

**“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA
PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”**

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA
PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”**

Realizado por:

ING. ANDREA OÑATE VEGA

Director del proyecto:

Dr. JESÚS LÓPEZ VILLADA.

Como requisito para la obtención del título de:

**MAGISTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
MENCION EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Quito, 23 de marzo 2022

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, ANDREA CAROLINA OÑATE VEGA, con cédula de identidad # 17198185-7, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

FIRMA
1719818575

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

Realizado por:

ANDREA CAROLINA OÑATE VEGA

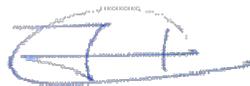
como requisito para la obtención del título de:

**MAGISTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
MENCIÓN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

ha sido dirigido por el profesor

ING. JESÚS LÓPEZ PHD.

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

**“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA
PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”**

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

Mag. Patricia Otero Valladares
PhD. Javier Martínez Gómez

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral
ante el tribunal examinador

FIRMA

FIRMA

Quito, 23 de marzo 2022

**“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA
PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”**

DEDICATORIA

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

AGRADECIMIENTO

A mis padres por su apoyo incondicional.

A Jesús López por guiarme y compartir todo su conocimiento.

A Alejandra Vallejo por su fuerza.

A UISEK por el apoyo económico en la compra del panel solar híbrido.

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

Para someter a:
To be submitted:

ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO

Andrea Oñate Vega, Jesús López Villalba, Patricia Otero Valladares, Javier Martínez Gómez.

Teléfono: 0995775793; email: andrecaro_143@hotmail.com

Título corto o Running title: Ensayos Energéticos de un Captador Solar Híbrido Pvt en la Ciudad de Quito

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción	3
Energía solar en América Latina.....	4
Recurso Energético Solar en Ecuador.....	6
Contexto Normativo Ecuatoriano.....	7
Proyectos Fotovoltaicos en Ecuador	8
Proyectos de Sistemas Colectores Térmicos Solares para Preparación de ACS.....	9
Energía Solar Fotovoltaica	9
Características Eléctricas Básicas de una Celda Solar	10
Energía Solar Térmica Pasiva	11
Colectores Solares	12
Sistema Solar Termosifón	12
Sistema Solar con Circulación Forzada	12
Tipos de Colectores.....	13
Colector de Tubos de Vacío.....	13
Colector de placas planas	13

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

Eficiencia de Colectores Solar según (ISO 9806, 2017):.....	13
Paneles Solares Híbridos PVT	15
Materiales y Metodología.....	17
Esquema Utilizado para Ensayo.....	17
Panel hibrido PVT.....	18
Micro Inversor.....	21
Instrumentos Utilizados en Ensayo	24
Procedimiento.....	25
Resultados	29
Ensayo 1	29
Ensayo 2	30
Ensayo 3	31
Cálculo de eficiencia Eléctrica y Térmica.....	32
Eficiencias Ensayo 1.	32
Eficiencias Ensayo 2.	33
Eficiencias Ensayo 3.	34
Análisis de Resultados	35
Rendimientos Térmicos Ensayo 1	35
Rendimientos Térmicos Ensayo 2.....	36

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

Rendimientos Térmicos Ensayo 3.....	37
Rendimiento Térmico Global.....	38
Rendimientos Eléctricos Ensayo 1.....	40
Rendimientos Eléctricos Ensayo 2.....	41
Rendimientos Eléctricos Ensayo 3.....	42
Rendimiento Eléctrico Global.....	44
Conclusiones.....	47
Recomendaciones.....	48
Referencias Biográficas.....	49
ANEXO A.....	51

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	19
Tabla 2	20
Tabla 3	21
Tabla 4	22
Tabla 5	23
Tabla 6	24
Tabla 7	29
Tabla 8	30
Tabla 9	31
Tabla 10	32
Tabla 11	33
Tabla 12	34
Tabla 13	41
Tabla 14	42
Tabla 15	44
Tabla 16	45

**“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA
PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	4
Figura 2	5
Figura 3	6
Figura 4	8
Figura 5	11
Figura 6	15
Figura 7	16
Figura 8	17
Figura 9	18
Figura 10	18
Figura 11	19
Figura 12	22
Figura 13	25
Figura 14	25
Figura 15	26
Figura 16	26
Figura 17	27
Figura 18	27
Figura 19	28
Figura 20	28
Figura 21	35

“ENSAYOS ENERGÉTICOS DE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PVT PARA PREPARACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN LA CIUDAD DE QUITO”

Figura 22	36
Figura 23	36
Figura 24	37
Figura 25	37
Figura 26	38
Figura 27	38
Figura 28	39
Figura 29	40
Figura 30	40
Figura 31	41
Figura 32	42
Figura 33	43
Figura 34	43
Figura 35	46

Resumen.

El 13 de noviembre del 2021 concluyó la COP 26 donde se reunieron aproximadamente 200 países para comprometerse a implantar acciones que garanticen la disminución de gases de efecto invernadero y poner fin al uso de derivados de hidrocarburos, entre ellos Ecuador.

Ecuador es privilegiado por su ubicación geográfica al no tener estaciones definidas ni cambios radicales en su clima, lo cual permite disponer de un recurso solar relativamente elevado y aproximadamente uniforme a lo largo de todo el año comparado a otros países. A pesar de que el recurso solar en Ecuador es abundante, por ejemplo para para el año 2019 se tuvo un promedio de 4,5 kW/m² (Diego Vaca, 2019), todavía se utiliza en gran medida el GLP y la electricidad para la preparación Agua Caliente Sanitaria (ACS) debido a los precios relativamente bajos de la energía y a los subsidios. Una de las tecnologías de aprovechamiento solar más prometedora y desarrollada en los últimos años es la tecnología híbrida PVT capaz de generar calor y electricidad simultáneamente. En este trabajo se planteó evidenciar las prestaciones energéticas de un panel solar híbrido PVT instalado en la ciudad de Quito, concretamente en las instalaciones de la Universidad Internacional SEK (UISEK). Para ello se realizaron 3 ensayos, uno por día, los días 10 de septiembre, 11 de septiembre y 13 de septiembre del año 2021 en los cuales se obtuvo mediciones de variables como caudal, corriente eléctrica, voltaje, irradiación solar y temperaturas de entrada, de salida del colector y temperatura ambiente.

El análisis de resultados es mediante la comparación de eficiencia eléctrica y térmica obtenida en los ensayos con respecto a las curvas de eficiencia proporcionadas por el fabricante, donde se evidencia que en la ciudad de Quito Norte se tiene condiciones favorables para instalar sistemas con paneles PVT.

Palabras clave: paneles PVT, paneles solares híbridos, eficiencia energética PVT.

Abstract.

On November 2021, COP 26 concluded, where approximately 200 countries agreed to commit to implementing actions that guaranteed the reduction of greenhouse gases and put an end to the use of hydrocarbon derivatives, including Ecuador.

Ecuador is privileged for its geographical location because it does not have defined seasons or radical changes in its climate, which allows it to have a relatively high and approximately uniform solar resource throughout the year compared to other countries. Though the fact that the solar resource in Ecuador is abundant, for example, for the year 2019 there was an average of 4.5 kW/m² (Diego Vaca, 2019), GLP are still used to preparation sanitary hot water due to relatively low energy prices and subsidies of GLP. One of the most promising solar harnessing technologies developed in recent years is hybrid PVT technology capable of generating heat and electricity simultaneously. In this document, it was proposed to demonstrate the energy performance of a PVT hybrid solar panel installed in the city of Quito, specifically in the property of the SEK International University (UISEK). For this, 3 tests were carried out, one per day, on September 10, September 11 and September 13 in 2021, which variables such as flow rate, electric current, voltage, solar irradiation and temperatures were obtained from collector inlet, outlet and ambient temperature. The analysis of results is through the comparison of electrical and thermal efficiency obtained in the tests with respect to the efficiency curves provided by the manufacturer, where it is evident that in the city of Quito Norte there are favorable conditions to install systems with PVT panels.

Keywords: PVT panels, hybrid solar panels, PVT energy efficiency.

Introducción

El incremento acelerado de demanda energética a nivel mundial, el declive evidente de los combustibles fósiles y el calentamiento global están obligando a varios países a diversificar su matriz energética abriendo campo al mundo de las energías renovables no convencionales como la solar.

En Ecuador el sector petrolero es uno de los más importantes en el país. Para el año 2020 se tuvo una producción de 175714 Kbp (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2021), siendo los combustibles fósiles los más consumidos en el sector de la industria, transporte público, privado, generar electricidad o a nivel residencial para cocción, y ACS. Para el calentamiento de agua sanitaria se usa principalmente electricidad y G.L.P., (*..se deduce de un análisis realizado por el MEER en el año 2007 basado en estadísticas de comercio exterior donde se registraba en que los 17 años anteriores se realizaron importaciones por 335000 calefones a GLP, pero a partir de 2007 las importaciones han aumentado un 50% por lo cual considerando el ciclo de vida existiría al menos 300000 calefones a GLP en el país(..)*) (Encalada, 2015), esta dependencia del G.L.P crea un futuro incierto, incluso algunos autores creen que ya se alcanzó el pico de extracción del petróleo, y predicen su disminución en los próximos años. (Fustier/Gray/Gundersen/Hilboldt, 2018).

Tal como se indica en (Fustier/Gray/Gundersen/Hilboldt, 2018), a partir del año 2016 se observa un declive en la extracción de petróleo, se prevé menor cantidad de explotación de este recurso hasta el año 2040 aproximadamente entre un -41 y -48 mbd en 24 años, adicional cada vez se requiere de mayor energía y recursos para extraer la misma cantidad de petróleo lo que se traduce en menor ganancia económica.

Bajo esta problemática se plantea buscar una alternativa y posible solución aprovechando las ventajas y disponibilidad del recurso solar en la ciudad de Quito Norte, que además contribuiría con la disminución de gases de efecto invernadero.

Se analiza las prestaciones energéticas de un panel PVT para preparación de ACS instalado en la terraza de la UISEK en Quito Norte, mediante mediciones variables energéticas térmicas y eléctricas, por medio de ensayos utilizando el sol como energético para calentamiento de agua y obtención de electricidad en simultaneo en base a la norma ISO 9806:2017.

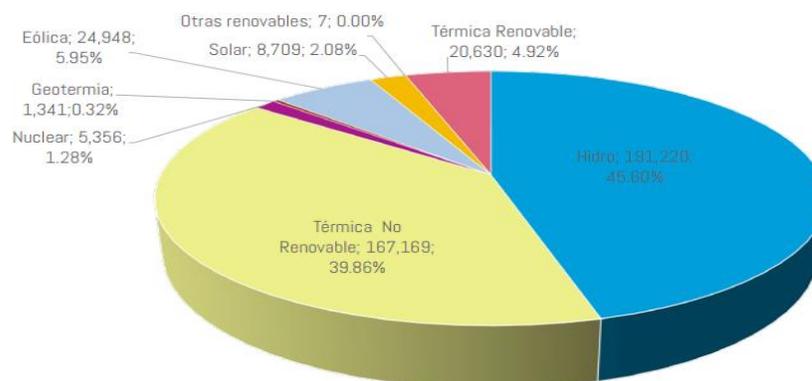
Energía solar en América Latina

El sol es una fuente de energía renovable natural, que en América Latina es apenas aprovechada solo el 2,08 % como se puede observar en la Figura 1.

Debido a las características topográficas y cuencas hidrográficas en América del Sur se tiene un alto porcentaje de capacidad instalada para generación hidroeléctrica, según un estudio realizado por la OLADE en el año 2019 la capacidad instalada es del 45,6% como se observa en la Figura 1, según datos de (OLADE, 2019, pág. 50) .

Capacidad Instalada para Generación Eléctrica ALC [MW; %] 2018

Figura 1



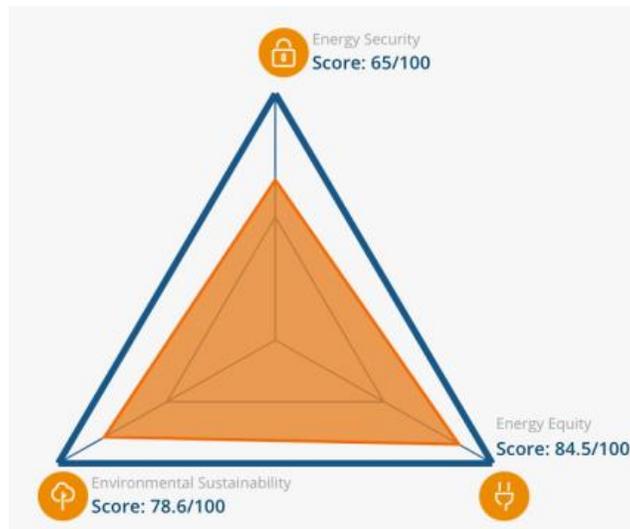
Nota: Porcentaje de capacidad instalada en ALC por tipo de energía. Adaptada de Capacidad Instalada para Generación Eléctrica ALC [MW; %] 2018, OLADE, 2019.

Sin embargo, debido a los efectos y consecuencias del cambio climático se prevé que van a existir variaciones climáticas bruscas y cambios de estacionalidades que provocarán entre otros estragos: sequías, variación en caudal de ríos e incremento de la temperatura que podrían influenciar en la disponibilidad del principal recurso de las hidroeléctricas como lo es el agua.

En Ecuador, en el año 2020 se tiene una potencia instalada de generación hidráulica del 58,5%, debido a esta gran dependencia de generación de electricidad con hidroeléctricas la World Energy Council a calificado a Ecuador en el trilema energético del 2020 como se puede observar en la Figura 2 con un puntaje de 65/100 en seguridad energética, lo cual evidencia un problema que promueve la diversificación en la matriz energética como solución mediante la implementación de energías renovables no convencionales para mejorar esta calificación.

Figura 2

Trilema Energético de Ecuador 2020



Nota: Puntuación en seguridad energética, sostenibilidad ambiental y equidad energética de Ecuador 2020. Adaptada de Balance de World Energy Council, 2020.

Adicional, a esto se tiene agravantes actuales la erosión regresiva en el río Coca que pone en riesgo la seguridad en la operación de la central más grande del país Coca Codo Sinclair.

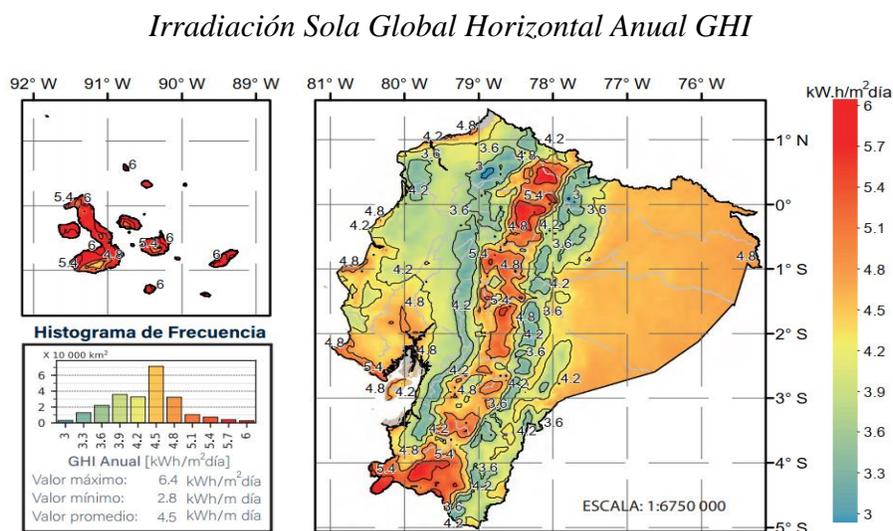
Bajo esta problemática, la instalación de parques fotovoltaicos que requieren relativamente de poco tiempo para su instalación comparada con una hidroeléctrica podría ser la mejor solución, tomando en cuenta la gran disponibilidad de recurso solar en Ecuador.

Recurso Energético Solar en Ecuador

Ecuador es privilegiado por su ubicación geográfica, este no tiene estaciones definidas ni cambios radicales en el clima lo cual permite aprovechar de mejor manera el recurso energético solar durante todo el año con respecto a otros países.

Como se observa en la Figura 3, el GHI irradiación global horizontal anual de Ecuador está entre 2,9kWh/m² día a 6,3 kWh/m² día, niveles de irradiación que son adecuados para aplicaciones solares fotovoltaicas y térmicas (Diego Vaca, 2019).

Figura 3



Nota: Valores de Irradiación global horizontal en Ecuador, Adaptada de grafico de Mapa solar de Ecuador 2019, CC BY 2.0. (Diego Vaca, 2019)

En la provincia de Pichincha, que es donde se realiza esta investigación se tiene un recurso solar aproximado de irradiación solar global de 3,5-5 kWh/m² día. (Diego Vaca, 2019) que favorece a las condiciones necesarias para obtener los parámetros y analizar las prestaciones energéticas del panel solar híbrido.

Contexto Normativo Ecuatoriano

En Ecuador, se tiene como marco regulatorio general la Constitución, que en el Art. 15. cita que *“El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto (...)”* (Constitución del Ecuador , 2008), también se tiene el Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 que busca garantizar una matriz energética diversificada, eficiente y sostenible (Consejo Nacional de Planificación., 2017).

Existen 2 regulaciones aprobadas en abril del 2021 que abren el mercado a la generación distribuida renovable, esta regulación se debe aclarar que no son específicamente de sistemas fotovoltaicos, estas abren la posibilidad de instalar sistemas de autoconsumo con generación renovable con una potencia nominal de hasta 1 MW.

La primera es la ARCERNNR-001/2021 que establece el procedimiento de factibilidad, requisitos de habilitación, condiciones de diseño, instalación, conexión y operación de sistemas regulados de generación distribuida para autoabastecimiento en sincronización con la red con o sin almacenamiento de energía.

La segunda es la ARCERNNR-002/2021 esta regulación establece las condiciones técnicas y comerciales que deben cumplirse los sistemas de generación distribuida regulados.

De acuerdo a estas regulaciones la capacidad del SGDA (Sistema de generación distribuida para autoabastecimiento) debe ser diseñada para que la generación anual sea menor o igual a la energía anual facturada al consumidor.

Cuando el cliente de un SGDA se encuentra regularizado se cambia de medidor o se lo reprograma a bidireccional que permite disminución en los costos de la planilla mediante un balance mensual de la energía entregada y consumida, de existir excedentes de energía en un mes se convierten en saldo de energía para transacción al siguiente mes.

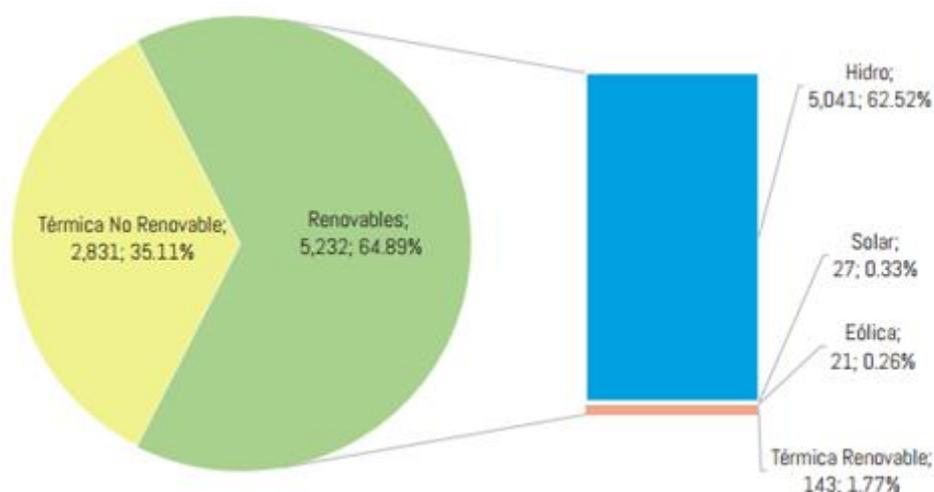
Para colectores solares térmicos principalmente para uso residencial para preparación de ACS y para calentamiento de agua en piscinas se tiene la norma NEC- HS-ER del año 2020 que establece los criterios de instalación, orientación y conexión de sistemas solares térmicos para ACS en residencias, adicional las dos normas INEN, la primera “*Sistemas de calentamiento de agua con energía solar para uso sanitario en Ecuador*” del año 2008, en esta norma se establece las especificaciones técnicas mínimas de fabricación y dimensionamiento sistemas solares térmicos para ACS y la segunda la norma INEN 2507 “*Rendimiento térmico de colectores solares. Requisitos y métodos de ensayo*” del año 2016 que usa como referencias normativas las normas ISO.

Proyectos Fotovoltaicos en Ecuador

Como se observa en la Figura 4 la capacidad instalada de generación fotovoltaica en el año 2018 en Ecuador es del 0,33% (OLADE, 2019).

Figura 4

Capacidad Instalada de Generación Eléctrica [MW, %] 2019



Nota: Capacidad instalada de generación eléctrica en Ecuador dividida por fuente, Adaptada de Capacidad Instalada para Generación Eléctrica [MW; %] 2018, OLADE, 2019.

En Galápagos se tiene varios sistemas fotovoltaicos híbridos aislados. El Instituto Coreano de Desarrollo donó a Ecuador un sistema fotovoltaico en la isla San Cristóbal bajo el “Plan cero combustibles fósiles”, en cual se instaló 1MW con un sistema de baterías de 1,4 MWh. En Santa Cruz se tiene un sistema fotovoltaico de 1,5 MW. En la isla Isabela se tiene una capacidad instalada de 2.54 MW

En Ecuador continental se tiene varios sistemas fotovoltaicos conectados a la red que las empresas distribuidoras de energía los regularizan y permiten la conexión a red, también en comunidades rurales o lugares lejanos a la red de distribución se tiene microsistemas fotovoltaicos aislados instalados principalmente en su mayoría en las provincias de Loja, Orellana, Zamora Chinchipe y Morona Santiago para octubre 2021 se tiene una potencia instalada de 27,65MW (OLADE, 2019).

Proyectos de Sistemas Colectores Térmicos Solares para Preparación de ACS

En Ecuador para el año 2011, a nivel residencial se tiene que el 55% de ACS se prepara con ducha eléctrica, un 33% no dispone de ACS y el 12% utiliza calefones (Manzano, 2011), el MIDUVI (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda) intentó implementar proyectos de viviendas de interés social con dotación de 10.905 sistemas de colectores solares para preparación de ACS, pero por recortes del presupuesto solo se terminaron instalando 2.912 sistemas.

Energía Solar Fotovoltaica

Es la conversión de energía solar en energía eléctrica mediante células fotoeléctricas de silicio o germanio, que se produce mediante el efecto fotovoltaico unión PN del semiconductor en la celda cuando esta se somete a incidencia de la luz solar.

Características Eléctricas Básicas de una Celda Solar

Las celdas solares certificadas, antes de ser comercializadas deben pasar ensayos en condiciones estándar de temperatura 25°C, AM=1,5, E=1000 W/m². La norma europea que describe los ensayos a realizar en los módulos es la IEC 61853-1:2011, obteniendo un reporte rápido de resultados en las condiciones estándar pudiendo conocer el rendimiento específico de cada módulo.

La eficiencia energética de la celda se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

$$\eta\% = \frac{P \text{ generada [kW]}}{\text{Irradiación de la celda } \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right] * \text{área}[\text{m}^2]} \quad (3)$$

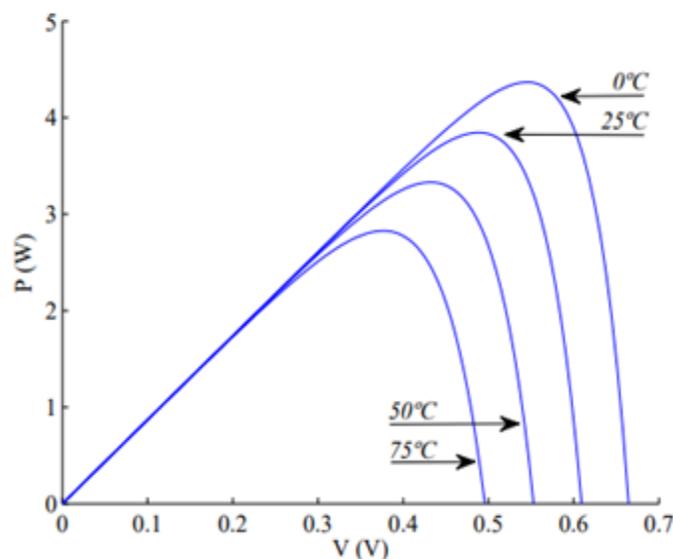
La eficiencia del panel fotovoltaico esta expresada en porcentaje, relaciona la potencia de salida y la potencia incidente aprovechada en el área del panel, en paneles fotovoltaicos con celdas mono cristalinas la eficiencia se encuentra entre el 15% -30%.

En las células fotovoltaicas cuando se tiene altas temperaturas de ambiente y exceso de radiación solar causa sobrecalentamiento en las células fotovoltaicas que reducen su eficiencia.

La potencia de salida disminuye conforme aumenta la temperatura de las celdas como se observa en la Figura 5 (Ziapour, 2016), se tienen 4 curvas con temperaturas de 0°C, 25°C, 50°C y 75°C en el pico de la curva de 75°C la potencia ha disminuido aproximadamente a la mitad, lo cual demuestra que la elevación de la temperatura de operación afecta considerablemente al rendimiento del módulo.

Figura 5

Curva PV para Diferentes Temperaturas del Módulo.



Nota: Comportamiento de un sistema PVT termosifón curva V vs P a diferentes temperaturas de operación. Adaptada de P-V characteristics of the solar cell for different temperatures of the module, adapted from, Behrooz M. Ziapour, 2016.

Energía Solar Térmica Pasiva

Es el diseño y ubicación de edificaciones de tal manera que aprovechen óptimamente el recurso solar disponible para climatizar la construcción, obtener ACS y/o electricidad.

Toma en cuenta la ubicación geográfica de la edificación, busca la orientación adecuada de la fachada, inclinación y orientación óptima del techo para aprovechar de mejor manera el recurso solar garantizando confort y disminuyendo del consumo eléctrico o de GLP lo cual reflejaría una disminución en la planilla mensual.

El ACS es una necesidad de confort básica, en Ecuador se estima que existen 300 mil sistemas de agua caliente funcionando con GLP (Vaca, 2012), considerando que Ecuador no produce GLP es importante considerar el desarrollo social que implicará aumento de demanda energética, los costos futuros asociados al declive del recurso fósil, y la oportunidad de aprovechamiento de recursos renovables como el sol.

Colectores Solares

La energía solar térmica obtenida por medio de colectores solares se adquiere a través de la energía irradiada por el sol en el área de superficie de captación del colector, se usa con fines, en baja temperatura para obtener agua caliente sanitaria, media y alta temperatura para generación de electricidad y precalentamiento en procesos industriales.

En el año 2012 según la IEA se produjo en sistemas solares térmicos 227,8 TWh. (IEA, 2012).

Sistema Solar Termosifón

Es un sistema compacto en el que el fluido de trabajo por lo general es agua, esta recibe la energía térmica captada por medio de colectores solares y fluye por diferencia de densidades hacia el tanque de almacenamiento que está aislado térmicamente y se encuentra por encima del captador.

Este tipo de sistema tiene la ventaja de no necesitar energía eléctrica para su funcionamiento por lo que no requiere de circulación forzada.

Sistema Solar con Circulación Forzada

Es un sistema que requiere de bombas hidráulicas para hacer circular el fluido de transferencia de calor entre el colector y el tanque de almacenamiento, en este tipo de sistemas no se requiere que el tanque de almacenamiento este por encima del colector solar. El accionamiento de esta bomba depende de un control diferencial que compara las temperaturas de entrada y salida.

Estas bombas deben resistir temperaturas de trabajo para la cual está diseñada el circuito de retorno que es donde usualmente es ubicada.

Tipos de Colectores

Colector de Tubos de Vacío

Para reducir las pérdidas térmicas por convección y conducción y alcanzar temperaturas elevadas se utiliza ese tipo de colectores están compuestos por tubos de vidrio cubiertos recubiertos de una superficie metálica en la cual se hizo vacío aumentando la eficiencia.

Colector de placas planas

Se compone de una placa plana metálica que recibe la energía térmica al recibir la irradiación solar, tiene una cubierta que por lo general es vidrio templado, o vidrio solar que es un vidrio tratado químicamente con el fin de tener propiedades que incrementen la temperatura y favorezcan el efecto invernadero como alta transmitancia y baja reflectancia.

Se utiliza en aplicaciones solares de baja temperatura como:

- Climatización de piscinas
- Producción de agua caliente sanitaria ACS
- Calefacción con temperaturas de operación

Eficiencia de Colectores Solar según (ISO 9806, 2017):

$$\eta = \frac{\text{Energía entregada por el colector}}{\text{Energía solar incidente sobre el colector}} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{q_{\text{útil}}}{q_{\text{incidente}}} \quad (5)$$

Realizando el balance de energía:

$$G_i A_c (\tau \alpha) = q_{\text{útil}} - q_{\text{pérdidas}} + \frac{dU}{dt} \quad (6)$$

Donde:

G_i : Irradiación

$\tau\alpha$: Coeficiente de transmitancia y absorbancia

A_c : Área del colector

Las pérdidas están dadas por:

$$q_{p\acute{e}rdidas} = U_L A_c (T_p - T_a) \quad (7)$$

Donde:

U_L : Coeficiente de pérdidas globales

A_c : Área del colector

T_p : Temperatura de la placa

T_a : Temperatura ambiente

Eficiencia instantánea:

$$\eta = \frac{\int Q_{\acute{u}til} dt}{A_c \int G_T dt} \quad (8)$$

$$Q_{\acute{u}til} = \dot{m} C_p (\Delta T) \quad (9)$$

$$Q_{\acute{u}til} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (10)$$

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} \quad (11)$$

Donde:

$Q_{\acute{u}til}$: Calor útil

\dot{m} : Flujo másico del agua

ρ : densidad del agua

\dot{V} : Volumen

C_p : Calor específico

T_{out} : Temperatura de salida de colecto

T_{in} : Temperatura de entrada del colector

La densidad y calor específico del agua se obtiene de tablas:

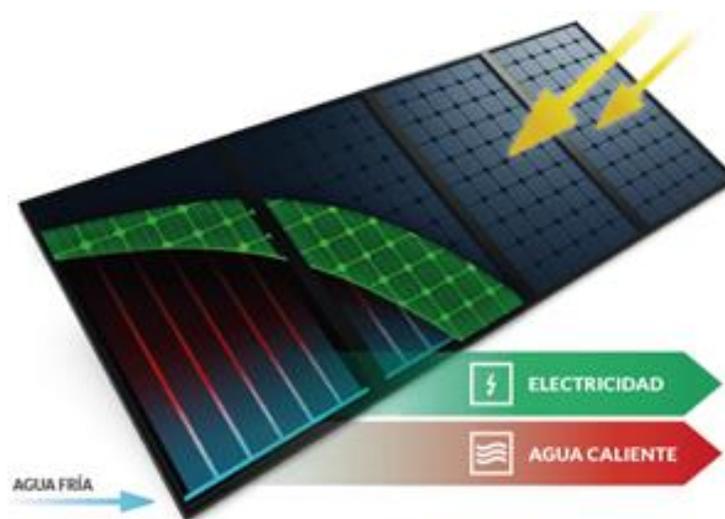
$$\rho = 997 \frac{kg}{m^3} \quad C_p = 4186 \frac{J}{kg K}$$

Paneles Solares Híbridos PVT

Los paneles PVT incorporan en un mismo dispositivo un panel fotovoltaico y un colector térmico, a partir de la incidencia de los rayos del sol en el módulo se obtiene simultáneamente electricidad y agua caliente como se observa en la Figura 6.

Figura 6

Panel Solar Híbrido PVT



Nota: Panel solar híbrido. Adoptada de Abora Energy, 2020, <https://abora-solar.com/>. CC BY 2.0

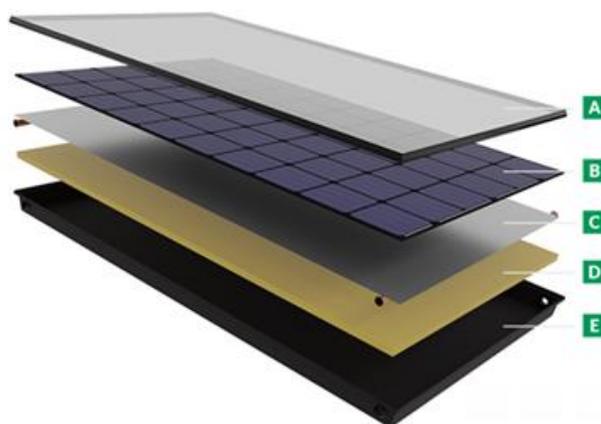
El panel híbrido PVT cuenta con tratamiento térmico que produce altas eficiencias térmicas, esta optimización en su construcción busca provechar el calor residual y perjudicial que se pierde en forma de calor. Como se observa en la siguiente figura se tiene en un mismo dispositivo el circuito hidráulico con la tubería de cobre en paralelo y por encima las células fotovoltaicas.

Los primeros colectores solares híbridos acoplaron un sistema aislante térmicamente en la parte posterior del panel que conseguía recuperar hasta un 40% de las pérdidas de calor, el inconveniente es que a temperaturas de ACS existe mayores pérdidas por la parte frontal y se reduce la recuperación de pérdidas, el panel usado en el ensayo tiene una cubierta frontal aislante que permite recuperar este calor y obtener un rendimiento térmico de 70%, además de un aislante térmico en la parte posterior como se observa en la siguiente figura.

El panel solar híbrido tiene las siguientes partes A (aislamiento frontal), B (Celdas fotovoltaicas), C (Recuperador de calor), D (aislamiento posterior) y E (carcasa) que se puede observar por separado en la Figura 7:

Figura 7

Componentes de un Panel Solar Híbrido



Nota: Componentes de un panel solar híbrido. Adoptada, Abora Energy, 2020, <https://abora-solar.com/>. CC BY 2.0

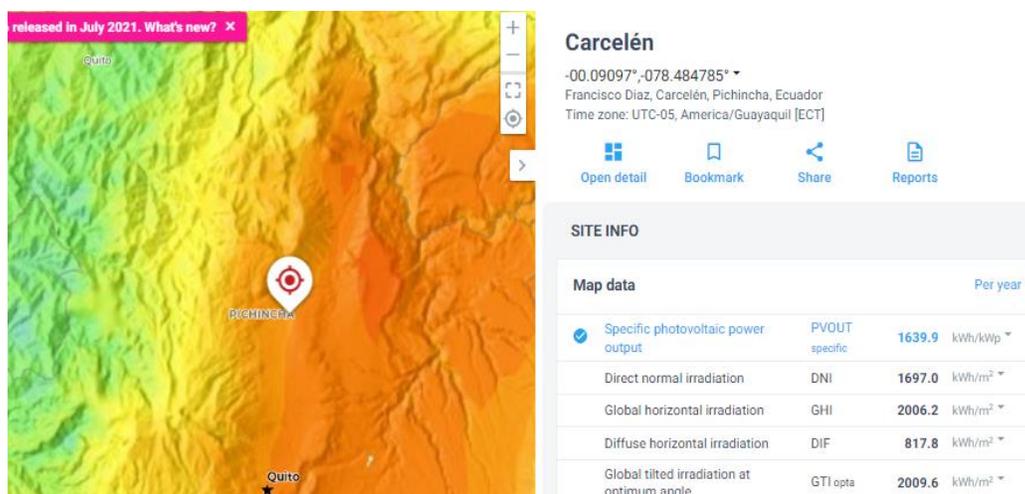
Materiales y Metodología

La metodología utilizada es investigación cuantitativa y experimental, por lo que, mediante la implementación de un circuito eléctrico e hidráulico se mide las prestaciones energéticas.

La implementación de este circuito se realiza en la terraza de la facultad de ingeniería de la Universidad Internacional SEK ubicada en Quito coordenadas 0.090658, -78.483173, en la Figura 8 como referencia en Global Atlas se tiene un PVout de 1639.8 kWh/kWp al año. En este lugar no se tiene sombras que obstaculicen los rayos incidentes en el panel PVT y disminuyan la generación de energía térmica y eléctrica.

Figura 8

Mapa y Datos de Irradiación Solar en Carcelén

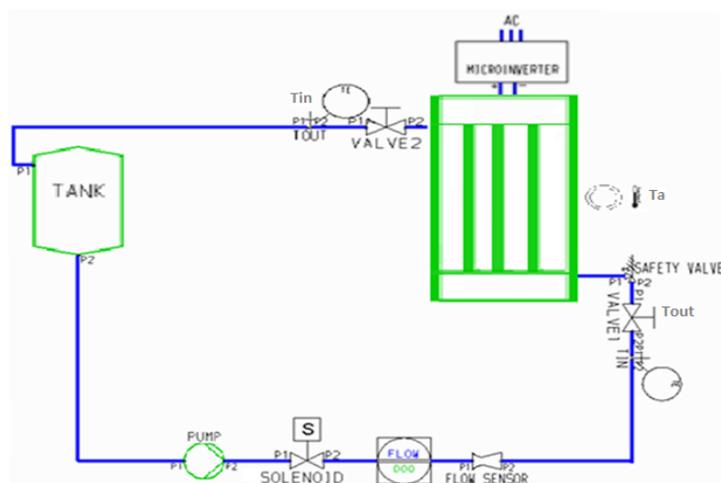


Nota: Map data. Adaptada de Global Solar Atlas,2021. CC BY 2.0. <https://globalsolaratlas.info/map>

Se divide el ensayo en mediciones de prestaciones energéticas eléctricas y térmicas. Para esto se utilizará de referencia la norma ISO9806:2017 tomando mediciones de parámetros básicos como voltaje, corriente, temperaturas, caudal, e irradiación (ISO 9806, 2017).

Esquema Utilizado para Ensayo

En la Figura 9 se observa el esquema del circuito eléctrico y térmico utilizado para realizar el ensayo, como se observa el micro inversor es conectado a red.

Figura 9*Esquema de Conexión*

Nota: Esquema de conexión.

El panel PVT se instaló con una inclinación de 18° con respecto a la horizontal, en estudios anteriores se demostró que para mejorar la captación y el efecto termosifón el ángulo óptimo está entre $15\text{-}20^\circ$ respecto a la horizontal, a esto se debe realizar una corrección sumando la latitud (M.Sc, 2010).

Panel híbrido PVT

En la Figura 10, se observa el panel híbrido PVT utilizado durante los ensayos.

Figura 10*Panel híbrido PVT*

Nota: Fotografía Panel híbrido PVT

En la Tabla 1 se encuentra las especificaciones generales del panel PVT que se seleccionó.

Tabla 1 Especificaciones Generales del Panel PVT

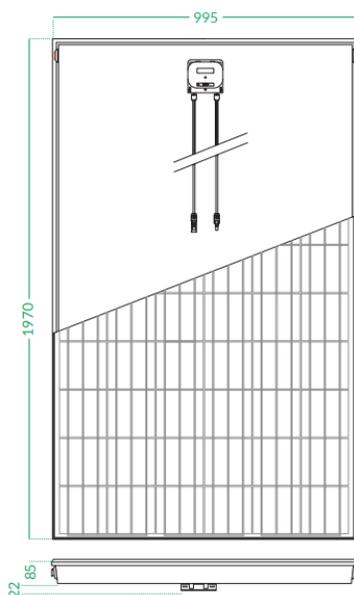
Especificación	Detalle
Dimensiones (LXAXE)	1.970 x 995 x (85+22) mm
Área Total	1,96 m ²
Área de Apertura ^a	1,88 m ²
Nº células	72
Peso	50 kg.
Vidrio Frontal	3,2 mm templado
Marco	Aluminio
Protección Caja de Conexión	IP65
Nº Diodos	3 diodos
Dimensiones de célula	156 x 156
Tipo de conexión FV / Longitud cables	Solarlok PV4 / 1m

Nota. Especificaciones Generales, Ficha Técnica Abora aH72 SK 2021.

^a El área de apertura del módulo es de 1,88 m² que es el área útil donde incidirá la irradiación solar.

Figura 11

Dimensiones del Panel PVT



Nota. Especificaciones Generales, Ficha Técnica Abora aH72 SK 2021.

En la Tabla 2, se indica las especificaciones eléctricas del panel solar híbrido, valores que se obtienen en laboratorio de pruebas bajo condiciones estándar: 1000 W/m², temperatura de 25°C y AM de 1,5 donde se observa una eficiencia eléctrica del 17,8%

Tabla 2

Especificaciones Eléctricas Panel PVT

Especificación	Detalle
Tipo de célula	Mono cristalina
Potencia Nominal (W)	350 W
Tensión Máxima Potencia (V _{mpp})	39,18V
Corriente Máxima Potencia (I _{mpp})	8,98 A
Tensión Circuito Abierto (V _{oc})	48,82 V
Corriente Cortocircuito (I _{sc})	9,73 A
Eficiencia del módulo (%)	17,8
Tolerancia de Potencia (W)	0/+3%
Tensión Máxima del Sistema	DC 1000 V (IEC)
Backsheet	Negro
Coeficiente de temperatura de P _{mpp}	-0,41%/°C
Coeficiente de temperatura de V _{oc}	-0,33%/°C
Coeficiente de temperatura de I _{sc}	+0,06%/°C
Corriente inversa máxima	15 A
Temperatura NOCT*	45+/-2 °C

Nota. Especificaciones Eléctricas, Ficha Técnica Abora aH72 SK 2021

En la Tabla 3 se indica las especificaciones térmicas donde se encuentra el coeficiente lineal de pérdidas térmicas a₁ y coeficiente cuadrático de pérdidas térmicas a₂, cuanto más grandes sean estos coeficientes menor valor tendrá el rendimiento térmico. En la norma EN 12975 se establece un modelo matemático que relaciona estos coeficientes y el rendimiento óptico obteniendo la curva característica de cada colector.

Tabla 3*Especificaciones Térmicas Panel PVT*

Especificación	Detalle
Rendimiento óptico	0,7
Coef. Pérdidas Térmicas, a1	5,98 W/m ² . K
Coef. Pérdidas Térmicas, a2	0,00 W/m ² . K ²
Volumen liquido interior	1,78 l
Temperatura de estancamiento	126°C
Núm. Conexiones hidráulicas	4 conexiones
Medida Conexión hidráulica	conexionado rápido
Presión máxima admisible	10 bar
Caudal nominal	60 l/h

Nota. Especificaciones Térmicas, Ficha Técnica Abora aH72 SK 2021.

Micro Inversor

Es un dispositivo que convierte la corriente continua en corriente alterna, es de menor tamaño comparado con los inversores comunes debido a que se instala en la parte posterior de cada panel PV obteniendo ventajas de funcionamiento independiente en caso de sombras por panel o de avería por panel, además, cada micro inversor busca la energía optima mediante el seguimiento del punto de máxima potencia independientemente del resto de paneles conectados. Según la marca el fabricante usualmente brinda garantía de hasta 15 años y tiene IP65 lo cual lo hace apto para la instalación en la intemperie, y garantiza la rentabilidad en proyectos fotovoltaicos.

El micro inversor utilizado se observa en la Figura 12 tiene la característica de conexión a red, por lo cual tiene la capacidad de sincronización con el voltaje y frecuencia propios de la red.

Este micro inversor cumple con las normas para instalaciones fotovoltaicas por lo que dispone de protección contra cortocircuitos, sobrecargas, temperaturas de trabajo anormales, frecuencias fuera de rango establecido y protección de funcionamiento en modo isla.

Figura 12*Micro inversor Solar Smart SG350*

Nota: Fotografía micro inversor.

Las características principales del micro inversor utilizado en el ensayo, se indican en la Tabla 4:

Tabla 4*Especificaciones Técnicas Micro Inversor*

Especificación	Detalle
MPPT Rango de voltaje	24-40V
Rango de voltaje de operación	18-50V
AC output	80-160V
Máx. potencia de entrada	350W
Máx. corriente de entrada	14 A
Corriente de salida nominal	2.75A
Voltaje de red	120V
Rango de frecuencia	57.5 Hz-62.5 Hz
Eficiencia	95%
CEC Eficiencia ponderada	92.5%
Rango de temperatura ambiente	-40C a 65C

Nota. Especificaciones Técnicas, Ficha Técnica Smart Inverter.

En la Tabla 5 se observa una fotografía y característica de cada equipo, válvula y accesorios que se utilizaron durante el ensayo.

Tabla 5

Equipos, Válvulas y Accesorios

Instrumentos/ accesorios	Figura	Características
Bomba		12VDC 19W 800l/h Elevación de agua: 5m
Sensor de Flujo		Rango de flujo: 1-30L/min Tensión nominal mín.: DC 4.5V-24V Corriente máxima: 15 mA (DC 5V) Rango de voltaje: DC 5 ~ 18 V
Válvula Solenoide		12VDC, Max 5 ^a 1/2" Interruptor de flujo NC. Temperatura: 0-100°C. Vida útil esperada: 50000 ciclos.
Válvula de Seguridad		Presión nominal: PN10 -5°C hasta 120°C Descarga de cierre: 20% Presión de actuación: 6 bares
Llave de corte		1" Latón forjado niquelado
Termo pozo		Incorporado llave cruz. Acero inoxidable Uso con termopar

Instrumentos Utilizados en Ensayo

Para realizar las mediciones en el ensayo se utilizó los siguientes equipos de la Tabla 6:

Tabla 6

Instrumentos de Medición Utilizados

Instrumentos	Figura	Características
Multímetro		<ul style="list-style-type: none"> • AC/DC Máx 10A • AC/DC Máx 750V • Conexión a PC RS232 Temperatura: 0°C a 400°C
Pinza Amperimétrica		Voltaje AC 2 V-600 V Corriente AC 2 A -400A Temperatura -40°C-1370°C.
Piranómetro		Clase C Rango espectral 285 a 3000x10 ⁻⁹ m. Conexión a PC mediante software LI19.
Termómetro 1		Temperaturas de -30 °C a 650 °C IP54 Relación de distancia al objetivo de 8:1
Termocupla		Tipo K
Sensor de Temperatura		Temperatura 0°C- 125°C. NTC3950 Precisión: ± 1 °C Rosca: M8
Medidor de flujo, control cuantitativo pantalla LCD.		Sensor de flujo G1/2” 12V DC Rango cuantitativo: 0-9999,99 gal/l.
Multímetro		Voltajes AC: 3.26-32.6 - 326 - 750V 0.8% Corriente AC:32.6m-326m-10A 1.5%

Procedimiento

Para medir las prestaciones energéticas del circuito hidráulico se dispone de:

- Tres termómetros
 1. Una termocupla tipo k ubicada en la llave tipo cruz que mide la temperatura de salida del colector a menos de 20 cm de la salida, Figura 13.

Figura 13

Medición de temperatura



Nota: Fotografía multímetro medición de temperatura con termocupla.

2. Un sensor de temperatura que está ubicada a la entrada del colector menos de 20cm de la entrada, Figura 14.

Figura 14

Sensor de temperatura



Nota: Fotografía válvula solenoide, caudalímetro y sensor de temperatura (enmarcado)

3. Un termómetro para medir temperatura ambiente,

Figura 15.

Figura 15

Medición de temperatura ambiente



Nota: Fotografía Medición de temperatura ambiente.

- Piranómetro

Registra irradiación en $[W/m^2]$ cada 15s, este se ubica en el mismo plano y a la altura media del panel híbrido. Es de Clase C. Registra los datos obtenidos mediante un software y realiza una gráfica W/m^2 vs t, Figura 16.

Figura 16

Medición con Piranómetro



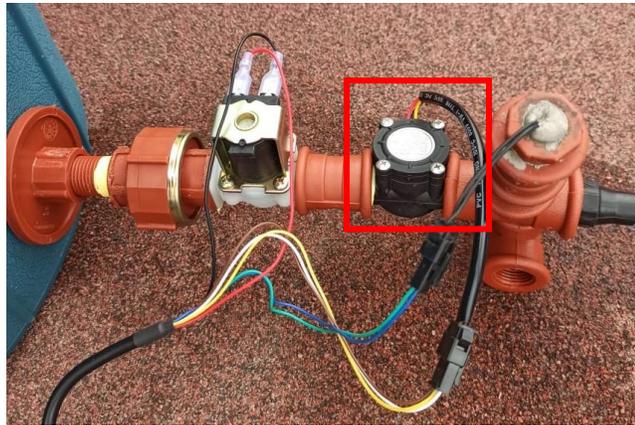
Nota: Fotografía Medición de irradiación.

- Caudalímetro

A la salida del tanque se dispone de un sensor de flujo que mide en l/min el caudal, se toma mediciones cada 5 minutos Figura 17.

Figura 17

Caudalímetro



Nota: Fotografía válvula solenoide, caudalímetro (enmarcado) y sensor de temperatura

Figura 18

Display caudalímetro, temperatura



Nota: Fotografía visor de caudal, temperatura, y válvula.

Para medir las prestaciones energéticas del circuito eléctrico se dispone de:

- Multímetro

Se mide el voltaje en AC cada 5 minutos, Figura 19.

Figura 19

Medición de voltaje AC



Nota: Fotografía medición de voltaje.

- Pinza Amperimétrica

Se mide la corriente en AC que entrega el micro inversor cada 5 minutos, Figura 20.

Figura 20

Medición de corriente AC



Nota: Fotografía medición de corriente.

Resultados

Ensayo 1

Se utilizó un tanque con un volumen de 30 l, caudal de 1,7 l/min. Se tomó medidas cada 5 minutos. Se obtuvo los datos que se muestran en la Tabla 7.

Donde **Ta**: Temperatura ambiente, **T in**: Temperatura de entrada, **Tout**: Temperatura de salida.

Tabla 7

Parámetros Medidos el día viernes 10 de septiembre 2021

Hora	Ta [°C]	Tin [°C]	Tout [°C]	Irradiación	Corriente	Voltaje
10:00:00	20	16	35	900	1,96	128,00
10:05:00	20	20	37	888	1,79	128,00
10:10:00	20	20	38	676	1,40	128,02
10:15:00	20	21	36	276	0,57	128,00
10:20:00	20	24	38	970	1,90	128,60
10:25:00	20	24	39	967	1,99	128,00
10:30:00	20	25	37	964	1,99	128,00
10:35:00	20	25	39	977	2,01	128,00
10:40:00	20	26	39	1003	1,99	128,00
10:45:00	20	28	39	1011	2,00	128,00
10:50:00	20	28	39	1012	2,11	128,00
10:55:00	21	29	39	1019	2,14	128,00
11:00:00	21	31	40	1027	2,17	128,00
11:05:00	21	31	39	1031	2,19	128,00
11:10:00	21	32	39	1027	2,20	128,00
11:15:00	21	34	41	1049	2,10	128,00
11:20:00	21	33	40	1052	2,30	128,00
11:25:00	21	35	40	837	1,70	128,70
11:30:00	21	37	42	837	1,60	128,60
11:35:00	21	38	40	833	1,61	128,60
11:40:00	21	39	40	836	1,70	128,70
11:45:00	21	39	43	836	1,65	128,00
11:50:00	21	40	42	836	1,70	127,90
11:55:00	21	41	43	837	1,70	127,70
12:00:00	21	42	44	842	1,70	128,00
12:05:00	21	42	44	842	1,73	128,00
12:10:00	21	42	44	842	1,73	128,05
12:15:00	21	44	45	843	1,68	127,80
12:20:00	22	43	45	844	1,74	128,10
12:25:00	22	43	45	846	1,75	128,00
12:30:00	22	46	46	782	1,50	128,00

Ensayo 2

Se utilizó un tanque con un volumen de agua de 27 l, un caudal de 1,7 l/min. Se tomó medidas cada 5 minutos. Se obtuvo los datos que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Parámetros Medidos el día sábado 11 de septiembre 2021

Hora	Ta [°C]	Tin [°C]	Tout [°C]	Irradiación [W/m2]	Corriente [A]	Voltaje [V]
10:00:00	18	16	24,00	390	0,75	128,00
10:05:00	18	18	24,00	390	0,75	128,00
10:10:00	18	19	24,00	390	0,74	128,00
10:15:00	18	19	25,00	326	0,67	128,00
10:20:00	18	21	26,00	373	0,75	128,00
10:25:00	18	21	26,00	328	0,65	128,00
10:30:00	18	21	26,00	441	0,79	128,00
10:35:00	18	22	26,00	428	0,80	128,00
10:40:00	18	22	26,00	360	0,65	128,00
10:45:00	18	22	27,00	358	0,65	128,00
10:50:00	19	23	27,00	328	0,60	128,00
10:55:00	19	23	27,00	468	0,84	128,00
11:00:00	19	23	27,00	348	0,68	128,00
11:05:00	19	25	28,00	402	0,79	128,00
11:10:00	19	25	28,00	363	0,75	128,00
11:15:00	19	26	29,00	397	0,80	128,00
11:20:00	19	26	30,00	322	0,70	128,00
11:25:00	19	27	30,00	329	0,71	128,00
11:30:00	20	27	32,00	433	0,79	128,00
11:35:00	20	29	33,00	349	0,68	128,00
11:40:00	20	29	33,00	370	0,66	128,00
11:45:00	20	29	33,00	349	0,67	128,00
11:50:00	20	30	33,00	374	0,65	128,00
11:55:00	20	30	33,00	393	0,84	128,00
12:00:00	20	30	34,00	326	0,60	128,00
12:05:00	20	31	33,00	328	0,60	128,00
12:10:00	20	31	33,00	328	0,60	128,00
12:15:00	19	31	33,00	374	0,66	128,00

Ensayo 3

Se utilizó un tanque con un volumen de agua de 25 l, un caudal de 1.8 l/min. Se tomó medidas cada 5 minutos. Se obtuvo los datos que se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9

Parámetros Medidos el día lunes 13 de septiembre 2021

Hora	Ta [°C]	Tin [°C]	Tout [°C]	Irradiación [W/m²]	Corriente [A]	Voltaje [V]
10:00:00	19	17	32,00	992	1,98	127,50
10:05:00	19	17	33,00	1001	2,00	128,00
10:10:00	19	20	33,00	1005	2,01	128,70
10:15:00	19	24	33,00	1101	2,00	128,00
10:20:00	19	25	34,00	869	1,86	128,60
10:25:00	19	26	34,00	337	0,72	128,00
10:30:00	20	28	35,00	908	1,70	128,00
10:35:00	20	29	35,00	1002	1,90	128,00
10:40:00	20	30	35,00	457	0,89	128,00
10:45:00	20	31	36,00	834	1,60	128,00
10:50:00	20	32	37,00	589	1,20	128,00
10:55:00	20	32	39,00	690	1,30	128,00
11:00:00	20	34	39,00	573	1,15	128,00
11:05:00	20	34	39,00	1167	2,24	128,00
11:10:00	20	35	39,00	303	0,60	128,00
11:15:00	20	36	40,00	1069	2,20	128,10
11:20:00	20	38	40,00	348	0,70	128,30
11:25:00	20	38	40,00	949	1,89	128,70
11:30:00	20	38	42,00	931	1,80	128,60
11:35:00	20	39	41,00	936	1,90	128,60
11:40:00	20	41	42,00	1033	2,10	128,70
11:45:00	21	41	43,00	1061	2,10	128,00
11:50:00	21	43	44,00	1110	2,20	127,00
11:55:00	21	43	45,00	955	1,92	127,00
12:00:00	21	44	45,00	544	1,00	128,00
12:05:00	21	44	44,00	680	1,30	128,60
12:10:00	21	44	44,00	1006	2,00	128,60
12:15:00	21	45	45,00	862	1,70	128,20
12:20:00	21	45	44,00	983	2,00	128,10
12:25:00	21	45	45,00	717	1,40	128,60
12:30:00	21	45	45,00	398	0,80	127,00

Cálculo de eficiencia Eléctrica y Térmica.

Con las ecuaciones (3) y (8) se calcula la eficiencia eléctrica y térmica, en cada uno de los ensayos.

Eficiencias Ensayo 1.

Tabla 10

Cálculos de Eficiencia Térmica y Eléctrica del Ensayo 1

Potencia [W]	Eficiencia Elec. del sistema [%]	Eficiencia Elec. del panel [%]	(Tm-Ta)/G	T °C	Tpro-ta °C	(Ta-Tpro)/G	Qutil (J)	N(%)
250,88	14,83	15,94	0,01	27,000	7,000	0,009	625200,000	45,45
229,12	13,72	14,75	0,01					
179,23	14,10	15,16	0,01					
72,96	14,06	15,12	0,03	29,750	9,750	0,011	500160,000	34,34
244,34	13,40	14,40	0,01					
254,72	14,01	15,06	0,01					
254,72	14,05	15,11	0,01	32,250	12,250	0,012	375120,000	22,38
257,28	14,01	15,06	0,01					
254,72	13,51	14,52	0,01					
256,00	13,47	14,48	0,01	34,500	14,000	0,014	375120,000	21,82
270,08	14,20	15,26	0,01					
273,92	14,30	15,37	0,01					
277,76	14,39	15,46	0,01	36,500	15,500	0,015	375120,000	21,39
280,32	14,46	15,55	0,01					
281,60	14,58	15,68	0,01					
268,80	13,63	14,65	0,02	38,375	17,375	0,018	312600,000	18,99
294,40	14,89	16,00	0,01					
218,79	13,90	14,95	0,02					
205,76	13,08	14,06	0,02	40,125	19,125	0,023	312600,000	22,11
207,05	13,22	14,21	0,02					
218,79	13,92	14,96	0,02					
211,20	13,44	14,45	0,02	42,000	21,000	0,025	375120,000	26,42
217,43	13,83	14,87	0,02					
217,09	13,80	14,83	0,03					
217,60	13,75	14,78	0,03	43,750	22,750	0,027	250080,000	17,55
221,44	13,99	15,04	0,03					
221,53	13,99	15,04	0,03					
214,70	13,55	14,56	0,03	45,250	23,500	0,012	250080,000	17,48
222,89	14,05	15,10	0,03					
224,00	14,08	15,14	0,03					
192,00	13,06	14,04	0,03					

Nota: El calor útil se calculó cada 15 minutos.

Eficiencias Ensayo 2.**Tabla 11***Cálculos de Eficiencia Térmica y Eléctrica del Ensayo 2*

Potencia [W]	Eficiencia Elec del sistema [%]	Eficiencia Elec del panel [%]	(T _m -T _a)/G	T _{pro} (°C)	T _{pro-ta} (°C)	(T _a - T _{pro})/G	Q _{util} (J)	N(%)
96,00	13,09	14,08	0,01	21,000	3,000	0,008	312600,000	47,56
96,00	13,09	14,08	0,01					
94,72	12,92	13,89	0,01					
85,76	13,99	15,04	0,01	22,750	4,750	0,013	208400,000	33,34
96,00	13,69	14,72	0,01					
83,20	13,49	14,50	0,02					
101,12	12,20	13,11	0,01	24,050	6,050	0,015	125040,000	18,29
102,40	12,73	13,68	0,01					
83,20	12,29	13,22	0,02					
83,20	12,36	13,29	0,02	24,800	6,050	0,016	83360,000	13,38
76,80	12,45	13,39	0,02					
107,52	12,22	13,14	0,01					
87,04	13,30	14,30	0,02	26,125	7,125	0,019	260500,000	42,12
101,12	13,38	14,38	0,02					
96,00	14,07	15,12	0,02					
102,40	13,72	14,75	0,02	28,375	9,125	0,023	156300,000	23,58
89,60	14,80	15,91	0,03					
90,88	14,69	15,80	0,03					
101,12	12,42	13,35	0,02	30,125	10,125	0,026	156300,000	23,79
87,04	13,27	14,26	0,03					
84,48	12,14	13,06	0,03					
85,76	13,07	14,05	0,03	31,375	11,375	0,031	156300,000	24,94
83,20	11,83	12,72	0,03					
107,52	14,55	15,64	0,03					
76,80	12,53	13,47	0,04	32,000	12,250	0,033	104200,000	16,80
76,80	12,45	13,39	0,04					
76,80	12,45	13,39	0,04					
84,48	12,02	12,92	0,03					

Nota: El calor útil se calculó cada 15 minutos.

Eficiencias Ensayo 3.**Tabla 12**

Potencia [W]	Eficiencia Elec del sistema [%]	Eficiencia Elec del panel [%]	(Tm-Ta) /G	Tpro (°C)	Tpro-ta (°C)	(Ta-Tpro)/G	Qutil (J)	N(%)
252,45	13,54	14,55	0,01	26,500	7,500	0,007	787752,000	46,38
256,00	13,60	14,62	0,01					
258,69	13,69	14,72	0,01					
256,00	12,37	13,30	0,01	30,000	10,750	0,015	450144,000	37,35
239,20	14,64	15,74	0,01					
92,16	14,55	15,64	0,03					
217,60	12,75	13,70	0,01	32,500	12,500	0,018	337608,000	28,18
243,20	12,91	13,88	0,01					
113,92	13,26	14,25	0,03					
204,80	13,06	14,04	0,02	35,000	15,000	0,019	337608,000	25,58
153,60	13,87	14,91	0,02					
166,40	12,83	13,79	0,02					
147,20	13,66	14,69	0,03	37,250	17,250	0,024	225072,000	18,71
286,72	13,07	14,05	0,01					
76,80	13,48	14,49	0,06					
281,82	14,02	15,07	0,02	39,000	19,000	0,027	225072,000	18,96
89,81	13,73	14,76	0,05					
243,24	13,63	14,66	0,02					
231,48	13,23	14,22	0,02	40,875	20,625	0,021	281340,000	17,24
244,34	13,89	14,93	0,02					
270,27	13,92	14,96	0,02					
268,80	13,48	14,49	0,02	43,125	22,125	0,023	393876,000	24,19
279,40	13,39	14,39	0,02					
243,84	13,58	14,60	0,02					
128,00	12,52	13,45	0,04	44,750	23,750	0,037	112536,000	10,50
167,18	13,08	14,06	0,03					
257,20	13,60	14,62	0,02					
217,94	13,45	14,46	0,03	45,000	24,000	0,013	0,000	
256,20	13,86	14,90	0,02					
180,04	13,36	14,36	0,03					
101,60	13,58	14,60	0,06					

Cálculos de Eficiencia Térmica y Eléctrica del Ensayo 3

Nota: El calor útil se calculó cada 15 minutos.

Análisis de Resultados

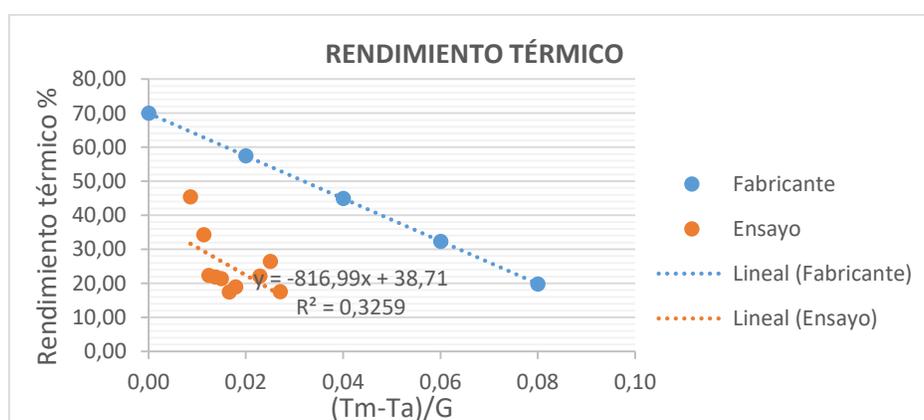
Rendimientos Térmicos Ensayo 1

En las siguientes gráficas se compara la curva de rendimiento proporcionada por el fabricante y la curva de rendimiento obtenida en condiciones de ensayo.

En la Figura 21, se observa el rendimiento térmico del Ensayo 1 del día viernes 10 de septiembre, los puntos en color tomate representan el rendimiento térmico calculado que se encuentran bajo la línea proporcionada por el fabricante (línea azul).

Figura 21

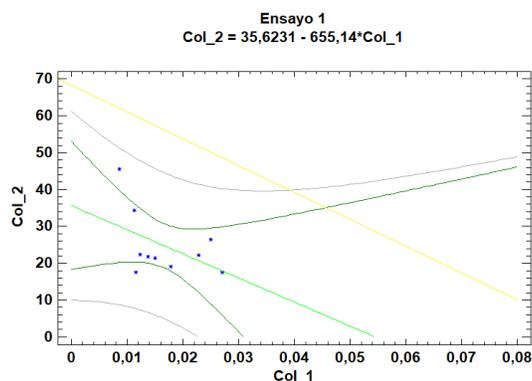
Comparación de Eficiencias Térmicas Ensayo 1.



Nota: Comparación de eficiencias térmicas ensayo 1, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Para el ensayo 1 se obtuvo un rendimiento térmico total de 26,92%, tomando en cuenta 2 horas y media que duró el ensayo.

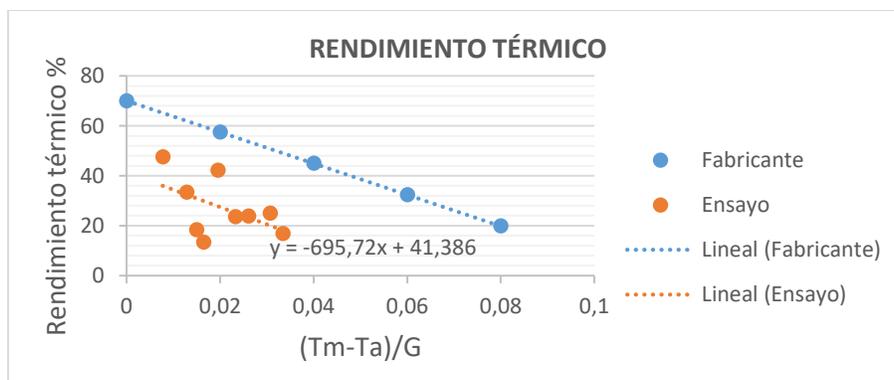
Debido a la dispersión de los puntos de rendimientos calculados se realizó un análisis gráfico de regresión lineal simple, como se observa en la Figura 22, la línea amarilla es el rendimiento indicado por el fabricante, la línea verde es la regresión línea de rendimientos calculados, el espacio entre líneas verdes es el intervalo de confianza 95%, mientras que el espacio entre las líneas grises es el intervalo de predicción.

Figura 22*Regresión lineal simple Ensayo 1 (Rendimiento Térmico)*

Nota: En el Ensayo 1 se tiene dos puntos que están fuera del intervalo de confianza del 95%.

Rendimientos Térmicos Ensayo 2

En la Figura 23, se observa el rendimiento térmico del Ensayo 2 del día sábado 11 septiembre, los puntos en color tomate representan el rendimiento térmico calculado que se encuentran bajo la línea proporcionada por el fabricante (línea azul)

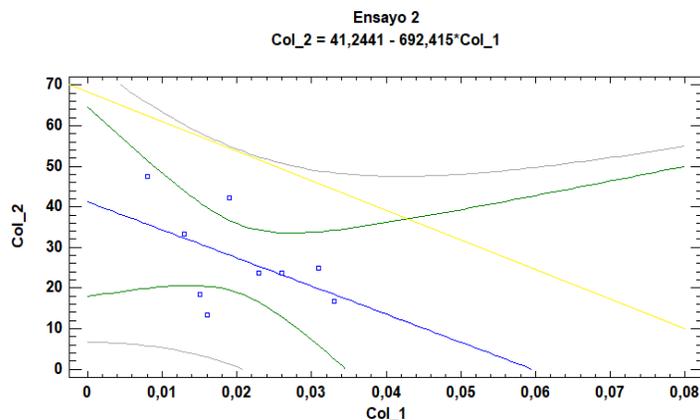
Figura 23*Comparación de Eficiencias Térmicas Ensayo 2.*

Nota: Comparación de eficiencias térmicas Ensayo 2, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Para el ensayo 2 se obtuvo un rendimiento térmico total de 24,4%, tomando en cuenta 2:15 horas que duró el ensayo. En la Figura 24 se observa la regresión lineal de los puntos de rendimiento calculados, donde se observa que 3 puntos no están dentro del intervalo de confianza del 95%.

Figura 24

Regresión lineal simple Ensayo 2 (Rendimiento Térmico)



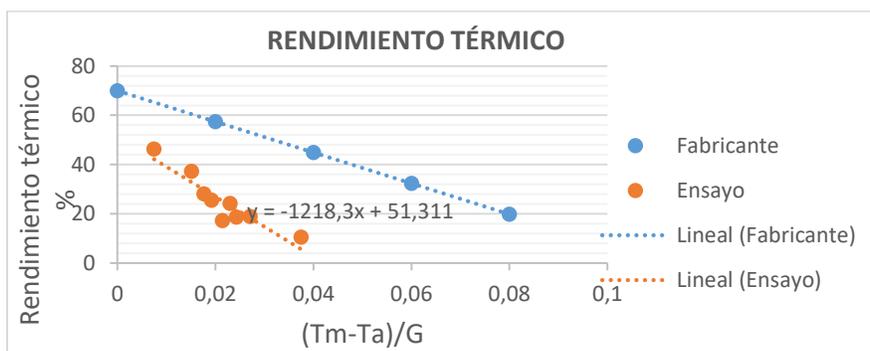
Nota: En el ensayo 2 se tiene tres puntos que están fuera del intervalo de confianza del 95%.

Rendimientos Térmicos Ensayo 3

En la Figura 25, los puntos en color naranja representan los rendimientos térmicos calculados obtenidos en el ensayo del día lunes 13 de septiembre como se observa están debajo de la línea proporcionada por el fabricante (línea azul).

Figura 25

Comparación de Eficiencias Térmicas Ensayo 3.



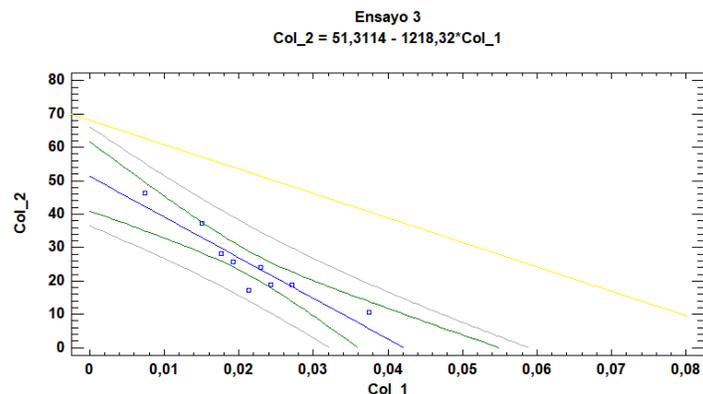
Nota: Comparación de eficiencias térmicas Ensayo 3, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Para el ensayo 3 se obtuvo un rendimiento térmico total de 19%, tomando en cuenta las 2:30 horas que duró el ensayo.

En la Figura 24 se observa la regresión lineal de los puntos de rendimiento calculados para el ensayo 3, donde se observa un punto que no están dentro del intervalo de confianza del 95%.

Figura 26

Regresión lineal simple Ensayo 3 (Rendimiento Térmico)



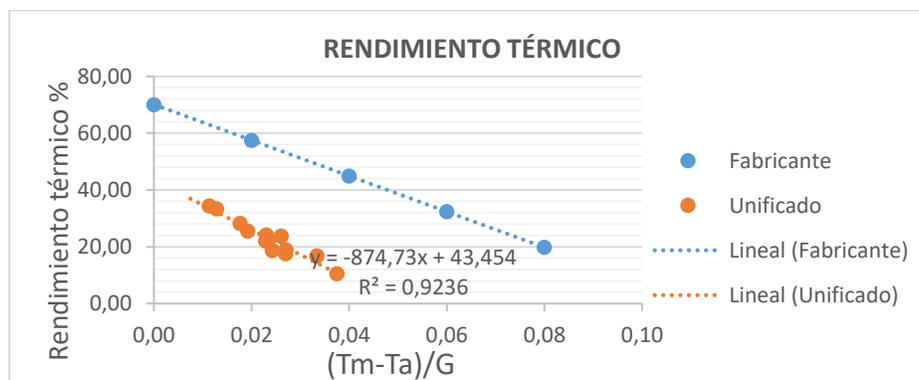
Nota: En el ensayo 3 se tiene un punto que están fuera del intervalo de confianza

Rendimiento Térmico Global

En la Figura 27, los puntos en color tomate representan el rendimiento térmico calculado de acuerdo a los valores obtenidos los 3 días de ensayo, como se observa están debajo de la línea proporcionada por el fabricante (línea azul).

Figura 27

Comparación de Eficiencias Térmicas Unificadas.



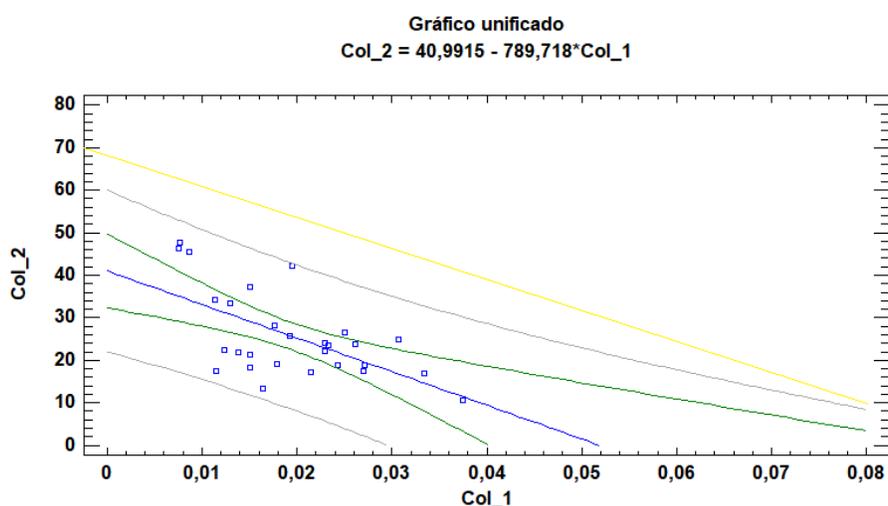
Nota: Comparación de eficiencias térmicas unificadas, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Tomando en cuenta los 3 ensayos, se obtuvo un rendimiento térmico total de 22,2%.

En la Figura 28, se observa el rendimiento total obtenido, dentro del intervalo de predicción se encuentran 15 puntos de rendimiento que no están el intervalo de 95% de confianza por lo cual son valores que no se tomaron en cuenta, eliminando esos valores se ha calculado un rendimiento de 23,01%.

Figura 28

Regresión lineal simple Unificado (Rendimiento Térmico)



Nota: En el rendimiento unificado se tiene 15 puntos que están fuera del intervalo de confianza

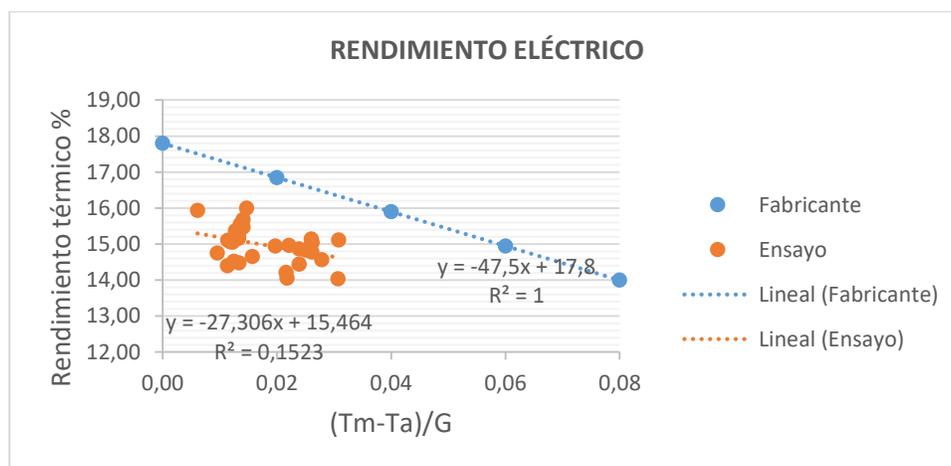
En general, para los cálculos del rendimiento térmico se obtuvo valores por debajo de los valores proporcionados por el fabricante, esto es debido a que en los tres ensayos no se tuvo las condiciones propicias se tuvo días parcialmente nublados, pérdidas térmicas en el tanque y tubería debido a que no estuvieron aisladas, adicional se tuvo errores de exactitud de medición con los termómetros y demás instrumentos utilizados que no son los adecuados para realizar este tipo de mediciones donde se requiere gran precisión, el salto térmico entre mediciones iniciales y finales en cada intervalo podían variar aproximadamente 2-3 °C y el error de medición de termómetros es de +/-1°C por lo cual existe grandes errores en el cálculo de rendimiento.

Rendimientos Eléctricos Ensayo 1

En la Figura 29, los puntos en color naranja representan los rendimientos eléctricos calculados de acuerdo a los valores obtenidos en el ensayo el día viernes 10 de septiembre como se observa están debajo de la línea proporcionada por el fabricante (línea azul).

Figura 29

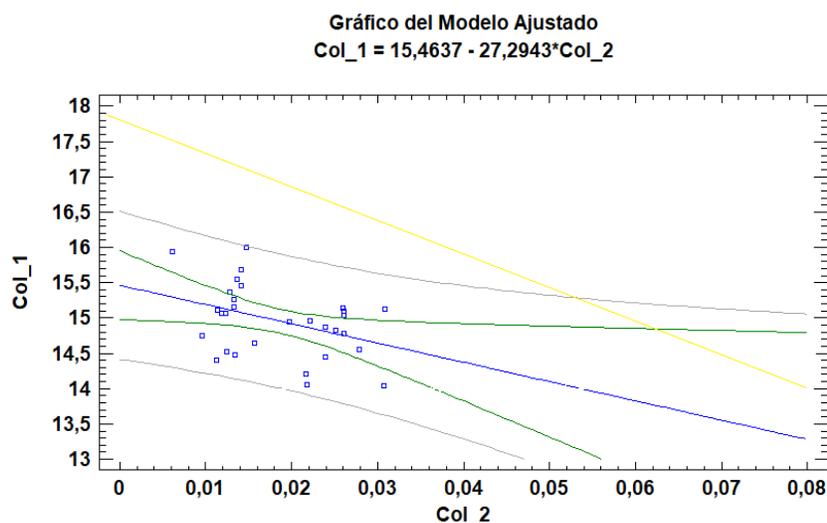
Comparación de Eficiencias Eléctricas Ensayo 1.



Nota: Comparación de eficiencias eléctricas ensayo 1, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Figura 30

Regresión lineal simple Eficiencias Eléctricas Ensayo 1.



Nota: En el rendimiento eléctrico del ensayo 1 se tiene 19 puntos que están fuera del intervalo de confianza

Para el ensayo 1 se obtuvo un rendimiento eléctrico de 13,93%, en la Tabla 13, se observa la diferencia porcentual entre la curva del fabricante y la curva en el ensayo.

Tabla 13

Diferencia entre Rendimientos Eléctricos Ensayo 1

Fabricante	Ensayo	Diferencia
17,58%	13,93%	3,65%

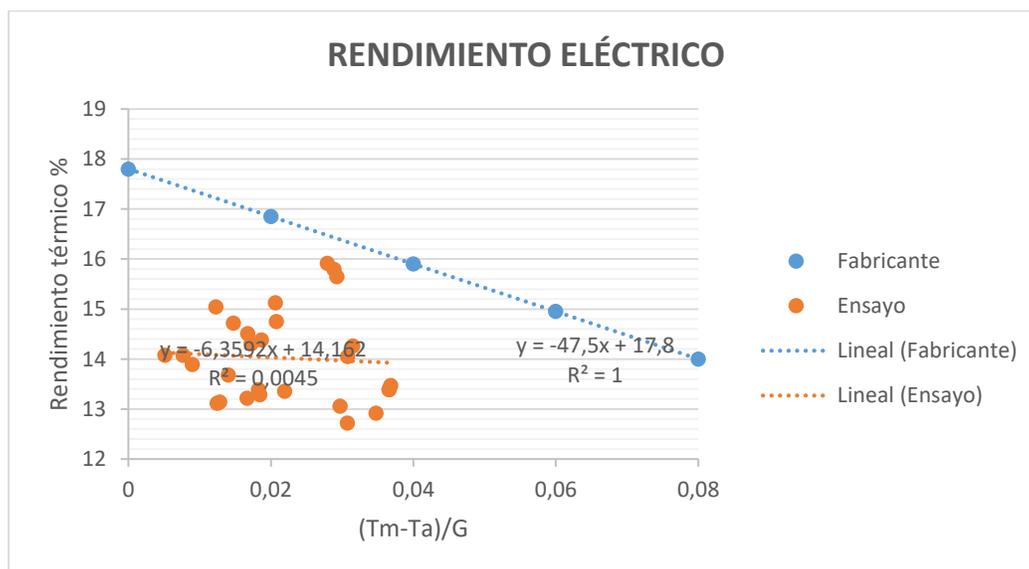
Nota: Se compara con un valor en $((T_m - T_a) / G) = 0,005$

Rendimientos Eléctricos Ensayo 2

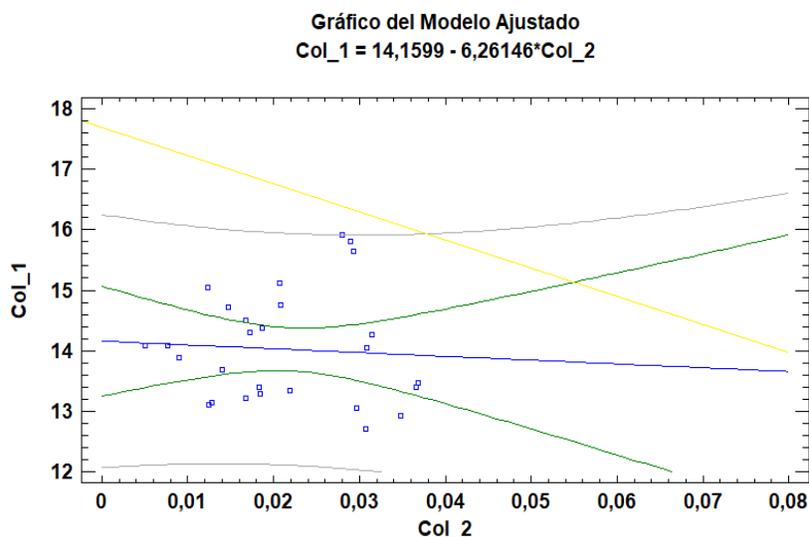
En la Figura 31, los puntos en color tomate representan los rendimientos eléctricos calculados de acuerdo a los valores obtenidos en el ensayo el día sábado 11 de septiembre como se observa están debajo de la línea proporcionada por el fabricante (línea azul).

Figura 31

Regresión lineal simple Eficiencias Eléctricas Ensayo 2.



Nota: Comparación de eficiencias eléctricas ensayo 2, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Figura 32*Comparación de Eficiencias Eléctricas Ensayo 2.*

Nota: En el rendimiento eléctrico del ensayo 2 se tiene 17 puntos que están fuera del intervalo de confianza

Para el ensayo 2 se obtuvo un rendimiento eléctrico de 13,02%, en la Tabla 13, se observa la diferencia porcentual entre la curva del fabricante y la curva en el ensayo.

Tabla 14*Diferencia entre Rendimientos Eléctricos Ensayo 2*

Fabricante	Ensayo	Diferencia
17,40%	13,02%	4,38%

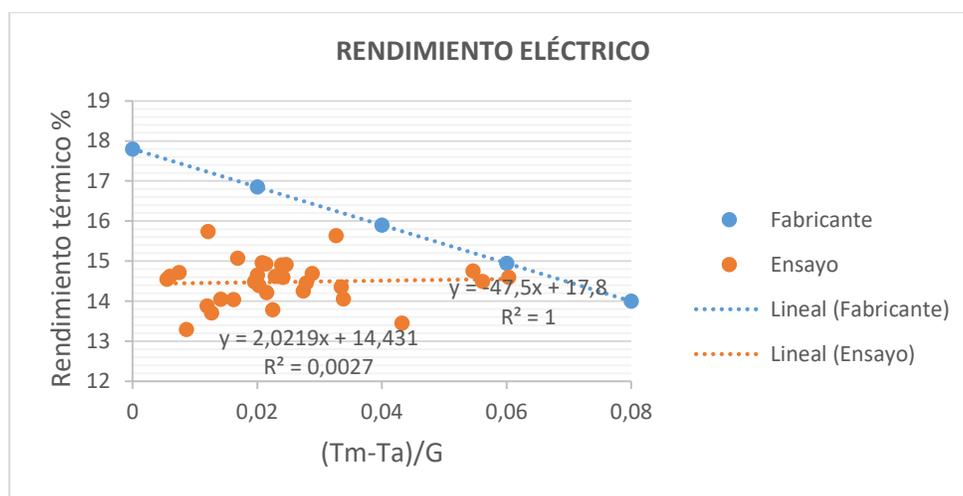
Nota: Diferencia entre rendimientos eléctrico encontrado en ensayos unificados vs rendimiento del fabricante. Se compara con un valor en $((T_m - T_a) / G) = 0,008$

Rendimientos Eléctricos Ensayo 3

En la Figura 33, los puntos en color tomate representan los rendimientos eléctricos calculados de acuerdo a los valores obtenidos en el ensayo el día lunes 13 de septiembre como se observa están debajo de la línea proporcionada por el fabricante (línea azul).

Figura 33

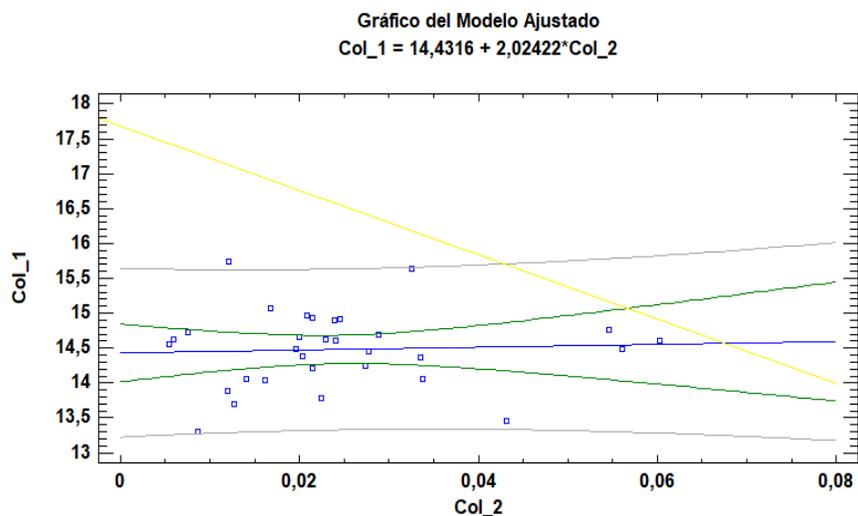
Comparación de Eficiencias Eléctricas Ensayo 3.



Nota: Comparación de eficiencias eléctricas ensayo 3, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Figura 34

Comparación de Eficiencias Eléctricas Ensayo 3



Nota: En el rendimiento eléctrico del ensayo 3 tiene 16 puntos que están fuera del intervalo de confianza y un punto está fuera del intervalo de predicción.

Para el ensayo 3 se obtuvo un rendimiento eléctrico de 12,93%, en la Tabla 15, se observa la diferencia porcentual entre la curva del fabricante y la curva en el ensayo.

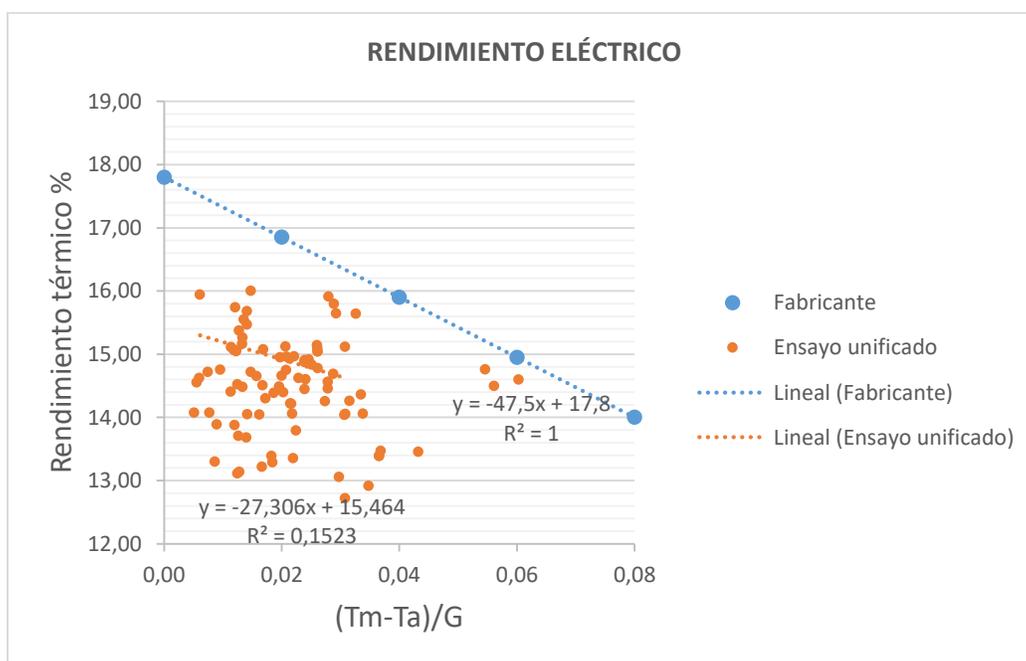
Tabla 15*Diferencia entre Rendimientos Eléctricos Ensayo 3*

Fabricante	Ensayo	Diferencia
17,63 %	12,93%	4,71%

Nota: Diferencia entre rendimientos eléctrico encontrado en ensayos unificados vs rendimiento del fabricante. Se compara con un valor en $((T_m - T_a) / G) = 0,04$

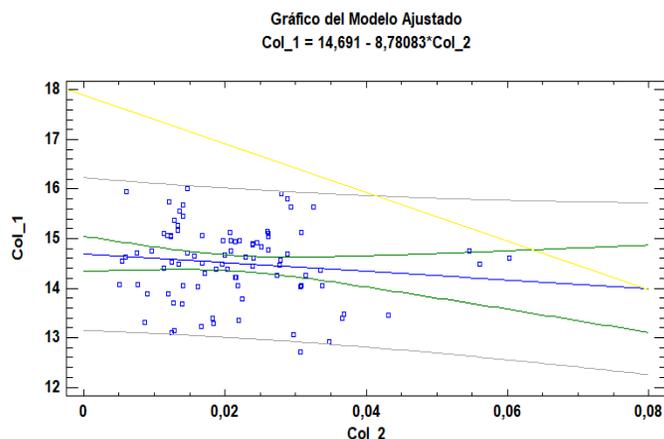
Rendimiento Eléctrico Global

En la Figura 35, los puntos en color tomate representan los rendimientos eléctricos calculados de acuerdo a los valores obtenidos durante todos los ensayos, como se observa están debajo de la línea proporcionada por el fabricante (línea azul).

Figura 35*Comparación de Eficiencias Eléctricas Ensayo Unificado.*

Nota: Comparación de eficiencias eléctricas unificadas, curva de fábrica vs curva de ensayo.

Para el ensayo unificado se obtuvo un rendimiento eléctrico de 12,93%, en la Tabla 13, se observa la diferencia porcentual entre la curva del fabricante y la curva en el ensayo.

Figura 36*Comparación de Eficiencias Eléctricas Ensayos Unificados*

Nota: En el rendimiento eléctrico unificado se tiene 57 puntos que están fuera del intervalo de confianza y un punto está fuera del intervalo de predicción.

Tabla 16*Diferencia entre Rendimientos Eléctricos Ensayo unificado*

Fabricante	Ensayo	Diferencia
17,63 %	12,93%	4,71%

Nota: Diferencia entre rendimientos eléctrico encontrado en ensayos unificados vs rendimiento del fabricante. Se compara con un valor en $((T_m - T_a) / G) = 0,04$.

Debido a las divergencias entre rendimientos térmicos calculados y los proporcionados por el fabricante se realiza una comparación con otras investigaciones que hayan realizado este tipo de ensayos, debido a que no se encuentra información de ensayos al aire libre para paneles PVT de placa plana en condiciones ambientales similares a las de Quito y solo se tiene divergencia en los datos del rendimiento térmico se realiza una comparación con investigaciones que haya realizado ensayos al aire libre con colectores solares de placa plana.

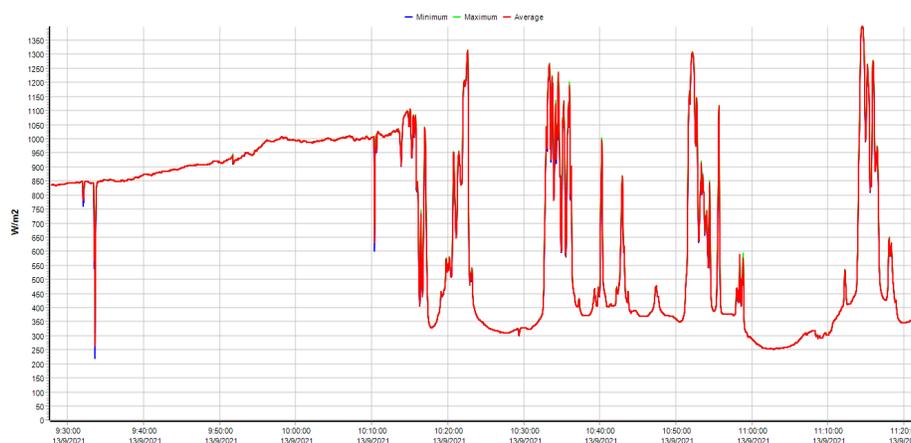
En (Vaca, 2012), se realiza ensayos al aire libre con el fin de conocer el potencial energético en instalación a gran escala de colectores solares en la ciudad de Quito mediante el cálculo de rendimiento térmico, realiza diversos ensayos que en comparación con esta investigación se utiliza

termómetros de precisión superior al 1%, menor incertidumbre estándar $< 0.05K$ y en condiciones de cielo despejado obteniendo valores de rendimiento térmico entre el 50%-70%, por lo cual no se tiene errores de medición de temperatura que estén fuera de norma ni cambios abruptos en los niveles de irradiación que afecta en el cálculo de rendimiento térmico.

Para los ensayos realizados en este documento, se tomó mediciones de irradiación cada 2s que fueron registrados en la aplicación II9 propia del piranómetro, después se exporto a una hoja en Excel por lo que se tuvo centenas de valores picos positivos que como se observa para ejemplo en la Figura 35, se tuvo variaciones desde 1300 W/m^2 hasta 300 W/m^2 , estos valores se sumaron en periodos de 15 minutos y se realizó el cálculo de eficiencia por cada 15 minutos, a diferencia de la investigación realizada en (Vaca, 2012) que tiene un valor casi constante de irradiación en todo el periodo de ensayo modificando sustancialmente el cálculo de rendimiento térmico.

Figura 35

Curva de irradiación.



Nota: Curva obtenida mediante el programa LI19 del piranómetro del día 13 de septiembre 2021

Adicional, la ISO 9806 indica que “la diferencia entre la temperatura de salida del captador de la de entrada” se debe determinar con una incertidumbre estándar de al menos el 0.2 K lo cual no fue posible cumplir en los ensayos.

Conclusiones

- Los ensayos realizados en la ciudad de Quito en las instalaciones de la UISEK demuestran que las prestaciones energéticas eléctricas del panel PVT están por debajo de la línea de rendimiento del fabricante, el rendimiento promedio fue aproximadamente del 13%, se tuvo una diferencia promedio del 4%.
- Comparando los rendimientos térmicos se obtuvo que el rendimiento calculado no se aproxima al rendimiento del fabricante, esto se justifica debido a que se tuvo errores de medición con los instrumentos utilizados que ascienden en ciertos casos al 100%, debido a la falta de instrumentos de alta precisión y exactitud no se pudo comparar porcentualmente los rendimientos. Sin embargo, en la peor condición que fue el día dos, se tuvo bajos niveles de radiación promedio de 350W/m^2 , la temperatura del agua inicial se incrementó aproximadamente al doble en el periodo de dos horas que duró el ensayo, lo cual demuestra que este tipo de paneles presentan favorables prestaciones energéticas en la ciudad de Quito Norte.
- Como se observa en los resultados todos los valores fueron debajo de la línea del fabricante o cercanos a esta, en condición despejadas los días de Ensayo 1 y 3 se demostró experimentalmente que aproximadamente en 2 horas la temperatura inicial del agua se incrementa 3 veces respectivamente, lo cual demuestra que los paneles PVT tienen excelentes prestaciones energéticas en la ciudad de Quito Norte.
- El uso de GLP o electricidad para preparación de ACS a nivel residencial es económico debido a los subsidios, esto desfavorece a la implementación de este tipo de proyectos con energías renovables limpias que tardan en su amortización. El estado debe focalizar los

subsidios y garantizar incentivos para este tipo de proyectos que contribuyan la disminución de CO₂.

- En abril del anterior año en Ecuador se aprobó regulaciones que permiten la implementación de generación distribuida con energías renovables sincronizadas a la red de distribución, esto diversificará el mercado abriendo mayor campo a este tipo de proyectos.

Recomendaciones

- Realizar pruebas al panel solar PVT con instrumentos de alta precisión o en un laboratorio certificado.
- Elaborar un proyecto que financie la estructura óptima para aprovechar de mejor manera las prestaciones energéticas del panel PVT, y pueda realizarse prácticas para estudiantes interesados en el tema.

Referencias Biográficas

- Consejo Nacional de Planificación. (22 de Septiembre de 2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Quito, Ecuador.
- Constitución del Ecuador . (2008). Constitución del Ecuador.
- Diego Vaca, F. O. (2019). Mapa Solar de Ecuador 2019. *SCIENERGY*, 10.
- Encalada, J. P. (2015). Reducción de costos en el calentamiento de agua en Ecuador, a través de la. Santa Elena, La Libertad, Ecuador. Obtenido de file:///C:/Users/Dany/Desktop/2-Texto%20del%20art%C3%ADculo-9-1-10-20151005.pdf
- Fustier/Gray/Gundersen/Hilboldt. (2018). Global Oil Supply . *HSBC Global Research*, 6-9.
- IEA. (2012). *International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org/>
- Instituto de Investigación Geológico y Energético. (Agosto de 2021). Balance Energético Nacional 2020. 16. Obtenido de <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Balance-Energe%CC%81tico-Nacional-2020-Web.pdf>
- ISO 9806. (2017). *ISO 9806:2017*. ISO.
- M.Sc, I. J. (2010). Agua caliente sanitaria de uso doméstico con Energía Solar, una alternativa para la ciudad de Cuenca. *Ingenius*, 57-63. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8359/1/Agua%20caliente%20sanitaria%20de%20uso%20dom%3%a9stico%20con%20energ%3%ada%20solar.pdf>
- Manzano, L. E. (Junio de 2011). Obtenido de Energía Renovable - ECUADOR Santiago: <https://www.slideserve.com/tadita/luis-e-manzano-v-director-nacional-de-energ-a-renovable-ecuador-santiago-junio-2011>
- OLADE. (2019). *Panorama Energético de America Latina y el Caribe*. Obtenido de Panorama Energético de America Latina y el Caribe: <http://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2019/>

Vaca, F. A. (Febrero de 2012). Instalación de colectores solares planos para calentamiento de agua en la facultad de ingeniería mecánica y levantamiento del potencial energético para la instalación a gran escala. Quito, Pichincha, Ecuador.

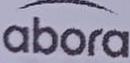
Ziapour, B. M. (2016). PVT type of the two-phase loop mini tube thermosyphon solar water. *Energy Conversion and Management*, 2-3. Recuperado el 23 de 09 de 2021

ANEXO A

Fotografía Panel solar hibrido



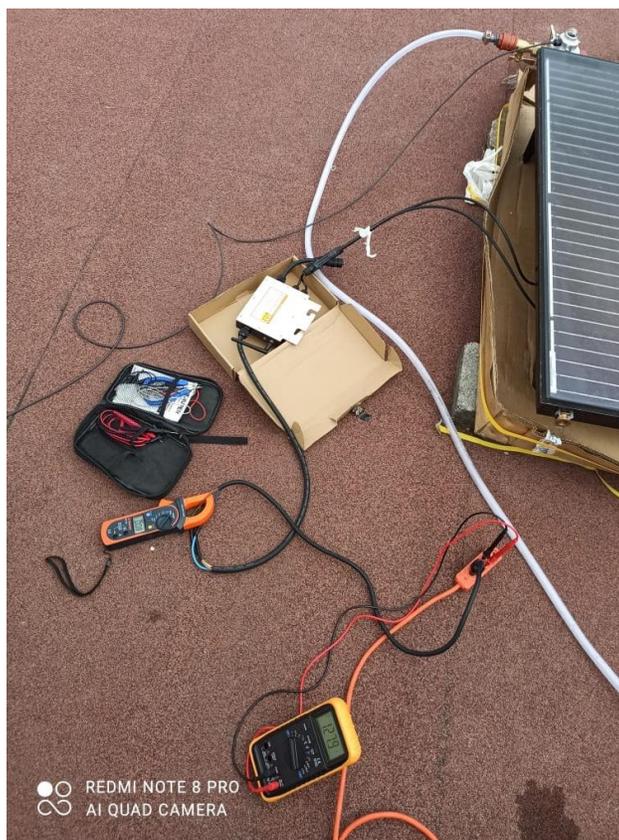
Fotografía Placa de características panel PVT

ESPECIFICACIONES GENERALES			
HÍBRIDO aH72	Año Fabricación: 2020	Area Total: 1.96 m ²	Peso: 56 kg
Dimensiones: 1970 x 995 x (83+22 Caja de conexiones) mm			
ESPECIFICACIONES TÉRMICAS			
Presión Máx. de trabajo: 10 bares.	Vol. captador: 1.78 l	T° de Estancamiento: 152 °C	
Rendimiento óptico: 0.59	Coef. Pérdidas: a1: 3.3 W/m ² k a2: 0.018 W/m ² k ²		
ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS			
Potencia nominal: 350W (0/+5%)	V _{máx} : 1000 V DC	I Inversa Máx: 15 A	Coef. T° Pmp: -0.41%/°C
Célula: Monocristalina	V _{mp} : 39.18 V	Imp: 8.98 A	Coef. T° Voc: -0.33%/°C
Eficiencia del módulo: 18.7%	Voc: 48.82 V	Isc: 9.73 A	Coef. T° Isc: +0.06%/°C
Especificaciones en 1000W/m ² 25°C AM 1.5			
		aH72-APA200698 MADE IN SPAIN CE ⚠	

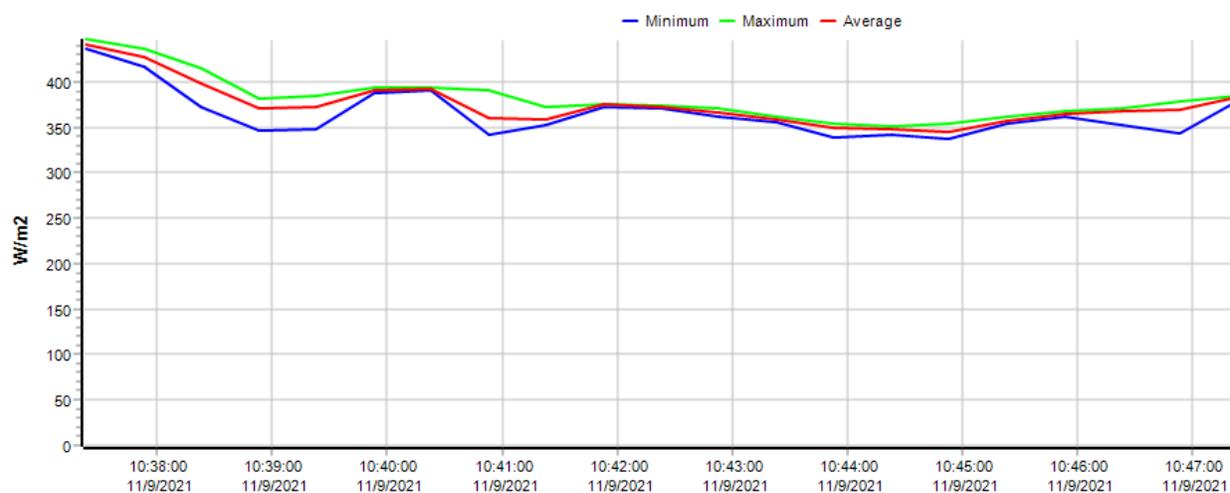
Fotografía Micro inversor



Fotografía de Medición de corrientes y voltajes



Curva de Irradiación obtenida mediante el programa LI19 del piranómetro del día 11 de septiembre 2021



Curva de Irradiación obtenida mediante el programa LI19 del piranómetro del día 13 de septiembre 2021

