los ecosistemas por la explotación de yacimientos petrolíferos, la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad y la contaminación del agua y el suelo son sólo algunos de los problemas a los que nos enfrentamos hoy en día.

Los combustibles fósiles afectan negativamente al medio ambiente al liberar vertidos de diversa composición, como gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O), óxidos de azufre, nitrógeno y partículas. A esto hay que añadir los daños provocados por el uso de agua destinada a las plantas de refrigeración, que libera calor en el medio ambiente por encima del que se encuentra de forma natural, provocando un aumento de la temperatura y teniendo un impacto significativo en la flora y la fauna acuáticas, por ejemplo, las cenizas creadas en las instalaciones de combustión. Sin embargo, dada su peligrosidad, capacidad de contaminación y dificultad de tratamiento, los residuos radiactivos de las centrales nucleares son especialmente significativos.

Según el sitio web de la Unión Europea, los efectos del aumento de las temperaturas incluyen el deshielo, la subida del nivel del mar, condiciones meteorológicas extremas, más olas de calor, regiones más secas, incendios y sequías, un aumento de las muertes relacionadas con la temperatura, cambios en la distribución de las enfermedades transmitidas por el agua, así como extinciones de especies animales y vegetales.

En respuesta a esta crisis, 191 naciones firmantes del Acuerdo de París se comprometieron a tomar medidas para combatir el cambio climático, limitando el aumento de la temperatura global en este siglo a menos de 2 °C y, si es posible, a 1,5 °C, así como a mejorar su capacidad de adaptación a sus efectos. Según la Agencia de Protección

Ambiental de Estados Unidos (EPA)³, la segunda mayor fuente de emisiones de CO2 en 2019 fue la generación de electricidad, responsable del 30,44% de dichas emisiones.

La producción y el consumo de energía, junto con el transporte, son los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero, o gases que contribuyen al cambio climático. Reducir el consumo de energía es, por tanto, uno de los métodos de actuación para limitar y prevenir sus repercusiones medioambientales, sociales y económicas extremadamente catastróficas, incluidas las relacionadas con el aumento de la temperatura, la subida del nivel del mar y la disminución de las precipitaciones, entre otras. En estos momentos, el aumento de la demanda y el consumo de energía, así como los retos actuales, hacen presagiar un escenario de crisis energética mundial.

La realidad del cambio climático nos prohíbe retrasar la adopción de medidas. Aunque Colombia no figura entre los principales contribuyentes de emisiones de efecto invernadero, ha hecho promesas que está incumpliendo. Las fuentes contaminantes ganan terreno en lugar de dar cada vez más prioridad a las energías limpias, tanto en la generación como en el transporte. La Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, señaló que la generación de energía derivada del carbón subió de 5,3% en 2018 a 10,3% en 2019 y se prevé que llegue a 15% en 2020. Si miramos atrás en el tiempo, su contribución fue inferior al 3%. Reconocer que la energía hidroeléctrica se ha visto limitada por varios años de escasas precipitaciones sugeriría un aumento de todas las formas de generación térmica, pero mientras el carbón aumenta de forma inusual, el gas disminuye. Entre 2018 y 2019, la generación a gas disminuyó del 11% al 10%. El hecho de que el país no tenga ningún plan para reducir la cantidad de electricidad generada a partir del carbón es especialmente preocupante, aunque la energía solar y la eólica están muy cerca, la hidroeléctrica es la forma de energía más utilizada, ya que es totalmente renovable porque la lluvia y las nevadas refrescan el suministro de agua. Con el 67% de la electricidad generada por fuentes renovables en todo el mundo, la energía

³EPA. Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos. Artículo [en línea]. 2023. [citado el 13 de nov de 2023].

hidroeléctrica cumple el Acuerdo de París, ralentiza el ritmo del cambio climático y promueve el desarrollo sostenible.

Es innegable que Colombia necesita aumentar su oferta de energía eléctrica para estar a la altura de la demanda en los próximos años, pero esta oferta no puede lograrse permitiendo la participación de recursos contaminantes, pues de hacerlo se obtendría un beneficio que tendría un costo muy alto, así como efectos negativos para la salud. En consecuencia, es conveniente priorizar la producción de electricidad mediante gas natural y fuentes no convencionales de energía renovable. A diferencia de lo que ocurre con el carbón, Colombia tiene otros recursos que son menos contaminantes. Me refiero al gas natural, a la electricidad producida por energía solar, eólica e hidroeléctrica, que son las formas más limpias de generación de electricidad. En consecuencia, estos recursos son, de lejos, los mejores aliados para lograr el cumplimiento de nuestra política de descarbonización en 2030.⁴

Hoy en día, la energía eléctrica es una necesidad básica sin la que no podemos vivir. Debemos obtener energía de forma sostenible para un futuro respetuoso con el medio ambiente, ya que la necesidad ineludible de producir electricidad en cualquiera de sus formas tiene un impacto medioambiental desastroso en el mundo.

⁴Ecología verde. Energías Renovables. Energía solar. Artículo [en línea]. 2020. [citado el 13 de nov de 2023].

¿COMO OBTENER EL MEJOR RESULTADO DE EFICIENCIA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE DOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS AL VACÍO EN CLIMA TROPICAL?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del colector solar, realizando la comparación de uno tipo placa plana y de otro de tipo tubos al vacío.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar e instalar un colector solar de placa plana de iguales medidas al de tubos al vacío que se encuentra en el laboratorio de energías renovables de la universidad industrial de Santander.
- Realizar mantenimiento correctivo de un colector solar de tubos al vacío de la zona de laboratorios de energías renovables de la universidad industrial de Santander.
- Calcular los parámetros técnicos y operacionales de los colectores solares para la correcta medición de la eficiencia.

3. JUSTIFICACIÓN

Los combustibles fósiles son una segunda o tercera alternativa por sus graves efectos medioambientales y su influencia económica en los procesos de producción, que han llevado a la búsqueda de nuevas tecnologías de producción limpia en respuesta a problemas medioambientales como el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono o la gestión del agua, entre otros. La crisis económica mundial se ha agravado como consecuencia del elevado precio del petróleo durante el pasado año, que incrementó el coste de los procesos industriales.

Dada la creciente demanda de energía por parte de la sociedad contemporánea, tanto urbana como rural, provocada por el aumento de la demanda de servicios, así como por los crecientes índices de contaminación ambiental,⁵ “causados por las fuentes finitas de combustibles fósiles y su impacto en el cambio climático y la destrucción del medio ambiente”,⁶ hacer un uso eficiente de la energía y de los recursos energéticos renovables, en particular del recurso solar, es una prioridad en general. Estas circunstancias han hecho que el rendimiento y la eficiencia de los sistemas de captación y transformación de energía, y en particular el rendimiento y la eficiencia de los colectores solares, sea una de las cuestiones fundamentales de gran importancia a nivel mundial y regional, sabiendo que, dadas las condiciones medioambientales y las necesidades energéticas actuales, el recurso solar como fuente limpia es prácticamente ilimitado en comparación con los recursos fósiles, lo que garantiza el suministro a largo plazo.

El rendimiento y la eficiencia de estos colectores solares dependen de varios factores, entre ellos sus características físicas, estructura, materiales utilizados, configuración geométrica, así como su ubicación y posicionamiento astronómico respecto a la incidencia de la radiación solar, como demuestran innumerables estudios e informes

⁵MADS. Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. Artículo [en línea]. 2019. [citado el 13 de nov de 2023].

⁶Energías Renovables. Energía Eficiente: Evaluación de proyectos y políticas de colectores solares. Artículo [en línea]. 2013. [citado el 13 de nov de 2023].

recientes sobre sus usos, características y técnicas para aumentar su eficiencia. El uso de tuberías con altas conductividades térmicas en lugar del tradicionalmente utilizada agua como fluido de trabajo de estos dispositivos es una de las formas más eficientes de aumentar su eficiencia disponible en la actualidad. Recientemente, se han utilizado suspensiones de nanopartículas sólidas en un fluido base conocido como nanofluidos. Según las estimaciones, estos nanofluidos presentan propiedades excepcionales de transferencia de energía termoiónica en comparación con los fluidos de transferencia convencionales. Este trabajo demuestra las ventajas y el potencial del desarrollo de un colector solar plano que permita la mayor eficiencia posible.

4. MARCO TEÓRICO

En el presente proyecto se citarán algunos antecedentes del tema de investigación con el fin de conocer, a nivel internacional, nacional y local como se ha abordado este tema, ayudando a orientar mejor la propuesta de investigación y dando un factor de innovación. De la misma manera, se mencionarán referentes a fin de fundamentar de manera clara y concisa las variables claves del proyecto de investigación.

4.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

Un colector solar es un dispositivo capaz de absorber la radiación solar y transformarla en energía térmica, que se manifiesta en forma de calor que se suministra al líquido que circula por el colector. Como consecuencia de la crisis energética que persiste desde finales del siglo XIX, se han desarrollado varias tecnologías que funcionan utilizando la radiación producida por el sol. Estos numerosos colectores solares, que son una fuente de energía limpia y abundante con numerosos usos, como la producción de electricidad, productos químicos y agua caliente, contribuyen directamente a la cuestión medioambiental. Mediante el uso de colectores solares térmicos, la calefacción y refrigeración solares utilizan directamente la energía térmica para, entre otras cosas, calentar agua y espacios o enfriar zonas de edificios. Algunas de las ventajas de la energía solar son que es una fuente prácticamente ilimitada y sostenible de energía limpia y renovable, que puede utilizarse para calentar viviendas y generar electricidad, que no tiene coste y que los paneles solares pueden durar hasta 40 años. También reduce la dependencia de los combustibles fósiles y ayuda a preservar los recursos naturales.

4.2 INTERNACIONAL

Una tesis de maestría en energías renovables titulada "colector solar plano didáctico"⁷ fue descubierta a nivel internacional. El objetivo principal de este proyecto era construir un colector pedagógico de laboratorio con instrumentos de medición para controlar los ajustes del colector. Además, debía ser lo suficientemente confiable para realizar prácticas a nivel técnico superior universitario, teniendo en cuenta las diversas características de funcionamiento que requiere un colector solar.

Crearon un colector a escala para poder aplicar las conclusiones a situaciones reales en cuanto a funcionamiento, eficacia y programas de mantenimiento. El colector estaría expuesto a la radiación solar y dispondría de los instrumentos de medición básicos que pueden montarse en el equipo, y la actividad de análisis se realizaría en el laboratorio de energías renovables. Esto permitiría al alumno practicar la manipulación de las condiciones y la obtención de resultados simulados de casos reales.

En la actualidad, los recursos no renovables se utilizan en exceso y muchas naciones ya no dependen de ellos para obtener energía, puesto que son demasiado caros y difíciles de extraer. Esta tesis demuestra una de las muchas formas de explotar la energía solar, por ejemplo, con colectores solares, que convierten la radiación solar en calor. Mediante este proceso, se puede calentar y/o evaporar agua y utilizarla para fines domésticos, comerciales e industriales, así como para la producción de electricidad. Esta tesis también demuestra la importancia de utilizar recursos naturales renovables, en particular la enorme energía que irradia nuestro sol.

Como el alumno podrá entender el funcionamiento, operación y toma de datos a través de instrumentos de medición necesarios para el funcionamiento y operación de los colectores con este equipo, es fundamental contar con un colector solar didáctico que sea capaz de proporcionar datos técnicos y físicos. Los objetivos primordiales de la instalación de este equipo en la institución serían la experimentación y el desarrollo de prácticas.

⁷ALVARADO, Julio. Colector solar plano didáctico. Trabajo de grado para Maestro en Energías Renovables. Nuevo Laredo Tamaulipas. Universidad Tecnológica, 2012. 51p.

Los resultados fueron buenos porque se cumplió el objetivo de producir un recolector didáctico. También se elaborarán formatos de práctica para el recopilador didáctico, que serán dinámicos y se actualizarán después de cada sesión de práctica.

De este proyecto podemos tomar como referencia el análisis económico realizado debido a que se identifica la viabilidad que tiene el proyecto dentro del mercado, además de conocer los requerimientos que se necesitan para tener un producto de buena calidad para los posibles consumidores.

Para el cálculo del sistema fotovoltaico que permite la generación de corriente eléctrica y tiene la propiedad de proporcionar sombra en el área de estacionamiento de los 23 vehículos del personal administrativo y docente, la Universidad Tecnológica de Salamanca en México identificó un proyecto de alcance internacional.

La Universidad Tecnológica de Salamanca decidió crear un sistema fotovoltaico para suministrar electricidad al edificio docente "A", ya que no es inmune a la falta de servicio de energía eléctrica. El sistema se conectará a la red y se montará en el aparcamiento del personal administrativo de la Universidad Tecnológica de Salamanca. Esto reducirá aún más el coste de las tasas porque la energía que no utilice el sistema se devolverá a la red. La instalación de paneles solares resolverá las principales demandas de la universidad, incluida la escasez de electricidad en determinados edificios, al tiempo que reducirá los costes energéticos y evitará cortes de electricidad localizados. Para que la UTS siga expandiéndose en el futuro, es necesario poner en marcha medidas de conservación de la energía, ya que la universidad gasta actualmente más de 25.000 pesos mexicanos al mes en electricidad. Esto es resultado del programa de desarrollo 2013-2016, que prevé un aumento del 100% en la matrícula de estudiantes, así como un crecimiento infraestructural que incluye la construcción de dos nuevos edificios de enseñanza.⁸

Antes de calcular el consumo promedio similar a CFE y finalmente el ahorro que se obtendrá al implementar el uso de paneles fotovoltaicos en el área de estacionamiento

⁸LOPEZ, Ramos. Universidad Tecnológica de Salamanca en México. Sistema Fotovoltaico para la generación de corriente eléctrica, 2014.

para alimentar el edificio de docencia A de la UTS, es necesario determinar datos similares a energía, demanda pico, 2% baja tensión, bonificación, factor de potencia, subtotal, IVA 16%, facturación por periodo y cuota de alumbrado público.

La estimación se hizo para un sistema fotovoltaico integrado en la red, que garantiza el suministro de energía incluso en días nublados. Cuando no se utiliza, la energía se devuelve a la red, lo que reduce aún más los gastos de consumo.

Dado que los centros de investigación sólo producen datos mediante predicciones o trazabilidad, pudimos detectar la irradiación en la Universidad Tecnológica de Salamanca, que es la única medición directa en la zona.

La diferencia entre la carga medida, la registrada por la CFE, y la tomada suele ser de 12.000 W/m², lo que garantiza el suministro energético del edificio. Los paneles solares se conectarán a la red de suministro local para abastecer la demanda anual de electricidad de 83.661,65 kW del centro docente. Se propuso conectar los paneles a la red para pagar más a la empresa eléctrica los días en que no se utilizaran, ya que el consumo medio diario de energía es de unos 229.210 kW y los sábados y domingos sólo se trabaja medio día y no a todas horas, respectivamente.

Aunque resulta algo complejo debido a los requisitos de algunos equipos, este proyecto se plantea como la primera de una serie de iniciativas de la institución para crear una universidad sostenible. Sin embargo, existen alternativas para reducir el consumo y aprovechar los recursos naturales tanto en nuestro beneficio como en el del medio ambiente.

En base en este proyecto se tomó como consideración y ayuda las diferentes alternativas que utilizaron para llevar a cabo su investigación y resolver los obstáculos presentados a lo largo de la realización. Recalcando el gran ahorro que le están proporcionando a la universidad con la excelente investigación que realizaron y ejecutaron con éxito.

Finalmente, se encontró un proyecto estudiantil de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, titulado "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA, RADIACIÓN Y HUMEDAD DE UN PANEL SOLAR DE

TUBO DE VACÍO PARA EL ESTUDIO DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA".⁹

A partir de la selección de los sensores adecuados y de una tarjeta DAQ, crearon una instalación para el calentamiento de agua ACS, así como el sistema que les permitió obtener la información necesaria para este estudio.

De acuerdo con el capítulo 14 de la norma NEC11 sobre energías renovables, se realizó el diseño hidráulico del sistema de calefacción para comprobar si el panel solar proporciona la energía térmica necesaria para satisfacer las necesidades de ACS de una familia de cuatro personas.

Para capturar los datos de temperatura, radiación, humedad y caudal a lo largo del tiempo y crear un informe Excel a partir de los datos, se creó un software en el entorno LabVIEW. Para analizar la energía solar, se recopilaron datos y se procesaron estadísticamente mediante distribución de frecuencias, y se demostró que entre las 11:00 y las 15:00, la energía solar aporta entre 850 y 1150 W/m².

Se realizó un análisis económico para ver si sería viable construir el sistema de calefacción, y se comprobó que la instalación solar es ventajosa incluso sin subvención de GLP, recuperando el gasto inicial en cinco años. La comparación de los gastos de calefacción con energía eléctrica demuestra que el proyecto también es factible.

4.1.2 NACIONAL

El uso de la energía térmica se practica en Colombia desde mediados del siglo pasado. Cuando los trabajadores de las plantaciones bananeras vivían en Santa Marta, se colocaron calentadores solares en sus casas; estos calentadores aún permanecen, aunque inactivos. Más adelante, en la década de 1960, se colocaron calentadores solares domésticos de origen israelí en la Universidad Industrial de Santander, para investigar su

⁹FLORES, Fiallos. Implementación de un sistema de adquisición de datos de temperatura, radiación y humedad de un panel solar de tubo de vacío para el estudio del suministro de energía solar en la ciudad de Riobamba. Escuela superior Politécnica de Chimborazo Ecuador, 2015. 134p.

comportamiento. Más tarde, hacia finales de la década de 1960 y espoleados por la crisis del petróleo de 1973, universidades (entre ellas la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Bogotá y la Universidad del Valle) y fundaciones (entre ellas el Centro las Gaviotas) sentaron las bases para la instalación de calentadores solares domésticos y sistemas importantes de calentamiento de agua para su uso en centros de servicios comunitarios (como hospitales y cafeterías). Cuando miles de calentadores fueron instalados, desarrollados y fabricados por el centro Las Gaviotas en urbanizaciones de Medellín y Bogotá, a mediados de la década de 1980, los resultados más inventivos de este desarrollo estaban en su apogeo. Según los avances hasta 1996 se habían construido 48.901 m² de calentadores solares, la mayoría en comunidades con financiación del Banco Central Hipotecario en Medellín y Bogotá. Actualmente, el mercado nacional de calentadores solares está inactivo y a la espera de una nueva crisis energética.

Una tesis de grado titulada "La energía solar como solución ambiental"¹⁰ de la Universidad Tecnológica de Pereira propone utilizar paneles de energía fotovoltaica para bombear agua para la comunidad del departamento colombiano de La Guajira debido a las extremas sequías de la región y a la contaminación por agentes industriales. La Escuela de Tecnología Mecánica construyó un colector solar de tubos de vacío en la azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería Mecánica para usos experimentales.

En el ámbito Nacional también se incluyó un proyecto con el título "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA DE DUCHA EN EL SECTOR DEPORTIVO DE LA UTP."¹¹ El objetivo principal del proyecto, desarrollado en la Universidad Tecnológica de Pereira, fue diseñar, modificar e implementar exitosamente un colector solar para suministrar agua caliente a la ducha del personal del edificio de deportes de la universidad.

¹⁰La Energía Solar como solución Ambiental. Universidad Tecnológica de Pereira. Energía Fotovoltaica. Escuela de Ingeniería, 2018.

¹¹CÁRDENAS, Fernando. Diseño e implementación de un colector solar para el calentamiento de agua de ducha en el sector deportivo de la UTP. Universidad Tecnológica del Pereira, 2019. 93p.

En este trabajo de grado se discuten los diferentes tipos de colectores solares, enfocándose en el diseño y modificación de un colector solar de tubos de vacío que se instala en los baños de las autoridades y docentes de la UTP en el área de deportes.

Para la construcción y ajuste del colector solar se han tenido en cuenta diferentes elementos determinantes como la temperatura, la inclinación de la cubierta, la radiación, la incidencia solar, el diseño hidráulico y el estudio de la estructura, con el fin de ubicarlo en el lugar donde mejor funcione al utilizar el sol para calentar un fluido. Se describe el método de construcción del colector, teniendo en cuenta las variables clave, para garantizar su buen funcionamiento al captar la energía solar y alcanzar la temperatura más alta en el fluido de trabajo.

Gracias a ello, pudieron montar la estructura del colector solar, modificarla según las necesidades y transportarla al lugar de instalación, donde iniciaron los últimos pasos, como la instalación de los tubos de vacío y las tuberías de agua caliente y fría, ya que habían subido el colector al tejado sin ellos por seguridad y comodidad. Tomaron la decisión de utilizar dos prensas de tipo C para el sistema de fijación del colector y la viga, lo que facilitará y hará más cómoda la instalación. Para crear una forma de chimenea en el interior del acumulador y descargar los gases del interior, se colocó una tubería.

La “Creación de un módulo de vivienda integrado con los recursos locales y conectado con el aprovechamiento de la luz solar mediante el uso de tecnologías de componentes energéticos”¹² fue otro proyecto que se descubrió a nivel nacional, este estudio fue creado en la universidad piloto colombiana.

Esta investigación sobre sostenibilidad en la vivienda se realizó como proyecto de grado del programa de Arquitectura de la Universidad Piloto de Colombia con el fin de conocer la importancia de contrastar los efectos de un tipo de vivienda con características bioclimáticas y sostenibles frente a una vivienda tradicional. El objetivo de este tipo de

¹²CORTES, Sotelo. Creación de un módulo de vivienda integrado con los recursos locales y conectado con el aprovechamiento de la luz solar mediante el uso de tecnologías de componentes energéticos. Universidad Piloto Colombiana, 2021.

módulo es tener un diseño e intervención que enfatice la eficiencia energética a través del aprovechamiento de la energía solar.

La investigación pretende demostrar la adecuada orientación y uso de los sistemas constructivos integrales -aquellos que aplican los elementos, materiales, técnicas, Herramientas y equipos para la construcción de un prototipo de vivienda que pretende utilizar la energía solar de manera efectiva y completa para generar soluciones ambientales, así como el tipo de construcción y uso de materiales bioclimáticos. Para profundizar en ello, se eligieron varios temas que complementan y/o están relacionados con la idea de emplear la energía fotovoltaica en el diseño arquitectónico de viviendas. En una serie de análisis de diferentes autores, antecedentes, sistemas ambientales y tecnológicos, a la vez que se estudia el lugar de la intervención, que será en el Municipio de La Vega Cundinamarca, se discuten las características de los fenómenos que afectan los determinantes de la arquitectura bioclimática y cómo reaccionan estos componentes frente al medio ambiente.

A continuación, se comprendió el funcionamiento adecuado de cada uno de estos sistemas ecológicos y cómo instalarlos en una vivienda típica utilizando los principios de la bioclimática y la sostenibilidad. Comprender los componentes de una vivienda sostenible, incluida la función de la energía solar como fuente de energía alternativa y los colectores solares, es el objetivo de este estudio.

La estructura, la materialidad y los métodos para potenciar la luz solar se tuvieron en cuenta en la investigación de un módulo de vivienda fabricado con tecnología sostenible. El estudio Fab-lab House fue el inicio de una iniciativa centrada en la revolución digital que proponía diseñar una vivienda apoyada en un sistema digital, demostrando que con la tecnología adecuada se puede crear un modelo de vivienda basado en la composición de materiales de última generación mediante métodos tecnológicos, como la madera de esta estructura, con el objetivo de tener una morfología fácilmente reparable, siendo el objetivo principal del diseño un volumen elipsoidal que tenga en cuenta, como resultado, se facilita su adaptación a diferentes latitudes cambiando sus curvaturas de acuerdo con la trayectoria del sol.

Específicamente para el estudio de la vivienda sostenible, busco estrategias para la eficiencia energética en casas y edificios, analizando técnicas o iniciativas. En consecuencia, se seleccionaron diversos programas informáticos pertinentes para el análisis energético de una vivienda, teniendo en cuenta el clima local, las coordenadas y la radiación solar. Debido a las posibles circunstancias climáticas del lugar, sigue siendo difícil identificar las técnicas energéticas en el consumo de energía de las estructuras. Conclusiones: Estas derivadas pueden ser controladas con los análisis necesarios e implementados, resultando en buenas estrategias bioclimáticas y ahorro energético para la vivienda.

El diseño de la vivienda comenzó con un estudio de la radiación solar del emplazamiento. A partir de ahí, se utilizaron técnicas de programación informática y análisis de datos, que se combinaron con el diseño de la cubierta y la iluminación del módulo para lograr el objetivo de ser adecuado. En consecuencia, los resultados de este módulo fueron satisfactorios. Estos resultados permitieron deducir que el objetivo de crear un diseño de vivienda sostenible se puede lograr con la ayuda de la radiación solar, elementos bioclimáticos y tecnologías sostenibles.

4.1.3 LOCAL

En el ámbito local se encontró un trabajo de investigación realizado en la universidad industrial de Santander titulado análisis para utilizar la energía eólica y solar como fuente de energía eléctrica para la operación de campos petrolíferos.¹³

Según el consumo y las necesidades energéticas de un yacimiento petrolífero, la adopción de energía solar y eólica puede escalarse como complemento para satisfacer la demanda energética del yacimiento. En este proyecto se presenta un estudio de la bibliografía sobre las distintas fuentes de energía que pueden utilizarse para producir electricidad.

¹³ALVAREZ, CARREÑO. Análisis para utilizar la energía eólica y solar como fuente de energía eléctrica para la operación de campos petrolíferos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Ingeniería de Petróleos, 2019.

Se evaluaron múltiples variables para un caso de campo en la cuenca del Valle Medio del Magdalena en Colombia. Los resultados demostraron que el 34% del consumo de energía eléctrica del yacimiento podría sustituirse por energía solar y eólica, lo que supondría una reducción del 21% de las toneladas de CO₂e producidas por las operaciones del yacimiento.

Con el objetivo de fomentar la innovación energética y aprovechar los aspectos positivos del petróleo y de las fuentes de energía alternativas, se ha podido estimar el número de paneles a utilizar, con seis opciones diferentes, así como el uso de un aerogenerador, cuyas características dependen de la velocidad media del viento.

Como resultado del diseño de los sistemas de generación de energía solar y eólica, y teniendo en cuenta que la cantidad de energía necesaria para el hipotético campamento es de 1,1 MWh anuales, se determina que esta energía puede ser sustituida bien por una hectárea de paneles solares, con una capacidad de 7.240 paneles para 256 W y 4.634 para 400 W, o bien por dos turbinas, cada una con una capacidad de 277 kW, con un diámetro de 62 metros, una altitud de 50 metros, y en su caso con una velocidad promedio del viento de 8 m/s.

En definitiva, se recomienda emplear un sistema eólico cuando se tenga la certeza de que se alcanzarán velocidades medias realistas para aprovechar la energía cinética del viento y cuando se disponga de una superficie limitada, ya que este sistema aprovecha la región que rodea a la turbina. En el caso de los sistemas fotovoltaicos, se necesita una gran superficie, pero, sin embargo, se puede establecer un sistema híbrido si hay voluntad de innovar y se realiza un análisis económico, teniendo en cuenta los beneficios potenciales. Teniendo en cuenta que estos sistemas son aprovechables y eficientes en un rango promedio de 5 horas durante el día. En este estudio se presenta la información adquirida para examinar el uso de la energía solar y eólica como fuente de electricidad para la explotación de un yacimiento petrolífero, junto con conceptos, beneficios e inconvenientes del uso de cada tipo de energía en diversos contextos.

4.2 REFERENTES

Palabras claves: Colector solar-mantenimiento correctivo-eficiencia.

4.2.1 COLECTOR SOLAR

Un colector solar es cualquier dispositivo diseñado para aprovechar la energía solar y elevar la temperatura (nivel térmico) de un fluido para su uso. Los dos tipos principales de colectores son los de alta temperatura, que se construyen con espejos que concentran la energía solar, y los de baja temperatura, que suelen utilizarse en sistemas de calefacción doméstica, calentadores de agua domésticos y calentamiento de piscinas. El vapor que mueve una turbina para producir electricidad suele proceder de colectores de alta temperatura.

4.3 CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES

4.3.1 COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

FIGURA 1. Colector solar de placa plana.



FUENTE: Onosi solar. Placa plana. Artículo. 2021 [citado el 13 de nov. 2023].

Los colectores planos son dispositivos únicos de intercambio de calor que se utilizan para captar la luz solar y transmitir el calor a un medio. El núcleo absorbedor, la carcasa, la placa de cubierta transparente, la sustancia de conservación del calor y algunas piezas más forman un colector plano. Con frecuencia, sólo se utiliza cobre y aluminio para fabricar el núcleo absorbedor. Esta placa colectora se suelda con una aleta absorbente de cobre y aluminio, que está hecha de cobre y aluminio o de cobre y cobre y tiene una resistencia térmica muy baja. Las dos categorías principales son:

4.3.1.2 COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO

FIGURA 2. Colector solar de tubos al vacío.



FUENTE: Eco fener. Tubos al vacío. Artículo. 2018 [citado el 13 de nov. 2023].

Un colector solar de tubos de vacío está formado por un conjunto de tubos cilíndricos. Se utiliza un absorbedor selectivo para crear los tubos, que luego se encierran en un cilindro de vidrio transparente y se montan en un asiento reflector.

Entre el absorbedor interior y el tubo transparente exterior se produce el vacío. De este modo se evitan las pérdidas por conducción y convección desde la superficie del absorbedor. Esta forma de colector solar es más eficaz que los colectores planos, ya que permite alcanzar temperaturas de más de 100 °C y utilizar la radiación solar de forma mucho más eficaz.

Los tubos de vacío solares pueden utilizarse para generar agua caliente sanitaria, calentar edificios, refrigerar piscinas, etc.

Como alcanzan temperaturas más altas que los colectores planos, ocupan menos espacio y son más eficaces. El Gobierno subvenciona los colectores de tubos de vacío, más caros que los planos, como parte de un sistema solar térmico formado por tres componentes:

- **Flujo directo:** el fluido circula por los tubos, como en los captadores planos.
- **Flujo indirecto con Heatpipe:** En primer lugar, el calor provoca la evaporación de un fluido en el interior del tubo. A continuación, el fluido se condensa en el extremo del tubo, transfiriendo su energía al pasar por el tubo interior.
- **Flujo indirecto sin Heatpipe:** El hecho de que esté totalmente construido con vidrio de borosilicato en lugar de utilizar cobre, lo que habría aumentado los gastos, lo diferencia del anterior. Además, rinde un 30% más que los tubos de vacío sin Heatpipe.

4.4 ENERGIA HIDRAULICA

La energía hidroeléctrica se produce cuando el agua cae desde una altura determinada a un nivel inferior, haciendo girar ruedas hidráulicas o turbinas. En las regiones con suficiente agua, existe un recurso natural llamado hidroelectricidad. Para explotarlo, hay que instalar enormes turbinas y otras máquinas generadoras de electricidad, así como embalses, presas, canales de derivación y otras infraestructuras. En una central

hidroeléctrica, la energía potencial del agua almacenada en un embalse se transforma en la energía cinética necesaria para accionar el rotor de un generador, que produce energía eléctrica. Aunque los costes de mantenimiento de una central térmica son superiores a los de una hidroeléctrica debido al combustible, todo ello exige gastar una cantidad considerable de dinero, lo que la hace poco competitiva en regiones donde el carbón o el petróleo son baratos.

Como ya se ha mencionado, 27 instalaciones hidroeléctricas en Colombia representan el 66,3% de la capacidad instalada efectiva neta del Sistema de Interconexión Nacional. Las instalaciones hidroeléctricas más importantes del Valle del Cauca son Alto Anchicayá, Calima, Salvajina, Nima, Bajo Anchicayá y Ro Cali.

4.4.1 ENERGIA TÉRMICA (OBTENIDA A PARTIR DE COMBUSTIBLES FÓSILES)

La energía térmica es la que se libera al medio ambiente en forma de calor y se obtiene mediante la combustión de combustibles fósiles, la electricidad generada por el efecto Joule, la fricción, la fisión nuclear o los subproductos de otros procesos mecánicos o químicos. La energía así producida puede utilizarse inmediatamente para refrigerar, calentar y producir agua caliente. En estas situaciones, la energía térmica puede proceder de procesos de combustión, de fuentes naturales, de la electricidad o del aprovechamiento del calor residual de actividades industriales.

En un motor térmico, la energía térmica también puede utilizarse para generar energía eléctrica, como en el caso de la energía nuclear, o para crear trabajo, como en el caso de la combustión, como en los motores de los automóviles o de los reactores.

Una instalación en la que la energía mecánica necesaria para accionar el rotor del generador y, por tanto, generar energía eléctrica se obtiene del vapor creado por la ebullición del agua en una caldera se conoce como central térmica.

Suministrado a las turbinas a alta presión, el vapor producido tiene la capacidad de impulsar los álabes de la turbina por expansión. Las centrales de carbón, fuel o gas natural se denominan centrales termoeléctricas "clásicas". Estas instalaciones utilizan el

calor liberado por la combustión de carbón, fuelóleo o gas natural para convertir el agua en vapor.

4.4.2 ENERGIA SOLAR

Sólo es utilizable el 40% de los 1,6 millones de kWh de energía que el sol proporciona cada año a nuestro planeta, lo que supone varios cientos de veces más energía de la que se utiliza ahora en todo el mundo. El sol es una fuente de energía descentralizada, limpia e ilimitada. La cantidad de radiación solar que recibe el planeta, los ciclos diarios y anuales a los que está expuesto y las variables climáticas locales influyen en la cantidad de energía que se utiliza. El término "energía solar" se refiere a cualquier forma de energía que utilice la radiación del sol para generar electricidad o calor.

La atmósfera, los océanos y la vegetación absorben la energía solar de forma natural. Los vientos, por ejemplo, se crean por el intercambio de energía entre el sol, los océanos y la atmósfera. Los vientos se han aprovechado durante siglos para hacer girar los molinos. Los sistemas modernos de energía eólica utilizan hélices duraderas, ligeras, resistentes a la intemperie y de construcción aerodinámica para generar electricidad para la red eléctrica de una comunidad o región o para necesidades locales especializadas.

El ciclo del agua, que da lugar a las precipitaciones y a la energía potencial de los ríos y arroyos de montaña, consume más del 30% de la energía solar que llega al borde exterior de la atmósfera. Hidroelectricidad es el término utilizado para describir la energía producida por el agua en movimiento que pasa a través de turbinas contemporáneas.

La energía solar contribuye al crecimiento de la vida vegetal (biomasa), que puede utilizarse como combustible junto con la madera y los combustibles fósiles, como resultado del proceso de fotosíntesis. La biomasa también puede utilizarse para producir combustibles como el metano y el alcohol.

Como ya se ha señalado, los procesos fotovoltaicos implican la conversión de energía solar en energía eléctrica utilizando células fotovoltaicas o colectores de concentración. Como estas células o colectores semiconductores son sensibles a la luz, una corriente eléctrica circula entre sus dos caras cuando se exponen a la luz solar. Los componentes

de un sistema fotovoltaico varían en función de las especificaciones de la instalación y de si la aplicación está conectada a la red o no. A continuación, se enumeran los componentes que integran un sistema fotovoltaico aislado y que se utilizan para generar, controlar, almacenar y transformar la energía eléctrica (figura 5).

- **Celdas fotovoltaicas:** Allí se produce la conversión fotovoltaica. Las construidas con silicio cristalino son las más utilizadas. La célula desarrolla una diferencia de potencial y una corriente utilizable como resultado de la incidencia de la radiación luminosa. Las células fotovoltaicas, fabricadas con silicio, ganaron popularidad tras utilizarse para alimentar satélites en la década de 1950. La radiación se convierte directamente en electricidad mediante células solares construidas con silicio delgado, arseniuro de galio u otros materiales semiconductores en estado cristalino. Actualmente, es posible encontrar células con eficiencias de conversión superiores al 30%. En la actualidad, las células solares sólo se utilizan en equipos de baja potencia, remotos y sin mantenimiento, como boyas y componentes de naves espaciales.
- **Paneles fotovoltaicos:** Producen energía en corriente continúa conectando un grupo de células fotovoltaicas. Se orientan para maximizar su potencial teniendo en cuenta su ubicación y latitud con el fin de proporcionar un mayor rendimiento.
- **Regulador de carga:** Su finalidad es proteger la batería contra la carga y descarga excesivas. Además, se utiliza para advertir al usuario y proteger las cargas durante situaciones de trabajo difíciles.
- **Baterías:** Sirven para almacenar la energía eléctrica. La característica de funcionamiento más crucial de las baterías estacionarias, que suelen utilizarse en este tipo de aplicaciones, es el ciclado. Durante un ciclo diario, la batería se carga durante el día y se descarga durante la noche. Superpuesto al ciclo diario hay un ciclo estacional, que está relacionado con las épocas en las que hay menos radiación disponible.
- **Ondulador o Inversor:** Convierte la corriente continua de los paneles fotovoltaicos, que se produce a (12, 24 o 48 voltios) y se almacena en las baterías, en corriente alterna, que se produce a (220 voltios y 60 Hz). Para dimensionar un sistema aislado de la red es necesario conocer el consumo energético previsto del lugar que se va a electrificar y la disponibilidad media de radiación solar a lo largo del año. Los módulos solares utilizados

en las instalaciones conectadas a la red son idénticos a los utilizados en las instalaciones aisladas en cuanto a sus componentes.

4.5 NORMAS APLICADAS

Según el Atlas Colombiano de Radiación Solar, los siguientes requisitos son algunos de los más representativos en la normatividad de energías renovables del país.¹⁴

- **1989 se crea la Comisión Nacional de Energía (CNE):** funciona en FNCE.
- **Artículos 42, 43 y 44 del Decreto 2119/92 del año 1992, Decreto 2245/59. Ley 143/94:** da lugar a la creación del Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA). Desarrollar programas científicos y tecnológicos para incrementar el uso de fuentes renovables de energía, el ahorro, la conservación y la eficiencia energética.
- **Ley 143/94, Decreto 1683/97-UPME del año 1997:** por el cual se crea la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Determinar la forma de satisfacer las necesidades energéticas teniendo en cuenta los recursos energéticos convencionales y no convencionales existentes.
- **IPSE para 1999:** Se crea el IPSE para promover, fomentar, desarrollar y ejecutar soluciones energéticas con el fin de satisfacer los requerimientos energéticos de largo plazo de las Zonas No Interconectadas, o ZNI, y brindar asistencia técnica a las entidades autorizadas por el Ministerio de Minas y Energía.
- **- Ley 1450 de 2011:** Plan Nacional de Desarrollo y Plan de Inversiones 2011-2014, entre otros aspectos, tiene en cuenta el avance social y el dinamismo económico para el desarrollo sostenible. Es significativo notar que el artículo 105 toma en consideración el tema de las fuentes renovables de energía. En el artículo 105 se mencionan las fuentes de energía renovables. El Gobierno Nacional creará e implementará una política nacional para fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en alternativas ambientalmente sostenibles como la energía solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica y undimotriz. Esta política también evaluará los efectos del carbono en diversas industrias y establecerá incentivos y alternativas para disminuir su huella en nuestro país.
- **- Año 2012 Resolución 563:** Por la cual, de conformidad con el artículo 4° de la Resolución Número 186 de 2012 del Ministerio de Ambiente, se establece el procedimiento y los pliegos de condiciones para evaluar y decidir las solicitudes presentadas ante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con el fin de

¹⁴COLOMBIA POTENCIA DE LA VIDA. Ministerio del Medio Ambiente. Normativa. [en línea]. 2019. [citado el 13 de nov de 2023].

obtener la exclusión del impuesto sobre las ventas IVA y/o deducción en renta de elementos, equipos y maquinaria para proyectos, programas o actividades de reducción del consumo de energía e incremento de la eficiencia energética.

1. - **Ley 1715 del año 2014:** Artículo 1°. "Objeto: La presente ley tiene por objeto incentivar el desarrollo y la aplicación de las fuentes no convencionales de energía, en particular las de carácter renovable, en el sistema energético nacional a través de su integración al mercado eléctrico, su participación en zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como herramienta crucial para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del suministro. Promueve la gestión eficaz de la energía, que tiene objetivos comunes con la respuesta a la demanda y la eficiencia energética.
2. ARTÍCULO 2°. "RAZÓN DE SER DE LA LEY El objetivo de esta ley es crear el marco y las herramientas necesarias para incentivar el uso de fuentes no convencionales de energía, en particular las renovables, así como fomentar la inversión en investigación y desarrollo de energías limpias y el desarrollo de tecnologías de respuesta a la demanda y eficiencia energética. Adicionalmente, busca establecer un plan de acción para que Colombia cumpla con sus obligaciones en materia de gestión eficiente de la energía, el uso de fuentes renovables de energía y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, como las obtenidas a través de la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena) mediante la Ley 1665 de 2013.
3. ARTÍCULO 30. ESTRUCTURAS PROPIEDAD DE LAS ADMINISTRACIONES PÚBLICAS. Todos los edificios de las administraciones públicas tendrán objetivos de eficiencia energética establecidos por el gobierno nacional y las demás administraciones públicas, que se cumplirán mediante prácticas eficaces de gestión de la energía. Dichos objetivos se establecerán como objetivos incrementales que deberán completarse durante periodos de tiempo de hasta diez años a partir de su fecha de entrada en vigor. Cada entidad deberá reservar los

fondos (recursos) necesarios para aplicar estas estrategias de gestión eficaz de la energía.

4. Se está desarrollando y gestionando la reglamentación correspondiente a FNCE (Atlas Colombiano de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono, 2012).
- **Decreto Año 2015, MME:** Publicado para comentarios el 20 de mayo de 2015, este decreto regula el Fondo de Energías Renovables y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE).
- **Decreto del año 2016, MME:** Publicado para comentarios el 16 de abril de 2016, donde se establecen lineamientos de política pública para incentivar la autogeneración a pequeña escala, la gestión de la demanda de energía eléctrica y los medidores inteligentes.
- **Resolución Año 2016, MADS:** El 19 de enero de 2016 se publicó un aviso en el que se señalan los pasos a seguir para presentar una solicitud de certificación de beneficios ambientales para nuevas inversiones en proyectos que utilicen fuentes no tradicionales de energía y gestión efectiva de la energía, así como otras determinaciones.
- **Proure 2030:** Las iniciativas de PROURE nos ayudan a cumplir nuestros objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, a consumir energía de forma más eficaz. Se prevé que el índice de intensidad de las emisiones baje de 81 kgCO₂/COP a 60 kgCO₂/COP. El indicador ha disminuido desde la hipótesis de referencia, pero la aplicación de las medidas PROURE supone una reducción adicional del 14%. Según las estimaciones, la intensidad de las emisiones del escenario de referencia aumentará hasta 0,85 veces el valor real de 2020 en 2030, mientras que la intensidad de las emisiones del escenario PROURE sólo aumentará hasta 0,74 veces. Según la hipótesis tendencial y la hipótesis PROURE, esto se traduce en disminuciones anuales del 1,60% y el 2,93%, respectivamente.

5. DISEÑO METODOLOGICO

A continuación, se presentará de manera concisa el tipo de proyecto que se desarrollará, además se identificarán las características de la región donde se ejecutará el proyecto con el fin de conocer el ámbito económico, político, social, ambiental y tecnológico con que se cuenta y así mismo brindar un proyecto acorde a las características de la zona escogida. Por último, se mencionarán las estrategias a implementar para cumplir cada uno de los objetivos específicos.

5.1 POBLACIÓN

Este proyecto se llevará a cabo en la ciudad colombiana de Bucaramanga Santander, cabecera del departamento de Santander. Una de las ciudades más competitivas de América Latina y con mayor calidad de vida, según una evaluación del Banco Mundial de 2015. A orillas del Río de Oro, está situada al noreste de la nación, en la Cordillera Oriental, una división de la cordillera de los Andes. Con 625.114 habitantes, Bucaramanga es la quinta aglomeración urbana más poblada del país. Forma parte del Área Metropolitana de Bucaramanga, que también incluye Floridablanca, Girón y Piedecuesta. La capital del país, Bogotá, está a 384 kilómetros.

La Gobernación de Santander, la Asamblea Departamental, la sede seccional de la Fiscalía y el Área Metropolitana de Bucaramanga tienen oficinas en la capital del departamento, Bucaramanga. Bucaramanga también conserva las distinciones de ser la capital de la Provincia Metropolitana y la capital de Santander. Las comunicaciones por carretera la conectan con otras ciudades del país, mientras que el Aeropuerto Internacional Palonegro facilita el acceso al aire.

Ordenados por su contribución a la economía de la ciudad, los tres sectores económicos son el comercio, los servicios y la industria. La economía del área metropolitana de Bucaramanga es la quinta más grande del país. Para los meses de junio a agosto de 2022, la región metropolitana de Bucaramanga tuvo una tasa de desempleo de 9,2%.¹⁵

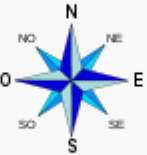
5.1.1 MARCO GEOGRAFICO

La ciudad está situada en una meseta a 959 metros sobre el nivel del mar en la Cordillera Oriental en el departamento de Santander en la provincia Metropolitana, a 7°08'N 73°08'W con respecto al Meridiano de Bogotá y longitud oeste de Greenwich, respectivamente. Las montañas la rodean por todos lados al este, mientras que el cañón

¹⁵IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología e investigaciones Ambientales. Artículo [en línea]. 2010. [citado el 13 de nov de 2023].

del Río de Oro está al oeste. Rionegro, al norte, y Matanza, Charta y Tona, al este, forman sus límites. Girón está al oeste y Floridablanca al sur.

FIGURA 3. Mapa Geográfico de Bucaramanga Santander.

<i>Noroeste:</i>	<i>Norte: Rionegro</i>	<i>Noreste:</i>
<i>Oeste: Girón</i>		<i>Este: Charta, Tona, Matanza</i>
<i>Suroeste:</i>	<i>Sur: Floridablanca</i>	<i>Sureste:</i>

FUENTE: Eco fener. Tubos al vacío. Artículo. 2018 [citado el 13 de nov. 2023].

Bucaramanga tiene una superficie total de 162 km², y debido a que varios puntos del terreno se encuentran a diferentes altitudes, la ciudad puede dividirse en tres pisos térmicos: cálido (55 km²), medio (100 km²) y frío (10 km²).

según la clasificación climática de Köppen Am, Bucaramanga tiene un clima monzónico, y está categorizada por el IDEAM como de clima cálido y seco en sus altitudes más bajas y de clima templado en sus altitudes más altas.⁴⁵ Su temperatura máxima promedio es de 30,9°C, mientras que su temperatura mínima promedio es de 23°C. Anualmente cae una media de 1304 mm de lluvia. Como en la mayor parte de Colombia, las precipitaciones se dividen en dos estaciones secas y dos lluviosas. Los meses secos son diciembre, enero, febrero, marzo, junio, julio y agosto. Los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre se distribuyen con épocas lluviosas.¹⁶

¹⁶IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología e investigaciones Ambientales. Artículo [en línea]. 2010. [citado el 13 de nov de 2023].

FIGURA 4. Promedio multianual de sol al día.

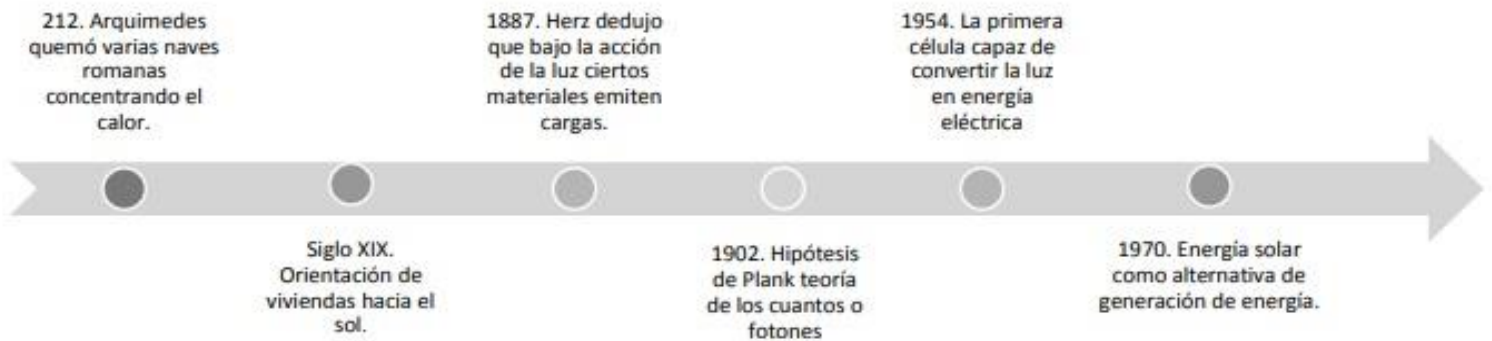
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temp. máx. abs. (°C)	32.0	33.0	34.2	33.8	32.4	33.8	32.6	33.8	32.6	32.4	32.4	33.8	34.2
Temp. máx. media (°C)	27.7	27.7	27.9	27.9	28.0	27.9	28.1	28.3	28.2	27.6	27.2	27.4	27.8
Temp. media (°C)	22.9	23.2	23.3	23.2	23.1	23.0	22.9	23.0	22.8	22.5	22.4	22.6	22.9
Temp. mín. media (°C)	18.9	19.1	19.4	19.5	19.5	19.4	19.0	19.1	19.0	18.9	19.1	18.9	19.2
Temp. mín. abs. (°C)	15.1	13.4	13.6	14.0	14.2	15.4	15.0	16.0	15.4	14.6	14.8	15.0	13.4
Precipitación total (mm)	90	101	138	134	131	86	106	86	111	132	111	78	1304
Días de precipitaciones (≥ 1 mm)	10	11	14	17	19	17	18	19	19	19	14	10	187
Horas de sol	174	107	98	100	115	88	112	111	101	104	125	156	1391
Humedad relativa (%)	80	80	81	83	84	83	82	81	82	84	85	82	82.3

FUENTE: IDEAM. Instituto de Hidrología, Metereología e investigaciones Ambientales. Artículo [en línea]. 2010. [citado el 13 de nov de 2023].

5.1.2 ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de la utilización de la luz solar como fuente de energía ha dado lugar a algunos acontecimientos históricos notables en los que el hombre ha utilizado el recurso solar como fuente de generación de energía.

FIGURA 5. Evolución de la utilización de la luz solar como fuente de energía



FUENTE: Energía solar. Departamento de energía. Artículo [en línea]. 2011. [citado el 13 de nov de 2023].

5.2 ESTRATEGIAS

Con el fin de cumplir el primer objetivo específico **Seleccionar e instalar un colector solar de placa plana de iguales medidas al de tubos al vacío que se encuentra en el laboratorio de energías renovables de la universidad industrial de Santander**, se plantearon las siguientes estrategias:

- A. Como primer paso se plantea la búsqueda de toda la información necesaria referente a los procesos que se han implementado, a fin de aprovechar las ventajas y desventajas que contiene el colector de placa plana para realizar un diseño exitoso.
- B. Seleccionar de los procesos consultados los más similares al proyecto de investigación planteado.
- C. Indagar acerca de los mecanismos o herramientas utilizados dentro del proceso.
- D. Consultar los parámetros técnicos necesarios que se requieren dentro del proceso del diseño y la instalación del colector en el laboratorio de energías renovables de la universidad industrial de Santander.
- E. Determinar correctamente la eficiencia del colector solar de placa plana una vez realizado el diseño y la instalación.

Realizar mantenimiento correctivo de un colector solar de tubos al vacío de la zona de laboratorios de energías renovables de la universidad industrial de Santander.

- A. Se debe realizar a gran profundidad un estudio acerca de cómo es el funcionamiento del colector solar de tubos al vacío.
- B. Indagar acerca del proceso a realizar al momento de ejecutar un mantenimiento correctivo de un colector solar de tubos al vacío.
- C. Hacer el debido mantenimiento correctivo del colector solar, con el fin de que este quede funcionando correctamente para su proceso de utilización.
- D. Seguidamente tomar diferentes medidas de eficiencia para continuar con el proceso de comparación con el colector de placa plana.

Calcular los parámetros técnicos y operacionales de los colectores solares para la correcta medición de la eficiencia.

- A. Primero se debe calcular las medidas exactas del colector solar de tubos al vacío que se encuentra en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Industrial de Santander.
- B. Cuando se tenga la medida anteriormente realizada, se debe comenzar la búsqueda del colector solar de placa plana con las mismas medidas del colector solar de tubos al vacío.
- C. Realizar un estudio matemático de los colectores totalmente terminados y funcionando correctamente para plantear y obtener el debido estudio técnico y operacional.
- D. Diferenciar cuál de los dos colectores solares obtendrá la mejor eficiencia con el debido proceso anteriormente mencionado.

6. PROCESO DE BUSQUEDA E INSTALACIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

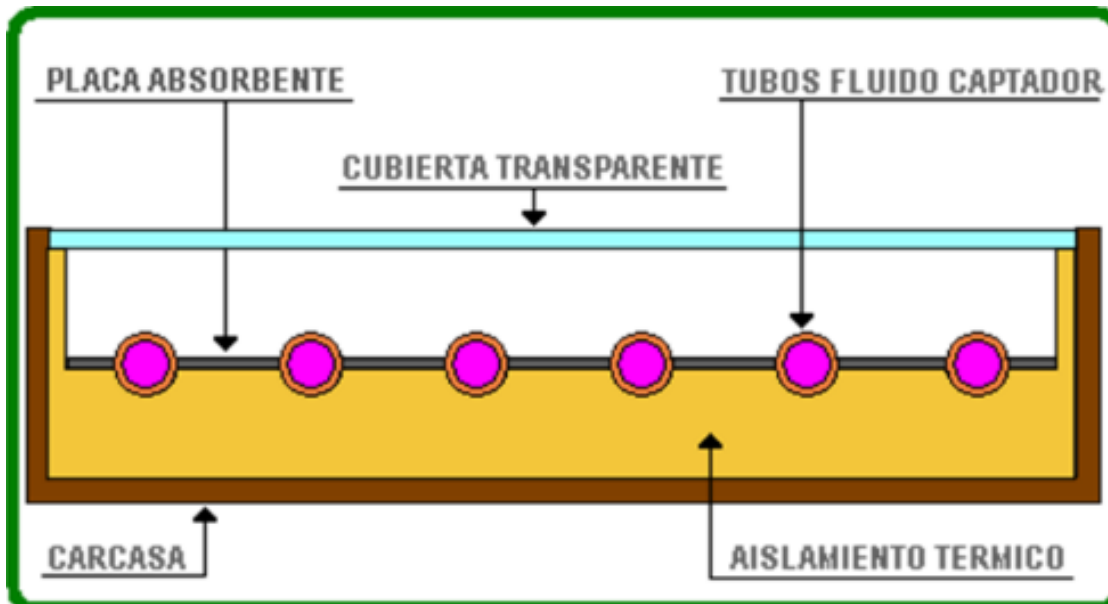
Para el diseño del colector solar de placa plana se tuvieron en cuenta los diferentes parámetros que tendría el colector, para posteriormente buscar la empresa que se encargara de realizar el prototipo exacto que se requería.

6.1 MATERIALES Y COMPONENTES

El captador solar plano, que es el componente principal de una instalación solar, se compone principalmente de una superficie absorbente, un sistema de tuberías, una

cubierta de vidrio, una capa aislante y una caja hermética que alberga el conjunto de componentes.¹⁷

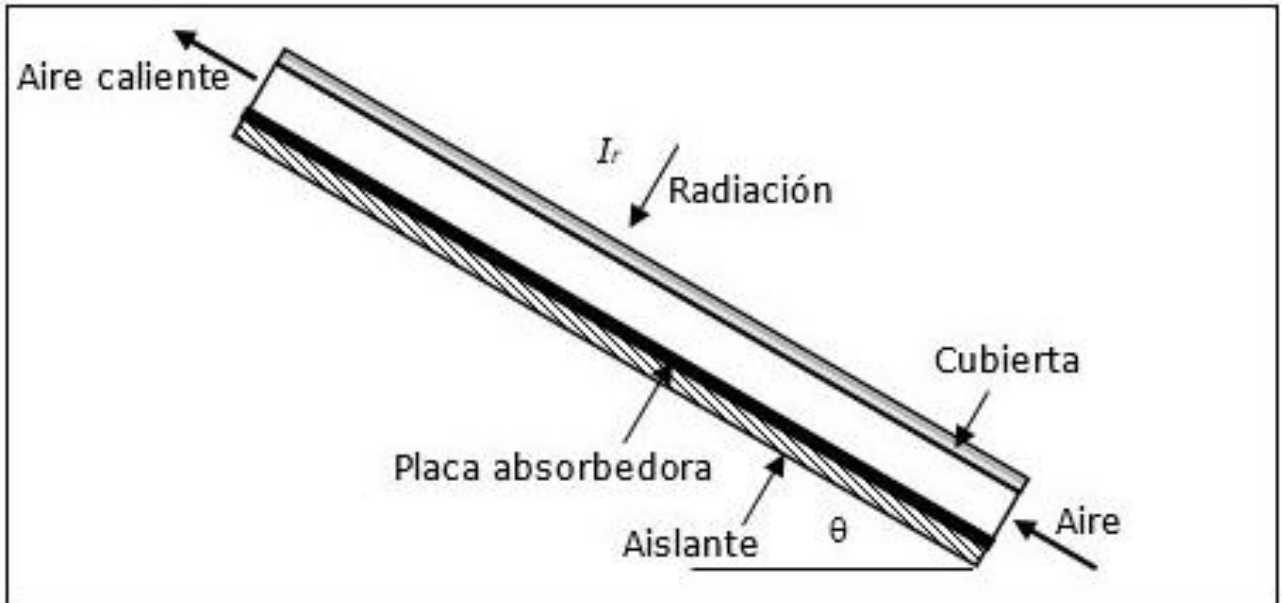
FIGURA 6. Materiales y componentes



FUENTE: EVE. Programa de incentivos ligados al autoconsumo y almacenamiento, con fuentes de energía renovable. Artículo [en línea]. 2021. [citado el 13 de nov de 2023].

¹⁷EVE. Programa de incentivos ligados al autoconsumo y almacenamiento, con fuentes de energía renovable. Artículo [en línea]. 2010. [citado el 13 de nov de 2023].

FIGURA 7. Radiación solar



FUENTE: Ingeniería energética. Artículo [en línea]. 2015. [citado el 13 de nov de 2023].

Radiación, absorción y convección son los tres fenómenos fundamentales que hacen que la temperatura del absorbedor aumente al incidir la radiación sobre él. Esto provoca un aumento de las pérdidas de calor hacia el entorno.

El material utilizado para fabricar el absorbedor debe tener altos niveles de absorción de la radiación solar, altos niveles de transmisión de calor y bajos niveles de emisión o pérdida de calor por radiación.

Es práctica común combinar cobre y aluminio con un recubrimiento superficial selectivo (antes pintura negra, más tarde recubrimiento de cromo negro y actualmente tratamientos electrolíticos y galvánicos). Este recubrimiento favorece la absorción, mejora el comportamiento térmico del colector y disminuye las pérdidas térmicas (radiación y convección).

6.2 CARACTERÍSTICAS FINALES DEL COLECTOR

- Portable y modular
- Bajo costo de adquisición
- Fácil mantenimiento
- Buen aspecto en general
- Fácil transporte
- No requerir supervisión
- No requerir mucho espacio
- Bajo peso
- Larga vida útil
- Silencioso bajo su operación
- Capacidad de calentar agua
- Adaptable a cualquier superficie

Los atributos de ingeniería que debe cumplir el colector son:

- Fácil acople al suministro de agua
- Sistema rígido
- Sistema instrumentado
- Colector portable y compacto
- Diseño modular
- Materiales resistentes a la corrosión
- Seguro en la operación y transporte
- Alta absorción de la radiación solar
- Materiales resistentes y buen acabado superficial
- Bajas pérdidas de calor

Uso de materiales comerciales

6.3 CIRCUITO HIDRAULICO

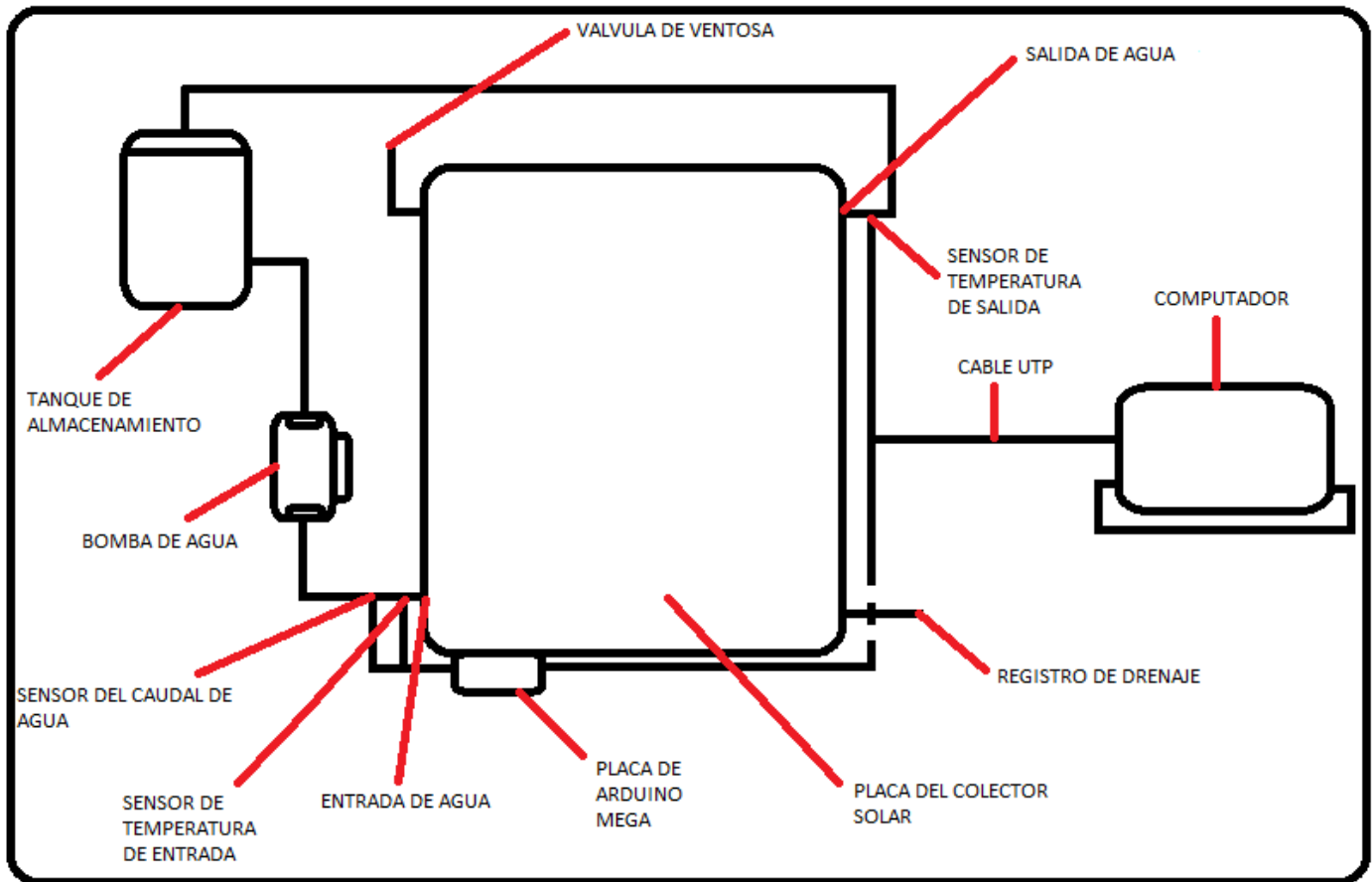
Los componentes principales de este sistema son:

- Entrada de agua
- Salida de agua
- Válvula de venteo
- Registro de drenaje
- Sensores de temperatura y caudal
- Placa de arduino mega
- Tanque de almacenamiento
- Bomba de agua
- computador

El circuito hidráulico debe cumplir los siguientes requisitos para garantizar su funcionamiento eficaz y correcto:

- Al instalar las tuberías, deben utilizarse retornos invertidos para garantizar que el caudal se distribuye por igual entre los colectores.
- Colocar una bomba de circulación en la zona más fría del circuito, a lo largo de un segmento de tubería vertical.
- Se instalarán en el circuito válvulas de seguridad que cumplan los requisitos de presión para garantizar que no se supere la presión máxima de trabajo de los componentes en ningún punto del circuito.
- Se instalarán dispositivos o válvulas anti retorno para evitar la circulación inversa y proteger la entrada de agua fría del acumulador solar.
- El circuito incluirá un dispositivo de llenado manual para permitir el llenado manual y el mantenimiento de la presión.
- Se instalarán válvulas de corte en la entrada de agua fría y en la salida de agua caliente del acumulador solar, así como válvulas auxiliares que permitan el vaciado total o parcial de la instalación.
- Donde previamente se hayan colocado válvulas de corte en cada zona de las baterías de captadores, se añadirán válvulas de seguridad.
- Se minimizarán en el diseño del circuito los sifones invertidos y los recorridos serpenteantes que faciliten el desplazamiento del aire atrapado hacia los puntos altos de la instalación.
- Siempre debe haber una pendiente mínima del 1% en la dirección del flujo para los trazados de tuberías horizontales.
- El aislamiento y la protección de las tuberías y accesorios deben realizarse con materiales que cumplan especificaciones estrictas.

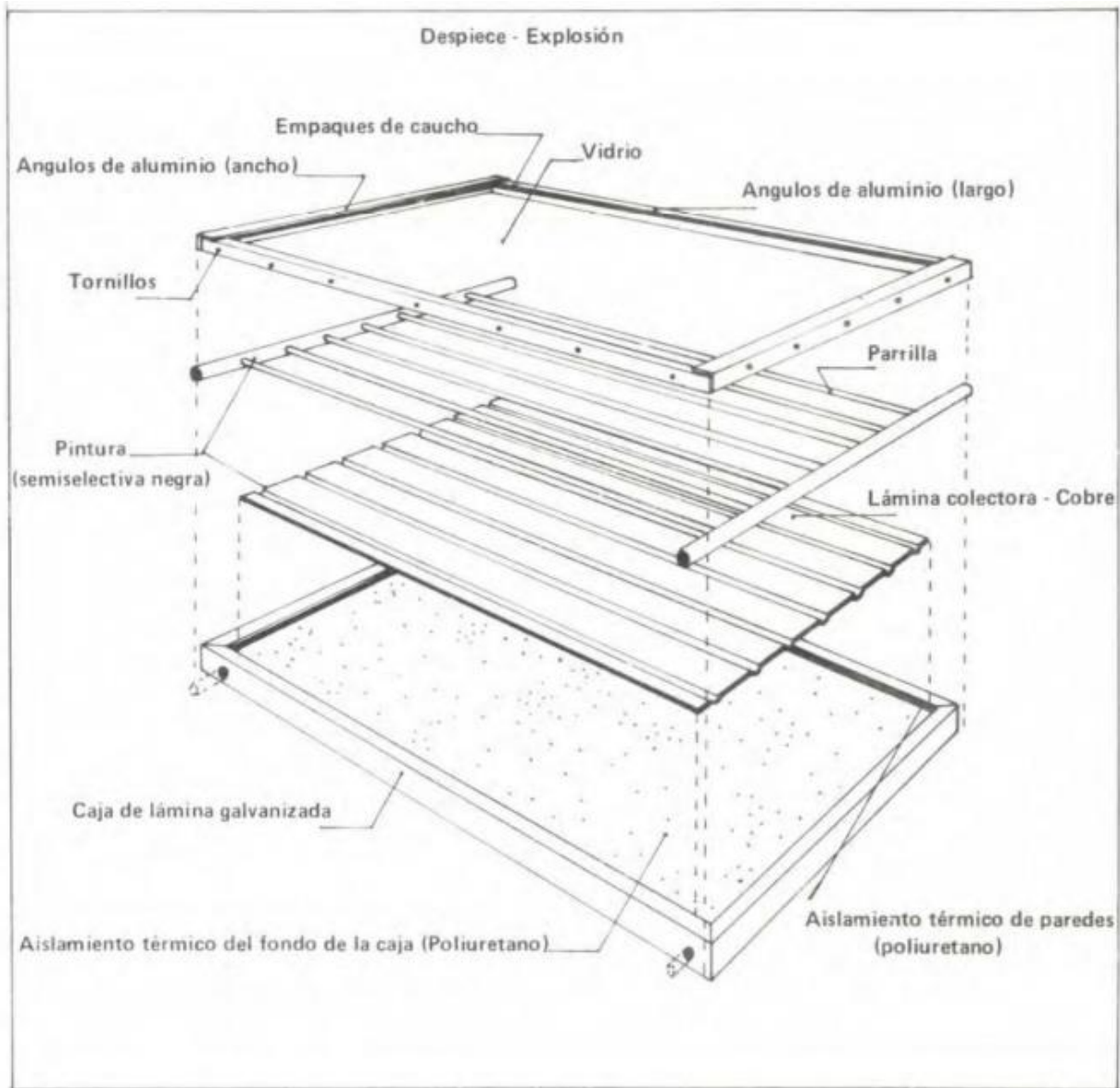
FIGURA 8. Circuito Hidráulico del colector solar de placa plana.



FUENTE: Autor.

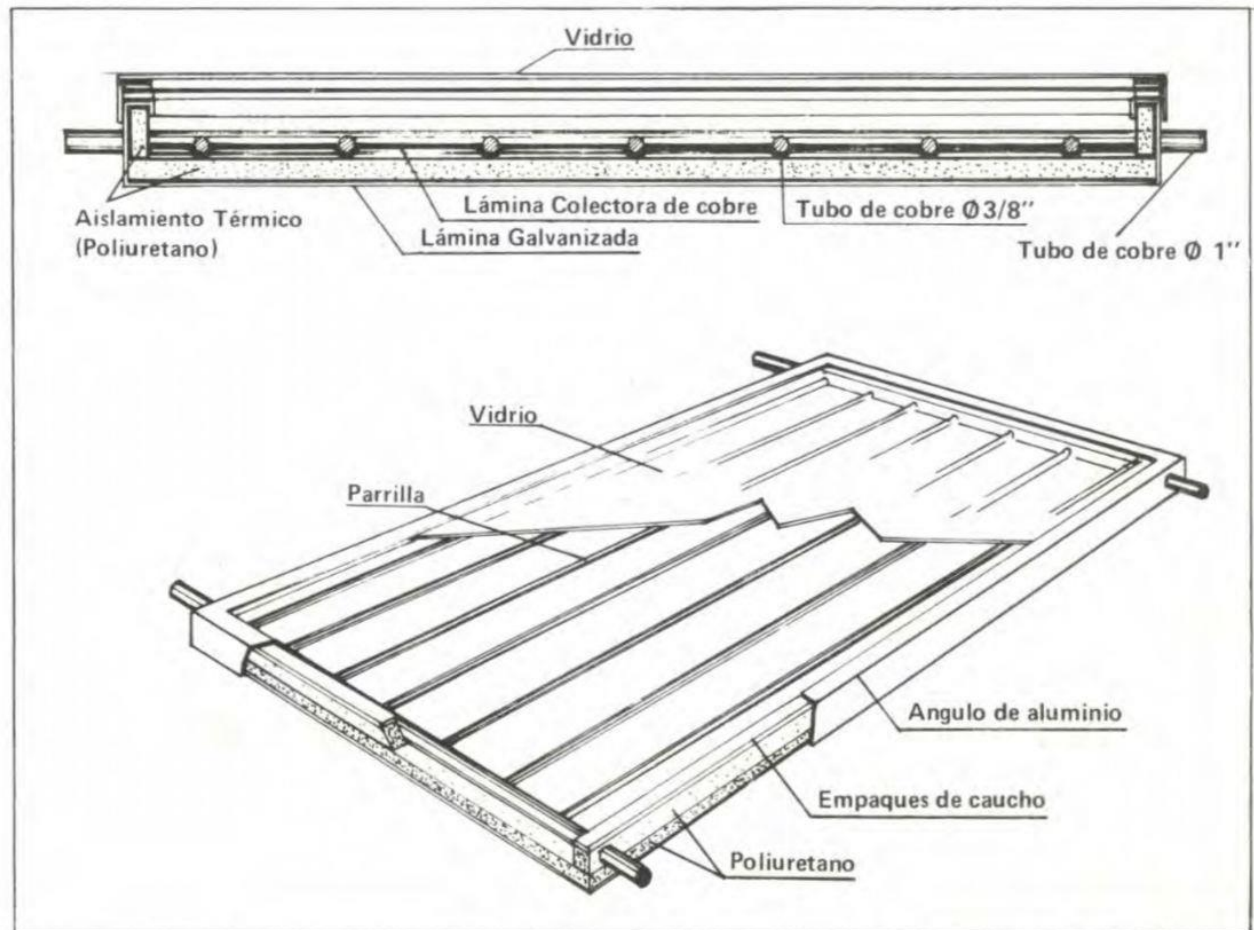
- Los componentes internos de la placa de captación del colector solar de placa plana son:
 - Vidrio
 - Parrilla
 - Lamina colectora y galvanizada
 - Aislamientos térmicos
 - Tornillos y empaques de caucho
 - Ángulos de aluminio de largo y ancho
 - Tubos internos de cobre

FIGURA 9. Componentes del sistema.



FUENTE: Construcción temas Especializados. Colector solar de placa plana. Artículo [en línea]. 1988. [citado el 13 de nov de 2023].

FIGURA 10. Componentes del sistema vistas de detalle



FUENTE: Construcción temas Especializados. Colector solar de placa plana. Artículo [en línea]. 1988. [citado el 13 de nov de 2023].

6.4 PARAMETROS DEL COLECTOR SOLAR SELECCIONADO

TABLA 1. DIMENSIONES DEL COLECTOR SOLAR SELECCIONADO

COLECTOR SOLAR CAPTADOR SOLAR	OP-V6
Código Codigo	5 200 214
Tipo Tipo	Plano Plan
Peso em vazio Peso en Vacio	33 kg
Dimensões - Área Dimensiones - Área	1930 x 1040 x 68 mm - 2,00 m ²
Área de abertura Área de abertura	1890 x 1000 mm - 1,89 m ²
Área do absorsor Área del absorsor	1890 x 1000 mm - 1,89 m ²
Espessura do absorsor Espesor del absorvedor	0,3 mm
Vidro cobertura temperado Cubiertas en vidrio templado	Baixo teor de ferro Bajo contenido hierro
Espessura do vidro Espesor del vidrio	3,2 mm
Material absorsor Material absorvedor	Aluminio Aluminio
Tratamento superficial Tratamiento superficial	Altamente selectivo Altamente selectivo
Absorção Absorción	95 %
Emissão Emisión	5 %
Tipo construção absorsor Tipo construcción absorbedor	Grelha tubos cobre Parrilha tubos cobre
Número de tubos - diâmetro x espessura Número de tubos – diámetro x espesor	Colectores Captadores: 2 - Ø 18x0,8 mm Verticais Verticales: 8 - Ø 8x0,4 mm
Fluído transferência calor Fluido Caloportador	Água + glicol Água + glicol
Capacidade de fluído Contenido de fluido	1,00 l
Máxima pressão de operação Máxima presión de operación	6 bar
Material isolamento Material aislamiento	Lã rocha Lana de roca: 40 kg/m ³
Espessura isolamento Espesor de aislamiento	Posterior Posterior: 30 mm
Material da caixa Material de carcasa	Alumínio Aluminio
Material painel traseiro Material panel trasero	Chapa zincada Hoja zincada
Material de vedação Material de sellado	Silicone, fita acrílica e EPDM Silicona, cinta de acrílico y EPDM
Ângulo de inclinação Angulo de inclinación	Min. 15° / Máx. 90°

FUENTE: Openplus solar Energy systems. Artículo [en línea]. 2018. [citado el 13 de nov de 2023].

7. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

7.1 MONTAJE DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

Colombia el diseño y el comercio de los colectores solares es extremadamente muy bajo, debido a esta problemática se realiza una búsqueda a nivel nacional para poder encontrar el diseño del colector solar de placa plana requerido en los objetivos del proyecto, finalmente en la empresa ECOSSOL de la ciudad de Bogotá D.C se realiza la compra del colector solar. Una vez transportado a la ciudad de Bucaramanga Santander se procede a la instalación del colector en el laboratorio de energías renovables de la universidad industrial de Santander.

FIGURA 11. Ingreso del colector solar de placa plana.



FUENTE: Autor.

FIGURA 12. Instalación del colector solar de placa plana.



FUENTE: Autor.

Una vez instalado el colector solar de placa plana en el laboratorio de energías renovables de la universidad industrial de Santander, se procede a seguir las especificaciones encontradas en el catálogo para así poder realizarle una base de soporte que se acople al ángulo de inclinación solicitado para obtener el mejor resultado de la eficiencia, en este caso se encuentra entre el rango de 20° a 35°, este dato es aconsejado por el fabricante del colector solar de placa plana.

- Base del soporte del colector solar de placa plana

FIGURA 13. Base de soporte.



FUENTE: Autor.

FIGURA 14. Base de soporte vista lateral.



FUENTE: Autor.

La base mostrada en la figura 13 y 14 se realizó exactamente a un ángulo de inclinación que varía entre 15 a 70 grados, este se limita por una cadena que se puede encontrar en las laterales del soporte, donde se podrá graduar manualmente a un ángulo acorde para extraer la mayor radiación solar que se evidencie en ese momento, también se encuentran unas platinas en la parte inferior, estas nos ayudan a que el soporte no se deslice al momento de acostar el colector solar de placa plana.

- Tanque de almacenamiento de agua del colector solar de placa plana

El tanque de almacenamiento tiene los siguientes materiales:

- Thermolón espuma aislante
- lamina térmica absorbente
- Cinta para ductos
- Remaches tipo pop

Pegante bóxer

FIGURA 15. Tanque de almacenamiento de agua.



FUENTE: Autor.

FIGURA 16. Tanque de almacenamiento de agua vista lateral.



FUENTE: Autor.

- Bomba de agua del colector solar de placa plana

Esta tiene las siguientes especificaciones:

- De 110 V – 217 V
- 45 Watts - 50 Watts
- 0.56 Amp
- 20L/Min
- 2.3 Cm de diámetro (entrada de agua)
- 2.17 Cm de diámetro (Salida del agua)

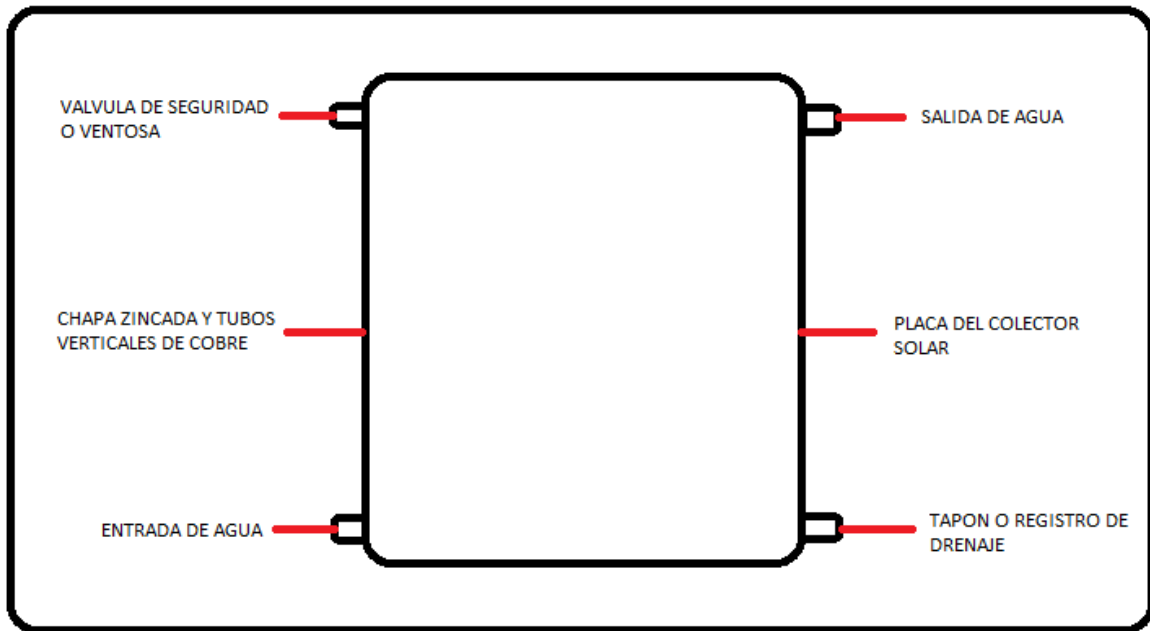
FIGURA 17. Bomba de agua del colector solar de placa plana.



FUENTE: Caboverdestore LC. Artículo [en línea]. 2021. [citado el 13 de nov de 2023].

- Placa del colector solar de placa plana

FIGURA 18. Bosquejo del colector solar de placa plana.



FUENTE: Autor.

Para cada una de las cuatro entradas de la gráfica 18 se realizaron las siguientes conexiones:

- VÁLVULA DE SEGURIDAD O VENTOSA

Para este puerto de entrada se realizó una conexión que consta primero de una soldadura de plata, esta se utilizó para pegar y asegurar todas las conexiones, de la salida del puerto de medida de $\frac{1}{2}$ pulgada se conectó un tubo de cobre de 4 cm de largo y $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, seguido de un codo de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada, un tubo de cobre de 4 cm de largo y $\frac{1}{2}$ pulgada, una hembra de $\frac{1}{2}$ pulgada y por último la válvula de ventosa de bronce de $\frac{1}{2}$ pulgada, como se muestra en la gráfica 19.

FIGURA 19. Entrada de válvula de seguridad o ventosa.



FUENTE: Autor.

- TAPON O REGISTRO DE DRENAJE

Para este puerto de entrada se realizó una conexión que consta primero de una soldadura de plata, esta se utilizó para pegar y asegurar todas las conexiones, de la salida del puerto de medida de $\frac{1}{2}$ pulgada se conectó un tubo de cobre de 4 cm de largo y $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, seguido de una hembra de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada y por último una válvula Bola de $\frac{1}{2}$ pulgada que permite el poder abrir o cerrar el paso del agua, como se puede evidenciar en la gráfica 20.

FIGURA 20. Tapón o registro de drenaje.



FUENTE: Autor.

- ENTRADA DE AGUA

Para este puerto de entrada se realizó una conexión que consta primero de una soldadura de plata, esta se utilizó para pegar y asegurar todas las conexiones, de la salida del puerto de medida de ½ pulgada se conectó un tubo de cobre de 4 cm de largo y ½ pulgada de diámetro, seguido de una hembra de cobre de ½ pulgada, un sensor de flujo de agua Yf-s201 con conexión macho-macho de ½ pulgada, una T hembra-hembra-hembra de ½ pulgada, una conexión para la entrada de agua que sale de la T y tiene entrada para manguera tipo jardín y la otra conexión para adaptar la termocupla tipo K para hallar la temperatura en la entrada del agua, como se puede observar en la gráfica 21.

El sensor de flujo de agua Yf-s201 parte con tres conexiones que son adaptadas a cable UTP, estas nos permiten poder alargar el trenzado hasta poder llegar a nuestra conexión de la protoboard y posteriormente unos jumper macho-macho que nos conectan al

arduino mega. La termocupla tipo K tiene directamente dos puertos de conexión, el positivo y el negativo. Estos directamente conectan con un módulo de temperatura max6675 que presentan 5 conexiones salientes, estas son adaptadas a cable UTP, donde este nos permite poder alargar el trenzado hasta poder llegar a nuestra conexión de la protoboard y posteriormente unos jumper macho-macho que nos conectan al arduino mega, como se puede observar en las gráficas 21,22,23 y 24.

FIGURA 21. Entrada de agua.



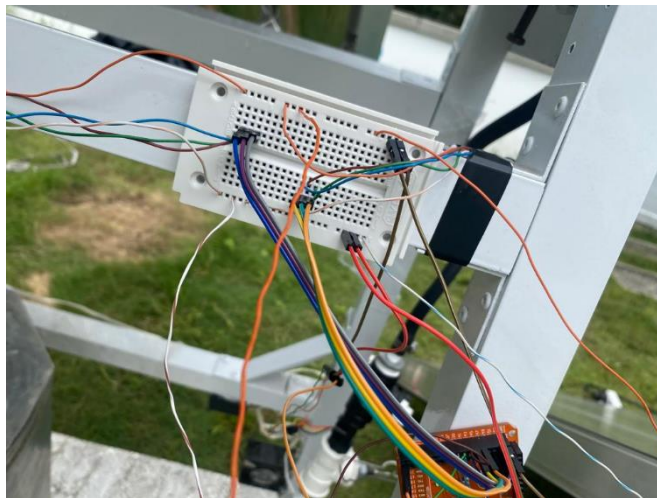
FUENTE: Autor.

FIGURA 22. Vista de conexiones.



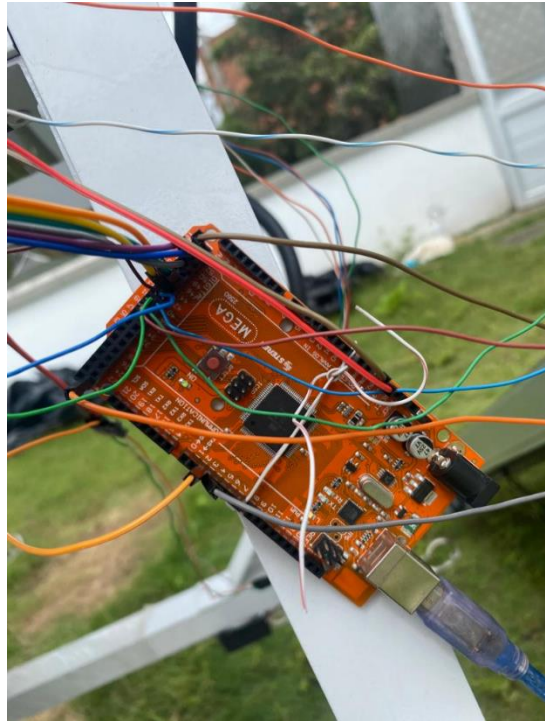
FUENTE: Autor.

FIGURA 23. Vista de conexiones al protoboard.



FUENTE: Autor.

FIGURA 24. Vista de conexiones al arduino.



FUENTE: Autor.

- **SALIDA DE AGUA**

Para este puerto de salida se realizó una conexión que consta primero de una soldadura de plata, esta se utilizó para pegar y asegurar todas las conexiones, de la salida del puerto de medida de ½ pulgada se conectó un tubo de cobre de 4 cm de largo y ½ pulgada de diámetro, seguido de una hembra de cobre de ½ pulgada, una T hembra-hembra-hembra de ½ pulgada, una conexión para la entrada de agua que sale de la T y tiene entrada para manguera tipo jardín y la otra conexión para adaptar la termocupla tipo K para hallar la temperatura en la salida del agua, como se puede observar en la gráfica 25.

La termocupla tipo K tiene directamente dos puertos de conexión, el positivo y el negativo. Estos directamente conectan con un módulo de temperatura max6675 que presentan 5 conexiones salientes, estas son adaptadas a cable UTP, donde este nos permite poder alargar el trenzado hasta poder llegar a nuestra conexión de la protoboard y

posteriormente unos jumper macho-macho que nos conectan al arduino mega, como se puede observar en las gráficas 21,22,23 y 24.

FIGURA 25. Salida de agua.



FUENTE: Autor.

- MONTAJE FINAL

Montaje final del colector solar de placa plana, se puede observar en las gráficas 26 y 27.

FIGURA 26. Montaje final.



FUENTE: Autor.

FIGURA 27. Montaje final vista lateral.



FUENTE: Autor.

7.2 MEDIDA DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.

La eficiencia η para el colector solar de placa plana se define mediante la siguiente ecuación (7.1):

$$\eta = \frac{Q_u}{H_t * A_c} \quad (7.1)$$

Donde Q_u , se puede calcular de la siguiente manera (7.2):

$$Q_u = \dot{m} * C_p * (T_s - T_e) \quad (7.2)$$

Para esto se debe realizar un balance de energía sobre la placa absorbidora, primero se analiza la radiación solar que incide sobre el plano del colector solar, esta se absorbe y atraviesa la cubierta, entregando una parte del calor absorbido como calor útil pero

también a su vez perdiendo calor hacia el ambiente exterior por conducción, como se muestra en la siguiente ecuación (7.3):

$$Q_{abs} = Q_u + Q_L \quad (7.3)$$

Para hallar el Q_{abs} , se debe tener en cuenta la incidencia de la luz solar en el vidrio o en una superficie transparente, siempre hay una parte que se refleja $H_{t_{pc}}$, una parte que se absorbe $H_{t_{ac}}$ y una que finalmente se transmite a través del vidrio $H_{t_{tc}}$, esa radiación que incide sobre la cubierta no se absorbe completamente, esta depende de la absorbancia de la cubierta.

$$S = H_t * (\tau\alpha) \quad (7.4)$$

$$Q_{abs} = H_t * A_c * (\tau\alpha) = S * A_c \quad (7.5)$$

Se debe tener en cuenta las pérdidas Q_L , esta se puede calcular como el coeficiente de pérdidas globales U_L , esta multiplicada por el área de la cubierta A_c y multiplicada por la diferencia de temperaturas $(T_p - T_a)$, que son la temperatura de la placa y la temperatura ambiente.

$$Q_L = U_L * A_c * (T_p - T_a) \quad (7.6)$$

Realizando un pequeño despeje para calcular Q_u , tenemos lo siguiente (7.7):

$$Q_u = Q_{abs} - Q_L \quad (7.7)$$

Reemplazando Q_{abs} y Q_L .

$$Q_u = A_c (S - U_L(T_p - T_a)) \quad (7.8)$$

Igualando Q_u , tenemos lo siguiente (7.9):

$$\dot{m} * C_p * (T_{salida} - T_{entrada}) = A_c (S - U_L(T_p - T_a)) \quad (7.9)$$

Para realizar el cálculo de la temperatura media del fluido también se debe tener en cuenta el factor de remoción F_r , como se muestra en la siguiente ecuación (7.10):

$$\eta = F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * \frac{T_{salida} - T_a}{H_t} \quad (7.10)$$

Calculando la temperatura de entrada del fluido

$$\eta = F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * \frac{T_{entrada} - T_a}{H_t} \quad (7.11)$$

Para hallar el F_r , se analiza lo siguiente (7.12):

$$F_r = \frac{\dot{m} * C_p}{A_c * U_L} \left(1 - e^{\left[\frac{U_L * F' * A_c}{\dot{m} * C_p} \right]} \right) \quad (7.12)$$

Para calcular el factor de eficiencia del colector F' , se analiza W como la distancia entre tubos, D como el diámetro externo de las tuberías, C_b como la conductancia de la soldadura, h_{fi} coeficiencia de película entre las tuberías y el agua y D_i diámetro interno de las tuberías.

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi * h_{fi} * D_i} \right]} \quad (7.13)$$

Al utilizar el concepto de eficiencia de aleta, podemos plantear el resultado para la eficiencia estándar, para aletas rectas que se presentan como el factor F, se puede expresar como (7.14):

$$F = \frac{\tanh\left[\frac{m(W-D)}{2}\right]}{\frac{m(W-D)}{2}} \quad (7.14)$$

Esta eficiencia se puede medir de forma experimental o teórica, para el caso de este trabajo de grado será medida experimentalmente, es importante tener en cuenta que esta eficiencia se puede definir para diferentes periodos como lo son la eficiencia diaria, eficiencia horaria o eficiencia instantánea. Todo depende en qué momento yo este evaluando el calor útil o la cantidad de radiación que llega del plano del colector solar, nos enfocaremos en la eficiencia horaria para eso seguiremos lo siguiente.

- Para realizar la medida de la eficiencia experimental primero debemos definir la siguiente ecuación (7.15):

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_D} \quad (7.15)$$

Esta se define como la cantidad de energía que yo le puedo extraer (energía útil), es la que pasa directamente a calentar el agua y se divide por la cantidad de energía disponible sobre el plano del colector, en este caso la energía que se tiene disponible es la que viene directamente de la radiación solar de la superficie inclinada en el área del colector.

- Para calcular la energía útil tenemos la siguiente ecuación (7.16):

$$Q_u = \dot{m} * C_p * (T_s - T_e) \quad (7.16)$$

Esta energía útil depende del flujo del caudal del agua que está en kilogramos de agua por segundo que circula por los tubos del colector, multiplicado por el calor específico del agua y multiplicado por el salto térmico de temperatura que yo consigo en este caso es la diferencia de temperatura entre la salida y la entrada del agua.

Para la medida del caudal del agua se debe tener en cuenta lo siguiente, La relación entre kilogramos (kg) y litros (L) depende de la densidad del material en cuestión. El litro es una medida de volumen, mientras que el kilogramo es una medida de masa. La conversión directa no es posible sin conocer la densidad del material. Sin embargo, en el caso del agua, que es una sustancia comúnmente usada como referencia, la relación es aproximadamente (7.17):

$$\mathbf{1 \text{ litro de agua} = 1 \text{ kilogramo} \quad (7.17)}$$

Esta relación se debe a que la densidad del agua es aproximadamente 1 g/cm³ (gramo por centímetro cúbico), y dado que hay 1000 cm³ en un litro, 1 litro de agua tiene una masa de alrededor de 1000 gramos o 1 kilogramo. Teniendo en cuenta que esta relación no se aplica a otros líquidos o sustancias con diferentes densidades.

Con base en lo anteriormente explicado, este caudal m se trabajó en la programación de arduino con unidades de L/s, para eso se utilizó un sensor de flujo de agua Yf-s201, como muestra la gráfica 21, donde este parte con tres conexiones que son adaptadas a cable UTP, estas nos permite poder alargar el trenzado hasta poder llegar a nuestra conexión de la protoboard y posteriormente unos jumper macho-macho que nos conectan al arduino mega.

Para la obtención de las variables T_s y T_e se utilizaron unas termocuplas tipo K, estas tienen directamente dos puertos de conexión, el positivo y el negativo. Estos directamente conectan con un módulo de temperatura max6675 que presentan 5 conexiones salientes, estas son adaptadas a cable UTP, donde este nos permite poder alargar el trenzado hasta poder llegar a nuestra conexión de la protoboard y posteriormente unos jumper macho-macho que nos conectan al arduino mega, como se puede observar en las gráficas 21,22,23 y 24.

Finalmente, en la variable C_p , esta es consultada directamente en tablas donde se encuentra un valor de $4182 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$.

- Para calcular la energía disponible tenemos la siguiente ecuación (7.18):

$$Q_D = H_t * A_c \quad (7.18)$$

Donde:

H_t = Radiación solar obtenida en la cubierta

A_c = Área de la cubierta

Esta depende de la radiación solar H_t que evidenciamos al momento de realizar las pruebas experimentales, en este caso se obtuvo la mayor radiación solar en $1106 \frac{W}{m^2}$ (resultado donde se encontró la mejor eficiencia de los colectores solares), está siempre rondo sobre los $700 \frac{W}{m^2}$, teniendo en cuenta que las pruebas se realizaron de 11 AM a 1 PM, los días donde se encontraba mayor radiación solar, los resultados se pueden evidenciar en la gráfica 32.

FIGURA 28. Máxima Radiación solar obtenida.

Radiación Solar Alta **1106** W/m² @ 12:50 p.m.

FUENTE: Weatherlink, estación Universidad Industrial de Santander. UIS-INGMECANICA, 2023.

Para la obtención del área total A_T , esta es extraída directamente por el fabricante con un valor de 2.01 m^2 y adicionalmente encontrada en la lateral de la placa del colector como se muestra en la figura 29, en el caso de los experimentos se necesita el área de la cubierta A_c , esta tiene un valor de $1,89 \text{ m}^2$, esta se puede encontrar en la tabla 1.

FIGURA 29. Especificaciones del colector solar de placa plana.



FUENTE: Autor.

➤ Bomba de circulación

Para calcular la potencia aproximada de la bomba necesaria hacemos uso de la siguiente expresión (7.19):

$$P = C * \Delta P \quad (7.19)$$

Donde:

P = Potencia eléctrica

C = Caudal del agua

ΔP = Pérdida de carga de la instalación.

Estas especificaciones se pueden encontrar en la página 49.

Finalmente, para calcular tanto la Q_u como la Q_D , como se ha mencionado anteriormente se procede a realizar la programación en arduino y posteriormente a realizar la conexión de los diferentes sensores y la lectura obtenida para hallar la eficiencia de los colectores solares, esta programación se puede observar en el anexo A.

Todas las variables anteriormente mencionadas fueron medidas para obtener finalmente la eficiencia térmica.

➤ Radiación solar:

La radiación solar fue medida con la ayuda de la aplicación WeatherLink, esta nos ayuda a localizar la estación UIS-INGMECANICA Bucaramanga-Santander y nos brinda en tiempo real el resultado de la radiación solar en unidades (W/m²).

➤ Medida de temperatura

La temperatura de entrada y de salida de los colectores solares se tomó mediante termocuplas tipo K, adaptadas a un módulo max6675 quien nos brindaba la conexión hacia la protoboard y posteriormente al arduino mega estos sensores se intentaron colocar lo más cerca posible a la entrada y salida de agua de los colectores solares.

➤ Flujo de agua

Para determinar el caudal se utilizó un sensor de flujo de agua YFS-201.

El agua se deja circular durante un periodo de 5 a 10 minutos antes de las mediciones para permitir que el sistema se estabilice térmicamente. Esto se debe al hecho de que cuando el agua se bombea por primera vez a través del colector después de estar en reposo, su temperatura de salida es extremadamente alta y desciende rápidamente antes de estabilizarse.

➤ Medida de la eficiencia

Con base en los sensores tanto de temperatura, flujo de agua y la obtención en tiempo real de la radiación solar. Primero se lleva el proceso de conexión de los sensores a los colectores de placa plana y de tubos al vacío, posteriormente se les realiza la conexión con cable UTP hacia la protoboard y posteriormente hacia el arduino mega utilizado en el proyecto. Una vez conectado totalmente los sensores se procede a cargar la programación realizada en el arduino mega en el software del computador y finalmente ejecutarlo para iniciar a obtener los resultados requeridos.

Estas pruebas se realizaron varios días en la hora de 11 AM a 1 PM, donde se obtenían resultados durante media hora de seguido, esta programación estaba editada para que nos tomara cada 3 segundos los resultados, pero cada 1 minutos los registrara, esto se realizó con el fin de no encontrar tantos resultados repetitivos y evidenciar el aumento de la temperatura, para posteriormente ver los resultados de la eficiencia tanto del colector solar de placa plana como el de tubos al vacío.

7.3 RESULTADOS FINALES DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

Los resultados de la eficiencia del colector solar de placa plana se almacenaron en el arduino, donde por varias pruebas se evidenció una tendencia donde las temperaturas empezaban en 27°C a 30°C y durante la media hora de prueba experimental tomaban un incremento de 50°C a 58°C, siendo esta su más alta temperatura registrada por los sensores.

Los experimentos se realizaron con un ángulo de 30°C, con el fin de que la placa del colector recibiera la mayor radiación solar posible.

Las variaciones presentadas en el caudal de agua se presentan porque el sensor de flujo depende de que tanta agua pueda desplazar la bomba puesta en el colector. Sabiendo que el funcionamiento de estas bombas es por tiempos, por ejemplo, trabaja seguidamente un tiempo adecuado y durante otra parte del tiempo completa su ciclo entregando menor potencia, durante la media hora del experimento se puede evidenciar que los resultados del caudal oscilan entre 0,142 L/s hasta los 0,162 L/s.

➤ Resultados obtenidos el 11 de Agosto de 2023

TABLA 2. Resultados obtenidos el 11 de Agosto de 2023.

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACIÓN SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,12	28,48	1,36	0,142	620	68,92%
28,22	29,56	1,34	0,142	620	67,91%
28,42	29,77	1,35	0,145	649	66,74%
28,96	30,23	1,27	0,153	649	66,25%
29,41	30,59	1,18	0,147	580	66,17%
30,15	31,26	1,11	0,151	580	63,94%
31,67	32,99	1,32	0,164	810	59,14%
32,77	34,05	1,28	0,162	810	56,65%
33,11	34,36	1,25	0,158	810	53,95%
33,96	35,16	1,2	0,156	800	51,78%
35,12	36,31	1,19	0,16	906	46,50%
35,71	36,87	1,16	0,158	906	44,76%
35,98	37,11	1,13	0,149	873	42,67%
36,51	37,61	1,1	0,147	873	40,98%
37,89	38,95	1,06	0,149	948	36,86%
38,92	39,95	1,03	0,148	948	35,58%
39,44	40,45	1,01	0,148	948	34,89%
39,93	40,9	0,97	0,154	948	34,87%
40,15	41,09	0,94	0,15	948	32,91%
40,81	41,73	0,92	0,156	1009	31,47%
41,66	42,55	0,89	0,16	1009	31,23%
42,21	43,06	0,85	0,156	1009	29,08%
43,96	44,78	0,82	0,16	1009	28,77%
45,67	46,49	0,82	0,154	980	28,51%
46,87	47,68	0,81	0,155	980	28,35%
48,11	48,91	0,8	0,156	980	28,18%
49,71	50,51	0,8	0,154	980	27,82%
51,22	52	0,78	0,16	1060	26,05%
52,12	52,86	0,74	0,164	1060	25,33%
53,76	54,47	0,71	0,164	1060	24,31%

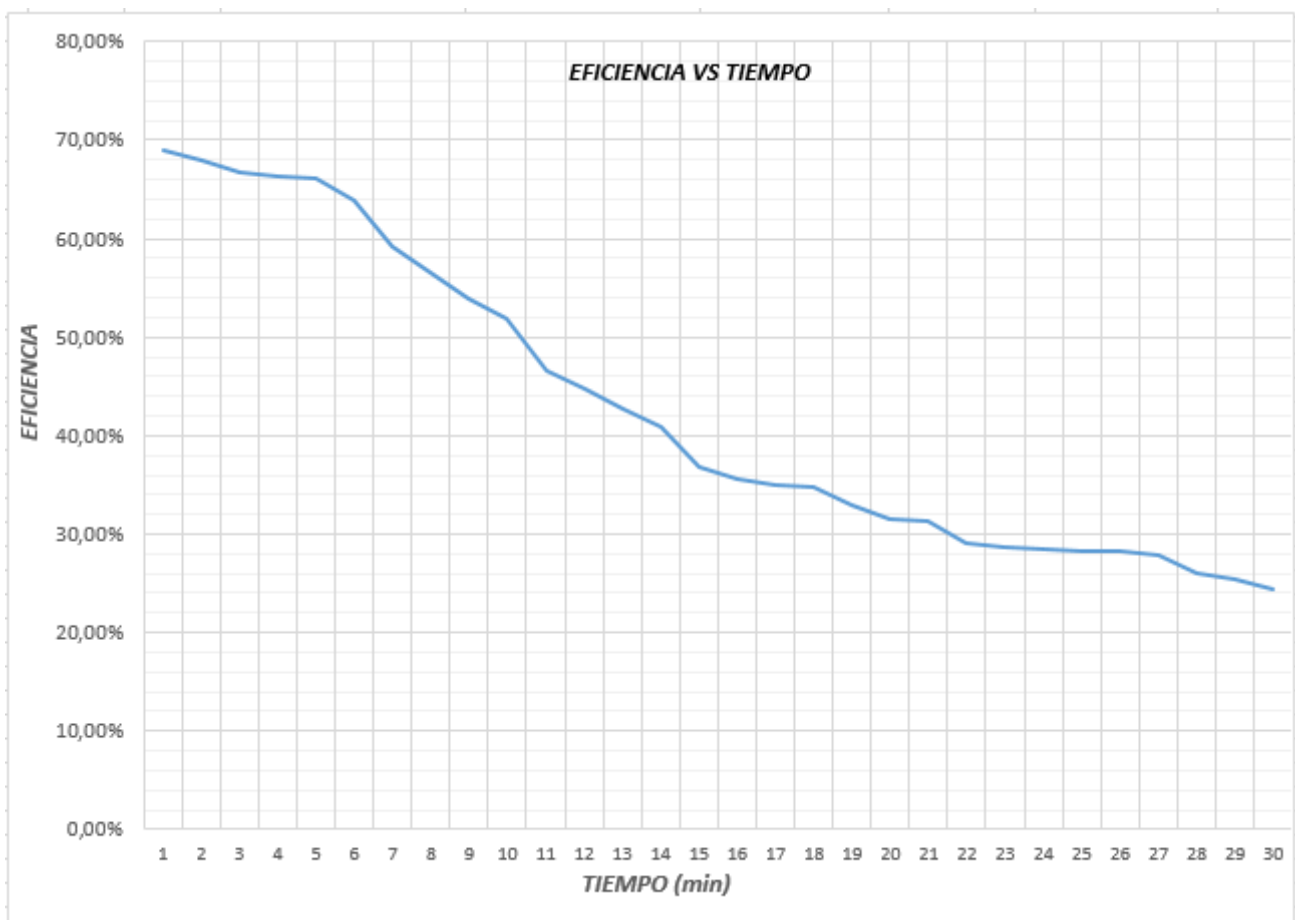
FUENTE: Autor.

En la tabla 2, podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 68,92% y finalizo con 24,31%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

- Eficiencia vs tiempo

En la gráfica 30, se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.

FIGURA 30. Eficiencia vs Tiempo 11 de Agosto de 2023.

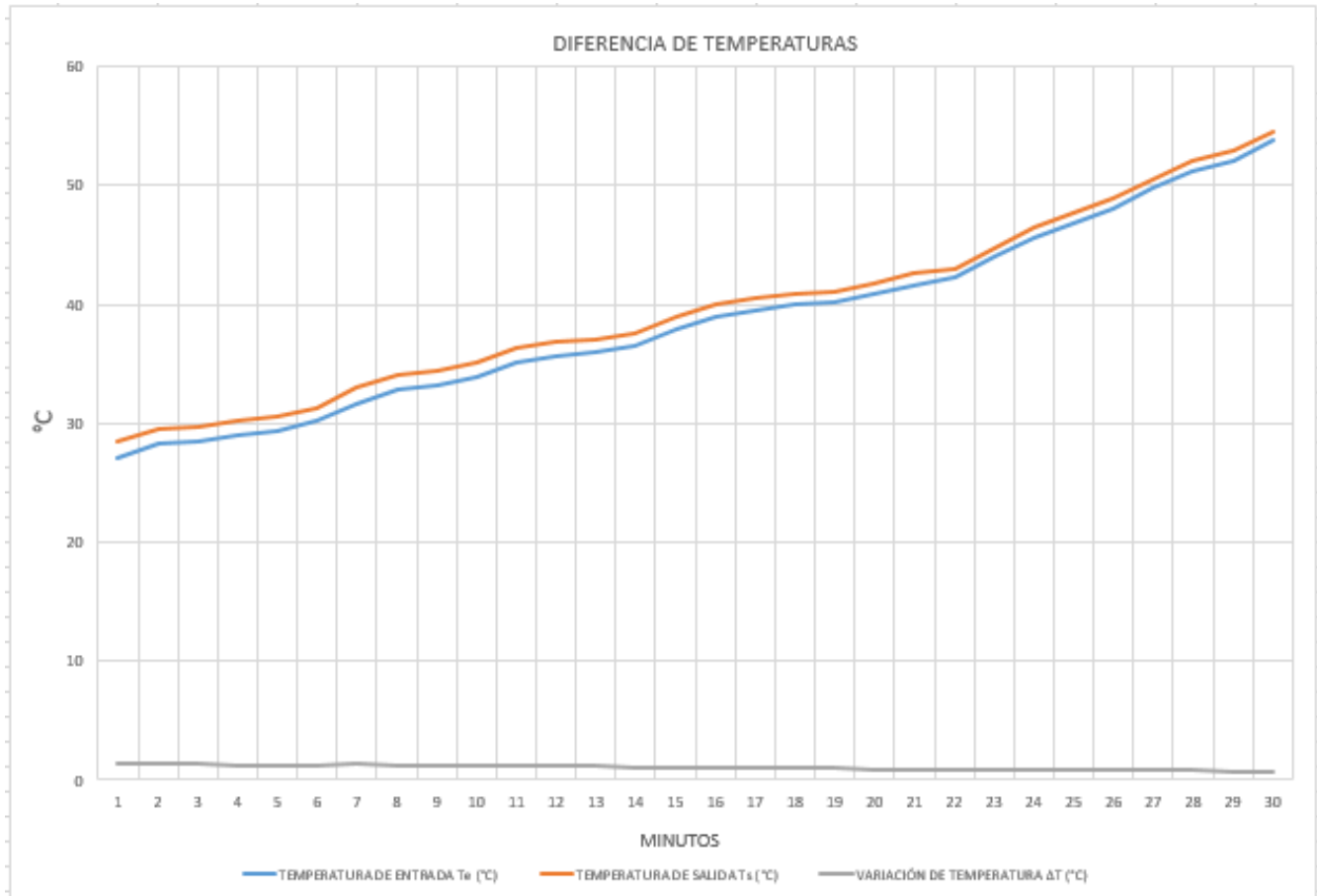


FUENTE: Autor.

- Diferencia de temperaturas T_s y T_e

En la gráfica 31, se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.

FIGURA 31. Diferencia de temperaturas, T_s y T_e , 11 de Agosto de 2023.



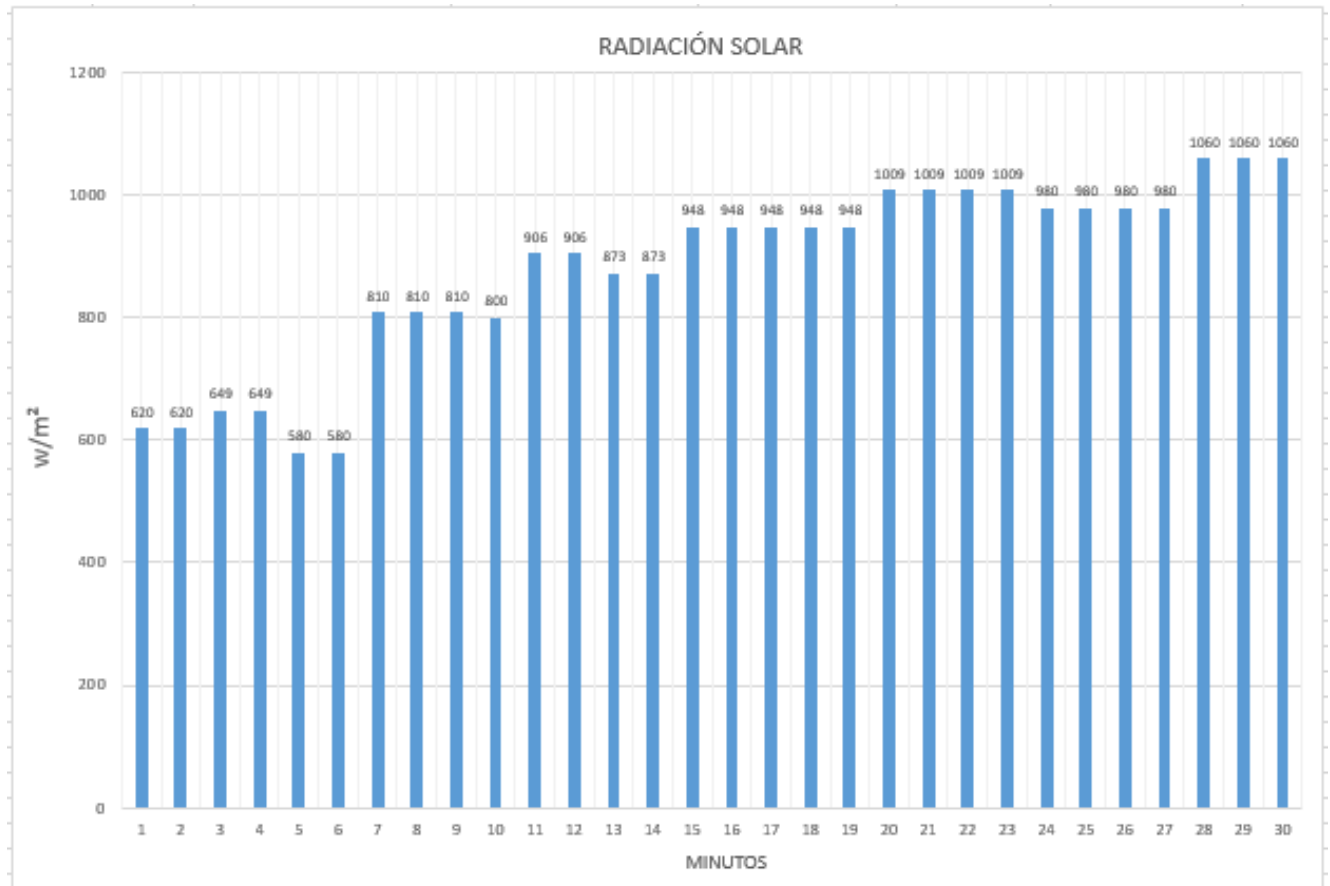
FUENTE: Autor.

- Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de radiación solar que se muestra en la gráfica 32, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que

su más baja radiación solar fue de $580 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1060 \frac{W}{m^2}$.

FIGURA 32. Radiación solar del 11 de Agosto de 2023.

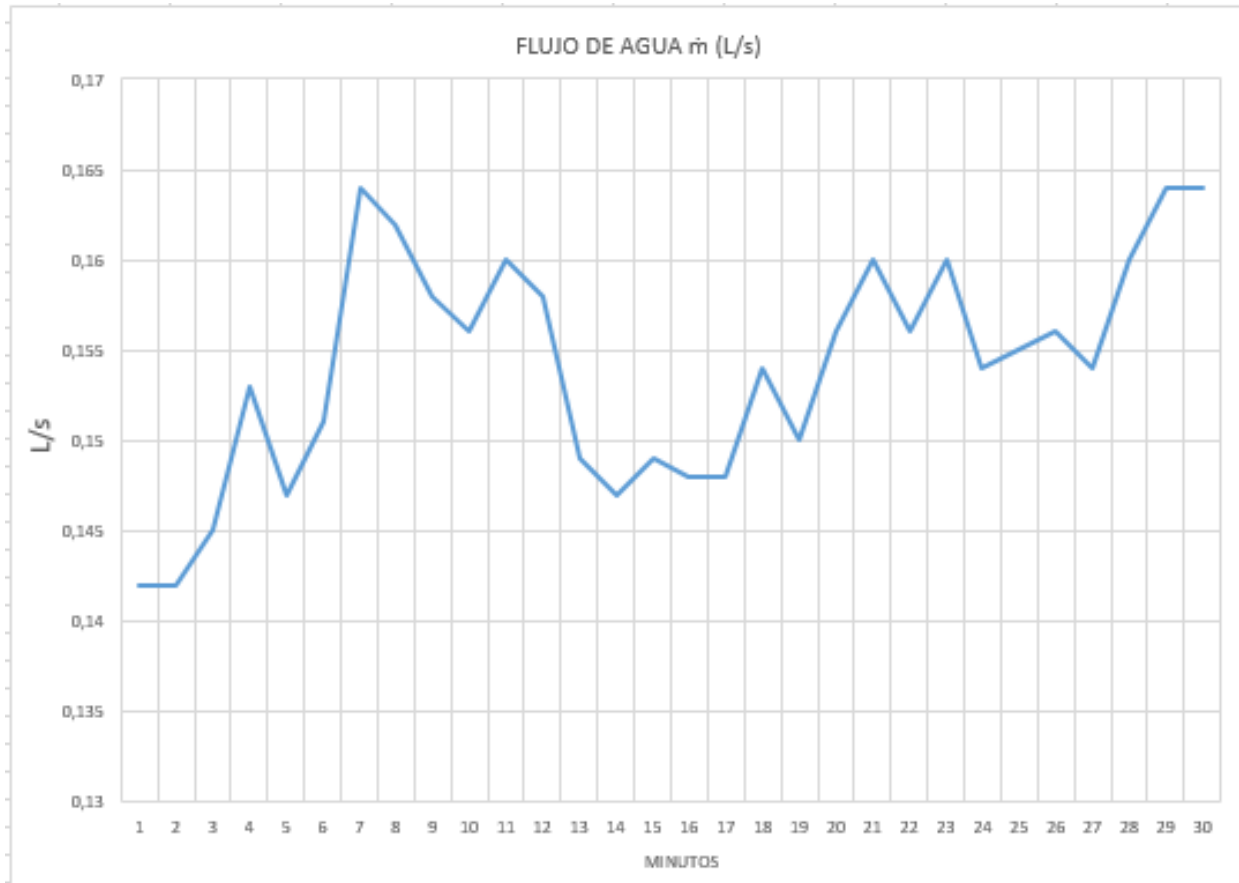


FUENTE: Autor.

- Flujo de agua \dot{m}

En la gráfica 33, podemos evidenciar que el flujo de agua rondó desde los 0,142 L/s hasta 0,164 L/s durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.

FIGURA 33. Flujo de agua del 11 de Agosto de 2023.



FUENTE: Autor.

Los resultados obtenidos el día 14 de Agosto al 18 de Agosto, adicionalmente el promedio general encontrado durante todas las pruebas experimentales del colector solar de placa plana se encuentra en el anexo B.

8. MODELO MATEMATICO E INSTALACIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACIO

Para la obtención de la eficiencia del colector solar de tubos al vacío que se encuentra situado en el laboratorio de energías renovables, se observarán los parámetros obtenidos y realizados en el trabajo de grado “Diseño y construcción de un colector solar de tubos al vacío”,¹⁸ para esto se analizará desde el calentamiento del fluido portador de calor por medio de los tubos en el intercambiador hasta la incidencia de la radiación en la superficie.

8.1 MODELO MATEMATICO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACIO

Este colector fue diseñado y construido por estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander en el trabajo de grado anteriormente mencionado.

FIGURA 34. Diseño final del colector de tubos al vacío.



FUENTE: JAIMES, Nelson y RIVERO, Sergio. Diseño y construcción de un colector solar de tubos al vacío. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, 2012. 233p.

¹⁸JAIMES, Nelson y RIVERO, Sergio. Diseño y construcción de un colector solar de tubos al vacío. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. 233p.

FIGURA 35. Modelo 3D del prototipo del colector solar.



FUENTE: JAIMES, Nelson y RIVERO, Sergio. Diseño y construcción de un colector solar de tubos al vacío. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, 2012. 233p.

El colector solar cuenta con 10 tubos al vacío marca Owen Ilinols, distribuidos en pares colineales a ambos lados del intercambiador de calor. Al reverso de cada tubo de vacío, se encuentra instalada una superficie reflectora cuya función es concentrar la radiación que pasa a través del espacio entre tubos y dirigirla hacia el tubo de vacío. Al interior de cada tubo de vacío, se encuentra una aleta absorbidora plana de aluminio, cuya función es la de aumentar el área que recibe radiación solar mientras transfiere esa energía hacia el tubo de calor ubicado en la mitad de la aleta. El tubo de calor tiene una presión interna de 3 inHg. El colector cuenta con una placa de ajuste manual, la cual permite fijar el colector en el ángulo de inclinación deseado. El sistema de transporte y almacenamiento del fluido consta de un tanque aislado con capacidad de 60 litros, una bomba centrífuga, manueras Parker de 5/16" y el intercambiador de calor ("manifold") entre los tubos de calor y el fluido portador de calor.

TABLA 3. Parámetros geométricos usados en modelo de transferencia de calor.

Constante	Descripción	Valor
L	Longitud de la aleta de aluminio	0,427 [m]
L_C	Longitud de la seccion del condensador	0,08 [m]
L_e	Longitud de la seccion del evaporador	0,48 [m]
L_S	Longitud de la superficie reflectora	0,45 [m]
t_{ais}	Espesor del aislante del tanque	0,02 [m]
t_w	Espesor de estructura capilar	4,65 [mm]

FUENTE: Autor.

Los diferentes parámetros tanto geográficos como componentes físicos del sistema se muestran a continuación.

TABLA 4. Parámetros Físicos usados en modelo de transferencia de calor.

Constante	Descripción	Valor
m_w	Masa del fluido de trabajo	0,037 [Kg]
μ_l	Viscosidad dinamica del fluido de trabajo en saturacion, estado liquido (P=3inHg)	0,5852 [g/m*s]
ρ_l	Densidad del fluido de trabajo en saturacion, estado liquido (P=3inHg)	989,63 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
ρ_{sup}	Reflectividad de la superficie reflectora	0,572 [-]
ρ_v	Densidad del fluido de trabajo en saturacion, estado gaseoso (P=3inHg)	0,069 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
τ_v	Transmisividad del tubo de vidrio	0,92 [-]
U_l	Coficiente global de perdidas del colector	0.8 $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

FUENTE: Autor.

TABLA 5. Parámetros Físicos usados en modelo de transferencia de calor (continuación).

Constante	Descripción	Valor
α_a	Absortividad de la aleta	0,15 [-]
C_{pc}	Calor específico promedio de la aleta y el tubo de calor	643,5 [J/KgK]
C_{pi}	Calor específico del fluido de trabajo (P=3inHg)	4182 [J/KgK]
C_{pf}	Calor específico del fluido portador de calor (P=101,325 kPa)	4182 [J/KgK]
h_a	Coefficiente de transferencia de calor por conveccion entre el aire y el manifold/tanque	$7.5 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$
h_{fg}	Entalpia de vaporizacion del fluido de trabajo (P=3inHg)	2391,5 [KJ/Hg]
k_{ais}	Conductividad termica del aislante	0,03 [W/mK]
k_l	Conductividad termica del fluido de trabajo en saturacion, estado liquido (P=3inHg)	0,6257 [W/mK]
k_m	Conductividad termica de la pared del manifold	205 [W/mK]
k_p	Conductividad termica del tubo de calor	397 [W/mK]
k_t	Conductividad termica del tanque	0,48 [W/mK]
m_{ac}	Masa de la aleta y la seccion del evaporador	0,2565 [Kg]
\dot{m}_f	Flujo masico del fluido portador de calor	0,062 [Kg/s]
m_t	Masa de agua almacenada en el tanque	59,82 [Kg]

FUENTE: Autor.

TABLA 6. Parámetros geométricos usados en modelo de transferencia de calor (continuación).

Constante	Descripción	Valor
h_z	Altura del tanque de almacenamiento	0,45 [m]
D_i	Diámetro interior del tubo de calor	14 [mm]
D_{im}	Diámetro interior del manifold	0,14 [m]
D_{ip}	Diámetro interior de la pared del tanque	0,3668 [m]
D_{it}	Diámetro interior del tubo al vacío	44,1 [mm]
D_{iw}	Diámetro interior de la estructura capilar	4,54 [mm]
D_o	Diámetro exterior del tubo de calor	16 [mm]
D_{oam}	Diámetro exterior del aislante del manifold	0,168 [m]
D_{oat}	Diámetro exterior del aislante del tanque	0,42 [m]
D_{om}	Diámetro exterior del manifold	0,148 [m]
D_{op}	Diámetro exterior de la pared del tanque	0,38 [m]
D_{ot}	Diámetro exterior del tubo al vacío	58,2 [mm]
C	Distancia entre centros de los tubos al vacío	0,145 [m]
β	Angulo de inclinación del colector	15 [°]
A_{ab}	Area de la aleta absorbidora	0,012 [m ²]
A_{et}	Area entre tubos de vacío	0,039 [m ²]

FUENTE: Autor.

8.2 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN EN LA PARTE INFERIOR DE LA ALETA

Esta proviene del reflejo de la radiación solar en la superficie semicircular ubicada en la parte de abajo del tubo de vacío. Esta radiación se calcula de la siguiente manera (8.1).

Una vez realizado el trazado se mide la longitud de las cuerdas que unen los puntos extremos de las superficies, las cuales se muestran en la anterior figura; L1, L2, L3, L4, L5, L6. Es importante tener en cuenta que las cuerdas cambian de trayectoria según los diferentes obstáculos.

Finalmente se pueden calcular con la siguiente formula (8.2):

$$F_{1-2} = \frac{(L_5+L_6)-(L_3+L_4)}{2L_1} \quad (8.2)$$

Al emplear el método para nuestro caso y junto con la ayuda del software SolidWorks y miden las longitudes de las cuerdas y se obtienen los siguientes datos en la tabla 7:

TABLA 7. Longitudes de las cuerdas para el cálculo del factor de visión.

CUERDA	LONGITUD (mm)
AB (L1)	145,88
AC (L6)	95,81
AD (L3)	51,15
BC (L4)	51,15
BD (L5)	95,81

FUENTE: Autor.

Reemplazando los valores se obtiene (8.3):

$$F_{1-2} = F_{sup} = \frac{(95.81+95.81)-(51.15+51.15)}{2*145.88} = 0.3061 \quad (8.3)$$

8.2.1 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN EN LA PARTE SUPERIOR DE LA ALETA.

La radiación incidente efectiva sobre la superficie superior de la aleta absorbadora depende de su inclinación y orientación con respecto al sol. Los valores de la radiación solar fueron tomados del proyecto de investigación “diseño del colector solar”, donde se seleccionaron en intervalos de 3 minutos, desde las 10:21 am, hasta las 3:31 pm, el día 12 de febrero de 2012 planteadas en dicho proyecto.

La cantidad de radiación solar incidente que es absorbida por la superficie superior de la aleta se puede calcular con la siguiente expresión (8.4).

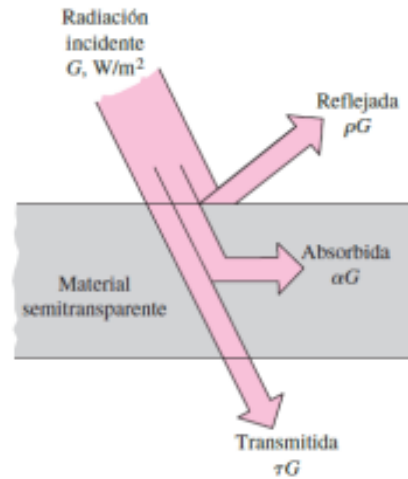
$$G_{abs} = \tau_v * \alpha_a * q_{s\beta} * A_{ab} \quad (8.4)$$

Donde τ_v es la transmisividad del vidrio de los tubos al vacío, α_a es la absorptividad de la aleta absorbadora y A_{ab} es el área de la superficie absorbadora.

8.2.2 INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE EL COLECTOR

La radiación solar incide sobre la superficie de los tubos al vacío. Hay una fracción de la radiación atraviesa las paredes del vidrio y llega a la aleta absorbadora, mientras que el resto es reflejado por el ambiente o absorbido por el material. El porcentaje de la radiación que atraviesa el vidrio está definido por la transmisividad (τ) de dicho material.

FIGURA 37. Método de Hottel.



FUENTE: Cengel, Yunus y Ghaja, Afshin. Transferencia de calor y masa. 4 ed. México D.F: Mcgraw-hill, 2011.

Los tubos de vidrio usados en el prototipo del colector solar tienen una transmisividad de $\tau_v=0,92$. De igual forma, la aleta absorbidora del aluminio ubicada al interior del tubo de vacío recibe la radiación proveniente del tubo de vidrio, absorbe una fracción y refleja el resto. La aleta es una superficie opaca y tiene una absorptividad de $\alpha_a=0,15$.

8.3 CÁLCULO DEL VALOR NETO DE ENTRADA.

Este se puede calcular fácilmente como la diferencia entre el calor absorbido por las aletas y las pérdidas de calor del colector.

$$Q_{ab} = Q_{en} - Q_{toss} \quad (8.5)$$

Dicho calor es el encargado de calentar la sección del evaporador del tubo de calor, el cual posteriormente calentará el fluido de trabajo en su interior.

8.4 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR DEL COLECTOR.

Estas se pueden observar en la siguiente expresión (8.6).

$$Q_{toss} = U_l * N_{hp} * 2A_{ab} * (T_{aletas} - T_{amb}) \quad (8.6)$$

Donde U_l es el coeficiente de pérdidas global del colector solar y A_{ab} es el área de la superficie absorbedora, la cual esta multiplicada por dos debido a que la aleta pierde calor por ambos lados al mismo tiempo, tanto en la parte inferior como en la superior.

El coeficiente de pérdidas global incluye los efectos de las resistencias térmicas de convección natural alrededor de la aleta, las paredes del vidrio interna y externa, y la resistencia entre el vidrio exterior y el ambiente. En el proceso de diseño se determinó el coeficiente global de pérdidas para este prototipo, el cual tiene un valor de $0.8 \frac{W}{m^2K}$.

8.5 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN TOTAL ABSORBIDA.

Conociendo el valor del factor de visión entre la superficie reflectora y la superficie inferior de la aleta, se puede calcular el valor de radiación trasera y por consiguiente el valor total absorbido por las aletas, como la suma de la radiación absorbida por las superficies superior e inferior de la aleta absorbedora, multiplicado por el número de tubos de calor.

$$Q_{en} = N_{hp} * (G_{abs} + G_{tr}) \quad (8.7)$$

8.6 BALANCE DE ENERGIA EN LA ALETA ABSORBEDORA Y LA PARED DEL EVAPORADOR.

Debido a la alta conductividad térmica y el bajo espesor de la aleta y la pared del evaporador, se puede asumir que la resistencia térmica de ambos elementos es aproximadamente cero. Por lo tanto, puede calcularse la temperatura de ambos

elementos mediante el planteamiento de un balance de energía, tomando como volumen de control la aleta y las paredes del evaporador.

Este balance de energía tiene como objetivo calcular la temperatura de la aleta y la pared del evaporador ($T_{e(t)}$) al final de un intervalo de tiempo de 3 minutos.

$$Q_{ab} - Q_{hp} = m_{ae} * C_{pc} * \frac{(T_{e(t)} - (T_{e(t-1)}))}{\Delta T} \quad (8.8)$$

Donde Q_{hp} es el calor que va desde las paredes del evaporador hacia el fluido de trabajo, m_{ae} es la masa de la aleta y la pared del evaporador y C_{pc} es el calor específico promedio entre la aleta y la pared del evaporador.

8.7 CÁLCULO DEL CALOR TRANSFERIDO A TRAVÉS DEL TUBO DE CALOR.

Para el cálculo de Q_{hp} hay dos casos en específico y estos cambian dependiendo del estado del fluido de trabajo al interior del tubo de calor, cuando el fluido está subenfriado o en saturación. Para el caso de que el fluido esté subenfriado para lo siguiente.

En este caso, el calor llega desde la pared del tubo de calor hasta el volumen del fluido líquido en la sección del evaporador y por ende se asume que este tiene siempre la misma temperatura. Se plantea la siguiente expresión (8.9).

$$Q_{hp} = \frac{T_e - T_w}{R_{ew}} \quad (8.9)$$

Donde R_{ew} hace referencia a la resistencia térmica de la estructura capilar, ubicada en el interior del tubo de calor. Puede calcularse mediante la siguiente expresión (8.10).

$$R_{ew} = \frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_{tw}}\right)}{2\pi * L_e * K_w} \quad (8.10)$$

Donde K_w es la conductividad térmica de la estructura capilar, la cual se calcula dependiendo del tipo de estructura, para el cálculo del tipo mallas tenemos el siguiente procedimiento (8.11).

$$K_w = \left(\frac{\beta - \epsilon}{\beta + \epsilon} \right) * k_l \quad (8.11)$$

Donde:

$$\beta = \frac{\left(1 + \frac{k_s}{k_l} \right)}{\left(1 - \frac{k_s}{k_l} \right)} \quad (8.12)$$

Donde k_s es la conductividad térmica del material de la estructura capilar, k_l es la conductividad del fluido de trabajo y ϵ es la fracción de volumen ocupada por la estructura capilar.

Para el caso de las mechas sinterizadas de igual forma que en las mallas, las constantes k_l , k_s y ϵ tienen el mismo significado.

$$k_w = k_s \left[\frac{2 + \frac{k_l}{k_s} - 2\epsilon \left(1 - \frac{k_l}{k_s} \right)}{2 + \frac{k_l}{k_s} + \epsilon \left(1 - \frac{k_l}{k_s} \right)} \right] \quad (8.13)$$

Para el caso de las mechas estriadas tenemos la siguiente expresión (8.14).

$$k_w = k_s \left[1 - \epsilon \left(1 - \frac{k_l}{k_s} \right) \right] \quad (8.14)$$

Donde ϵ representa la sección vacía del líquido y se calcula de la siguiente manera (8.15).

$$\epsilon = \frac{2b}{2b+f} \quad (8.15)$$

Donde b es el ancho medio de los canales y f es el espesor de las aletas de la estructura capilar.

Para el caso del anillo concéntrico este proviene del fluido del trabajo, por lo tanto.

$$k_w = k_l \quad (8.16)$$

En las fibras de metal sinterizado tenemos la siguiente expresión (8.17).

$$k_w = \epsilon^2 k_l + (1 - \epsilon)^2 k_s + \frac{4\epsilon(1-\epsilon)k_l k_s}{k_l + k_s} \quad (8.17)$$

En el diseño del colector determinaron los siguientes valores, teniendo en cuenta el uso del agua como fluido de trabajo $k_l = 0.6257 [W/mK]$, $k_s = 0.04 [W/mK]$ y la porosidad de la malla es de 73%, por lo tanto, la fracción de volumen es $\epsilon = 0.27$.

Entonces:

$$\beta = \frac{\left(1 + \frac{0.04}{0.6257}\right)}{\left(1 - \frac{0.04}{0.6257}\right)} \quad (8.18)$$

$$\beta = 1.136$$

$$k_w = \left(\frac{1.1366 - 0.27}{1.1366 + 0.27}\right) * 0.6257 \quad (8.19)$$

$$k_w = 0.3855 \left[\frac{W}{mK}\right]$$

Seguido de esto se debe calcular el incremento de la temperatura del fluido de trabajo a lo largo del tiempo, para ello se debe plantear un balance de energía como se muestra a continuación (8.20).

$$Q_{hp} = m_w * C_{pl} * \frac{(T_{w(t)} - T_{w(t-1)})}{\Delta T} \quad (8.20)$$

8.8 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL CONDENSADOR.

Para calcular la temperatura del condensador se debe tener en cuenta la energía que atraviesa el tubo y las resistencias térmicas, para eso se tiene la siguiente expresión (8.21).

$$R_{ci} = \frac{1}{h_{ci} * \pi * D_i * L_c} \quad (8.21)$$

$$R_{cp} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi * L_c * k_p} \quad (8.22)$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor por condensación en película dentro de tubos (h_{ci}) se calcula mediante la siguiente expresión (8.23).

$$h_{ci} = 0,555 * \left[\frac{g * \sin(\beta) * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * k_l^3}{\mu_l * (T_{sat} - T_c)} * \left(h_{fg} + \frac{3}{8} * C_{pl} * (T_{sat} - T_c) \right) \right]^{0,25} \quad (8.23)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, β es el ángulo de inclinación del colector, ρ_l y ρ_v son las densidades del fluido de trabajo en estado líquido y gaseoso en saturación, μ_l es la viscosidad dinámica del fluido de trabajo en estado líquido y de saturación, k_l es la conductividad térmica del fluido de trabajo en estado líquido y de saturación, h_{fg} es la entalpia de vaporización a una presión de 3 inHg y C_{pl} es el calor específico del fluido de trabajo en estado líquido y de saturación.

Finalmente podemos calcular la T_c con la siguiente expresión (8.24).

$$Q_{hp} = \frac{T_e - T_c}{R_{ew} + R_{ei} + f(T_c) + R_{cp}} \quad (8.24)$$

8.9 CÁLCULO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

Es necesario plantear un balance de energía tomando como volumen de control la cantidad de agua en el interior del tanque, teniendo en cuenta los flujos de masa y de calor, el balance queda planteado de la siguiente manera (8.25).

$$\dot{m}_f * h_{fo} - \dot{m}_f * h_{fi} - Q_{tl} = m_t * C_{pf} * \frac{(T_{fi(t)} - T_{fi(t-1)})}{\Delta T} \quad (8.25)$$

Donde h_{fo} y h_{fi} son las entalpías del fluido portador de calor a la salida y entrada del manifold respectivamente, Q_{tl} son las pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento y T_{fi} es la temperatura de entrada del fluido.

Las entalpías del fluido portador de calor pueden determinarse mediante regresiones lineales como se muestra a continuación (8.26).

$$h_{fo} = 2,27411199 * 10^2 + 4,18569749 * 10^3 * T_{fo} - 4,32321420 * 10^{-2} * T_{fo}^2 \quad (8.26)$$

$$h_{fi} = 2,27411199 * 10^2 + 4,18569749 * 10^3 * T_{fi} - 4,32321420 * 10^{-2} * T_{fi}^2 \quad (8.27)$$

Las pérdidas de calor en el tanque pueden calcularse mediante la siguiente expresión (8.28).

$$Q_{tl} = \frac{T_{fi} - T_{amb}}{R_{tl}} \quad (8.28)$$

Donde R_{tl} es la resistencia térmica entre el agua y el ambiente y se puede calcular con la siguiente expresión (8.29).

$$R_{tl} = R_p + R_{ais} + R_{air} \quad (8.29)$$

Donde R_p es la resistencia térmica del aislante del tanque.

$$R_p = \frac{\ln\left(\frac{D_{op}}{D_{ip}}\right)}{2\pi * k_t * h_t} \quad (8.30)$$

Donde R_{ais} es la resistencia térmica del aislante del tanque.

$$R_{ais} = \frac{\ln\left(\frac{D_{oat}}{D_{op}}\right)}{2\pi * k_{ais} * h_t} \quad (8.31)$$

Donde R_{air} es la resistencia térmica del aire

$$R_{air} = \frac{1}{h_a * A_{aist}} \quad (8.32)$$

El coeficiente de calor entre el aislante del tanque y el aire es $7,5 \frac{W}{m^2K}$, finalmente se obtiene el siguiente procedimiento (8.33) para hallar la eficiencia del colector solar.

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{disp}} \quad (8.33)$$

Tomando el calor útil como el calor neto en toda el área del colector, se puede expresar de la siguiente manera 8.34):

$$Q_{util} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (8.34)$$

El calor disponible es toda aquella radiación incidente en el área total del colector.

$$Q_{disp} = H_t * A_c \quad (8.35)$$

Reemplazando, calculamos la eficiencia con la siguiente expresión (8.6).

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T}{H_t \cdot A_c} \quad (8.36)$$

9. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

9.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO Y MONTAJE DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

Primeramente se realizó una revisión de los componentes que conformaban el diseño del colector solar de tubos al vacío que se encuentra en el laboratorio de energías renovables de la universidad industrial de Santander, con la ayuda del trabajo de grado donde se realizó su diseño e instalación en el año 2012, se encontró los diferentes componentes que conformaban este colector y además su funcionamiento, una vez encontrado y estudiado este trabajo de grado se procedió a realizar el mantenimiento correctivo y montaje del colector solar.

- Se comenzó con una limpieza total del colector y los componentes que lo conforman.

FIGURA 38. Mangueras de conexión.



FUENTE: Autor.

FIGURA 39. Placa del colector solar.



FUENTE: Autor.

FIGURA 40. Tubos en U de cobre y aletas de Aluminio.



FUENTE: Autor.

FIGURA 41. Tubos al vacío.



FUENTE: Autor.

- Se realiza una lista de los componentes que se tienen en correcto funcionamiento y los que faltan para iniciar a realizar la búsqueda y conexión del montaje.
- La conexión parte de la moto bomba con diámetro de $\frac{3}{4}$ pulgada, una manguera de 25 cm de largo y $\frac{3}{4}$ de diámetro, una T de $\frac{3}{4}$ pulgada tipo hembra-hembra-hembra, en una conexión un reductor de $\frac{1}{2}$ pulgada a $\frac{3}{4}$ pulgada, un sensor de flujo de agua Yf-s201 con conexión macho-macho de $\frac{1}{2}$ pulgada, un reductor de $\frac{1}{2}$ pulgada a $\frac{3}{4}$ pulgada, una T de $\frac{3}{4}$ pulgada tipo hembra-hembra-hembra, una conexión para la entrada de agua que sale de la T y tiene entrada para manguera tipo jardín y la otra conexión para adaptar la termocupla tipo K para hallar la temperatura en la entrada del agua, en la segunda conexión de la primera T mencionada sale un reductor de $\frac{1}{2}$ pulgada a $\frac{3}{4}$ pulgada donde tiene su acople a las mangueras que pasan por los tubos al vacío conectándose con unos tubos tipo U de cobre y sujetas abrazaderas metálicas, en la salida de las mangueras que atraviesan los tubos al vacío se conecta una termocupla tipo K que nos registra la temperatura de la salida del agua, una llave de paso que me limita el permiso de la entrada del agua al tanque de almacenamiento mediante una manguera de $\frac{3}{4}$ pulgada, en la parte de abajo del tanque de almacenamiento sale una unión en cpvc de $\frac{3}{4}$ pulgada que conecta a una manguera de 25 cm de largo y de diámetro de $\frac{3}{4}$ pulgada, un codo de $\frac{3}{4}$ pulgada que conecta nuevamente a la entrada de la moto bomba.

FIGURA 42. Vista frontal derecha del montaje del colector solar de tubos al vacío.



FUENTE: Autor.

FIGURA 43. Vista lateral izquierda del montaje del colector solar de tubos al vacío.



FUENTE: Autor.

FIGURA 44. Vista a detalle 1.



FUENTE: Autor.

FIGURA 45. Vista a detalle 2.



FUENTE: Autor.

FIGURA 46. Vista frontal del montaje del colector solar de tubos al vacío.



FUENTE: Autor.

FIGURA 47. Vista posterior del montaje del colector solar de tubos al vacío.



FUENTE: Autor.

- Debido a que el proyecto fue realizado en el año 2012, en la actualidad sujeto a la normativa se hace imposible conseguir el tubo al vacío que no se encontraba en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Industrial de Santander, con base a que hace varios años simplemente se fabrican tubos al vacío de un largo de 1,8 metros, se utilizó una propuesta que es realizar un experimento para el cálculo de la eficiencia con 8 tubos al vacío y otro con 9 tubos al vacío, una vez hallado estos dos resultados proceder a extrapolarlos para conseguir finalmente el objetivo.

9.2 RESULTADOS FINALES DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

Los resultados de la eficiencia del colector solar de placa plana se almacenaron en el arduino, donde por varias pruebas se evidencio una tendencia donde las temperaturas empezaban en 28°C a 30°C y durante la media hora de prueba experimental tomaban un incremento de 46°C a 55°C, siendo esta su más alta temperatura registrada por los sensores.

Los experimentos se realizaron con un ángulo de 30°C, con el fin de que la placa del colector recibiera la mayor radiación solar posible.

Las variaciones presentadas en el caudal de agua se presentan porque el sensor de flujo depende de que tanta agua pueda desplazar la bomba puesta en el colector. Sabiendo que el funcionamiento de estas bombas es por tiempos, por ejemplo, trabaja seguidamente un tiempo adecuado y durante otra parte del tiempo completa su ciclo entregando menor potencia, durante la media hora del experimento se puede evidenciar que los resultados del caudal oscilan entre 0,036 L/s hasta los 0,039 L/s.

- Resultados obtenidos el 11 de Agosto de 2023

TABLA 8. Resultados obtenidos el 11 de Agosto de 2023.

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT (°C)	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACION SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,12	29,58	2,46	0,038	620	68,48%
28,43	30,75	2,32	0,039	620	66,29%
29,47	31,81	2,34	0,039	649	63,87%
31,03	33,39	2,36	0,037	649	61,11%
32,48	34,61	2,13	0,036	580	60,05%
33,61	35,53	1,92	0,038	580	57,14%
34,97	37,39	2,42	0,038	810	51,57%
35,87	38,18	2,31	0,039	810	50,52%
36,77	39,05	2,28	0,039	810	49,86%
38,11	40,15	2,04	0,039	800	45,17%
38,89	41,08	2,19	0,038	906	41,72%
39,92	42,06	2,14	0,037	906	39,70%
41,03	43,07	2,04	0,036	873	38,21%
42,11	43,93	1,82	0,039	873	36,93%
43,67	45,51	1,84	0,039	948	34,38%
44,71	46,5	1,79	0,038	948	32,59%
45,66	47,39	1,73	0,038	948	31,50%
46,21	47,92	1,71	0,038	948	31,13%
46,89	48,52	1,63	0,037	948	28,90%
47,13	48,82	1,69	0,036	1009	27,39%
47,76	49,41	1,65	0,037	1009	27,48%
47,99	49,55	1,56	0,039	1009	27,39%
48,31	49,83	1,52	0,038	1009	26,00%
48,92	50,34	1,42	0,039	980	25,67%
49,66	51,06	1,4	0,039	980	25,31%
50,53	51,96	1,43	0,038	980	25,19%
51,51	52,85	1,34	0,039	980	24,22%
52,87	54,33	1,46	0,038	1060	23,77%
53,88	55,26	1,38	0,039	1060	23,06%
54,21	55,55	1,34	0,039	1060	22,39%

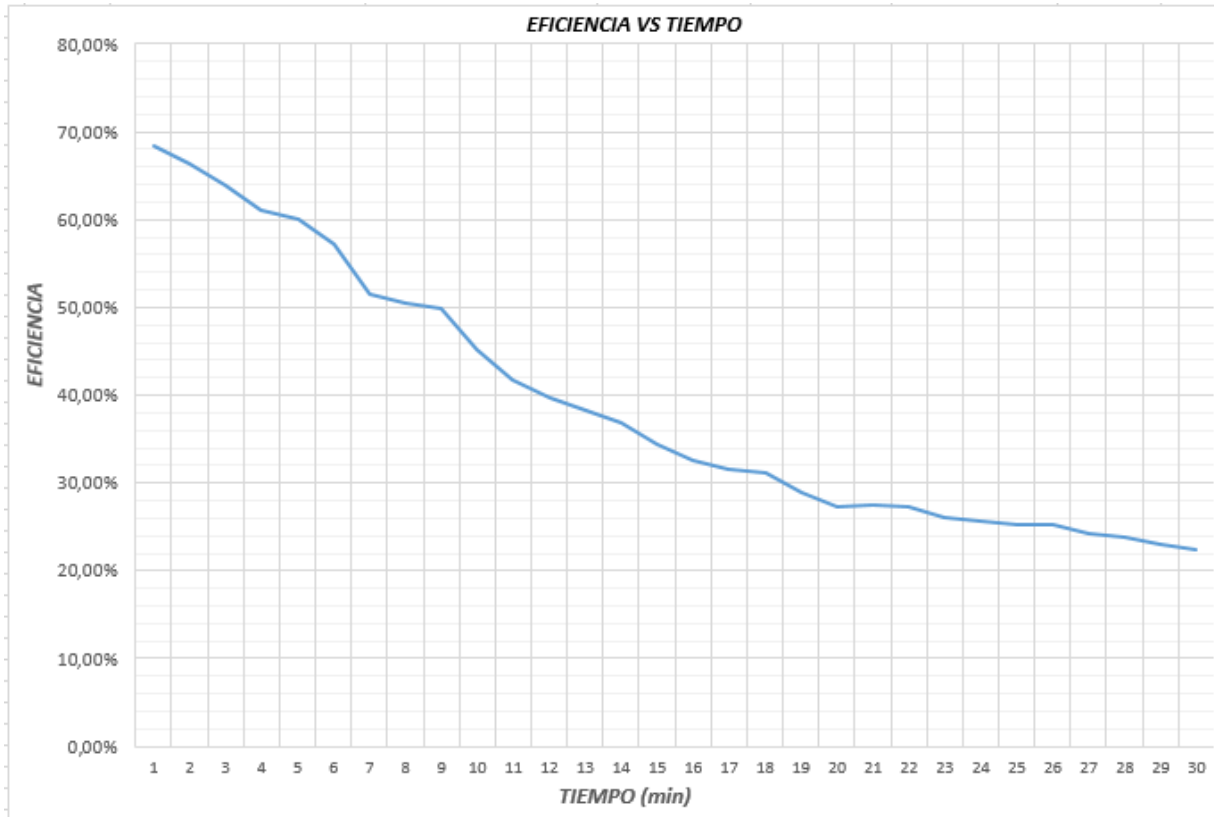
FUENTE: Autor.

En la tabla 8, podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 68,48% y finalizo con 22,39%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

➤ Eficiencia vs tiempo:

En la gráfica 48, se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.

FIGURA 48. Eficiencia vs Tiempo del 11 de Agosto de 2023.

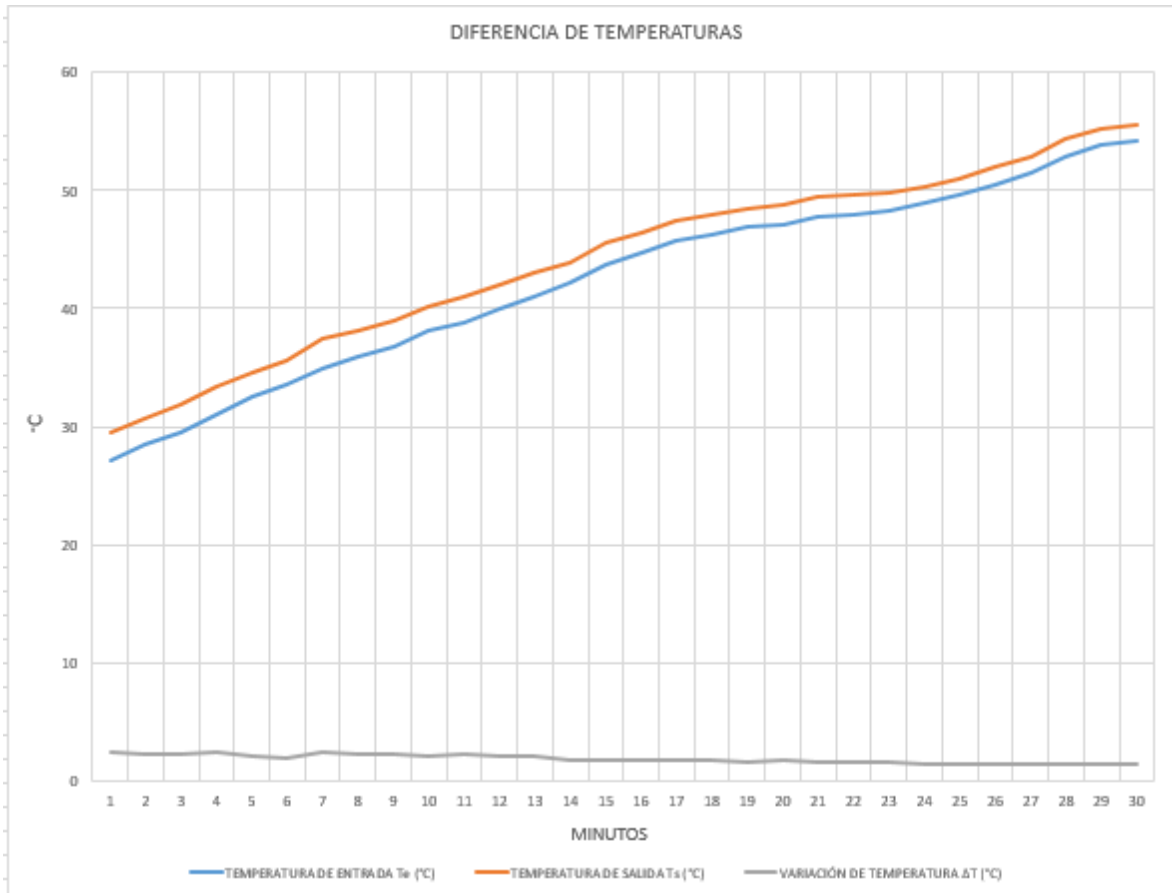


FUENTE: Autor.

➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e

En la gráfica 49, se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.

FIGURA 49. Diferencia de temperaturas, Ts y Te, del 11 de Agosto de 2023.



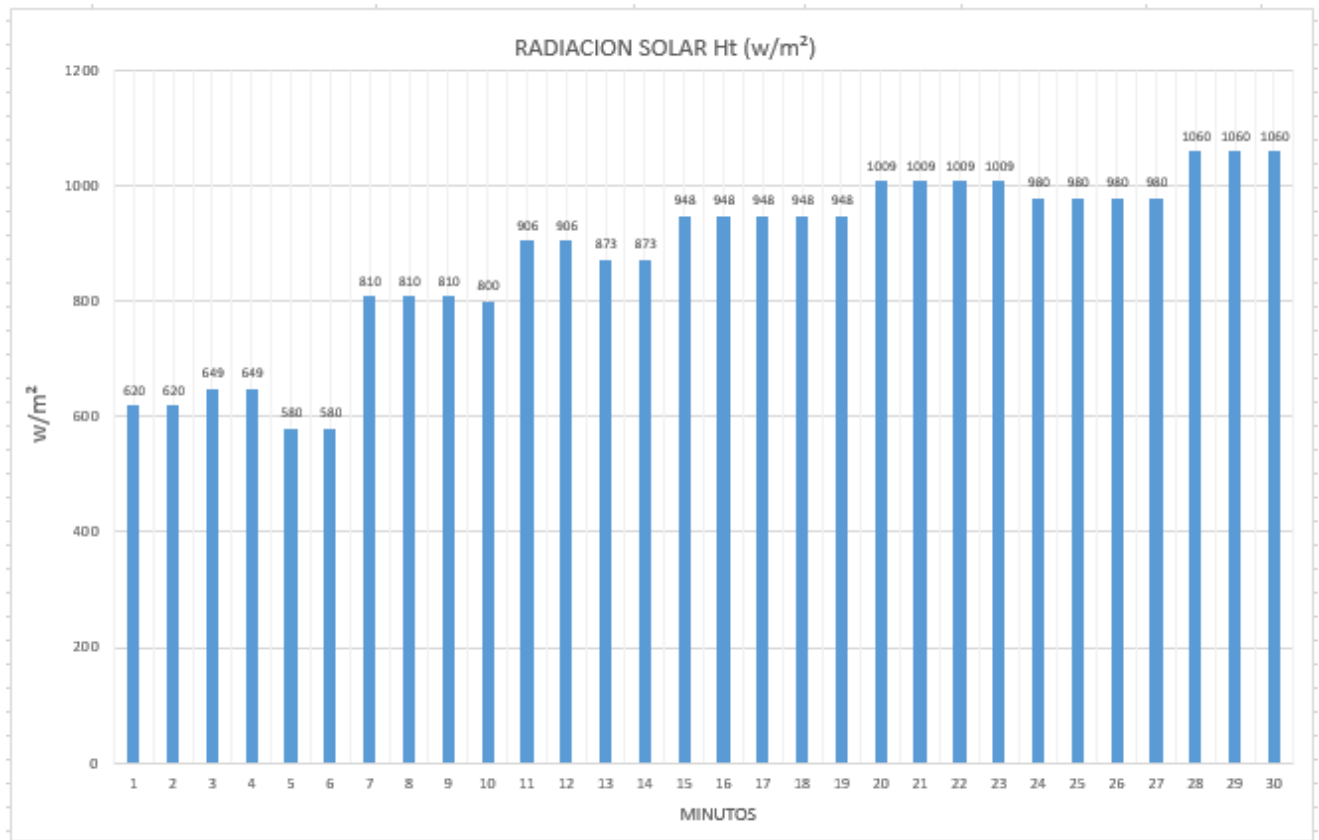
FUENTE: Autor.

➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de radiación solar que se muestra en la gráfica 50, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $580 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1060 \frac{W}{m^2}$.

Se debe tener en cuenta que los experimentos fueron realizados al mismo tiempo para ambos colectores solares para poder realizar su comparación, se utilizó la misma radiación solar.

FIGURA 50. Radiación solar del 11 de Agosto de 2023.

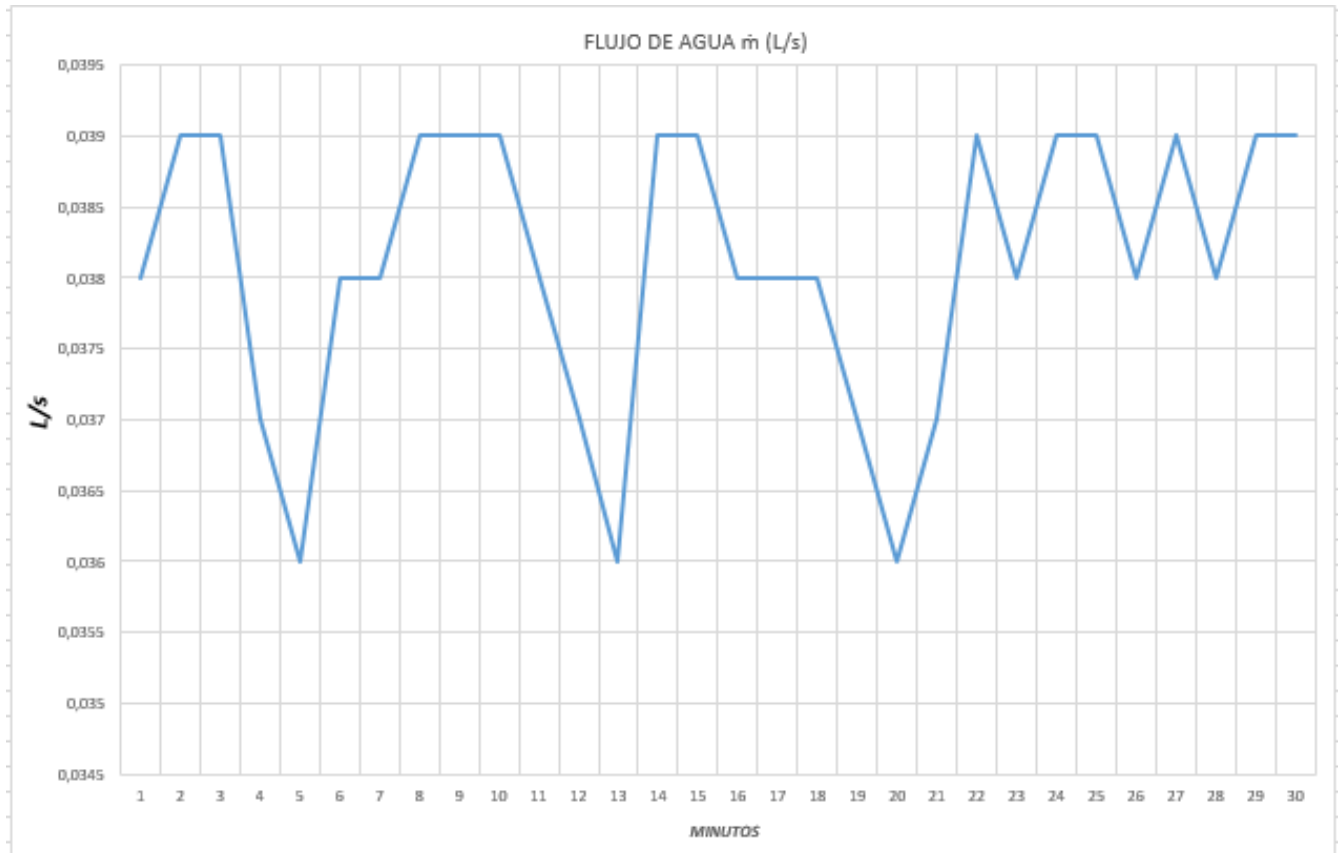


FUENTE: Autor.

➤ Flujo de agua \dot{m}

En la gráfica 51, podemos evidenciar que el flujo de agua ronda los 0,0360 L/s hasta los 0,0390 L/s, durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.

FIGURA 51. Flujo de agua del 11 de Agosto de 2023.



FUENTE: Autor.

Los resultados obtenidos el día 14 de Agosto al 18 de Agosto, adicionalmente el promedio general encontrado durante todas las pruebas experimentales del colector solar de tubos al vacío se encuentra en el anexo c.

Las pruebas experimentales se repitieron durante 20 veces para poder llegar hacer un análisis estadístico, cabe destacar que estas pruebas se realizaban durante media hora de 11 AM a 1 PM, donde se realizaban de 3 a 4 pruebas diarias y entre una prueba y la otra se dejaba el colector solar 15 min descansando para proceder con la siguiente prueba experimental, durante este tiempo de descanso se procedía a realizar el vacío de agua y a tapar completamente los colectores solares, esto se realizaba para alimentar nuevamente el tanque de agua. Normalmente los colectores solares presentaban

siempre su mayor eficiencia en la última prueba de 12:30 a 1 PM esto por qué las temperaturas de salida y entrada eran más altas y su variación entre un minuto y el otro se mostraba mayor, por ende, la eficiencia aumentaba.

10. COMPARACIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS AL VACIO.

FIGURA 52. Colector solar de tubos al vacío vs colector solar de placa plana.



FUENTE: Autor.

- El colector solar de placa plana es un poco menos eficiente respecto al de tubos al vacío.
- Considerando que el colector de placa plana es mucho más nuevo y tiene menos utilidad que el de tubos al vacío, nos evidencia que este tiene menos rendimiento.
- Durante las pruebas experimentales, las temperaturas de ambos colectores solares durante la media hora se evidenciaron muy parecidas, estas siempre rondaron desde los 27°C hasta casi los 60°C.
- El colector solar de placa plana tiene un área de placa de 1,89 m², mientras que el colector solar de tubos al vacío es de 0,9207 m².
- En tanto la moto bomba mostrada por los colectores solares, la del colector solar de placa plana es mayor con 0,142 L/s a 0,162 L/s, mientras que la de tubos al vacío es de 0,036 L/s a 0,039 L/s, a pesar de esta diferencia el colector solar de tubos al vacío mostro una mayor eficiencia en las pruebas experimentales.
- Finalmente, en la comparación de ambos colectores solares, se puede evidenciar que el colector de tubos al vacío es más eficiente que el de placa plana.

10.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

Entre estas podemos evidenciar las siguientes:

- Son productos de alta calidad, más fiables y duraderos gracias a la baja emisividad del tubo (0,08), su alta absorbencia (0,93) y su aislamiento al vacío.
- Incluso en días completamente nublados se pueden alcanzar temperaturas superiores a 40 °C gracias a la iluminación difusa.
- Se alcanzan temperaturas superiores a 55 °C en días con radiación típica.
- El comportamiento térmico permite un funcionamiento con un rendimiento superior al 45% a temperaturas superiores a 55 °C.
- La curvatura del tubo de vidrio (con un diámetro que oscila entre 30 y 58 mm) ofrece una mayor resistencia a los efectos del frío o el viento, y su instalación es sencilla incluso para quienes no tienen mucha experiencia.
- El único mantenimiento regular es una limpieza dos veces al año. Las incrustaciones no les afectan negativamente.
- El depósito de agua ayuda a la absorción de calor, aumentando la temperatura en la salida y entrada del colector y, en consecuencia, su eficiencia.
- Pueden funcionar a presiones superiores a 4 atmósferas en la termosfera del depósito.
- Si se rompe un tubo de vidrio en un modelo de tubo de vacío, el calentador sigue funcionando y simplemente se sustituye.
- Si la construcción se ha realizado correctamente, no es imprescindible separar los tubos durante los ciclones debido a su resistencia a los vientos fuertes por su diseño aerodinámico.

- Los concentradores cilíndrico-parabólicos se integran en los colectores de tubos de vacío para mejorar el rendimiento durante las estaciones en las que el sol no brilla en su ángulo ideal.
- Permiten responder mejor a situaciones en las que no es posible instalar en la inclinación o dirección correcta, en cuyo caso los colectores solares planos tendrían un rendimiento deficiente. Esta característica permite una integración arquitectónica aún mejor de los colectores de tubos de vacío.

10.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.

Entre estas podemos evidenciar las siguientes:

- El rendimiento térmico es superior al de los colectores solares de la competencia (colectores solares planos). Su rendimiento oscila entre el 50% y el 70%.
- En días sombríos, es posible alcanzar temperaturas superiores a 40°C gracias al aprovechamiento de la luz difusa.
- Se alcanzan temperaturas superiores a 60°C en días con radiación típica.
- Son vulnerables a la rotura del cristal. Deben estar compuestas de vidrio térmico resistente a los impactos. En caso de rotura del cristal, siguen funcionando, aunque con mucha menos eficacia.
- Si eres un constructor experto, son fáciles de montar.
- Dado que las tuberías de la placa absorbente son tan pequeñas, son extremadamente susceptibles de ensuciarse. Si es necesaria la limpieza por incrustaciones, sólo existe una opción de mantenimiento compleja: la limpieza química.
- El tanque de agua ayuda a la absorción de calor, esto nos brinda una mayor temperatura de salida y entrada, posteriormente una mayor eficiencia en el colector.
- Pueden funcionar a presiones superiores a 4 atmósferas en la termosfera del tanque.
- En caso de ciclones, se aconseja desmontarlas debido a su forma protegida, que las hace susceptibles a los vientos fuertes.

10.3 CONSUMO Y EMISIONES DE LOS COLECTORES SOLARES.

Para calcular los valores netos, los valores brutos hallados para cada uno de los sistemas de captación solar seleccionados se eliminan. La contribución solar se acredita con la producción de energía bruta y la métrica de reducción de emisiones de cada sistema

TABLA 9. Consumo y emisión de los colectores solares.

Materiales e insumos	Colector placa plana				Colector de tubos al vacío			
	Consumo		Emisión		Consumo		Emisión	
	MJ	%	kg CO2 eq	%	MJ	%	kg CO2 eq	%
Colectores solares	3547,7	48,2	343	50,9	2525,7	41	179,9	38
Tanque de almacenamiento	1117,4	15,2	110,8	16,4	931,3	15,1	92,3	19,5
Materiales varios	2024,7	27,5	159,3	23,6	2030,3	32,9	150,1	31,7
Actividades complementarias	669	9,1	61,3	9,1	675	11	51,2	10,8
Total	7358,8	100	674,4	100	6162,2	100	473,5	100

FUENTE: Autor.

11. CONCLUSIONES

- Se obtuvieron diferentes cálculos en los colectores solares de placa plana y de tubos al vacío, donde finalmente se evidencio que el colector solar de placa plana es un poco menos eficiente con un rango de (26%-68%) que el colector de tubos al vacío que tiene un rango de (22%-70%).
- Se evidencia que el colector solar de placa plana es mayormente utilizado en climas cálidos mientras que el de tubos al vacío en climas cálidos y también muy fríos. Esto finalmente nos muestra el resultado final de las eficiencias obtenidas.
- Con base en los objetivos del proyecto que fueron, realizar mantenimiento correctivo al colector solar de tubos al vacío, seleccionar e instalar un colector solar de placa plana y finalmente realizar la comparación de las eficiencias para ambos colectores solares, evidenciamos que se cumplieron los objetivos planteados al inicio de proyecto.
- De los resultados del proyecto de investigación podemos evidenciar los dos colectores solares instalados correctamente en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Industrial de Santander para realizar pruebas experimentales, además completamente el modelo matemático y programación para su facilidad.
- La búsqueda de una empresa para la compra del colector solar de placa plana en Colombia es completamente difícil, esto nos muestra el tan bajo crecimiento que tiene nuestro país hacia la implementación de estos prototipos.
- Finalmente, si queremos luchar ante la crisis ambiental que vive el mundo, debemos apoyar e implementar este tipo de prototipos que nos ayudan con mejores resultados en el medio ambiente.

12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para proyectos de investigación futuros utilizar materiales tales como acero inoxidable, bronce, cinc o hierro con el fin de aumentar el desempeño global del sistema.
- Se recomienda utilizar el colector de placa plana en climas cálidos y el de tubos al vacío en climas cálidos y fríos para sacar provecho a una mayor eficiencia.
- Se recomienda desarrollar un análisis del colector solar de tubos al vacío con tubos de calor implementando otros fluidos de trabajo o estructuras capilares.

BIBLIOGRAFÍA

A. Zurita, A. Castillejo-Cuberos, M. García, C. Mata-Torres, Y. Simsek, R. García, F. Antonanzas-Torres y R. A. Escobar., «State of the art and future prospects for solar PV Development in Chile, renewable and Sustainable Energy Reviews.,» Sciencedirect, vol. 92, pp. 701-727, 2018.

ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/flat-plate-collector.html>

CABIROL, THIERRY; PELISSOU, ALBERTH; ROUX, DANIEL, el colector plano de efecto invernadero y el calentador solar de agua, (1978).

Cengel, Yunus y Ghaja, Afshin. Transferencia de calor y masa. 4 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2011.

CEPAL; Javier Blanco, «Panorama del cambio climático en Colombia.,» Naciones Unidad, Santiago de Chile, 2013.

Departamento Nacional de Planeación (1996) “La Cooperación Técnica InternacionalCTI”, Colombia.

Energía Fotovoltaica, Energía Térmica, Energía Eólica, Climatización. Ed. LIMUSA / Noriega. México. 2005.

ENERGIAS RENOVABLES. <https://www.energias-renovables.com/termosolar/elpresidente-de-murcia-inaugura-la-planta-20121005>

Geofísica, facultad de ciencias básicas y matemáticas. Universidad de Chile, ministerio de energía.

Grupo IDEA. I+D Energía solar y automática.
http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/java/pro_rad_5.htm [Último acceso: 20 septiembre 2013].

García Barrero Jhon Fernando y otros (2003) Análisis de experiencias en Cooperación. Internacional al Desarrollo de las ONG federadas en Antioquia, Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Económicas Especialización en Gerencia Social, Medellín (Tesis de grado). Perales Sanahuja José Antonio. Cooperación al desarrollo y globalización: Entre la beneficencia pública internacional y el Estado del bienestar mundial.

H. Gruppe. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/HOME/Desktop/cronograma.pdf>

Ibáñez Plana, M. et al. "Tecnología Solar". Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 2005. 544 p. ISBN: 84 8476-199-1.

IDEAM; UPME, Atlas de radiación solar, ultravioleta y Ozono de Colombia, Bogotá: Imprenta National de Colombia, 2017.

Instituto Penitenciario y Carcelario -INPEC-, «Informe Estadístico febrero 2019. Población reclusa a cargo del Inpec,» Oficina asesora de planeación. Grupo estadística, Bogotá, 2019.

Iván León, tesis, Análisis del potencial natural de viento, radiación solar y precipitación pluvial UTP, trabajo de grado, UTP, 2015.

LEFTWICH, R (1992). Sistemas de precios y asignación de recursos México: Mc GrawHill.

NASA (2014). Surface meteorology and solar energy. A renewable energy resource web site. Atmospheric Science Data Center [en línea]. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>.

N. E. Hernández Rueda y A. X. Ramírez Contreras, Estudio Sobre la Sustitución por Energías Renovables (Solar Fotovoltaica) en las Instituciones educativas de Básica Primaria y Secundaria en Colombia: Análisis y Posibilidades., Bogotá: Universidad Santo Tomas, 2015.

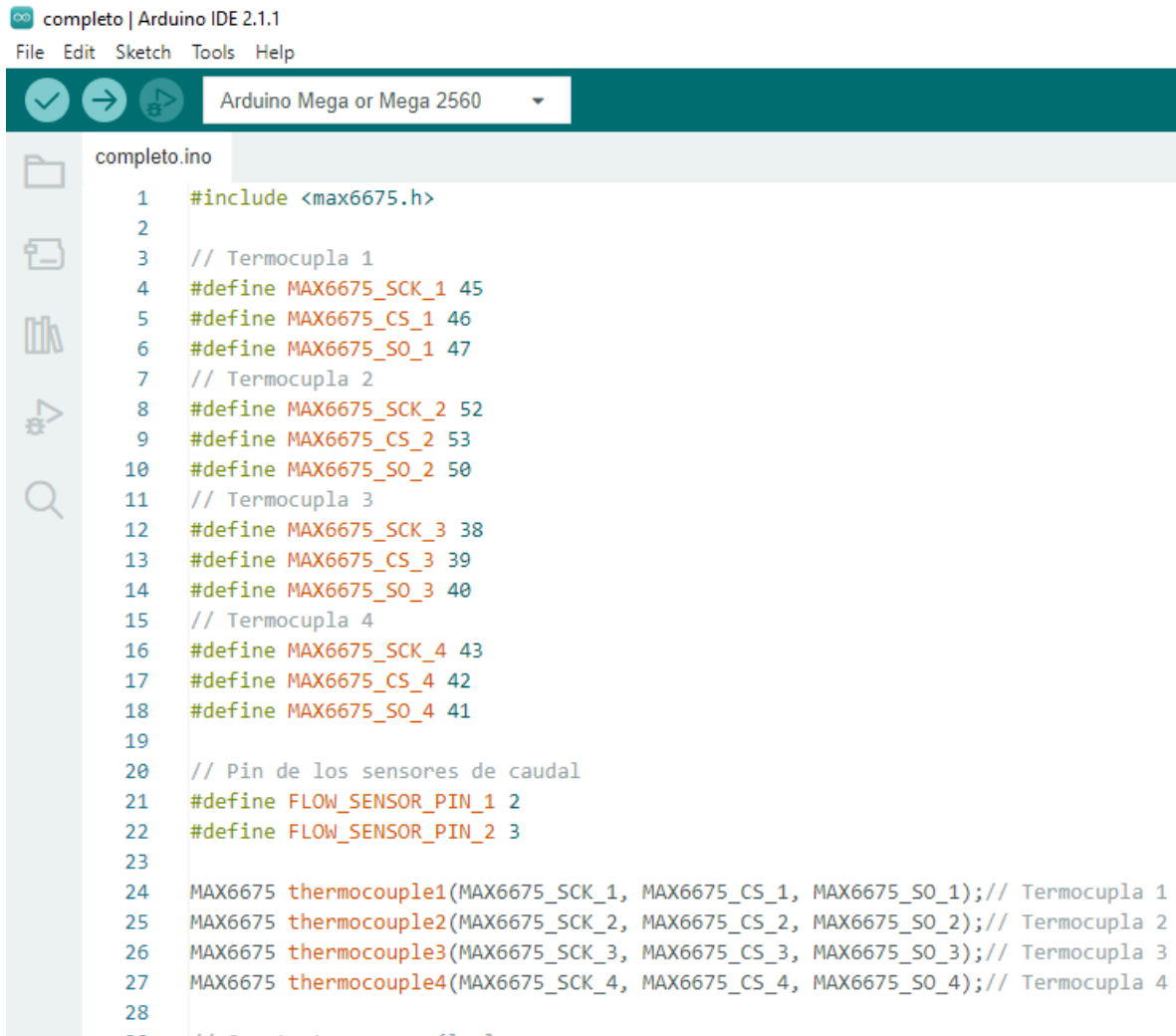
OMM (2012). Declaración de la Organización Meteorológica Mundial sobre el estado del clima mundial en 2011, OMM-No. 1085, 24 pp.

Universidad de Oviedo, área mecánica de fluidos, EPS de ingeniería de Gijón presentación de pérdidas de cargas de tuberías, 2008.

USPEC, «Plan de transformación y Humanización del Sistema Carcelario en Colombia. » Bogotá, 2019.

ANEXOS

Anexo A. Programación utilizada en el software de arduino para mediante los sensores calcular las variables de las pruebas experimentales.



```
completo | Arduino IDE 2.1.1
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Mega or Mega 2560
completo.ino
1  #include <max6675.h>
2
3  // Termocupla 1
4  #define MAX6675_SCK_1 45
5  #define MAX6675_CS_1 46
6  #define MAX6675_SO_1 47
7  // Termocupla 2
8  #define MAX6675_SCK_2 52
9  #define MAX6675_CS_2 53
10 #define MAX6675_SO_2 50
11 // Termocupla 3
12 #define MAX6675_SCK_3 38
13 #define MAX6675_CS_3 39
14 #define MAX6675_SO_3 40
15 // Termocupla 4
16 #define MAX6675_SCK_4 43
17 #define MAX6675_CS_4 42
18 #define MAX6675_SO_4 41
19
20 // Pin de los sensores de caudal
21 #define FLOW_SENSOR_PIN_1 2
22 #define FLOW_SENSOR_PIN_2 3
23
24 MAX6675 thermocouple1(MAX6675_SCK_1, MAX6675_CS_1, MAX6675_SO_1); // Termocupla 1
25 MAX6675 thermocouple2(MAX6675_SCK_2, MAX6675_CS_2, MAX6675_SO_2); // Termocupla 2
26 MAX6675 thermocouple3(MAX6675_SCK_3, MAX6675_CS_3, MAX6675_SO_3); // Termocupla 3
27 MAX6675 thermocouple4(MAX6675_SCK_4, MAX6675_CS_4, MAX6675_SO_4); // Termocupla 4
28
```

```

29 // Constantes para cálculos
30 const float Ht = 820.0; // Radiación solar constante en W/m2
31 const float Ac1 = 0.9207; // Área del colector 1 en m2
32 const float Ac2 = 2.01; // Área del colector 2 en m2
33 const float Cp = 4182.0; // Capacidad calorífica en J/KgC
34
35 // Variables para el cálculo del flujo en litros
36 volatile int pulseCount1 = 0;
37 volatile int pulseCount2 = 0;
38 float flowRate1 = 0.0;
39 float flowRate2 = 0.0;
40 float flowLitresPerSecond1 = 0.0;
41 float flowLitresPerSecond2 = 0.0;
42 float totalLitres1 = 0.0;
43 float totalLitres2 = 0.0;
44 float tempC1 = 0.0;
45 float tempC2 = 0.0;
46 float tempC3 = 0.0;
47 float tempC4 = 0.0;
48 float efficiency1 = 0.0;
49 float efficiency2 = 0.0;
50 unsigned long prevMillis = 0;
51
52 void setup() {
53     Serial.begin(9600);
54     pinMode(FLOW_SENSOR_PIN_1, INPUT);
55     pinMode(FLOW_SENSOR_PIN_2, INPUT);

```

```

55     pinMode(FLOW_SENSOR_PIN_2, INPUT);
56     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN_1), pulseCounter1, FALLING);
57     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN_2), pulseCounter2, FALLING);
58 }
59
60 void loop() {
61     unsigned long currentMillis = millis();
62
63     if (currentMillis - prevMillis >= 3000) {
64         prevMillis = currentMillis;
65
66         // Lee las temperaturas de las termocuplas en grados Celsius
67         tempC1 = thermocouple1.readCelsius(); // Termocupla 1
68         tempC2 = thermocouple2.readCelsius(); // Termocupla 2
69         tempC3 = thermocouple3.readCelsius(); // Termocupla 3
70         tempC4 = thermocouple4.readCelsius(); // Termocupla 4
71
72         // Calcula el flujo en litros por segundo para ambos sensores de caudal
73         flowRate1 = ((1000.0 / 1000.0) * pulseCount1) / 1.0;
74         flowRate2 = ((1000.0 / 1000.0) * pulseCount2) / 1.0;
75         flowLitresPerSecond1 = flowRate1 / 1000.0; // Convertir a litros
76         flowLitresPerSecond2 = flowRate2 / 1000.0; // Convertir a litros
77
78         // Calcula los litros totales para ambos sensores de caudal
79         totalLitres1 += flowLitresPerSecond1 * 3.0; // 3 segundos de intervalo
80         totalLitres2 += flowLitresPerSecond2 * 3.0; // 3 segundos de intervalo
81
82         // Calcula el calor útil y eficiencias para ambos sensores de caudal

```

```

82 // Calcula el calor útil y eficiencias para ambos sensores de caudal
83 float deltaT1 = tempC2 - tempC1;
84 float deltaT2 = tempC4 - tempC3;
85 float Qu1 = flowLitresPerSecond1 * Cp * deltaT1;
86 float Qu2 = flowLitresPerSecond2 * Cp * deltaT2;
87 efficiency1 = (Qu1 / (Ht * Ac1)) * 100.0;
88 efficiency2 = (Qu2 / (Ht * Ac2)) * 100.0;
89
90 // Muestra todos los valores en el monitor serie
91 Serial.print("Temperatura 1: ");
92 Serial.print(tempC1);
93 Serial.println(" °C");
94
95 Serial.print("Temperatura 2: ");
96 Serial.print(tempC2);
97 Serial.println(" °C");
98
99 Serial.print("Temperatura 3: ");
100 Serial.print(tempC3);
101 Serial.println(" °C");
102
103 Serial.print("Temperatura 4: ");
104 Serial.print(tempC4);
105 Serial.println(" °C");
106
107 Serial.print("Flujo en Kilogramos/seg (Sensor 1): ");
108 Serial.println(flowLitresPerSecond1, 4);
...

```

```

108     Serial.println(flowLitresPerSecond1, 4);
109
110     Serial.print("Total Litros (Sensor 1): ");
111     Serial.println(totalLitres1, 4);
112
113     Serial.print("Flujo en Kilogramos/seg (Sensor 2): ");
114     Serial.println(flowLitresPerSecond2, 4);
115
116     Serial.print("Total Litros (Sensor 2): ");
117     Serial.println(totalLitres2, 4);
118
119     Serial.print("Eficiencia 1: ");
120     Serial.print(eficiency1, 2);
121     Serial.println(" %");
122
123     Serial.print("Eficiencia 2: ");
124     Serial.print(eficiency2, 2);
125     Serial.println(" %");
126
127     // Reinicia los contadores de pulsos
128     pulseCount1 = 0;
129     pulseCount2 = 0;
130 }
131 }
132
133 void pulseCounter1() {
134     pulseCount1++;

```

```

133 void pulseCounter1() {
134     pulseCount1++;
135 }
136
137 void pulseCounter2() {
138     pulseCount2++;
139 }
140

```

Anexo B. Resultados obtenidos el día 14 de Agosto al 18 de Agosto de 2023, adicionalmente el promedio general encontrado durante todas las pruebas experimentales en el colector solar de placa plana.

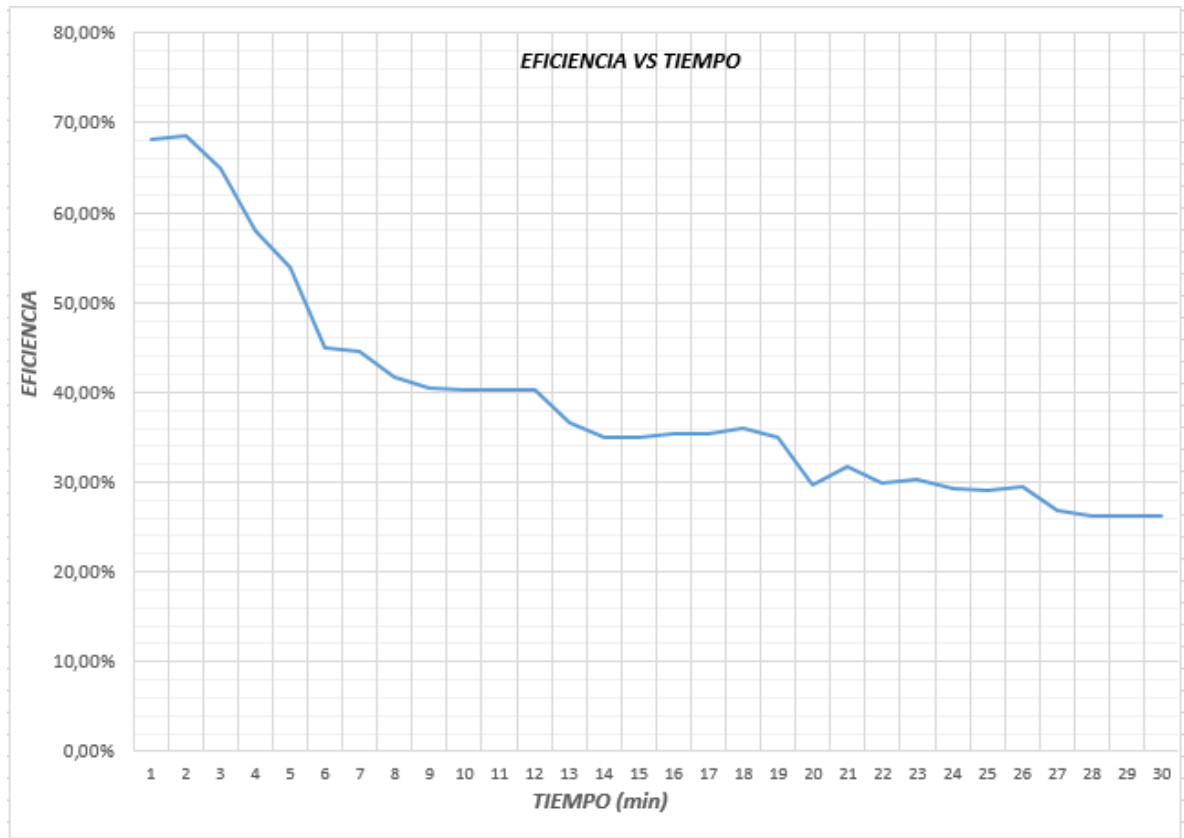
➤ Resultados obtenidos el 14 de Agosto de 2023.

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACIÓN SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,39	28,81	1,42	0,145	669	68,10%
28,45	29,84	1,39	0,149	669	68,50%
29,91	31,29	1,38	0,142	669	64,81%
30,96	32,28	1,32	0,153	772	57,89%
32,01	33,28	1,27	0,148	772	53,87%
32,87	34,08	1,21	0,15	895	44,87%
33,92	35,03	1,11	0,162	895	44,46%
35,22	36,36	1,14	0,148	895	41,71%
36,24	37,36	1,12	0,146	895	40,43%
37,64	38,74	1,1	0,148	895	40,25%
38,81	39,86	1,05	0,15	865	40,29%
39,51	40,53	1,02	0,154	865	40,18%
40,43	41,43	1	0,149	903	36,51%
41,66	42,63	0,97	0,147	903	34,94%
42,95	43,91	0,96	0,149	903	35,05%
44,23	45,17	0,94	0,148	869	35,42%
45,32	46,26	0,94	0,148	869	35,42%
46,83	47,75	0,92	0,154	869	36,08%
47,22	48,14	0,92	0,149	869	34,90%
47,98	48,88	0,9	0,15	1003	29,78%
49,16	50,05	0,89	0,162	1003	31,81%
50,67	51,55	0,88	0,154	1003	29,90%
51,34	52,22	0,88	0,156	1003	30,29%
52,75	53,61	0,86	0,153	996	29,23%
53,18	54,02	0,84	0,156	996	29,11%
53,79	54,63	0,84	0,158	996	29,48%
55,06	55,87	0,81	0,162	1080	26,88%
56,78	57,59	0,81	0,162	1106	26,25%
57,81	58,61	0,8	0,164	1106	26,25%
58,13	58,93	0,8	0,164	1106	26,25%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 68,10% y finalizo con 26,25%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

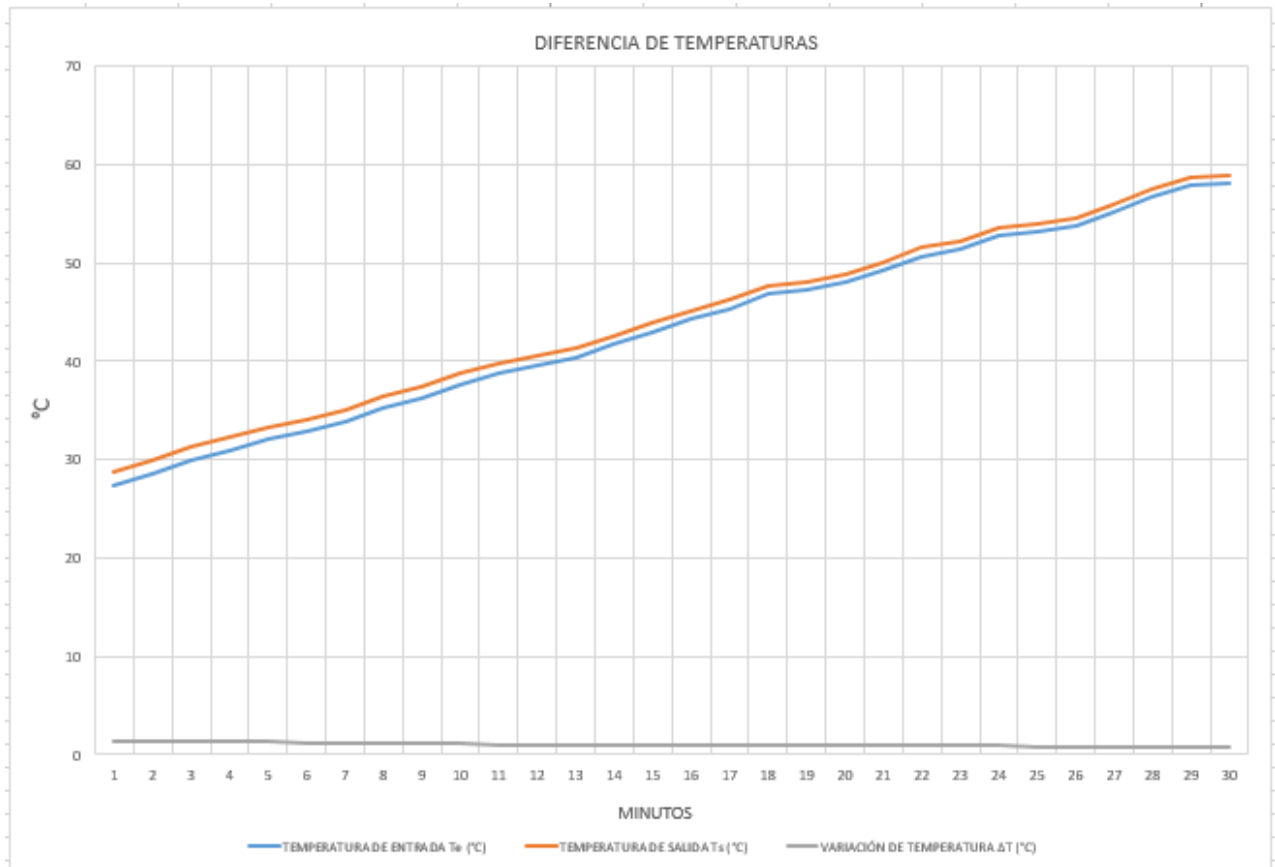
➤ Eficiencia vs tiempo

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



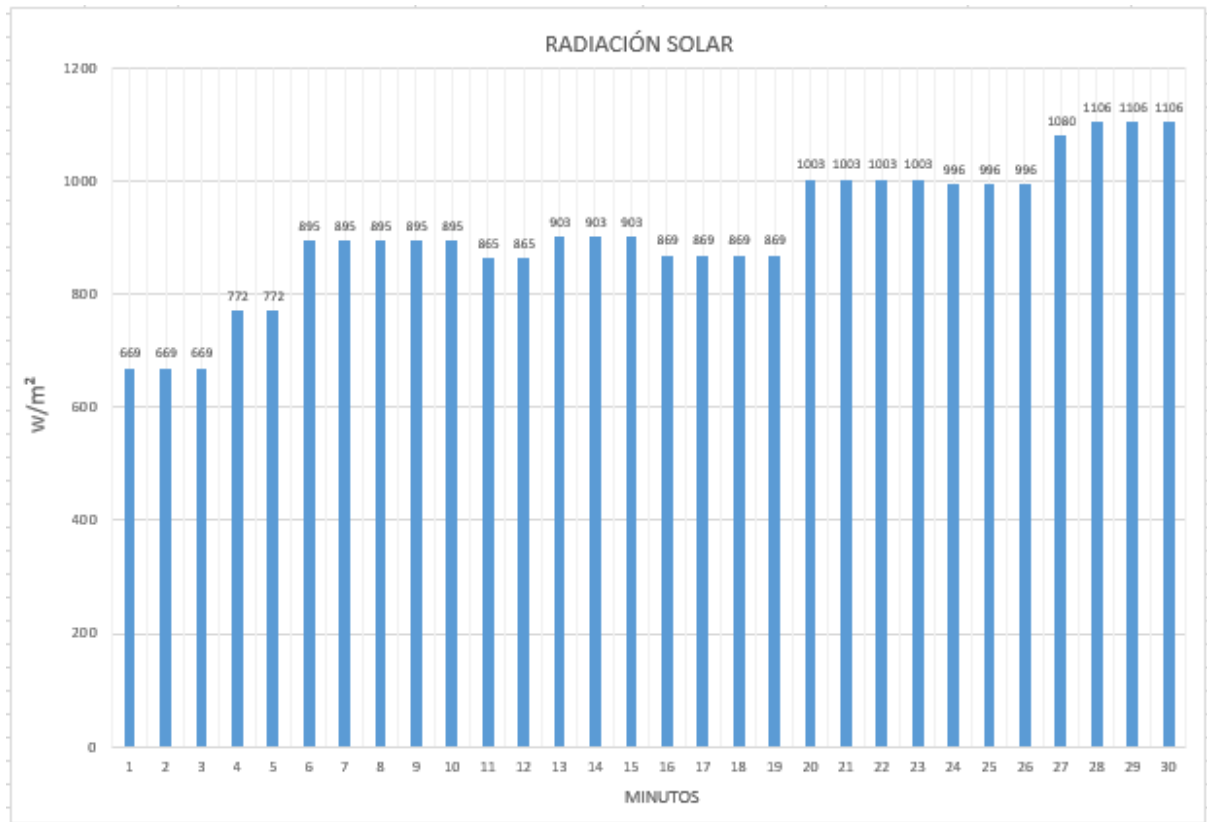
➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



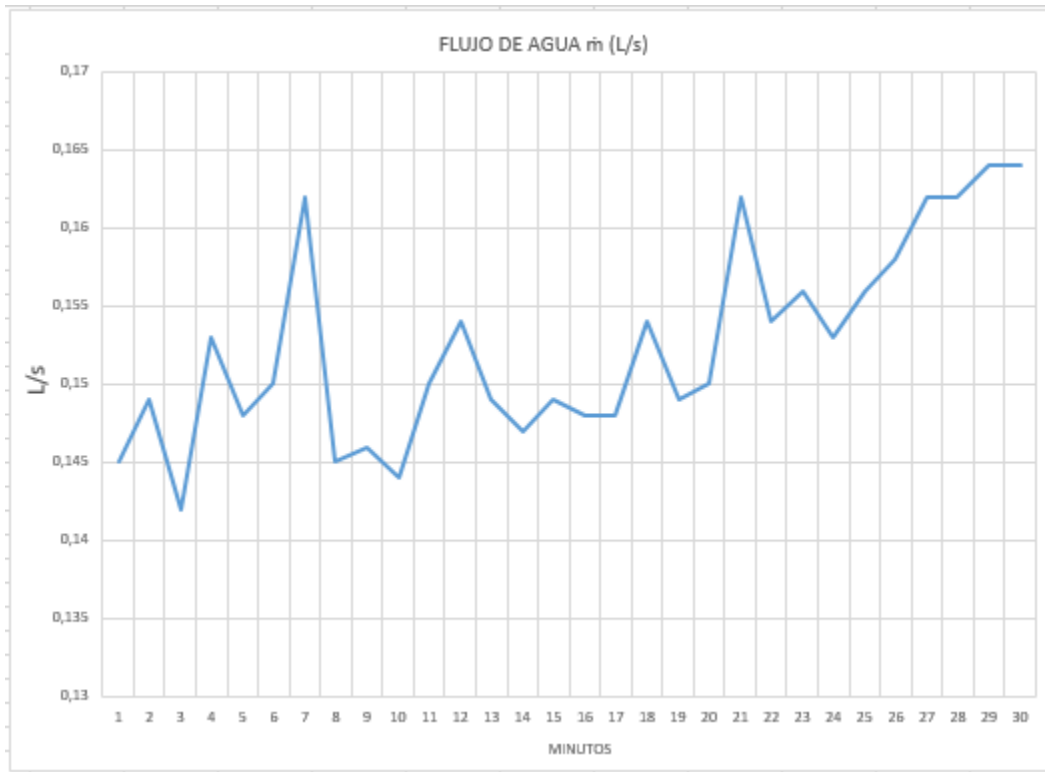
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, esta fue extraída del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $669 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1106 \frac{W}{m^2}$.



➤ Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua rondó desde los 0,142 L/s hasta 0,164 L/s durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



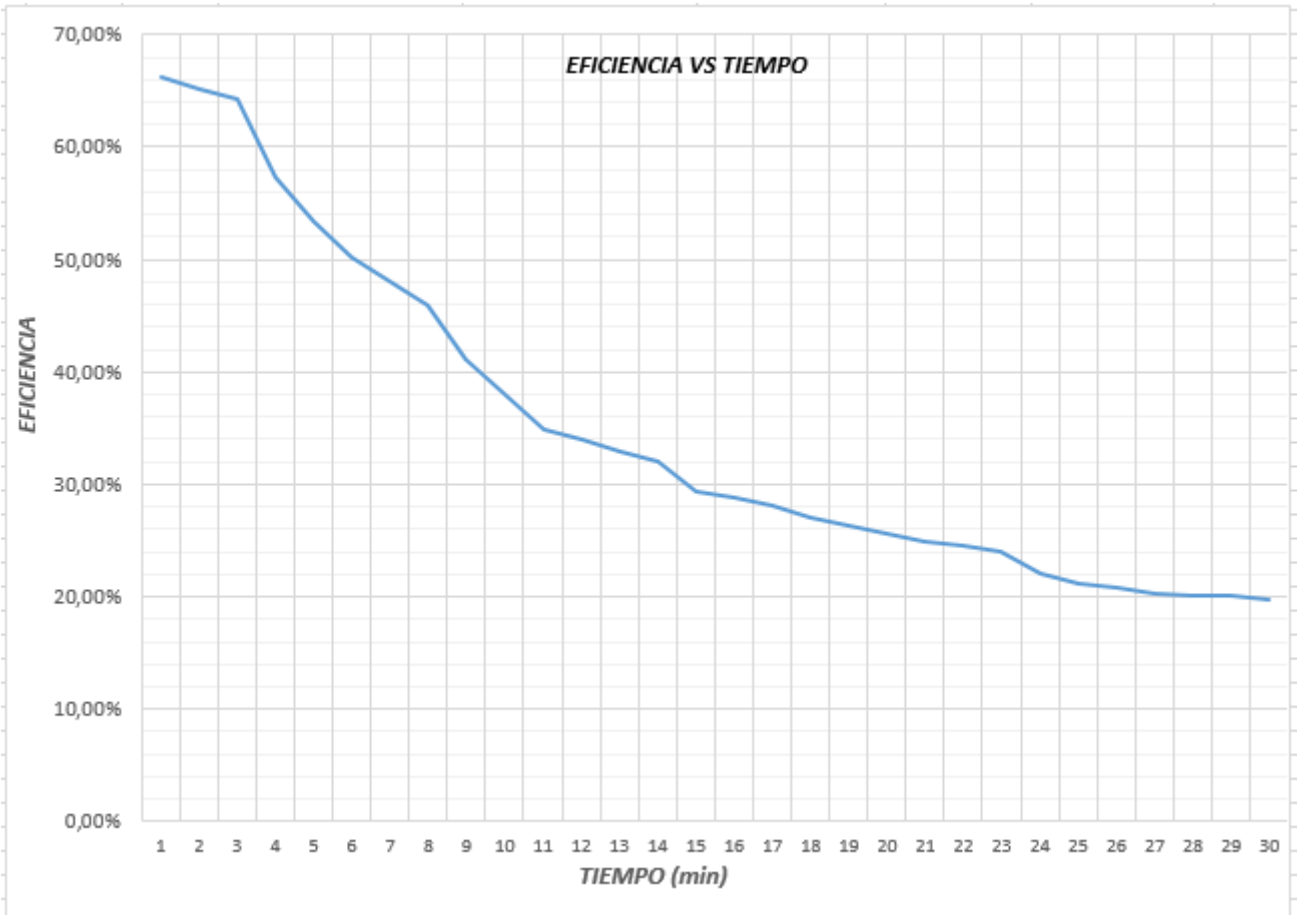
➤ Resultados obtenidos el 15 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACIÓN SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,04	28,22	1,18	0,142	560	66,21%
28,31	29,47	1,16	0,142	560	65,08%
28,92	30,05	1,13	0,144	560	64,29%
28,99	30,09	1,1	0,16	680	57,27%
29,52	30,6	1,08	0,152	680	53,42%
30,03	31,07	1,04	0,152	696	50,26%
31,47	32,49	1,02	0,162	760	48,11%
32,81	33,81	1	0,164	790	45,93%
33,18	34,17	0,99	0,164	874	41,10%
33,69	34,64	0,95	0,158	874	38,00%
34,17	35,1	0,93	0,164	969	34,83%
34,81	35,74	0,93	0,16	969	33,98%
34,96	35,87	0,91	0,144	881	32,91%
35,62	36,52	0,9	0,142	881	32,10%
36,51	37,38	0,87	0,149	978	29,33%
37,23	38,09	0,86	0,148	978	28,80%
37,91	38,75	0,84	0,148	978	28,13%
38,67	39,51	0,84	0,146	1003	27,06%
39,11	39,94	0,83	0,144	1003	26,37%
39,76	40,58	0,82	0,142	1003	25,69%
40,11	40,83	0,72	0,142	910	24,86%
40,66	41,36	0,7	0,144	910	24,51%
40,98	41,63	0,65	0,152	910	24,02%
41,89	42,51	0,62	0,144	892	22,15%
42,78	43,38	0,6	0,142	892	21,13%
43,77	44,42	0,65	0,142	980	20,84%
45,23	45,83	0,6	0,15	980	20,32%
46,99	47,57	0,58	0,16	1024	20,05%
48,81	49,37	0,56	0,164	1008	20,16%
50,21	50,76	0,55	0,164	1008	19,80%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 66,21% y finalizo con 19,80%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

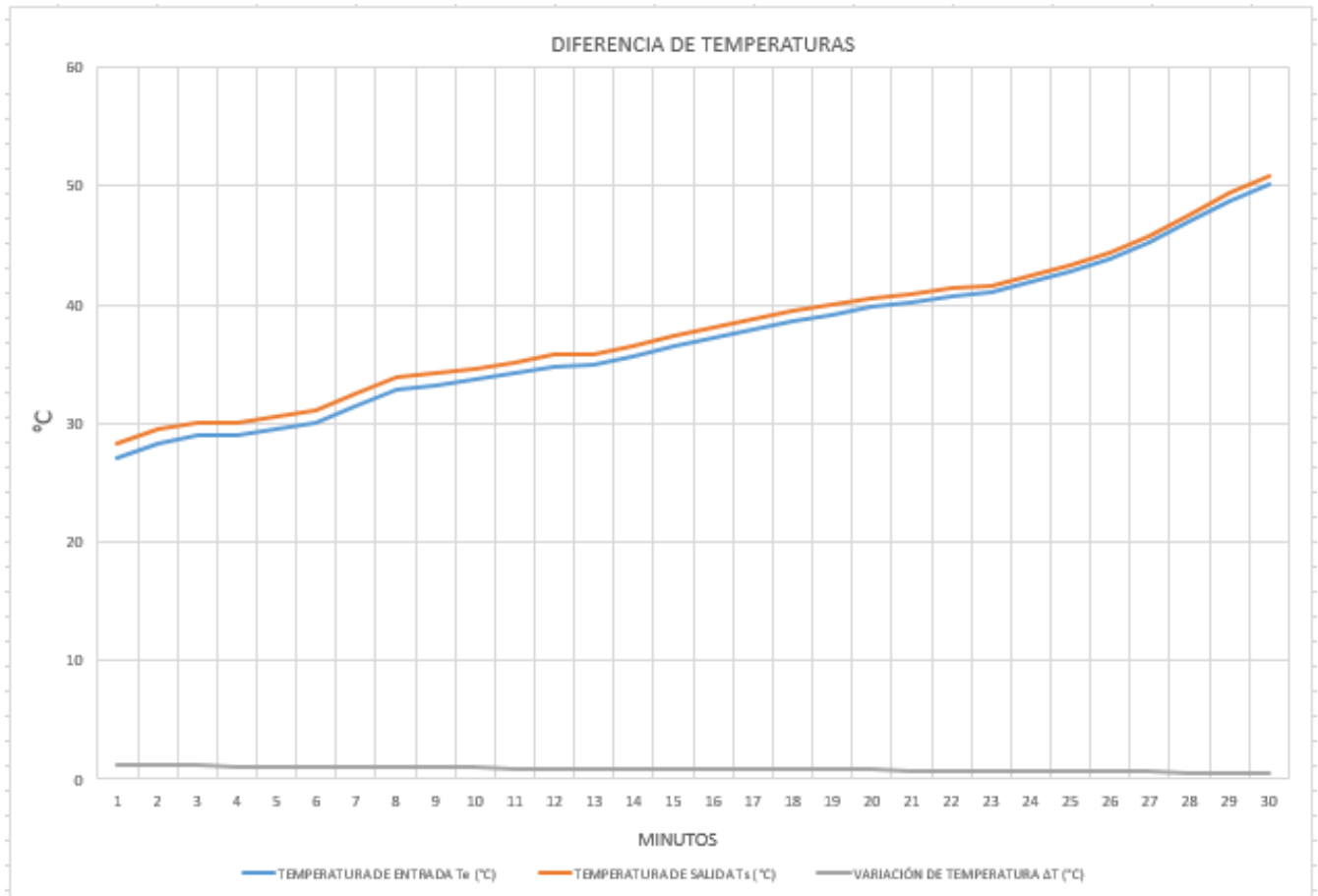
- Eficiencia vs tiempo

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



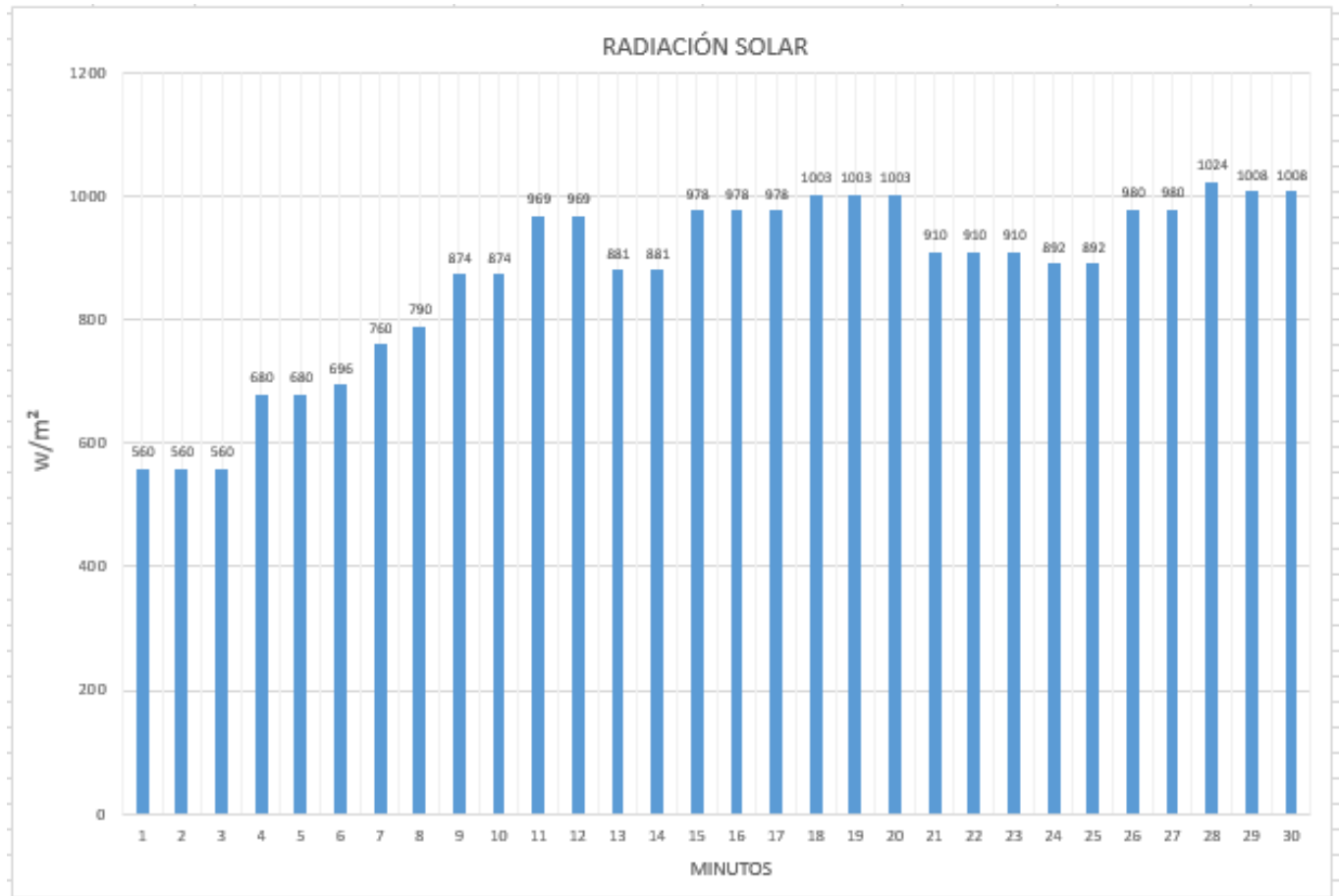
- Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



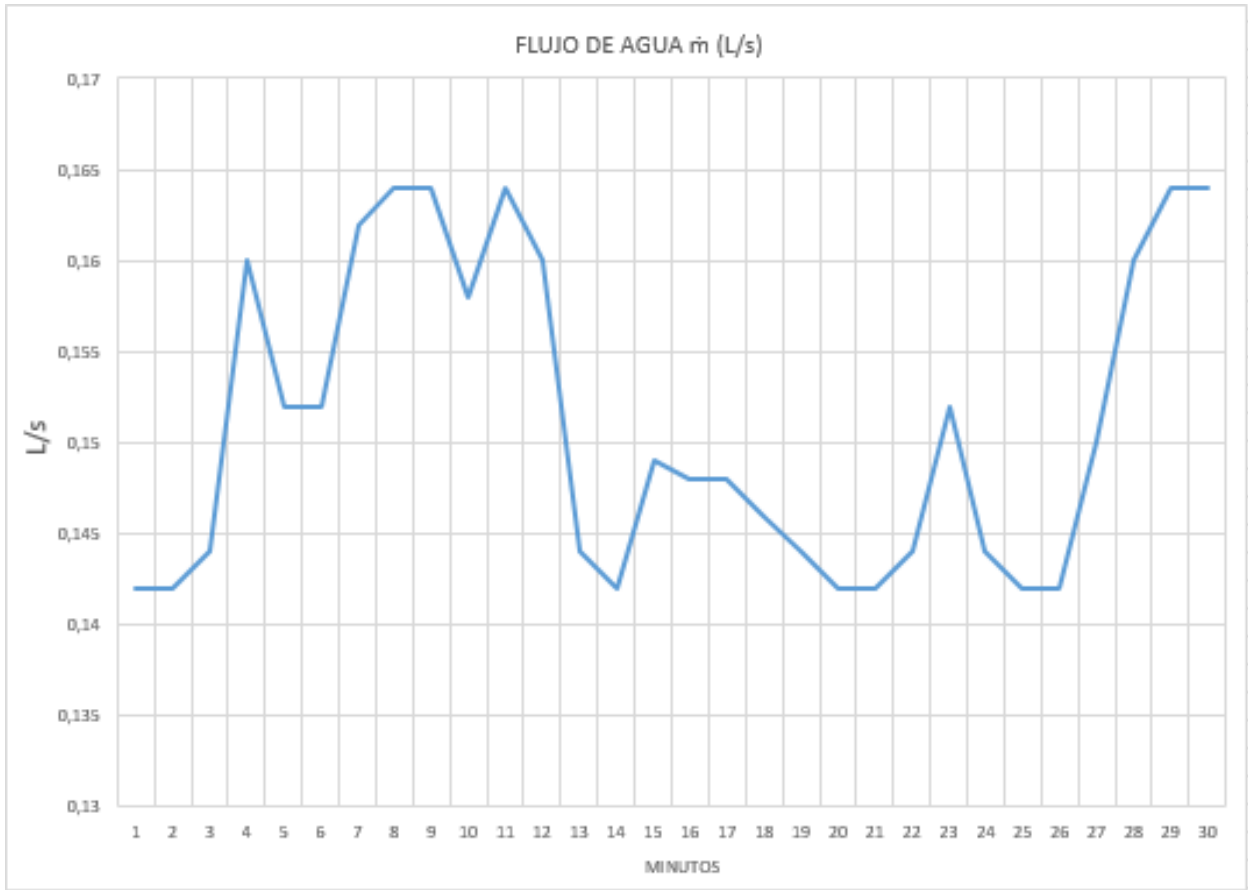
- Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $560 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1024 \frac{W}{m^2}$.



- Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua rondó desde los 0,142 L/s hasta 0,164 L/s durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



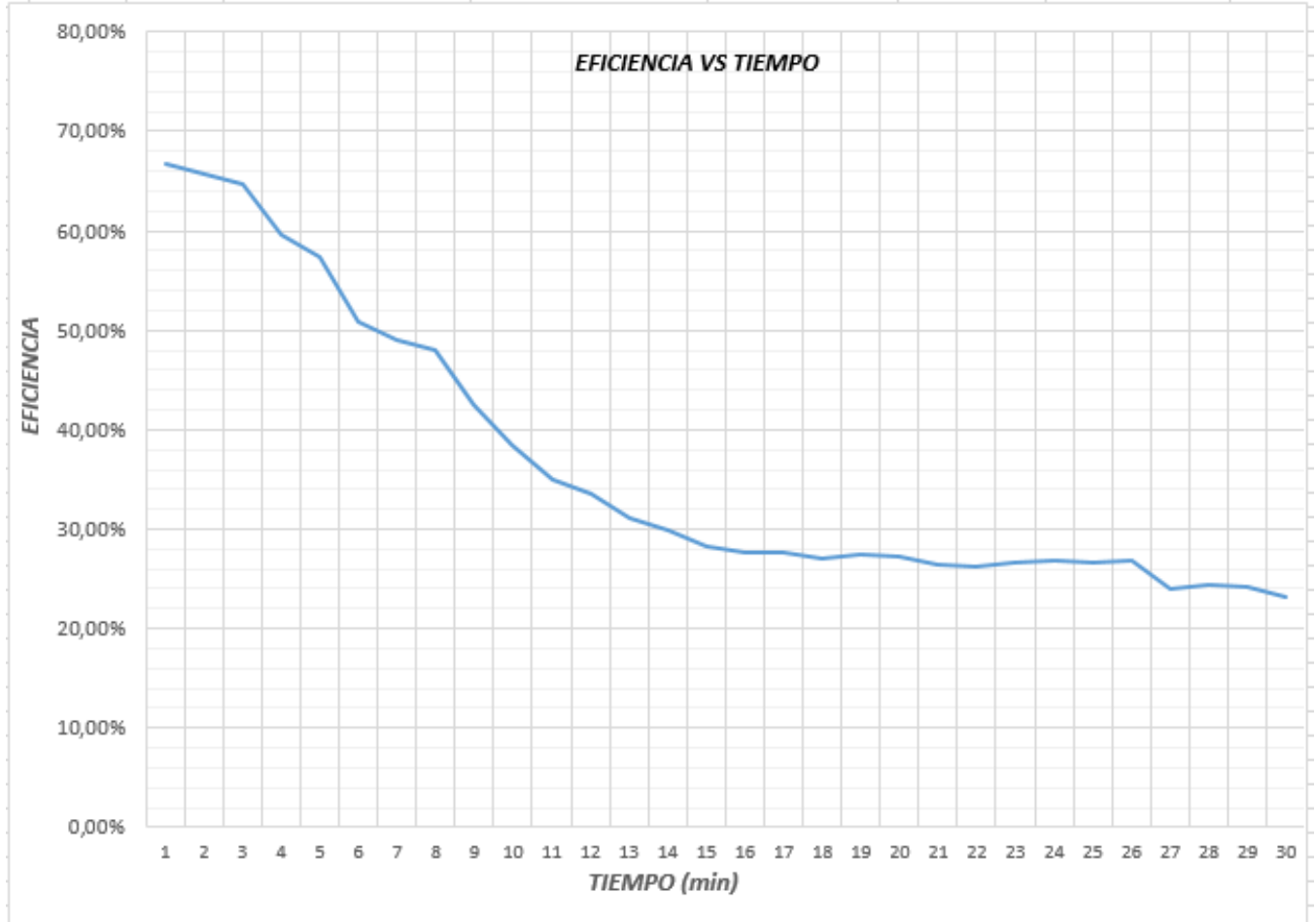
➤ Resultados obtenidos el 16 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT	FLUJO DE AGUA m (L/s)	RADIACIÓN SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,51	28,79	1,28	0,142	602	66,81%
28,36	29,62	1,26	0,142	602	65,76%
28,96	30,2	1,24	0,142	602	64,72%
29,51	30,72	1,21	0,158	710	59,58%
29,99	31,17	1,18	0,156	710	57,37%
30,71	31,86	1,15	0,162	810	50,89%
31,89	33	1,11	0,162	810	49,12%
33,01	34,08	1,07	0,164	810	47,94%
33,89	34,99	1,1	0,164	940	42,46%
34,56	35,57	1,01	0,162	940	38,52%
35,78	36,75	0,97	0,164	1008	34,92%
36,91	37,88	0,97	0,158	1008	33,64%
38,72	39,68	0,96	0,148	1008	31,19%
39,81	40,75	0,94	0,142	990	29,83%
40,97	41,89	0,92	0,148	1066	28,26%
42,51	43,42	0,91	0,146	1066	27,58%
43,17	44,06	0,89	0,142	1010	27,69%
44,54	45,41	0,87	0,142	1010	27,07%
45,67	46,54	0,87	0,144	1010	27,45%
46,11	46,96	0,85	0,142	978	27,31%
47,65	48,47	0,82	0,142	978	26,34%
48,56	49,35	0,79	0,144	960	26,22%
49,11	49,87	0,76	0,152	960	26,63%
49,91	50,66	0,75	0,142	876	26,90%
50,87	51,61	0,74	0,142	876	26,54%
52,03	52,77	0,74	0,144	876	26,92%
53,01	53,74	0,73	0,146	980	24,06%
54,76	55,47	0,71	0,152	980	24,37%
55,42	56,11	0,69	0,152	960	24,17%
56,12	56,79	0,67	0,15	960	23,16%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 66,81% y finalizo con 23,16%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

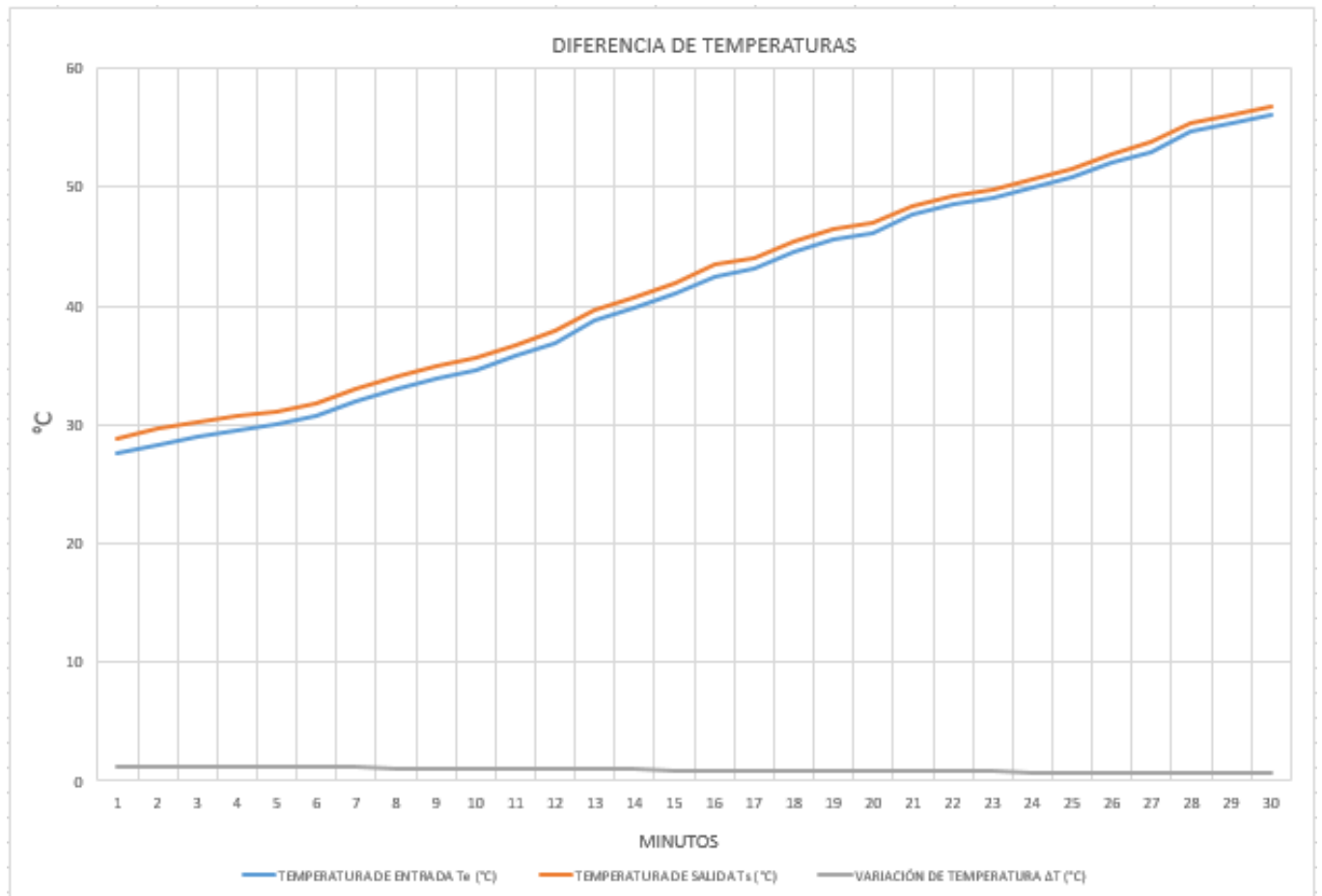
- Eficiencia vs tiempo

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



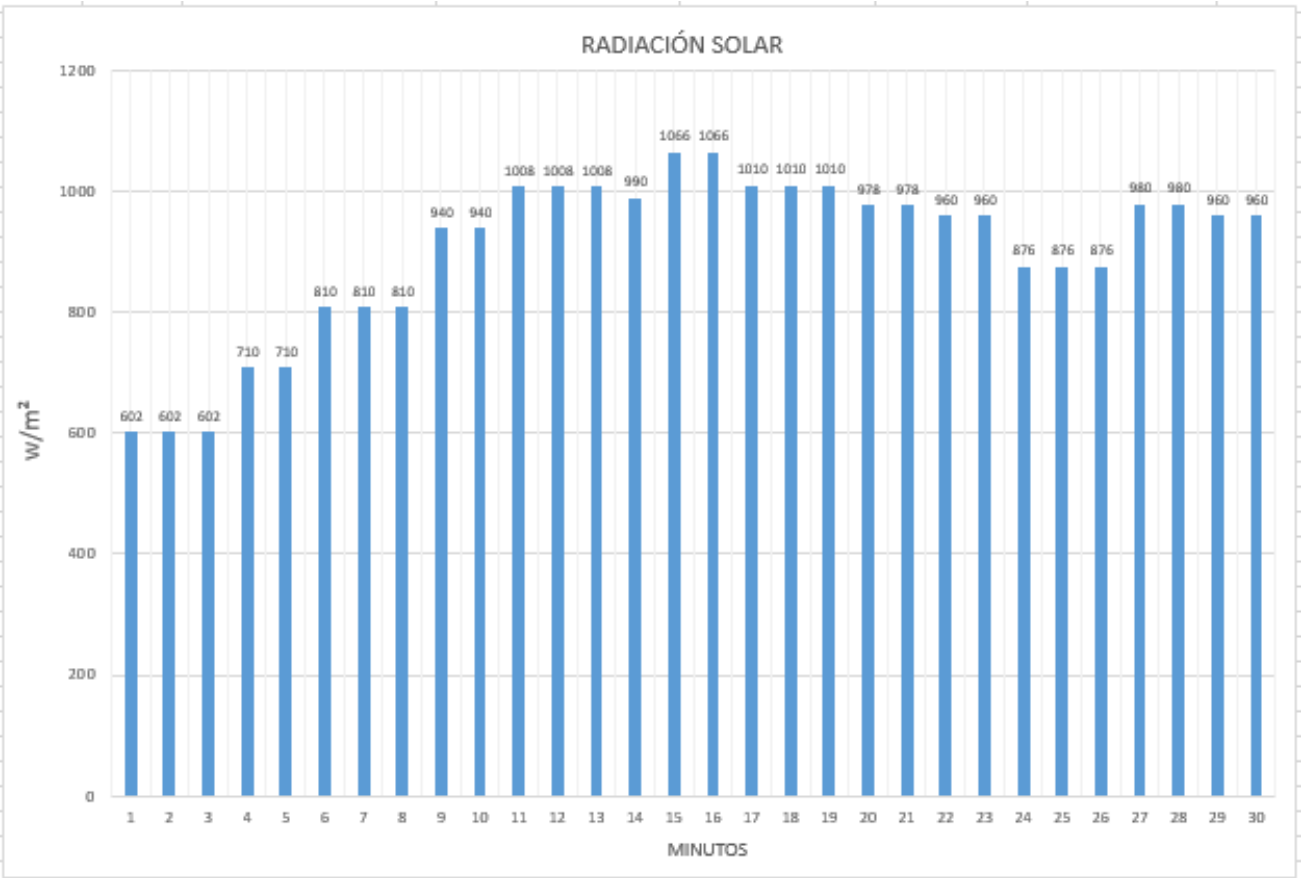
- Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



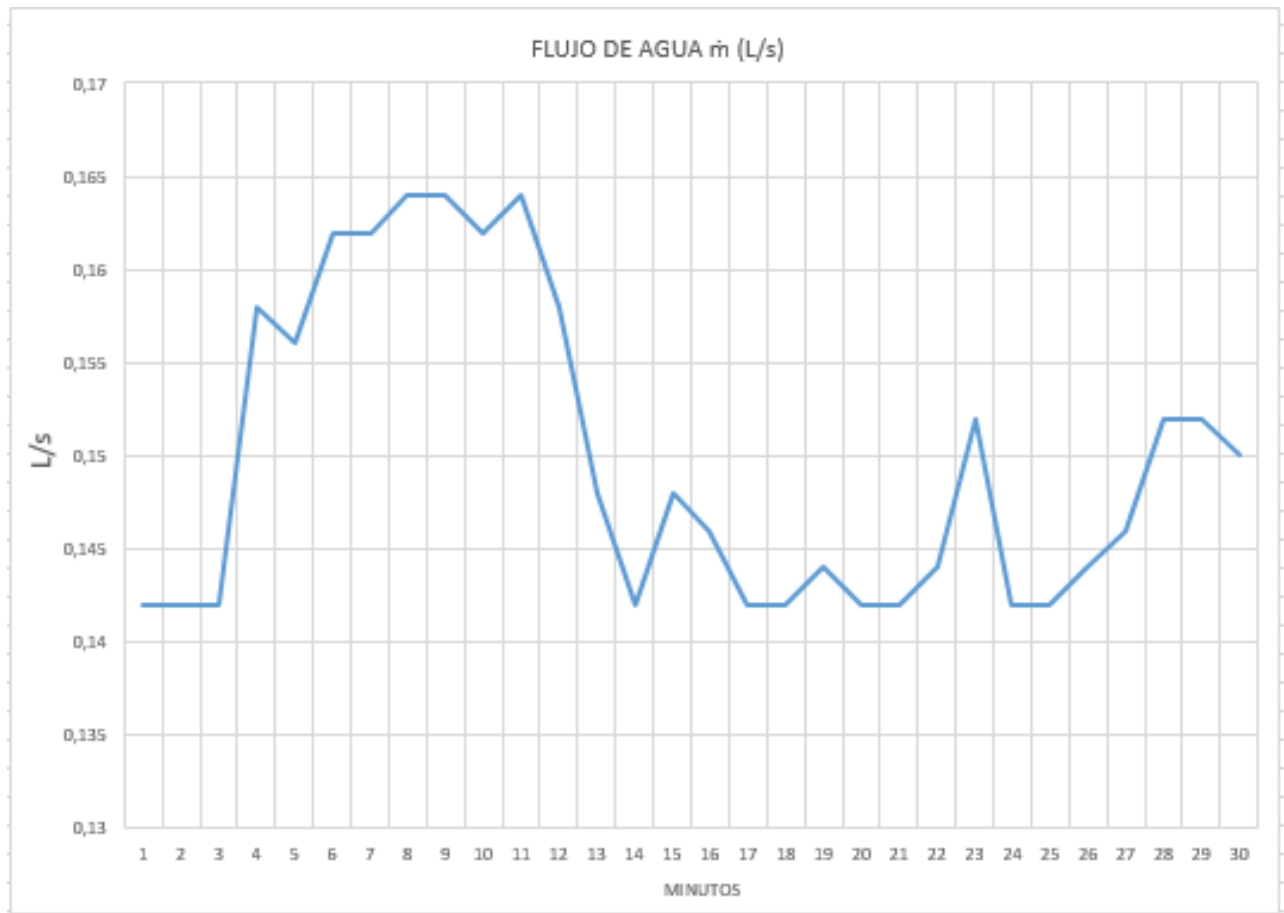
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $602 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1066 \frac{W}{m^2}$.



- Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua rondó desde los 0,142 L/s hasta 0,164 L/s durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



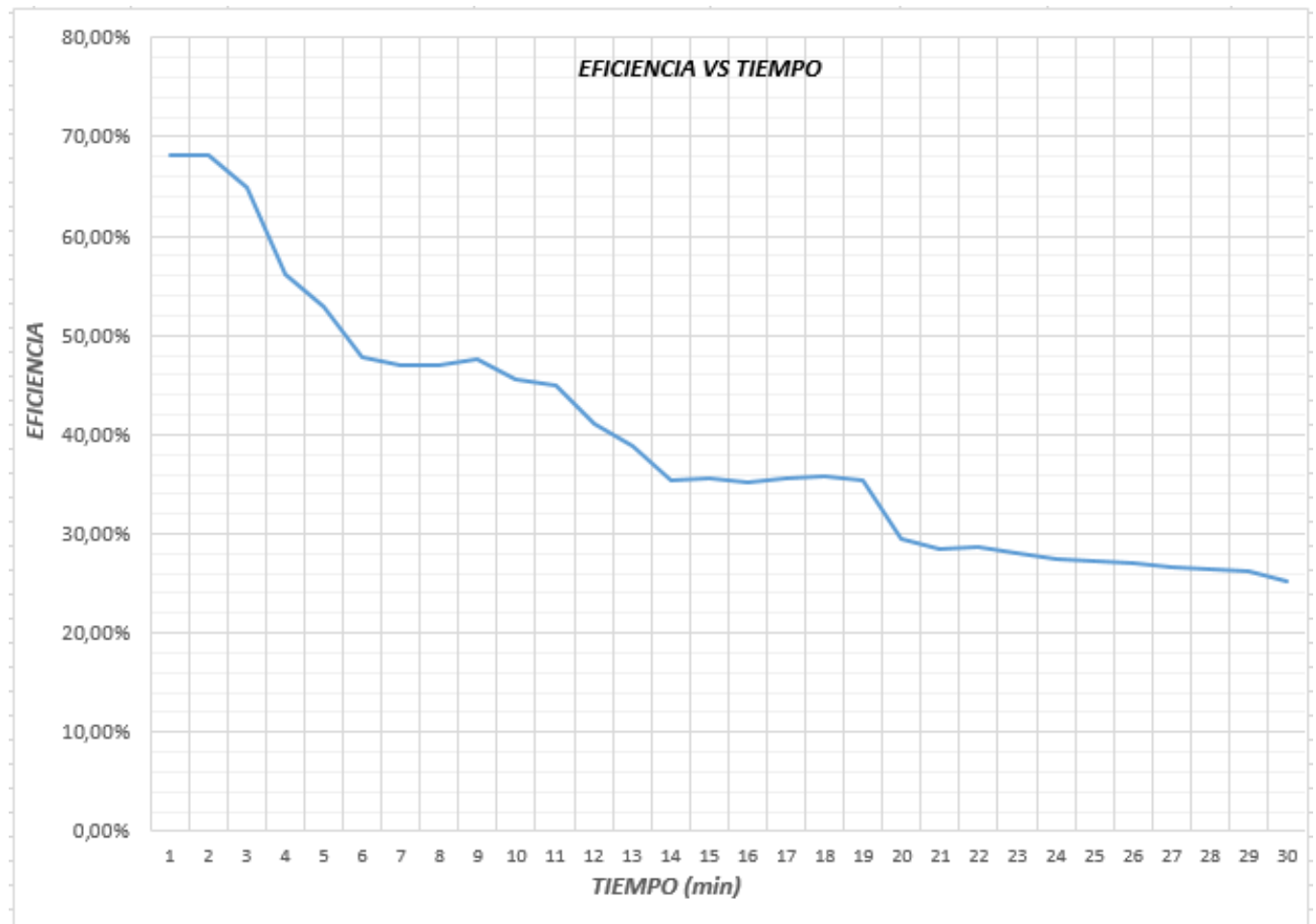
➤ Resultados obtenidos el 17 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACIÓN SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,29	28,67	1,38	0,145	649	68,22%
28,37	29,72	1,35	0,148	649	68,12%
29,86	31,2	1,34	0,142	649	64,87%
30,91	32,19	1,28	0,153	772	56,13%
32,01	33,24	1,23	0,15	772	52,88%
32,85	34,05	1,2	0,16	890	47,73%
33,8	34,98	1,18	0,16	890	46,94%
35,03	36,18	1,15	0,164	890	46,89%
36,21	37,35	1,14	0,164	870	47,55%
37,62	38,74	1,12	0,16	870	45,58%
38,8	39,89	1,09	0,162	870	44,91%
39,42	40,48	1,06	0,158	904	40,99%
40,15	41,17	1,02	0,156	904	38,95%
41,13	42,14	1,01	0,144	910	35,36%
42,81	43,81	1	0,146	910	35,50%
43,98	44,96	0,98	0,148	910	35,27%
45,16	46,12	0,96	0,146	869	35,69%
46,83	47,78	0,95	0,148	869	35,80%
47,21	48,15	0,94	0,148	869	35,42%
47,81	48,75	0,94	0,142	1002	29,48%
49,01	49,92	0,91	0,142	1002	28,54%
50,6	51,49	0,89	0,146	1002	28,69%
51,32	52,19	0,87	0,146	1002	28,05%
52,74	53,6	0,86	0,142	986	27,41%
53,18	54,02	0,84	0,145	986	27,33%
53,79	54,63	0,84	0,144	986	27,14%
55,02	55,85	0,83	0,146	1004	26,71%
56,71	57,52	0,81	0,148	1004	26,42%
57,21	58	0,79	0,162	1080	26,22%
57,96	58,74	0,78	0,158	1080	25,25%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 68,22% y finalizo con 25,25%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

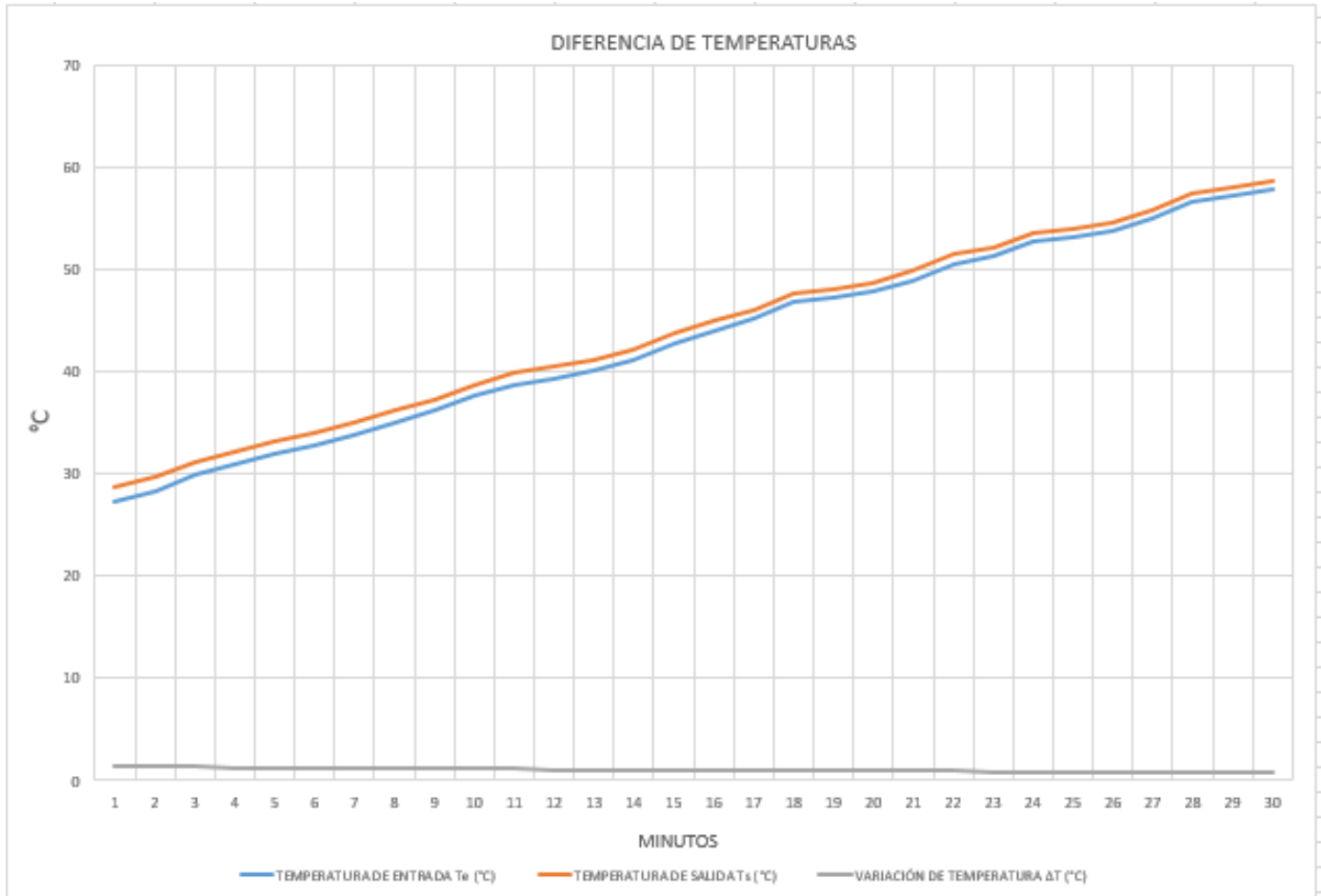
- Eficiencia vs tiempo

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



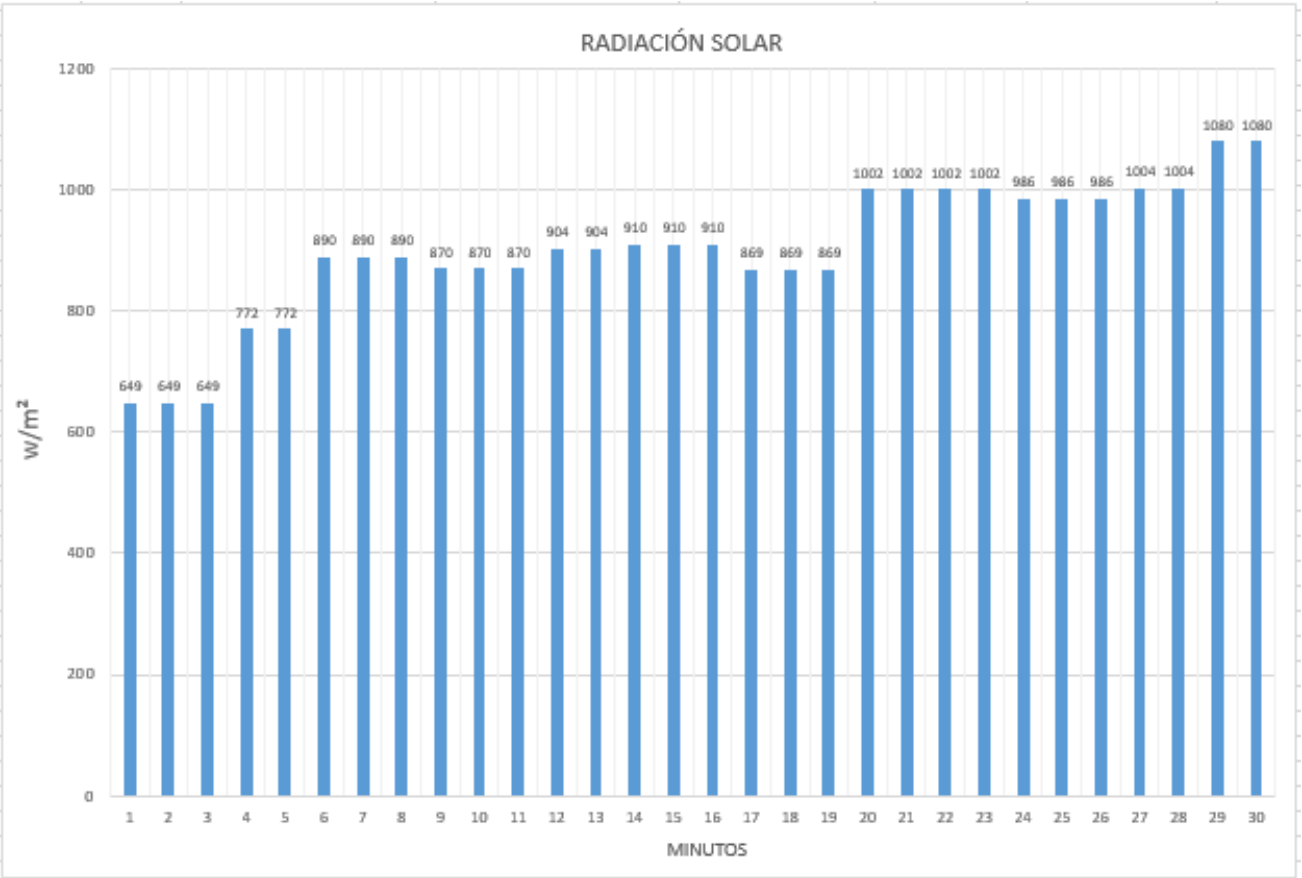
- Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



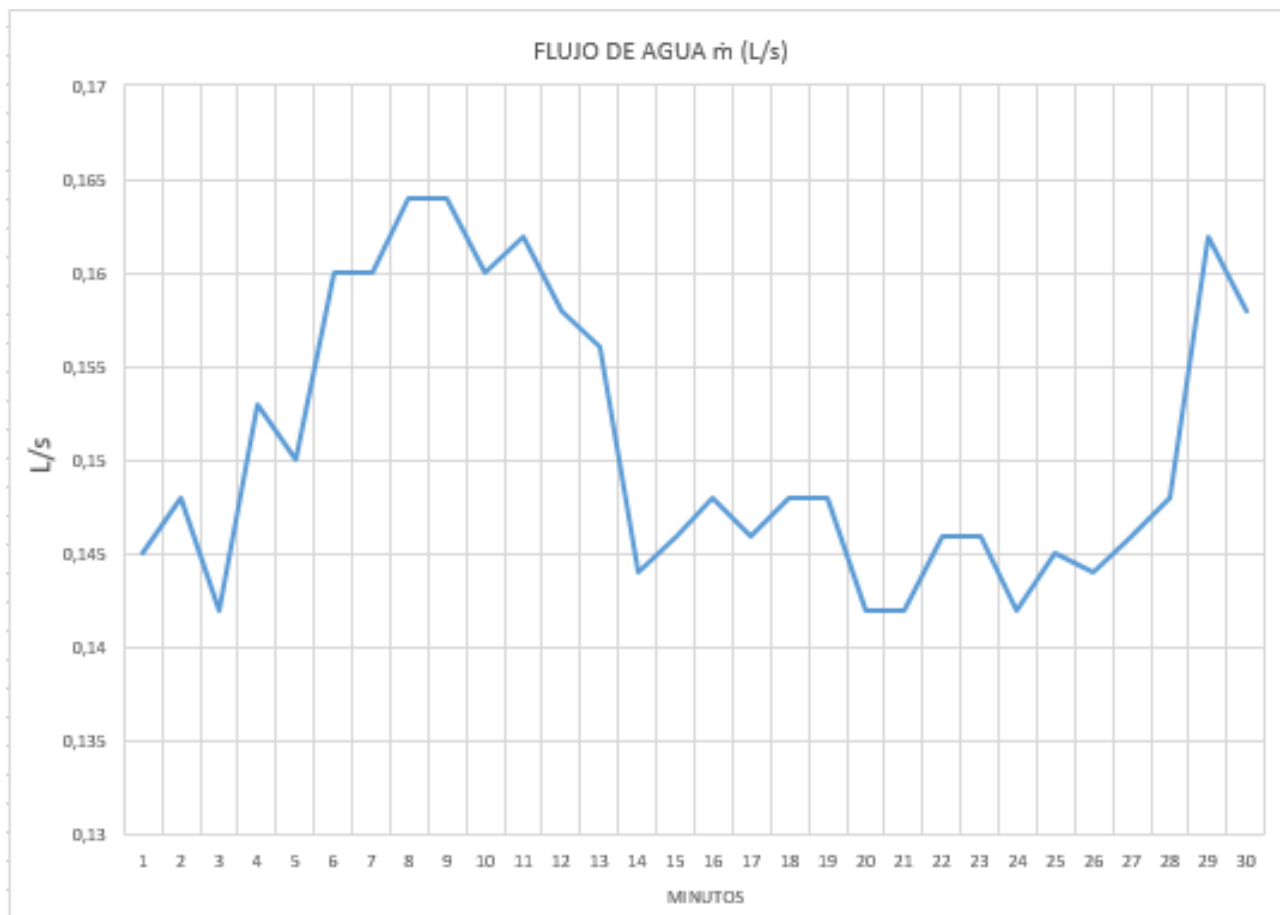
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $649 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1080 \frac{W}{m^2}$.



- Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua rondó desde los 0,142 L/s hasta 0,164 L/s durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



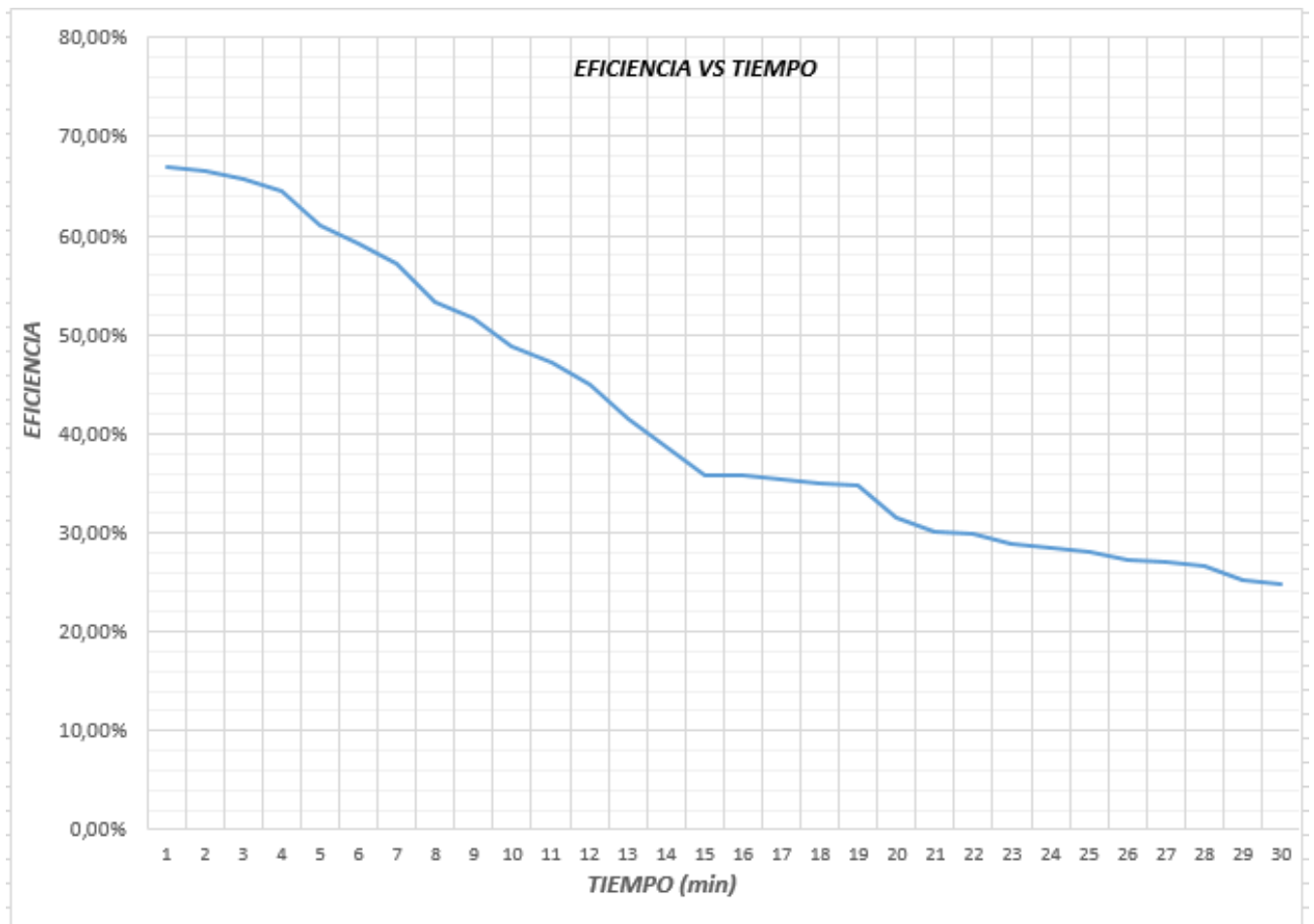
➤ Resultados obtenidos el 18 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACIÓN SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,12	28,51	1,39	0,146	670	67,02%
28,45	29,83	1,38	0,146	670	66,54%
29,9	31,28	1,38	0,144	670	65,63%
30,82	32,18	1,36	0,148	690	64,55%
31,56	32,9	1,34	0,142	690	61,02%
32,76	34,08	1,32	0,152	750	59,19%
33,23	34,54	1,31	0,148	750	57,20%
33,89	35,19	1,3	0,164	886	53,24%
35,34	36,6	1,26	0,164	886	51,61%
36,82	38,04	1,22	0,16	886	48,75%
37,91	39,09	1,18	0,16	886	47,15%
38,98	40,15	1,17	0,158	908	45,05%
40,15	41,27	1,12	0,152	908	41,49%
41,56	42,66	1,1	0,144	908	38,60%
42,67	43,74	1,07	0,146	967	35,75%
43,51	44,55	1,04	0,15	967	35,70%
44,82	45,82	1	0,142	889	35,34%
45,98	46,97	0,99	0,142	889	34,99%
47,04	48	0,96	0,142	869	34,71%
47,88	48,85	0,97	0,146	996	31,46%
48,89	49,83	0,94	0,144	996	30,07%
50,02	50,94	0,92	0,146	996	29,84%
51,09	51,98	0,89	0,146	996	28,87%
52,86	53,72	0,86	0,15	1004	28,43%
53,76	54,64	0,88	0,145	1004	28,12%
53,98	54,84	0,86	0,144	1004	27,29%
55,02	55,87	0,85	0,158	1100	27,02%
56,66	57,49	0,83	0,16	1100	26,71%
57,83	58,64	0,81	0,142	1010	25,20%
58,01	58,81	0,8	0,142	1010	24,89%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 67,02% y finalizo con 24,89%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

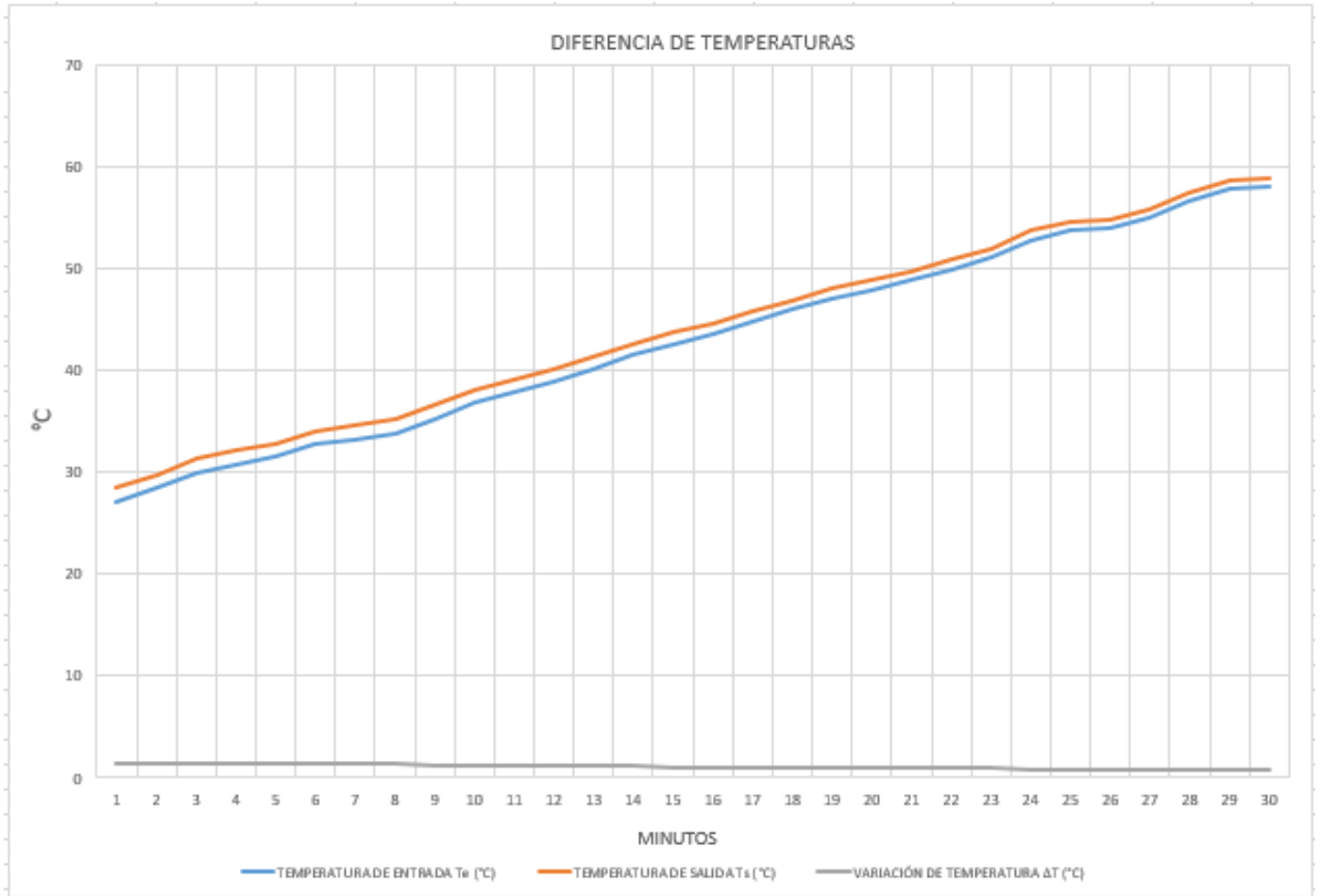
- Eficiencia vs tiempo

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



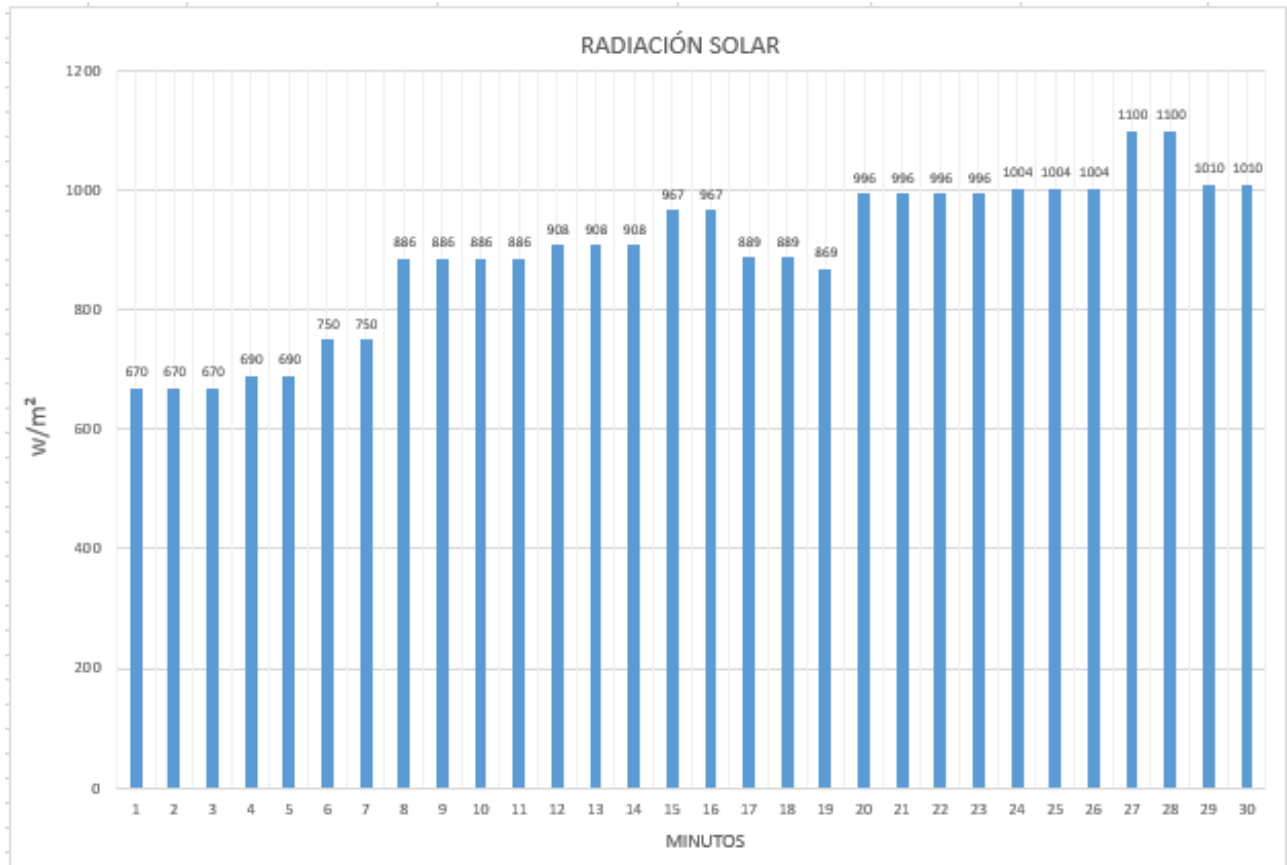
- Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



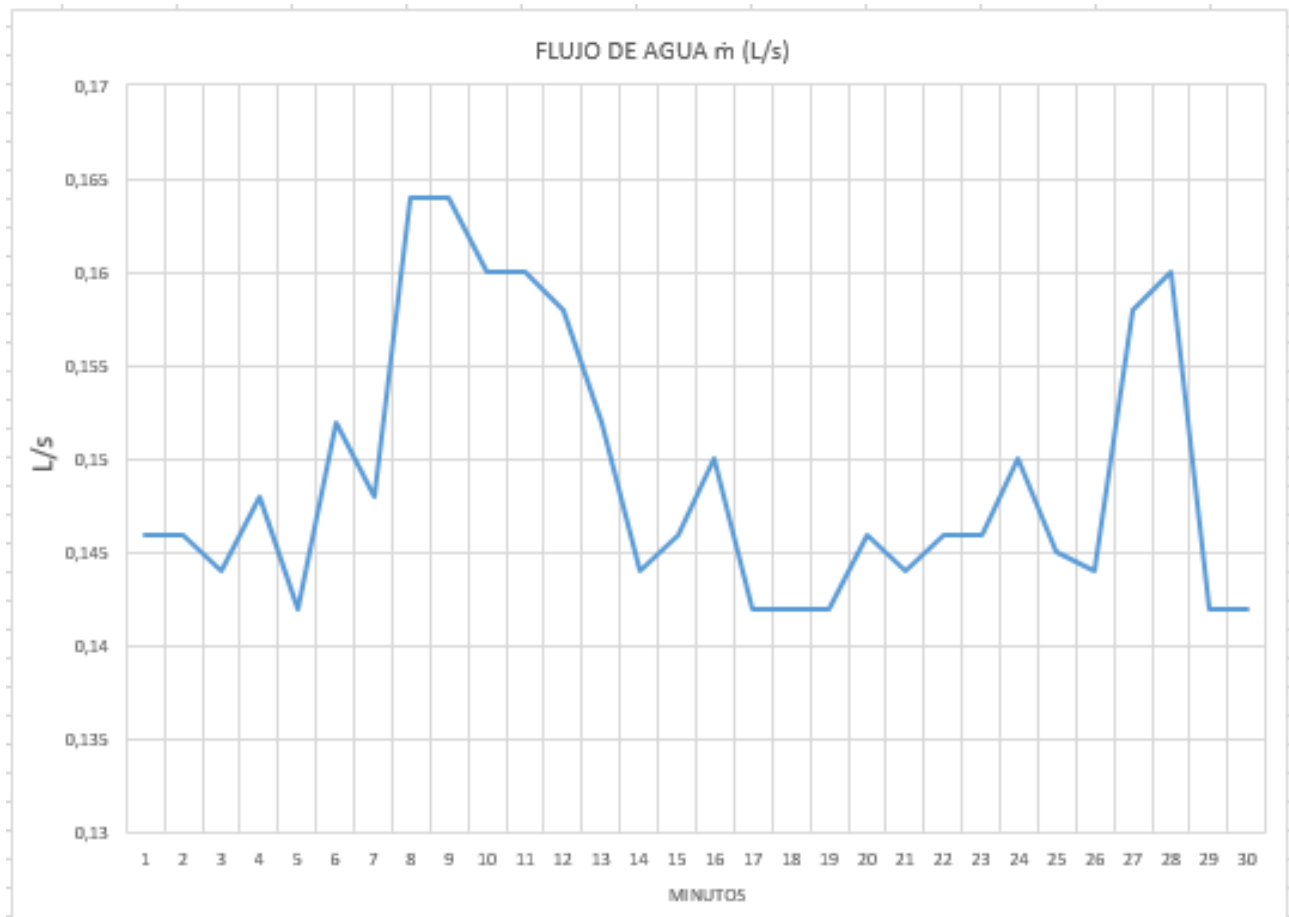
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $670 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1100 \frac{W}{m^2}$.



- Flujo de agua \dot{m}

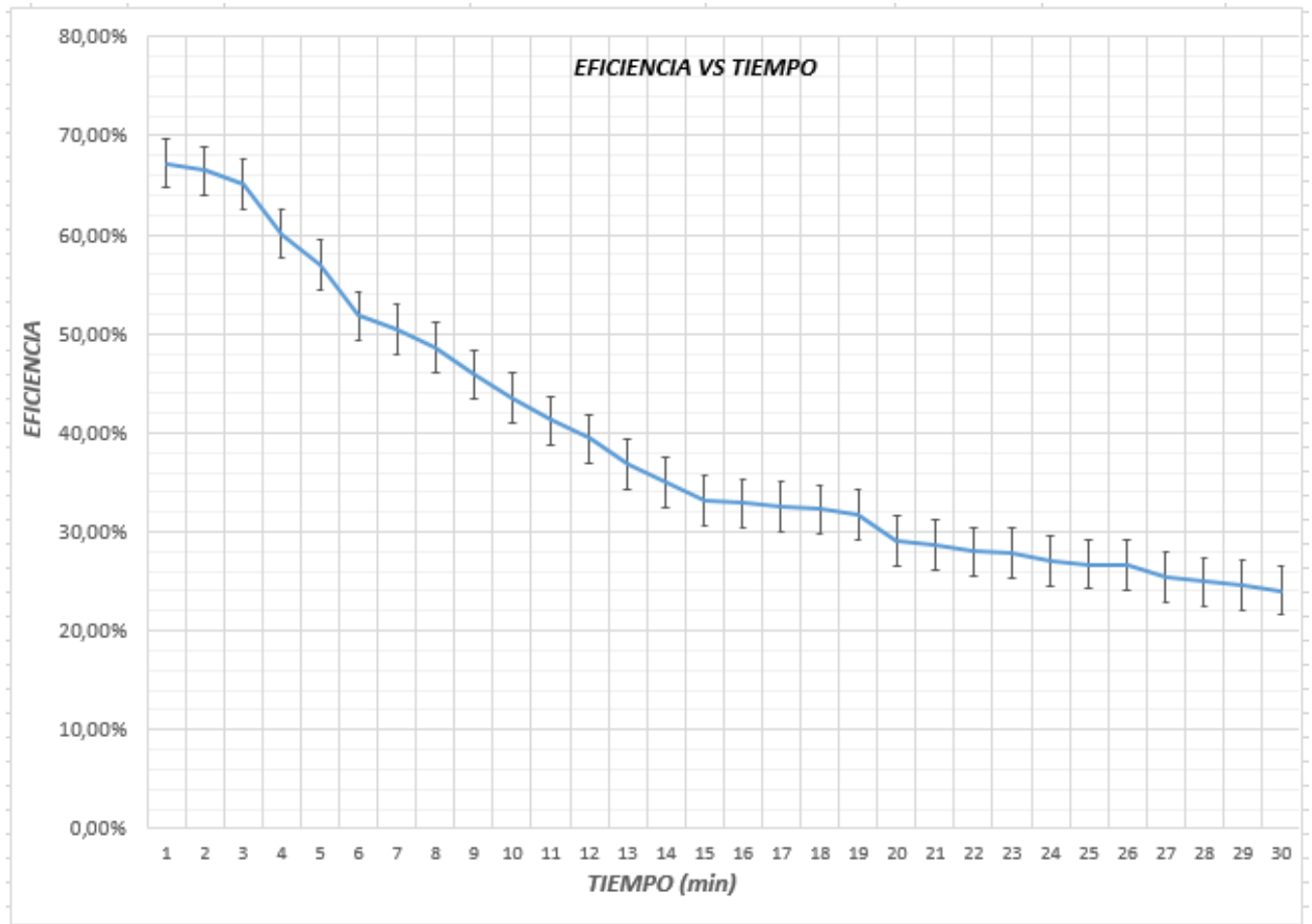
Podemos evidenciar que el flujo de agua rondó desde los 0,142 L/s hasta 0,164 L/s durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



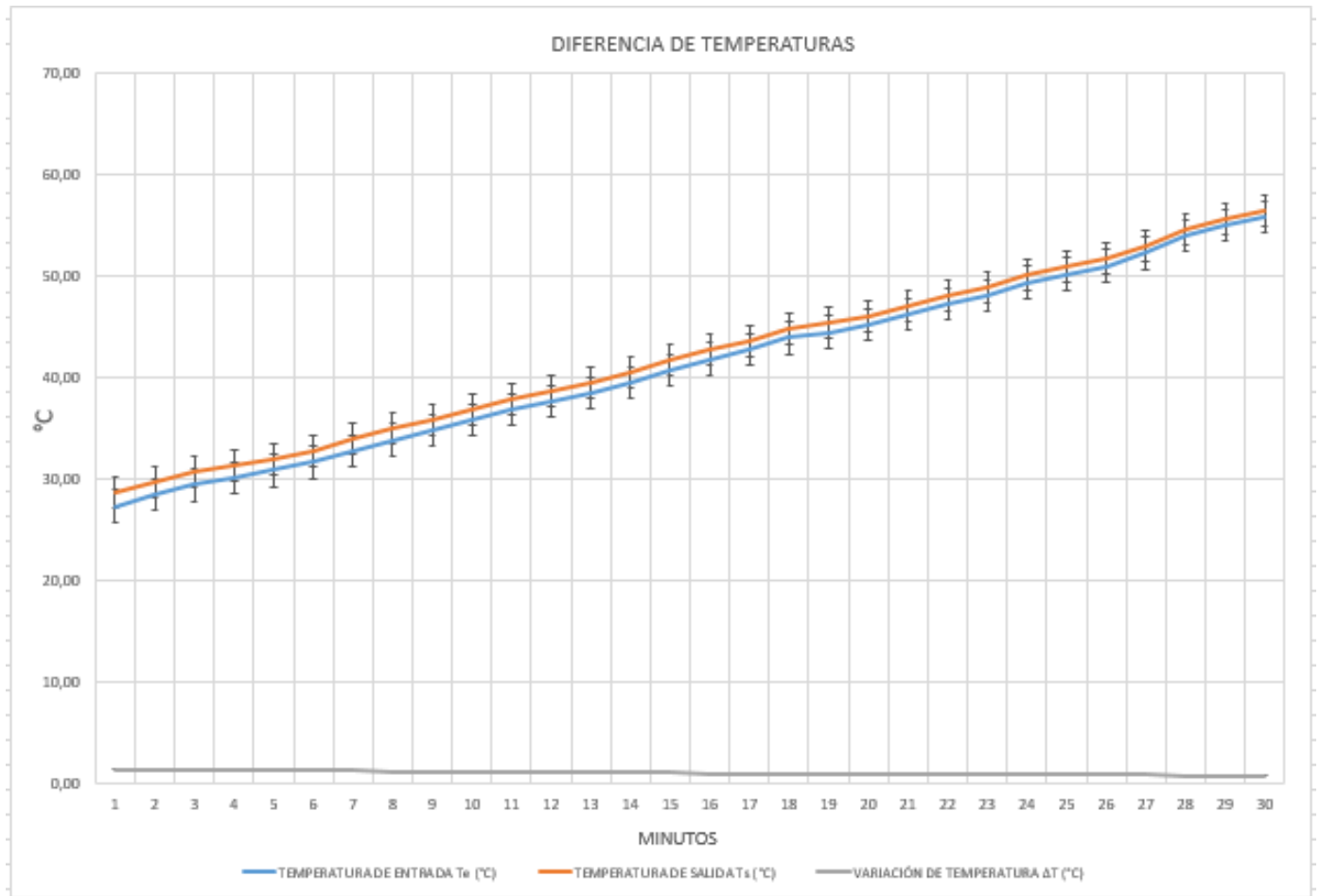
➤ Resultados del promedio final obtenido

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACIÓN SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,25	28,6	1,34	0,143	628	67,23%
28,36	29,7	1,31	0,144	628	66,43%
29,33	30,6	1,30	0,143	633	65,12%
30,03	31,3	1,26	0,154	712	60,10%
30,75	32,0	1,21	0,149	701	56,94%
31,56	32,7	1,17	0,154	770	51,77%
32,66	33,8	1,18	0,159	819	50,47%
33,79	34,9	1,16	0,161	847	48,63%
34,66	35,8	1,14	0,16	879	45,91%
35,72	36,8	1,10	0,157	878	43,55%
36,77	37,8	1,07	0,16	917	41,22%
37,56	38,6	1,05	0,157	927	39,37%
38,40	39,4	1,02	0,149	913	36,84%
39,38	40,4	1,00	0,144	911	34,98%
40,63	41,6	0,98	0,147	962	33,14%
41,73	42,7	0,96	0,148	956	32,87%
42,64	43,6	0,94	0,145	927	32,53%
43,80	44,7	0,92	0,147	931	32,24%
44,40	45,3	0,91	0,146	928	31,68%
45,06	46,0	0,90	0,146	999	29,12%
46,08	46,9	0,86	0,148	983	28,68%
47,12	48,0	0,84	0,148	980	28,00%
47,97	48,8	0,81	0,152	980	27,83%
49,30	50,1	0,80	0,147	956	27,06%
50,11	50,9	0,79	0,147	956	26,72%
50,91	51,7	0,79	0,148	970	26,60%
52,18	52,9	0,77	0,152	1021	25,37%
53,85	54,6	0,75	0,157	1046	24,92%
54,87	55,6	0,73	0,158	1037	24,60%
55,70	56,4	0,72	0,157	1037	24,05%

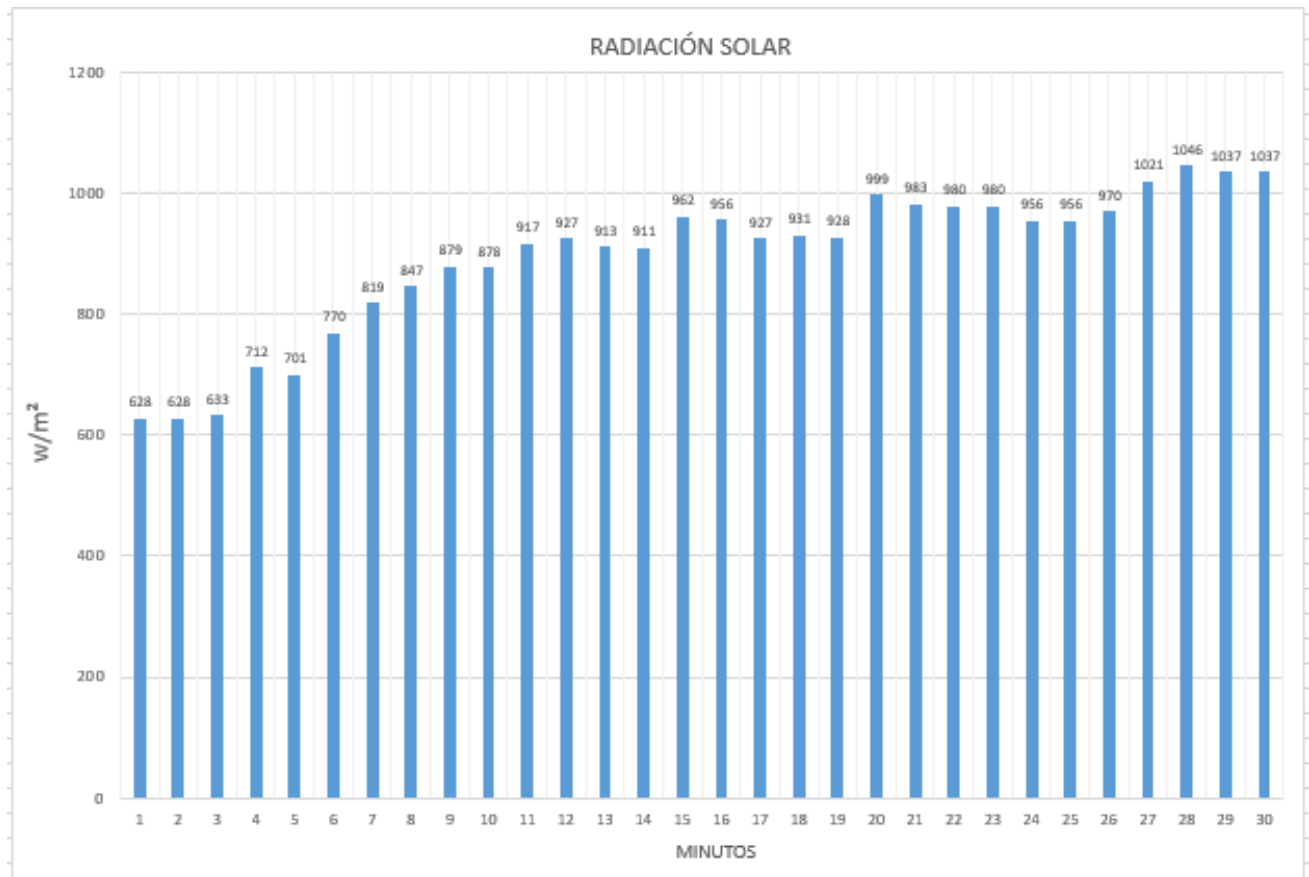
○ Eficiencia vs tiempo



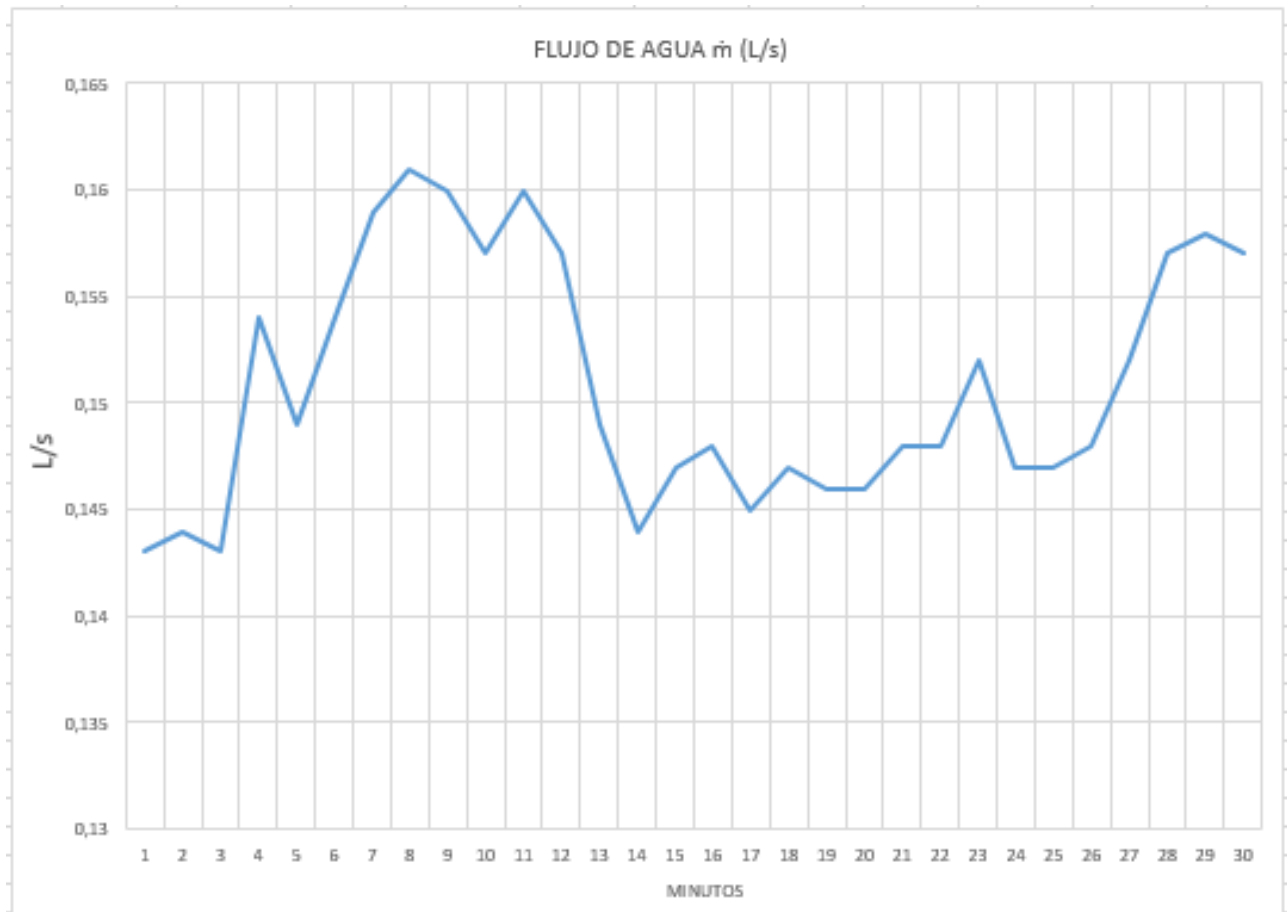
- Diferencia de temperaturas T_s y T_e



➤ Radiación solar H_t



- Flujo de agua \dot{m}



Anexo C. Resultados obtenidos el día 14 de Agosto al 18 de Agosto de 2023, adicionalmente el promedio general encontrado durante todas las pruebas experimentales en el colector solar de tubos al vacío.

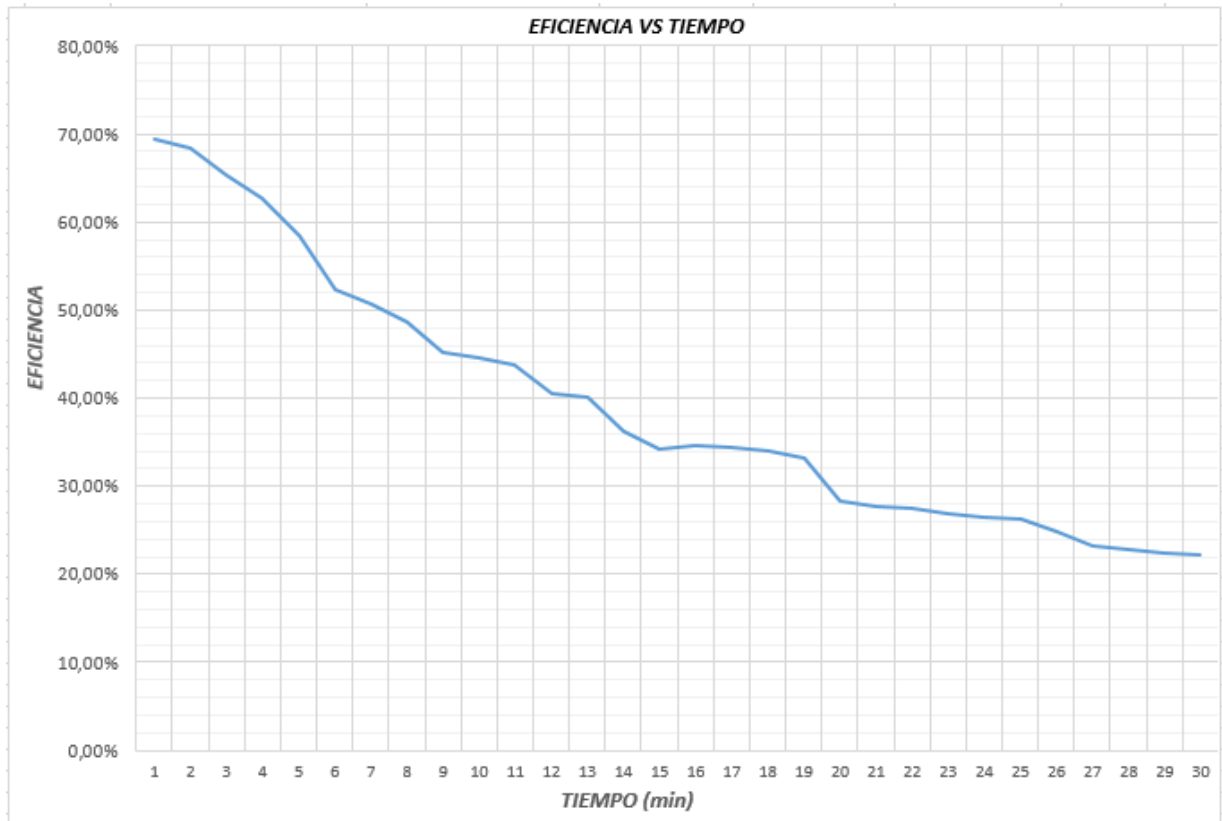
➤ Resultados obtenidos el 14 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT (°C)	FLUJO DE AGUA m (L/s)	RADIACION SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,31	30,09	2,69	0,038	669	69,40%
28,53	31,11	2,58	0,039	669	68,32%
29,61	32,08	2,47	0,039	669	65,40%
31,22	34,18	2,96	0,036	772	62,70%
32,76	35,44	2,68	0,037	772	58,34%
33,91	36,62	2,71	0,038	895	52,26%
34,98	37,61	2,63	0,038	895	50,72%
36,45	38,91	2,46	0,039	895	48,69%
37,88	40,16	2,28	0,039	895	45,13%
39,43	41,68	2,25	0,039	895	44,53%
40,52	42,71	2,19	0,038	865	43,70%
41,97	44,11	2,14	0,036	865	40,45%
43,17	45,21	2,04	0,039	903	40,02%
44,11	46,06	1,95	0,037	903	36,29%
45,65	47,49	1,84	0,037	903	34,25%
46,12	47,91	1,79	0,037	869	34,62%
46,96	48,69	1,73	0,038	869	34,36%
47,23	48,94	1,71	0,038	869	33,96%
47,44	49,07	1,63	0,039	869	33,23%
47,99	49,68	1,69	0,037	1003	28,32%
48,32	49,97	1,65	0,037	1003	27,65%
48,71	50,27	1,56	0,039	1003	27,55%
49,03	50,55	1,52	0,039	1003	26,85%
50,31	51,8	1,49	0,039	996	26,50%
51,62	53,1	1,48	0,039	996	26,32%
52,87	54,3	1,43	0,038	996	24,78%
53,92	55,33	1,41	0,039	1080	23,13%
54,56	56,02	1,46	0,038	1106	22,78%
55,68	57,08	1,4	0,039	1106	22,42%
55,78	57,17	1,39	0,039	1106	22,26%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 69,40% y finalizo con 22,26%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

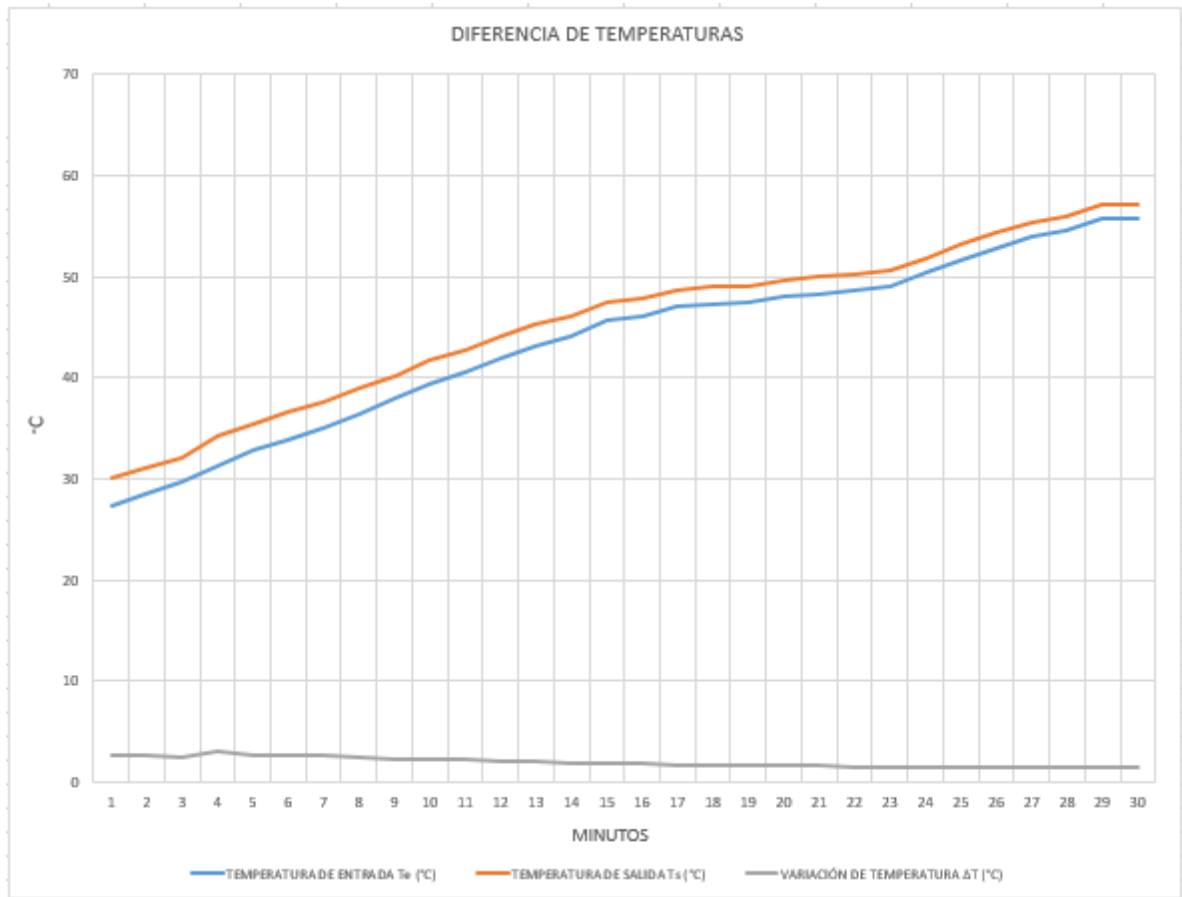
➤ Eficiencia vs tiempo:

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



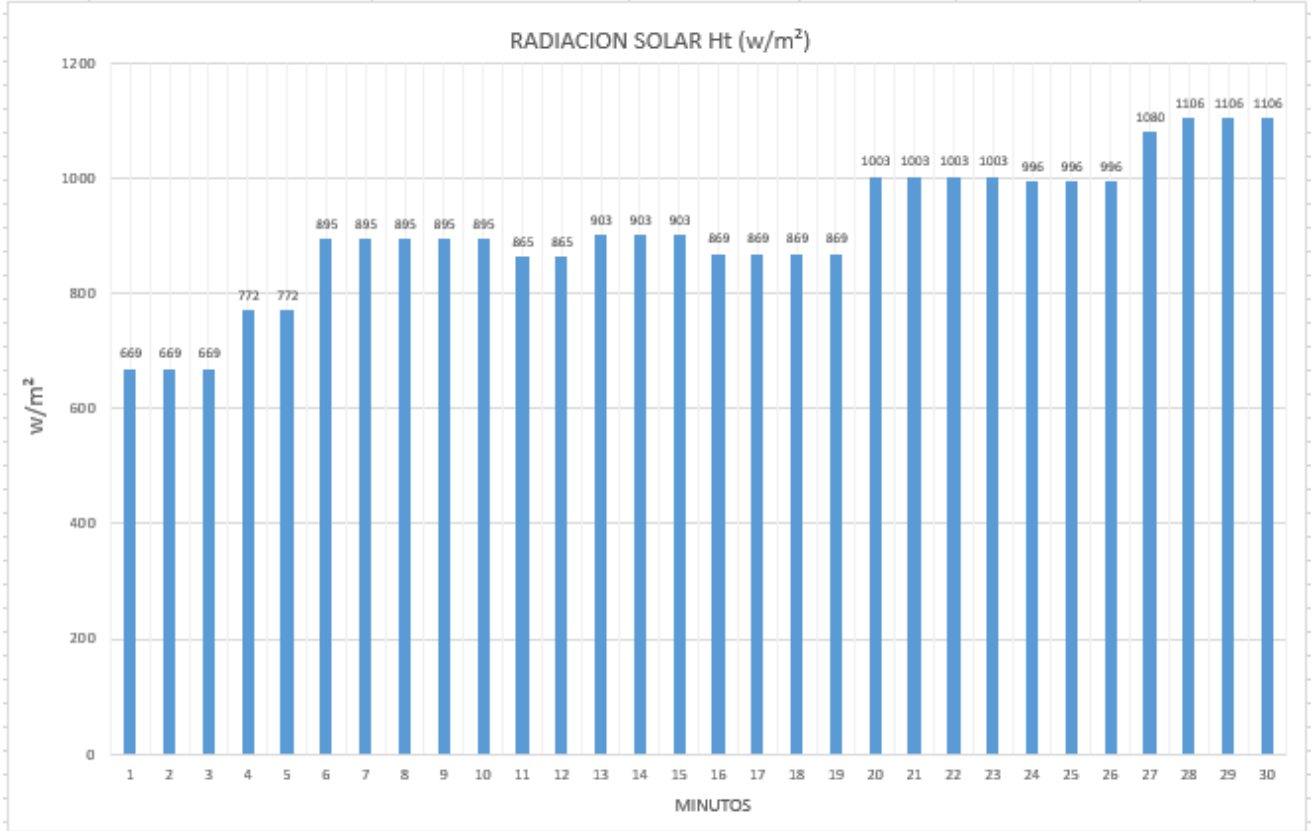
➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



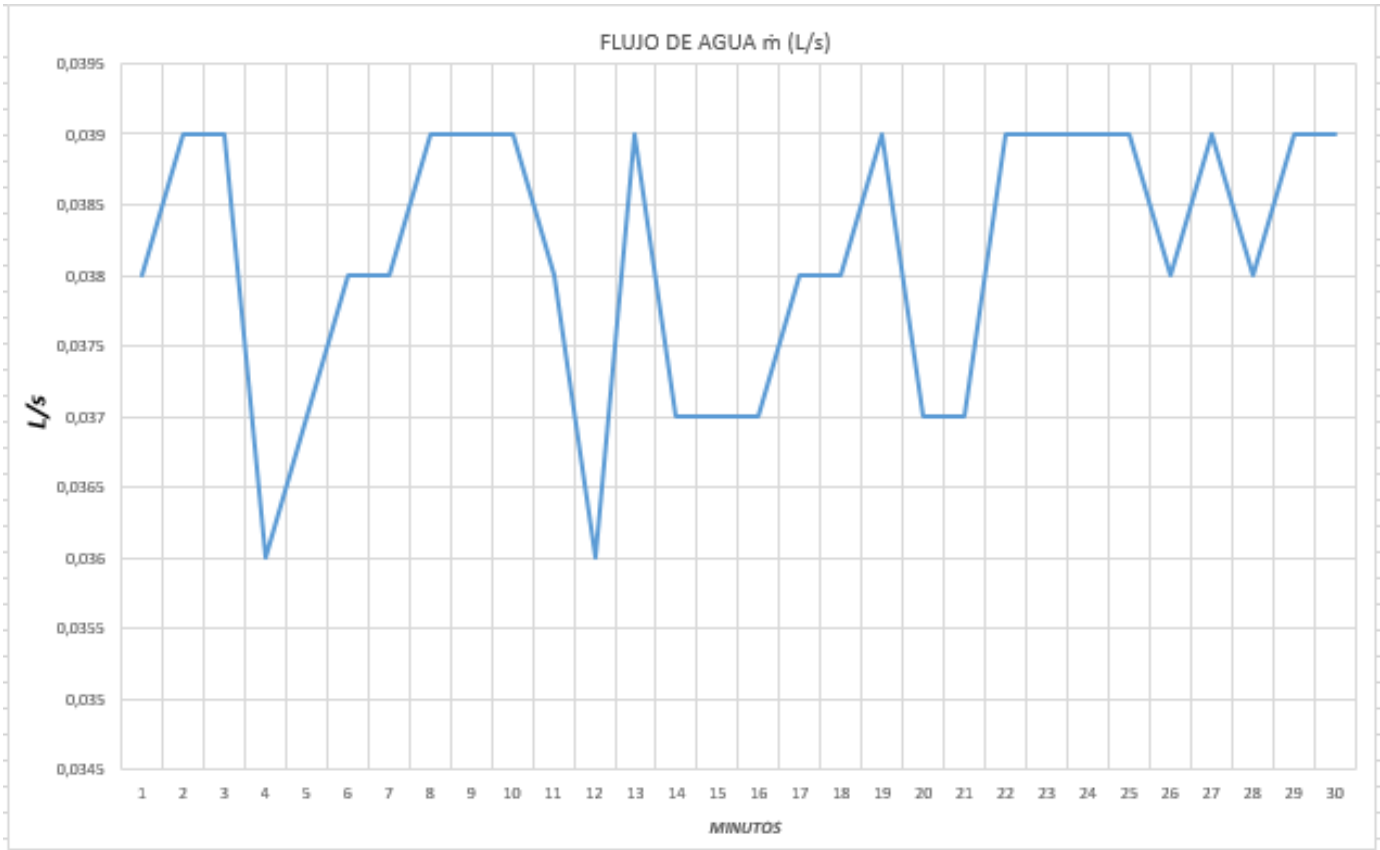
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $669 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1106 \frac{W}{m^2}$.



➤ Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua rondo los 0,0360 L/s hasta los 0,0390 L/s, durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



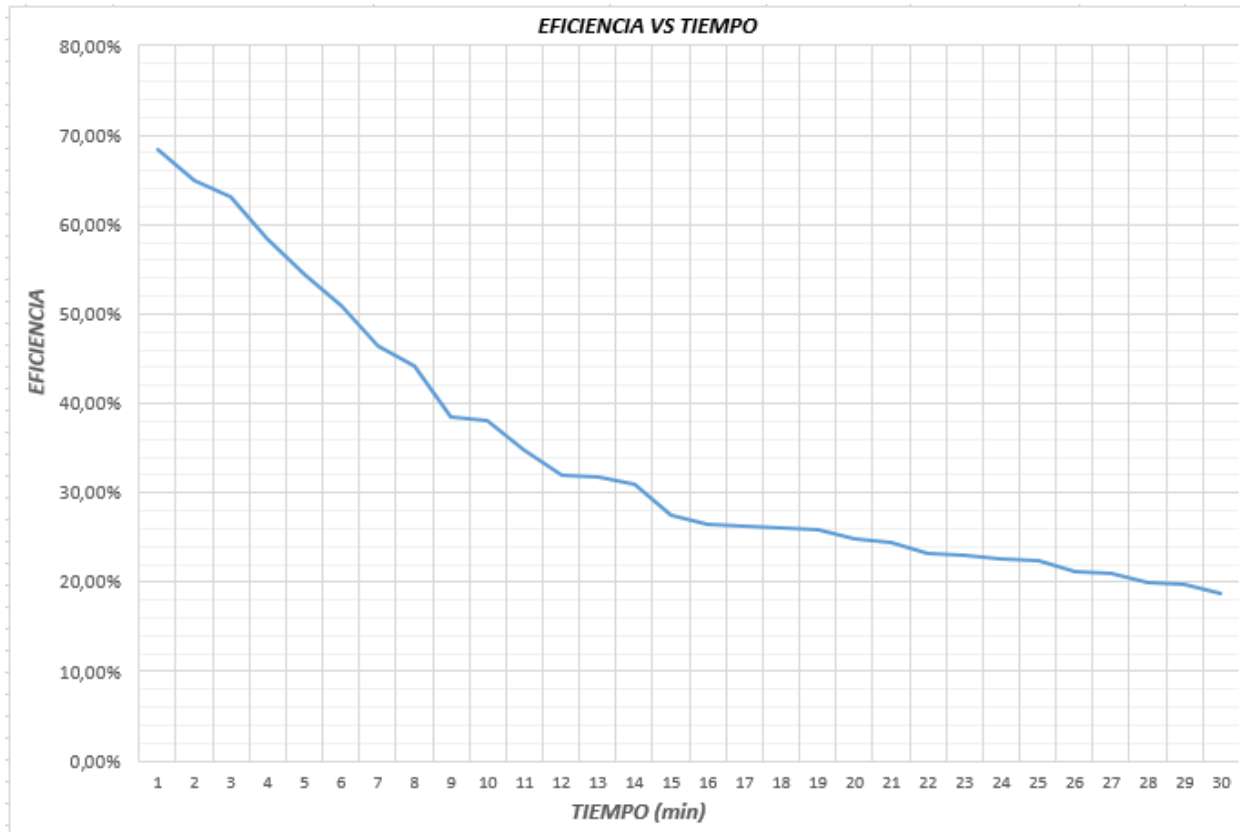
➤ Resultados obtenidos el 15 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT (°C)	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACION SOLAR H_t (W/m^2)	EFICIENCIA η (%)
27,04	29,2	2,16	0,039	560	68,33%
28,32	30,43	2,11	0,038	560	65,03%
29,47	31,52	2,05	0,038	560	63,19%
30,92	33,22	2,3	0,038	680	58,38%
31,43	33,69	2,26	0,036	680	54,35%
32,71	34,71	2	0,039	696	50,90%
33,81	35,8	1,99	0,039	760	46,38%
34,96	36,93	1,97	0,039	790	44,17%
36,17	38,12	1,95	0,038	874	38,51%
37,55	39,48	1,93	0,038	874	38,11%
38,22	40,13	1,91	0,039	969	34,92%
39,92	41,76	1,84	0,037	969	31,91%
40,87	42,54	1,67	0,037	881	31,86%
41,58	43,12	1,54	0,039	881	30,97%
42,81	44,33	1,52	0,039	978	27,53%
43,43	44,93	1,5	0,038	978	26,47%
44,12	45,61	1,49	0,038	978	26,30%
44,98	46,46	1,48	0,039	1003	26,14%
46,12	47,58	1,46	0,039	1003	25,79%
46,88	48,32	1,44	0,038	1003	24,78%
47,22	48,51	1,29	0,038	910	24,47%
47,99	49,21	1,22	0,038	910	23,14%
48,26	49,44	1,18	0,039	910	22,97%
48,77	49,91	1,14	0,039	892	22,64%
49,31	50,44	1,13	0,039	892	22,44%
50,16	51,36	1,2	0,038	980	21,14%
50,89	52,08	1,19	0,038	980	20,96%
51,43	52,62	1,19	0,038	1024	20,06%
52,61	53,73	1,12	0,039	1008	19,68%
53,97	55,07	1,1	0,038	1008	18,84%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 68,33% y finalizo con 18,84%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

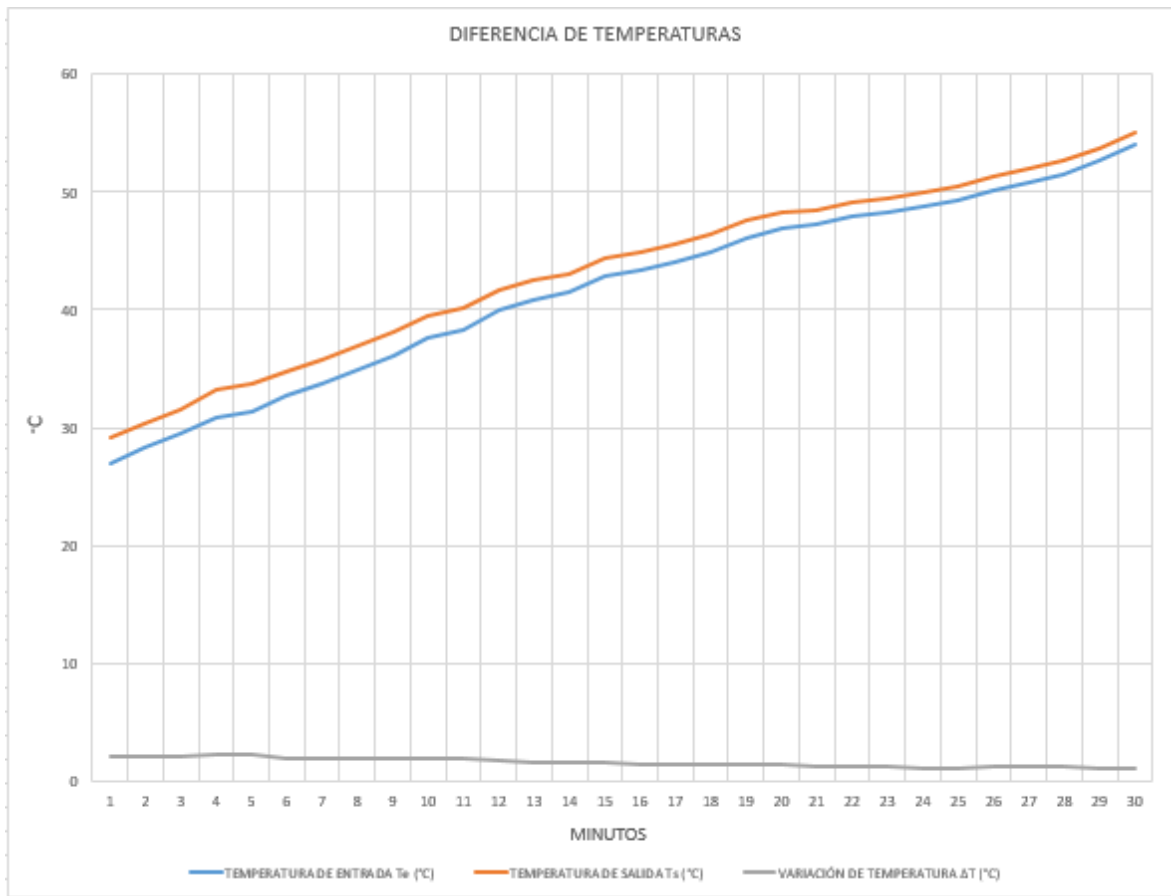
➤ Eficiencia vs tiempo:

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



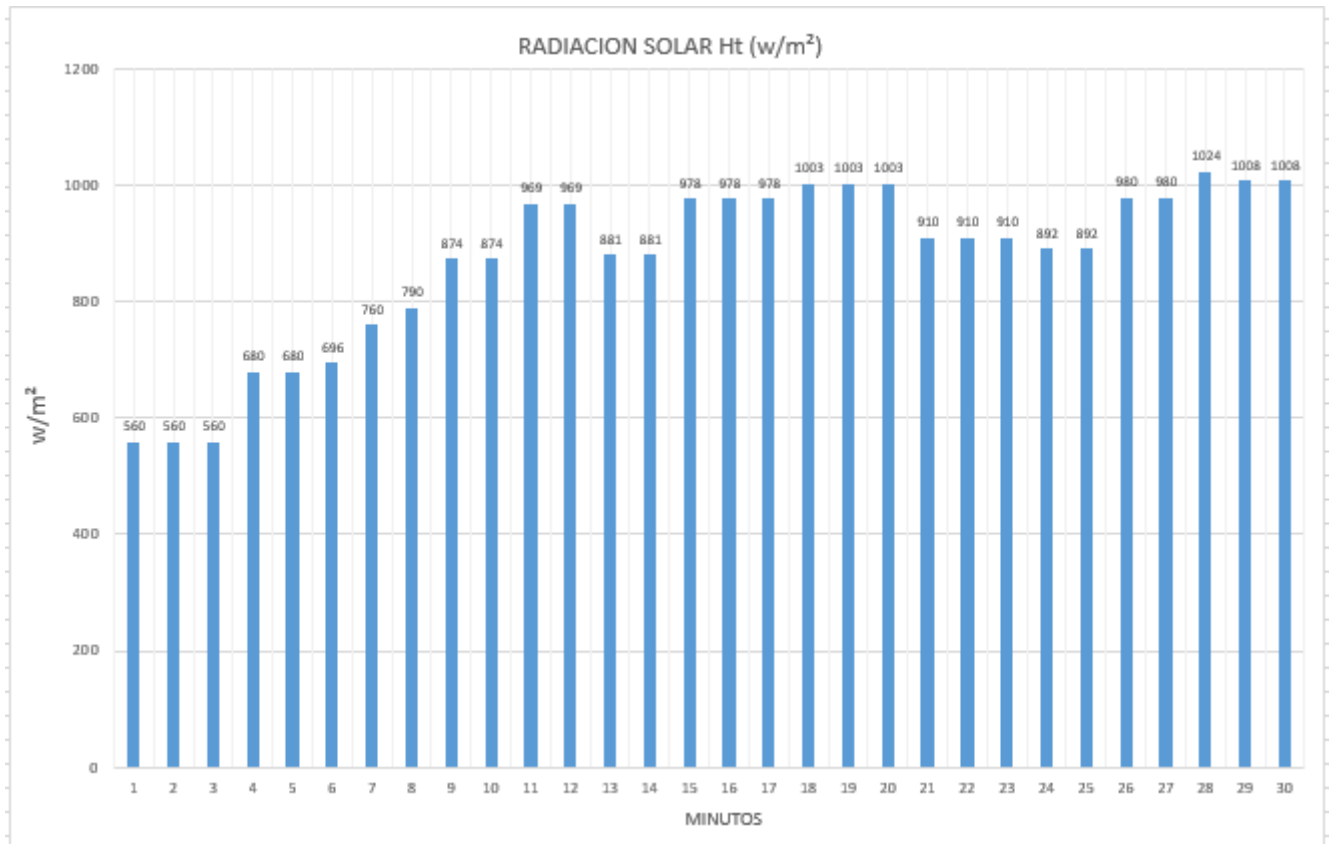
➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



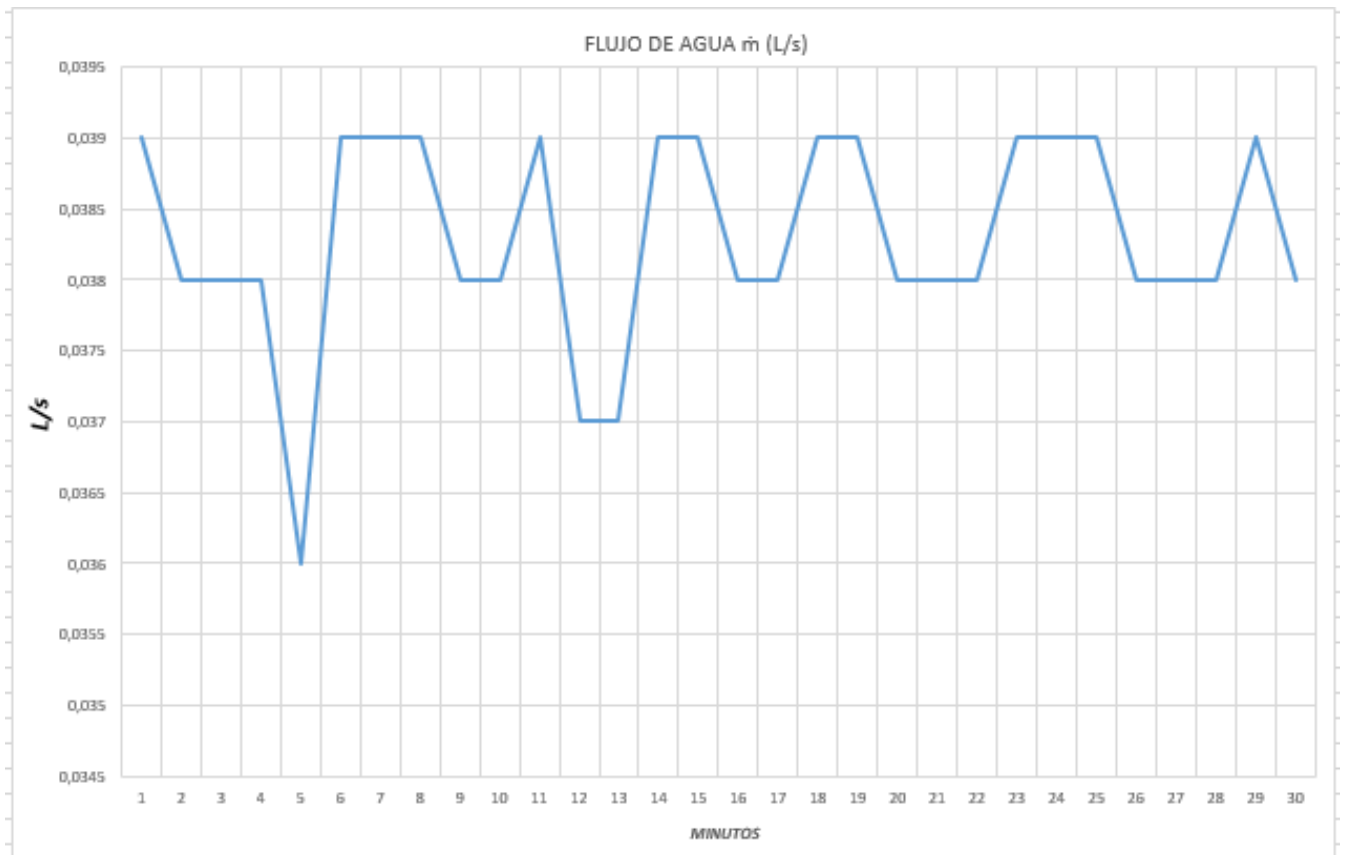
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $560 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1024 \frac{W}{m^2}$.



➤ Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua ronda los 0,0360 L/s hasta los 0,0390 L/s, durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



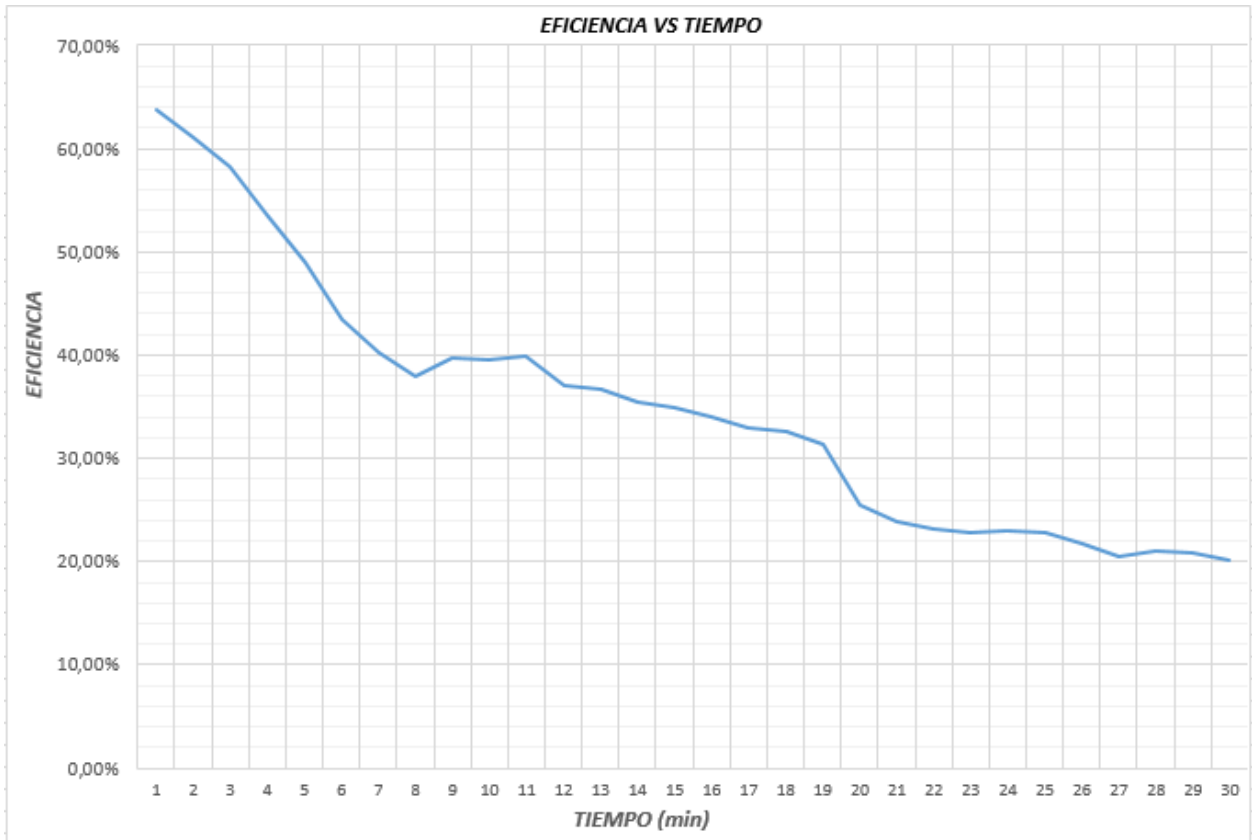
➤ Resultados obtenidos el 16 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT (°C)	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACION SOLAR H_t (w/m^2)	EFICIENCIA η (%)
27,22	29,62	2,4	0,038	649	63,83%
28,67	30,91	2,24	0,039	649	61,14%
29,71	31,9	2,19	0,038	649	58,24%
30,98	33,38	2,4	0,038	772	53,66%
32,65	34,96	2,31	0,036	772	48,93%
33,81	36,05	2,24	0,038	890	43,44%
34,77	36,79	2,02	0,039	890	40,21%
35,98	37,99	2,01	0,037	890	37,96%
37,06	39,06	2	0,038	870	39,68%
37,99	39,98	1,99	0,038	870	39,48%
39,02	40,98	1,96	0,039	870	39,91%
40,42	42,36	1,94	0,038	904	37,04%
41,88	43,8	1,92	0,038	904	36,66%
42,78	44,6	1,82	0,039	910	35,43%
43,93	45,72	1,79	0,039	910	34,85%
45,02	46,77	1,75	0,039	910	34,07%
46,14	47,76	1,62	0,039	869	33,02%
46,79	48,39	1,6	0,039	869	32,62%
47,61	49,15	1,54	0,039	869	31,39%
48,64	50,08	1,44	0,039	1002	25,46%
49,08	50,47	1,39	0,038	1002	23,94%
49,89	51,24	1,35	0,038	1002	23,25%
50,73	52,05	1,32	0,038	1002	22,74%
51,45	52,59	1,14	0,039	876	23,05%
52,69	53,82	1,13	0,039	876	22,85%
52,97	54,07	1,1	0,038	876	21,67%
53,03	54,23	1,2	0,037	980	20,58%
53,75	54,94	1,19	0,038	980	20,96%
53,99	55,12	1,13	0,039	960	20,85%
54,23	55,35	1,12	0,038	960	20,14%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 63,83% y finalizo con 20,14%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

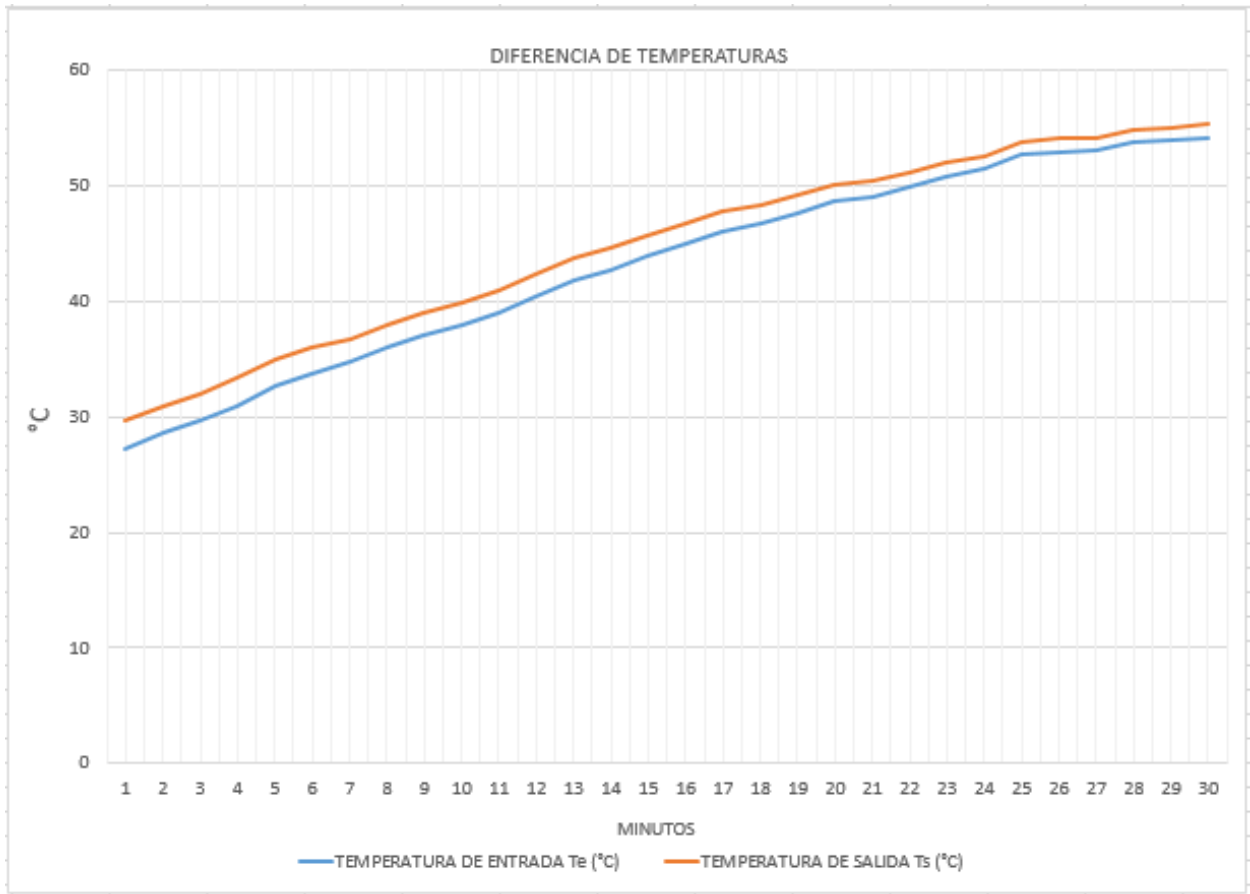
➤ Eficiencia vs tiempo:

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



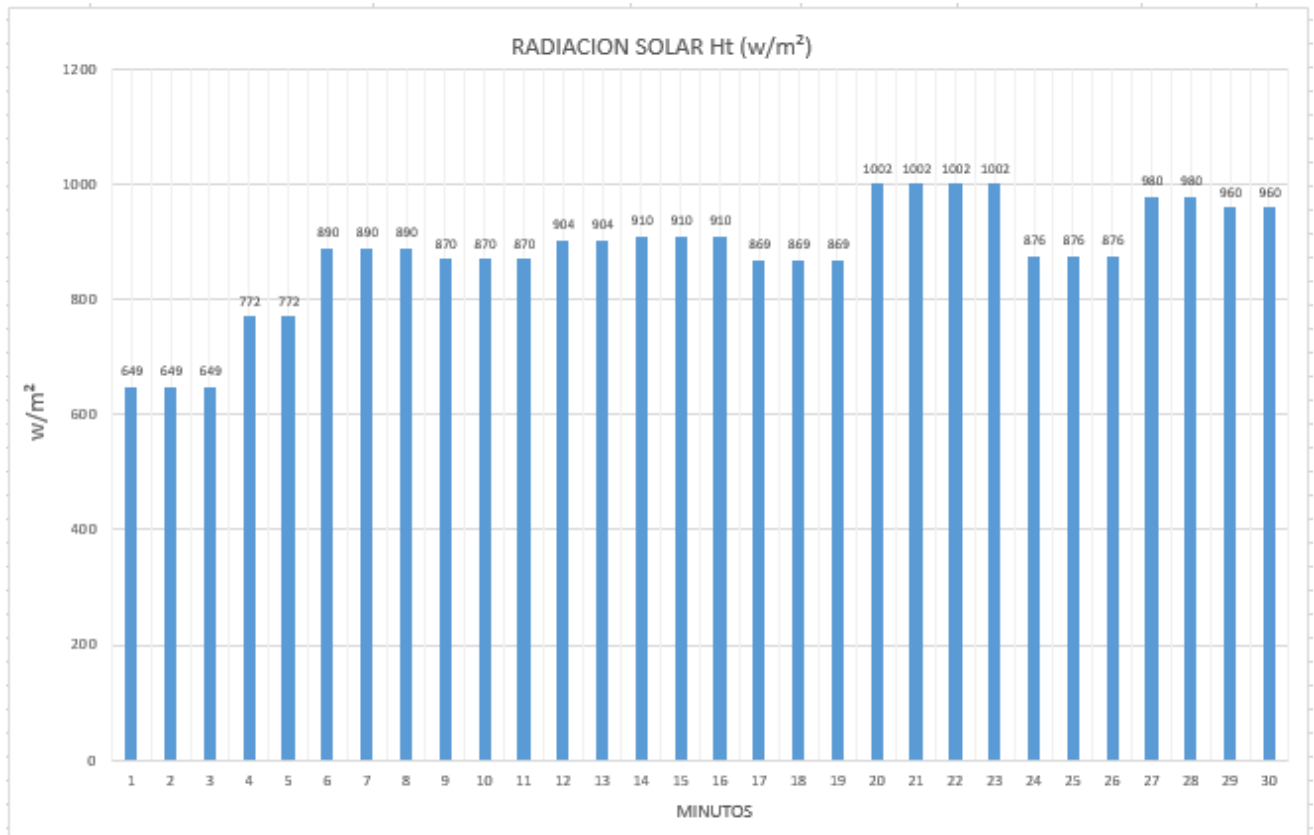
➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



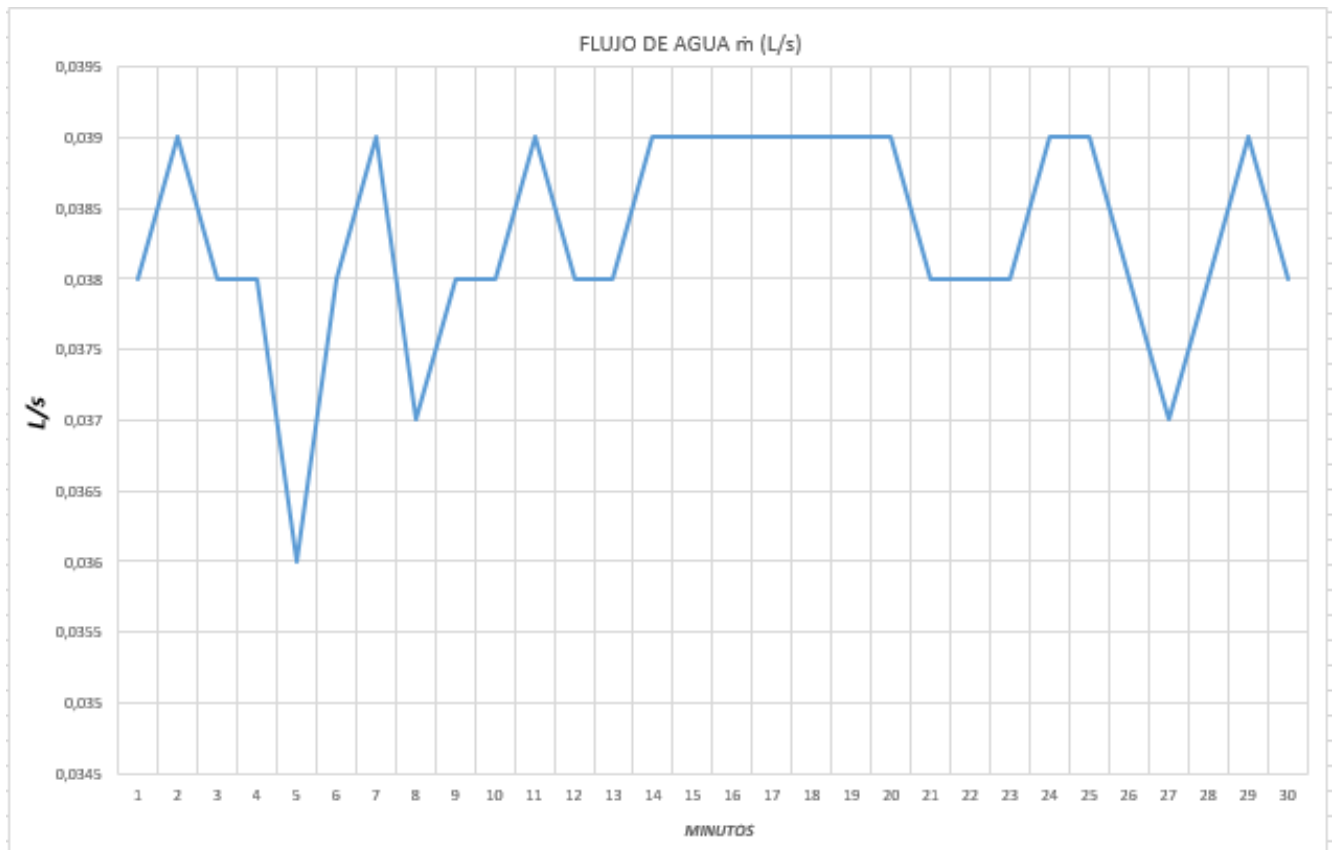
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $649 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1002 \frac{W}{m^2}$.



➤ Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua ronda los 0,0360 L/s hasta los 0,0390 L/s, durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



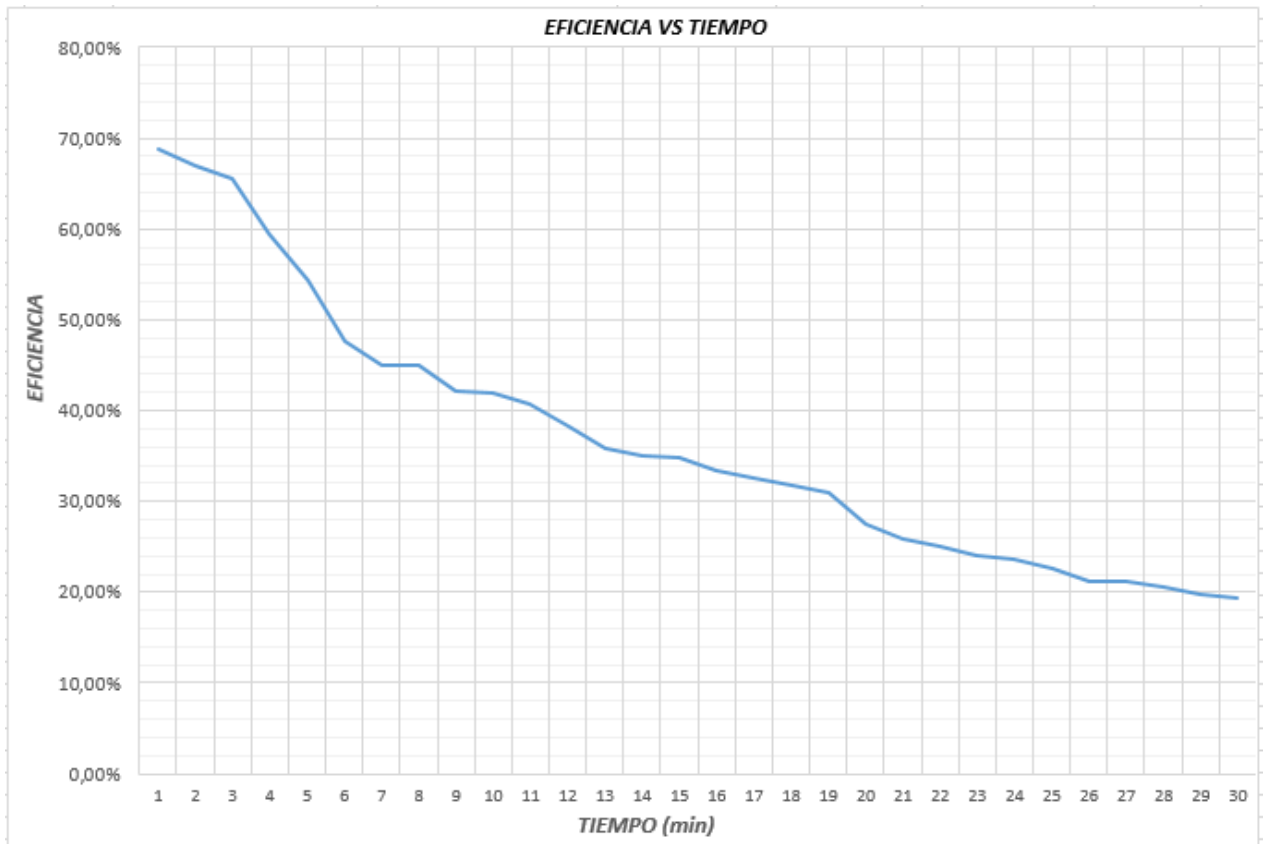
➤ Resultados obtenidos el 17 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT (°C)	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACION SOLAR H_t (w/m^2)	EFICIENCIA η (%)
27,2	29,79	2,59	0,038	649	68,88%
28,51	30,96	2,45	0,039	649	66,87%
29,23	31,63	2,4	0,039	649	65,51%
30,12	32,71	2,59	0,039	772	59,43%
30,97	33,34	2,37	0,039	772	54,38%
32,66	35,25	2,59	0,036	890	47,59%
33,81	36,26	2,45	0,036	890	45,01%
34,67	37,05	2,38	0,037	890	44,94%
35,89	38,01	2,12	0,038	870	42,06%
36,97	39,03	2,06	0,039	870	41,94%
38,01	40,01	2	0,039	870	40,72%
39,08	41,08	2	0,038	904	38,19%
40,19	42,17	1,98	0,036	904	35,82%
41,34	43,14	1,8	0,039	910	35,04%
42,52	44,31	1,79	0,039	910	34,85%
43,88	45,64	1,76	0,038	910	33,38%
44,98	46,62	1,64	0,038	869	32,57%
46,04	47,6	1,56	0,039	869	31,80%
46,56	48,08	1,52	0,039	869	30,99%
47,32	49,01	1,69	0,036	1002	27,58%
48,67	50,25	1,58	0,036	1002	25,78%
49,11	50,56	1,45	0,038	1002	24,98%
49,78	51,18	1,4	0,038	1002	24,12%
50,32	51,64	1,32	0,039	986	23,72%
51,45	52,71	1,26	0,039	986	22,64%
51,98	53,16	1,18	0,039	986	21,20%
52,97	54,17	1,2	0,039	1004	21,17%
53,35	54,55	1,2	0,038	1004	20,63%
53,78	54,98	1,2	0,039	1080	19,68%
54,01	55,19	1,18	0,039	1080	19,35%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 68,88% y finalizo con 19,35%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

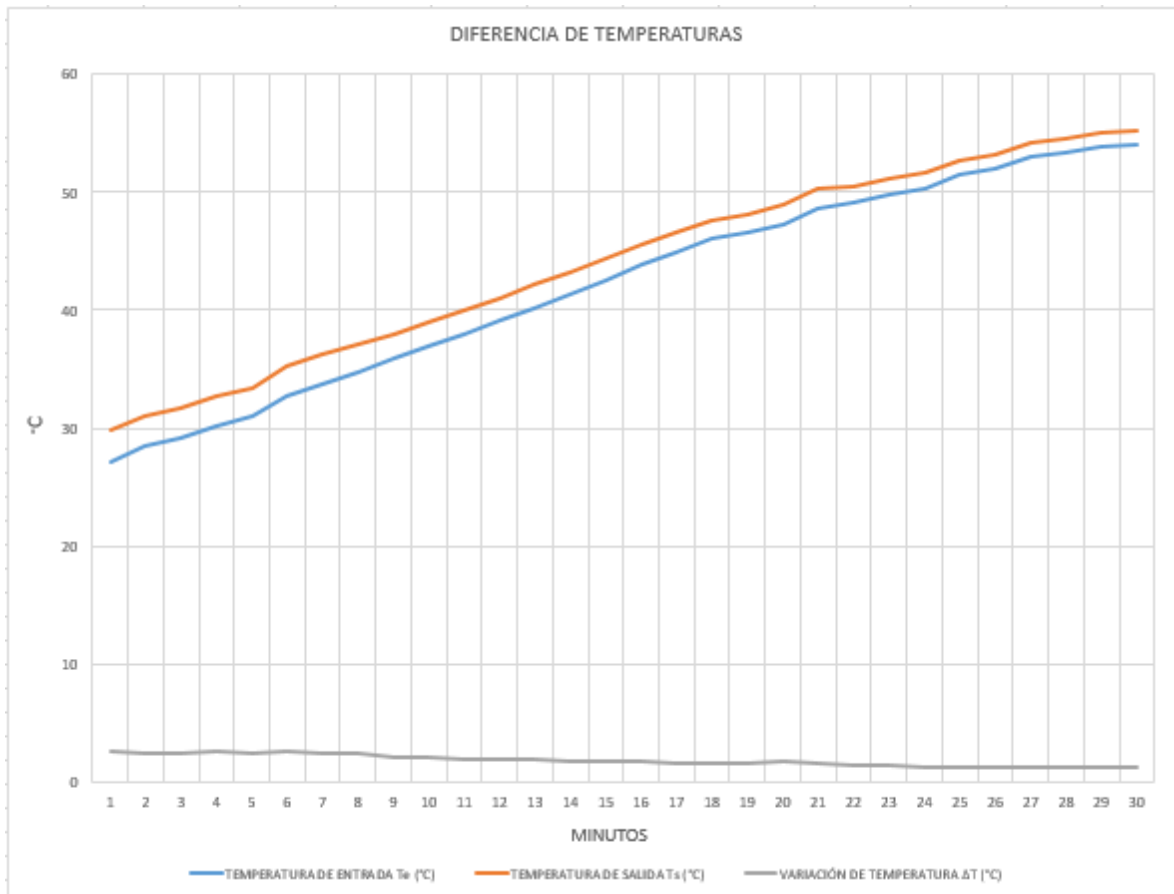
➤ Eficiencia vs tiempo:

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



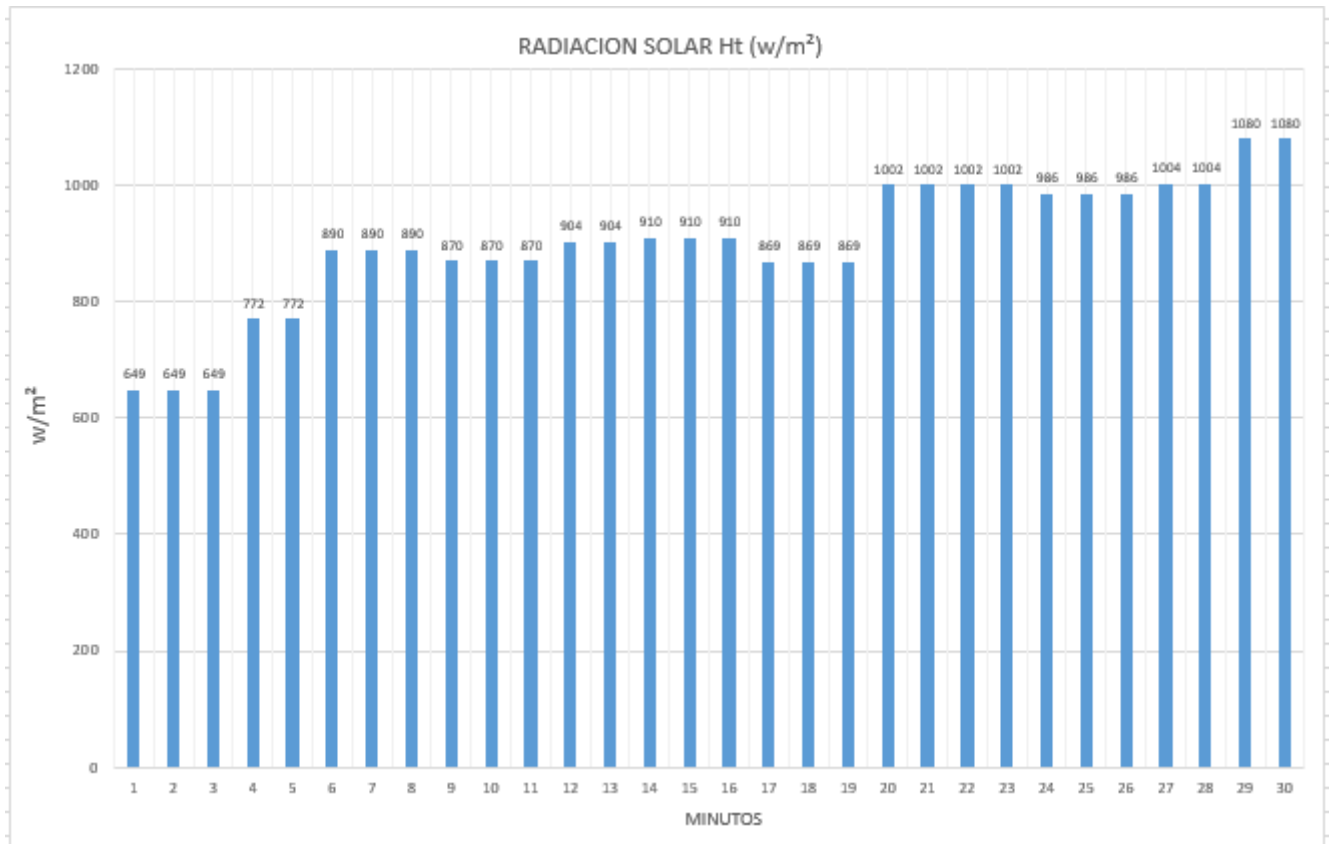
➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



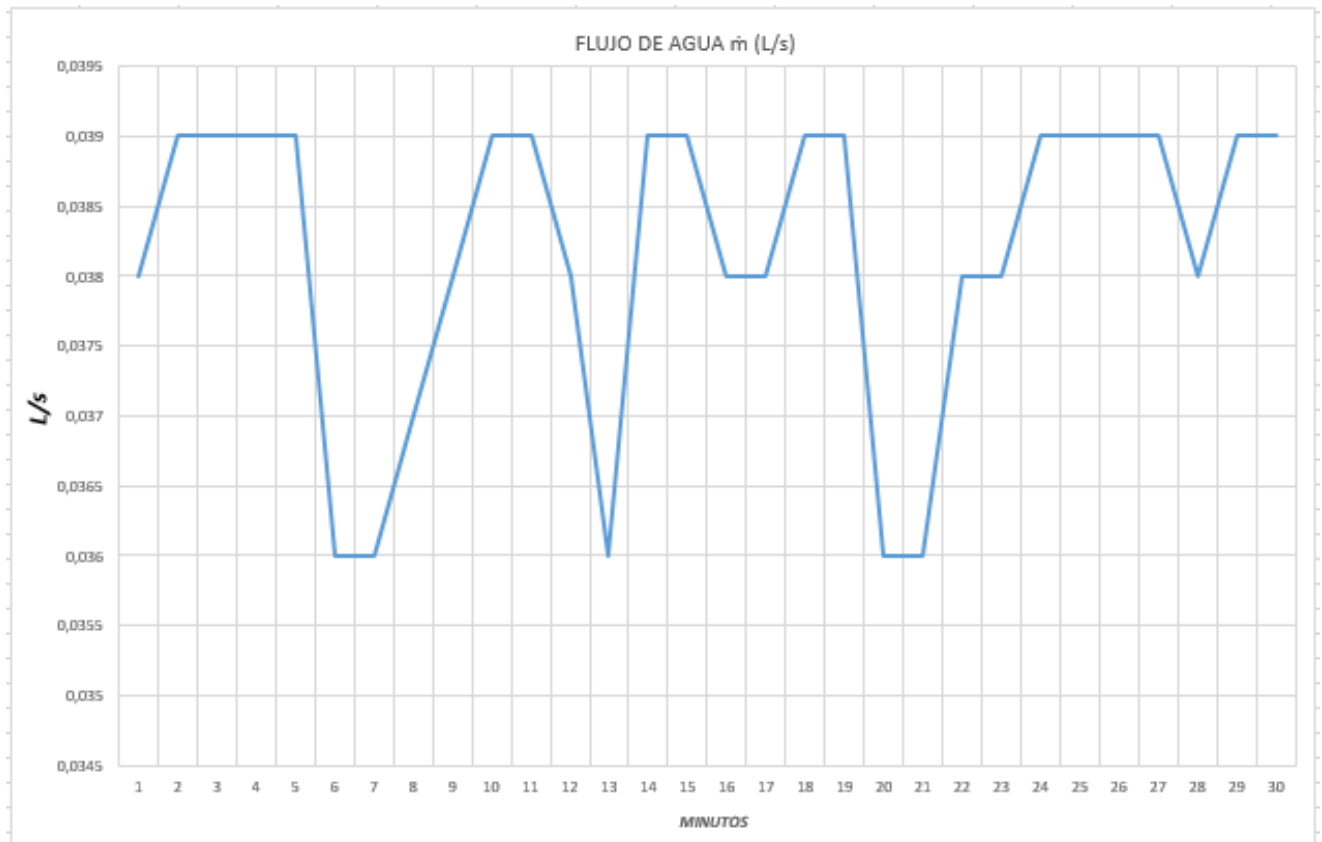
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $649 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1080 \frac{W}{m^2}$.



➤ Flujo de agua \dot{m}

Podemos evidenciar que el flujo de agua ronda los 0,0360 L/s hasta los 0,0390 L/s, durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



5.

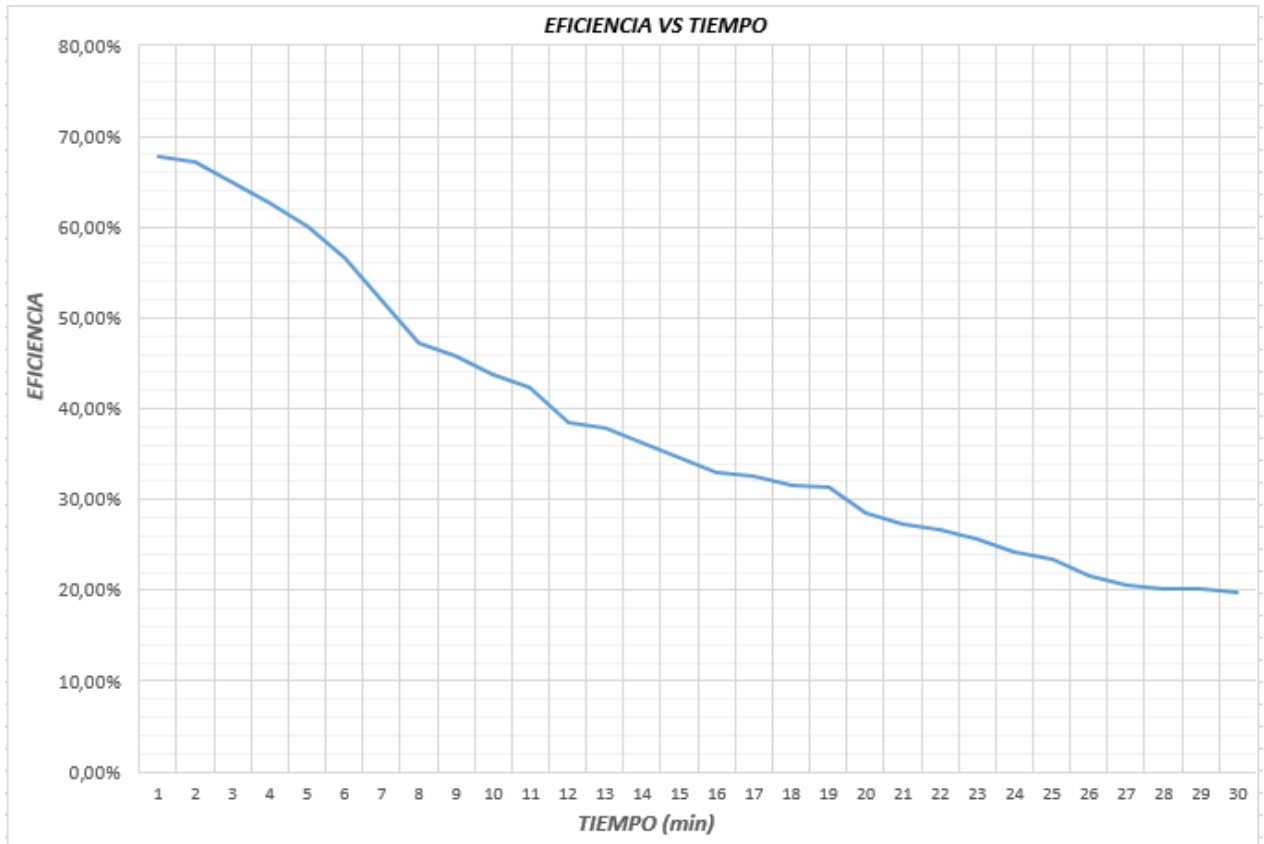
➤ Resultados obtenidos el 18 de Agosto de 2023

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT (°C)	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACION SOLAR H_t (w/m^2)	EFICIENCIA η (%)
27,3	29,86	2,56	0,039	670	67,69%
28,61	31,15	2,54	0,039	670	67,16%
29,63	32,15	2,52	0,038	670	64,92%
30,31	32,82	2,51	0,038	690	62,79%
31,56	33,96	2,4	0,038	690	60,04%
32,82	35,22	2,4	0,039	750	56,69%
33,97	36,17	2,2	0,039	750	51,96%
34,89	37,45	2,56	0,036	886	47,25%
35,38	37,8	2,42	0,037	886	45,90%
36,88	39,19	2,31	0,037	886	43,82%
37,98	40,1	2,12	0,039	886	42,39%
39,01	41,03	2,02	0,038	908	38,40%
39,93	41,87	1,94	0,039	908	37,85%
40,56	42,42	1,86	0,039	908	36,29%
41,71	43,6	1,89	0,039	967	34,62%
42,96	44,81	1,85	0,038	967	33,02%
44,08	45,76	1,68	0,038	889	32,62%
45,21	46,79	1,58	0,039	889	31,48%
46,45	47,99	1,54	0,039	889	31,39%
47,67	49,36	1,69	0,037	996	28,52%
48,82	50,44	1,62	0,037	996	27,34%
49,12	50,66	1,54	0,038	996	26,69%
50,33	51,81	1,48	0,038	996	25,65%
51,47	52,84	1,37	0,039	1004	24,17%
52,77	54,1	1,33	0,039	1004	23,47%
53,01	54,33	1,32	0,036	1004	21,50%
53,52	54,91	1,39	0,036	1100	20,66%
53,98	55,27	1,29	0,038	1100	20,24%
54,23	55,38	1,15	0,039	1010	20,17%
55,22	56,38	1,16	0,038	1010	19,82%

Podemos evidenciar que la eficiencia inicio en 67,69% y finalizo con 19,82%, siendo esta su más baja eficiencia obtenida durante las pruebas experimentales.

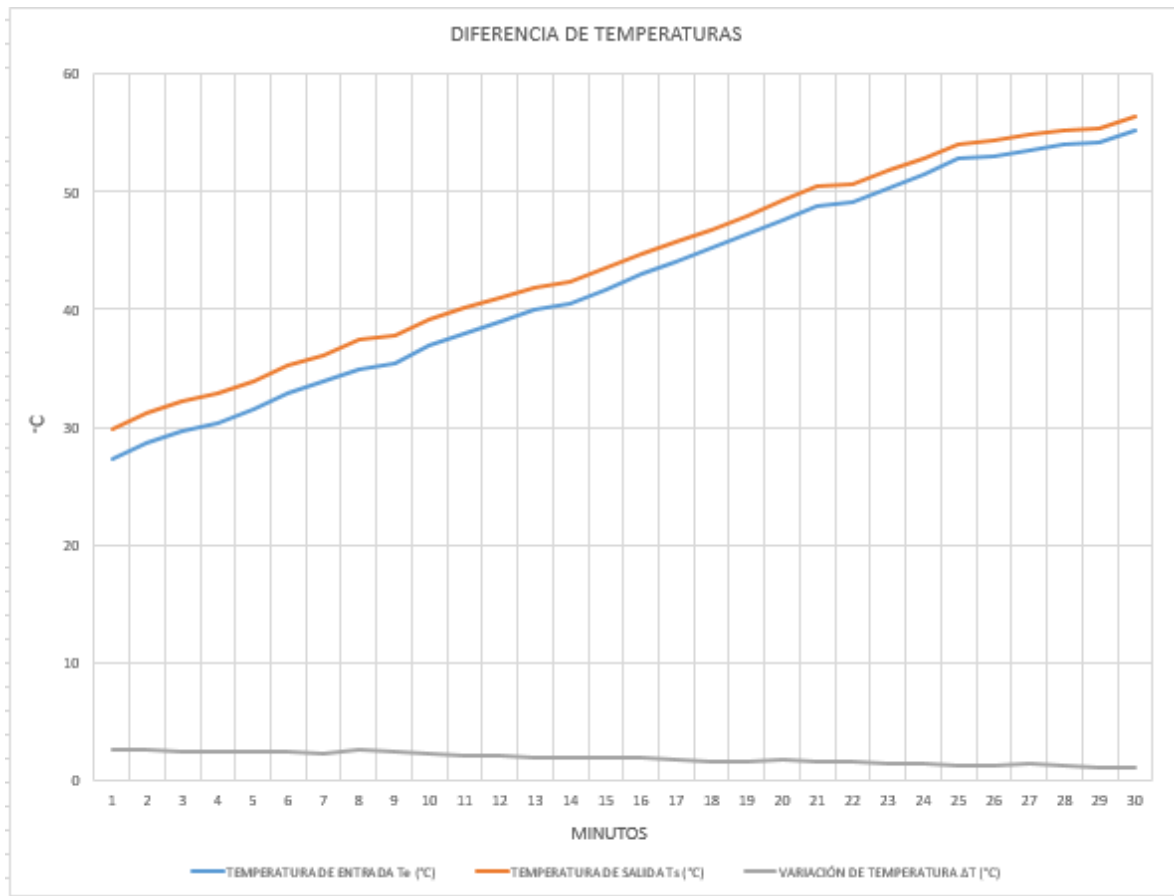
➤ Eficiencia vs tiempo:

Se puede evidenciar la disminución de la eficiencia a medida de los 30 minutos de prueba experimental, esto teniendo en cuenta que se extraían los datos cada minuto tanto de la temperatura de entrada como de salida.



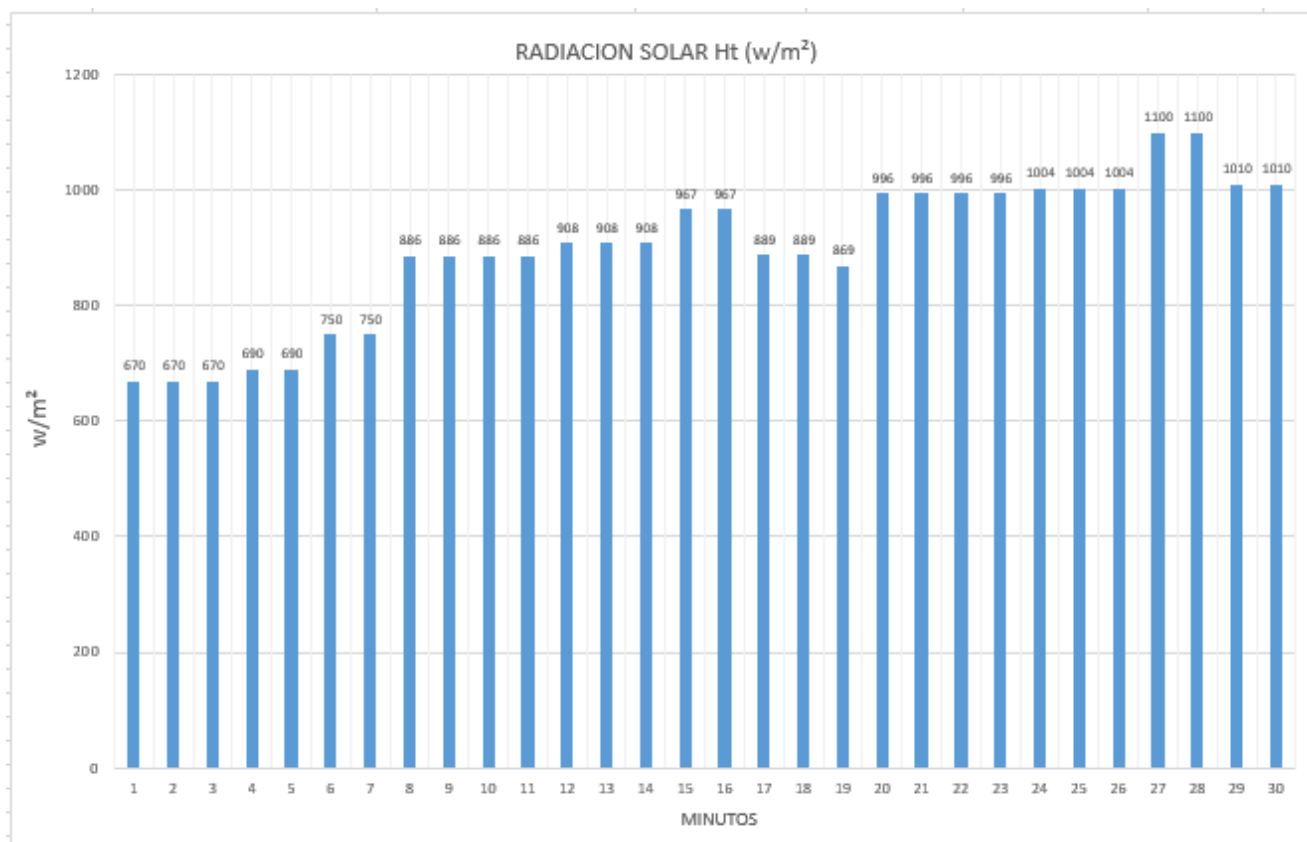
➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e

Se puede evidenciar la diferencia de la temperatura de salida respecto con la temperatura de entrada de agua, se debe tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron durante media hora, donde cada minuto se tomaba al mismo instante el resultado de la temperatura de entrada y salida.



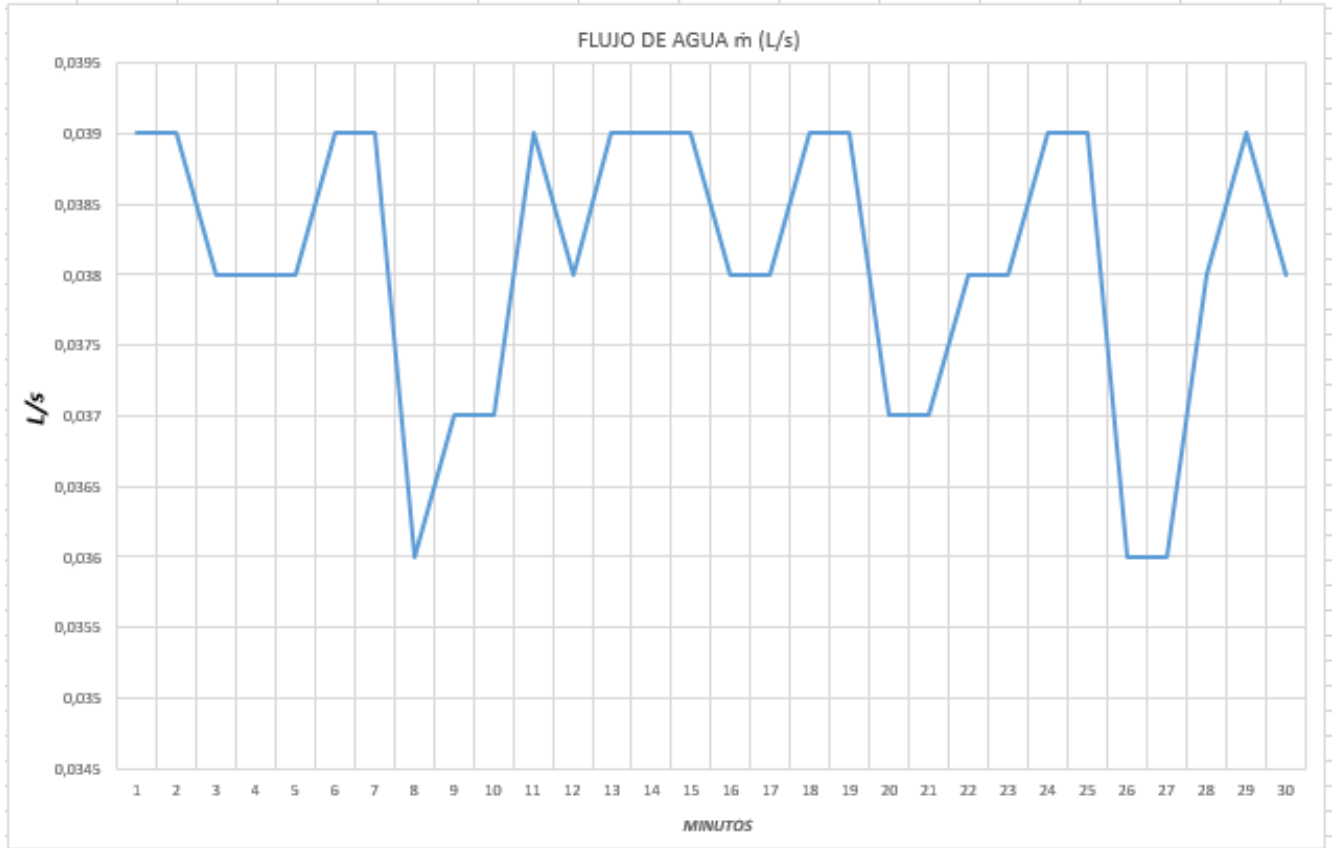
➤ Radiación solar H_t

Para obtener el resultado de la radiación solar, este fue extraído del software WeatherLink-UIS-INGMECANICA, donde podemos evidenciar que su más baja radiación solar fue de $670 \frac{W}{m^2}$ y posteriormente la más alta obtenida durante las pruebas experimentales fue de $1100 \frac{W}{m^2}$.



➤ Flujo de agua \dot{m}

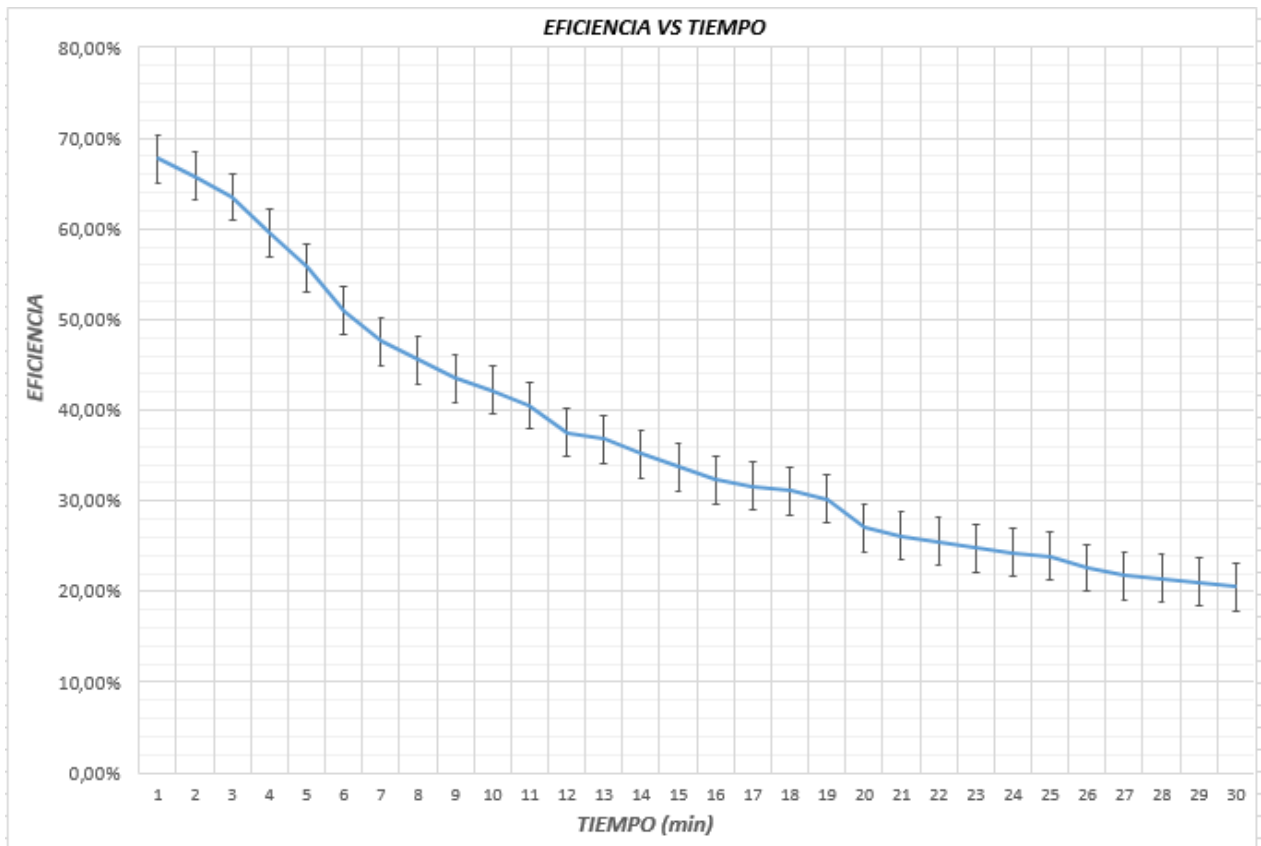
Podemos evidenciar que el flujo de agua ronda los 0,0360 L/s hasta los 0,0390 L/s, durante la media hora de pruebas experimentales, cabe destacar que se extraía 1 dato cada minuto.



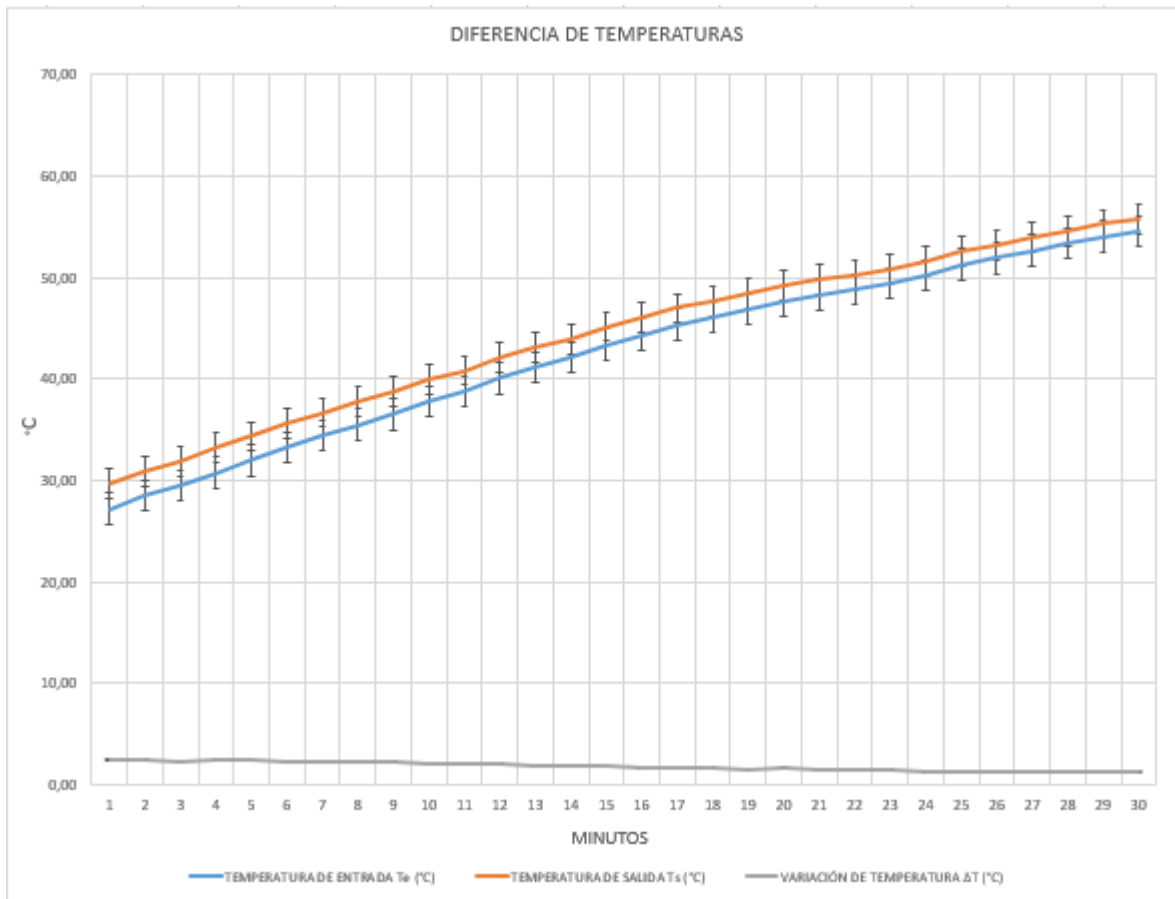
➤ Resultados del promedio final obtenido

TEMPERATURA DE ENTRADA T_e (°C)	TEMPERATURA DE SALIDA T_s (°C)	VARIACIÓN DE TEMPERATURA ΔT (°C)	FLUJO DE AGUA \dot{m} (L/s)	RADIACION SOLAR H_t (w/m ²)	EFICIENCIA η (%)
27,20	29,7	2,48	0,038	636	67,73%
28,51	30,9	2,37	0,039	636	65,81%
29,52	31,8	2,33	0,039	641	63,51%
30,76	33,3	2,52	0,038	722	59,61%
31,98	34,3	2,36	0,037	711	55,74%
33,25	35,6	2,31	0,038	783	50,92%
34,39	36,7	2,29	0,038	832	47,61%
35,47	37,8	2,28	0,038	860	45,58%
36,53	38,7	2,18	0,038	867	43,49%
37,82	39,9	2,10	0,038	865	42,19%
38,77	40,8	2,06	0,039	894	40,51%
40,05	42,1	2,01	0,037	909	37,55%
41,18	43,1	1,93	0,038	895	36,77%
42,08	43,9	1,80	0,039	897	35,20%
43,38	45,2	1,78	0,034	810	33,77%
44,35	46,1	1,74	0,038	930	32,29%
45,32	47,0	1,65	0,038	903	31,64%
46,08	47,7	1,61	0,039	907	31,10%
46,85	48,4	1,55	0,039	904	30,17%
47,61	49,2	1,61	0,037	1002	27,06%
48,31	49,8	1,53	0,037	987	26,17%
48,80	50,2	1,45	0,038	987	25,51%
49,41	50,8	1,40	0,038	987	24,75%
50,21	51,5	1,31	0,039	956	24,33%
51,25	52,5	1,29	0,039	956	23,87%
51,92	53,2	1,28	0,038	970	22,61%
52,64	53,9	1,29	0,038	1021	21,77%
53,32	54,6	1,30	0,038	1046	21,42%
54,03	55,3	1,23	0,039	1037	21,01%
54,57	55,8	1,22	0,039	1037	20,49%

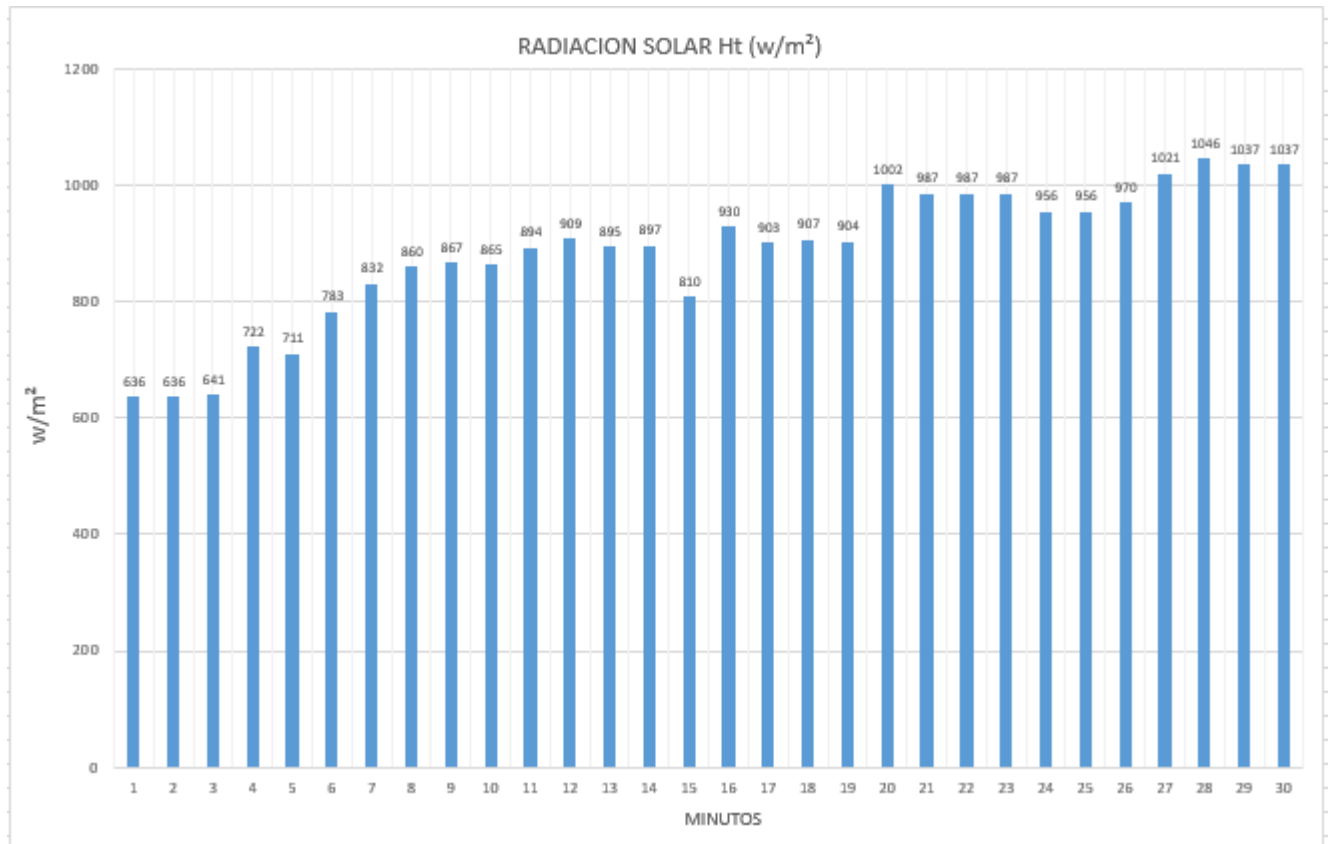
➤ Eficiencia vs tiempo:



➤ Diferencia de temperaturas T_s y T_e



➤ Radiación solar H_t



➤ Flujo de agua \dot{m}

