

Diseño de dos bancos de prueba para colectores solares de placa plana

Fernando Xavier Ortega Abril^a, Guillermo Isidro Urquiza Acosta^b, Guillermo Enrique Soriano Idrovo^c

^a Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencia de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
fxortega@espol.edu.ec

^b Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencia de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
giurquiz@espol.edu.ec

^c Laboratorio de Ensayos Térmicos y Eficiencia Energética, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
gsorian@espol.edu.ec

Resumen. Se diseñaron dos bancos de pruebas para la determinación de la eficiencia térmica de los colectores solares de placa plana que funcionan con aire o agua como fluido caloportador; este diseño se basó en la norma internacional ANSI/ASHRAE 93, la cual dictamina el procedimiento para la obtención del rendimiento térmico de estos colectores. Las limitaciones para los dos bancos de prueba fueron que no excedan de 3 m² de área de captación y cuya temperatura máxima de trabajo sea 90 °C para agua y 70 °C para aire. Ambos sistemas constan de equipos de adquisición de datos y sensores capaces de determinar parámetros de radiación solar, presión, flujo y temperatura del fluido caloportador, para fines de caracterización de colectores solares en condiciones reales. Se elaboró el procedimiento experimental para la realización de los ensayos que definen los parámetros característicos de los colectores solares evaluados, estos son: determinación de la constante de tiempo, rendimiento térmico y el factor de modificación del ángulo de incidencia solar.

Finalmente, el monto de implementación para el banco de prueba que utiliza agua como fluido caloportador es de 30,020 dólares americanos, en tanto para el que utiliza aire es de 26,670 dólares americanos.

Palabras Clave: rendimiento térmico, colectores solares, ensayos.

1 Introducción

En la actualidad, el Ecuador se encuentra inmerso en un proceso de cambio de la Matriz Energética y Productiva, con la finalidad de reducir la dependencia de los derivados del petróleo, disminuyendo los gastos que conllevan su compra y explotación, y producir energía libre de emisiones nocivas a la capa de ozono, impulsando el desarrollo de los diferentes tipos de obtención de energía no convencionales.

Como consecuencia a este proceso de cambio surgieron dos normas ecuatorianas, la primera tiene como objetivo principal regular el consumo energético en edificaciones, a un límite sostenible, implementando el uso de energías renovables para suministrar parte de la energía eléctrica requerida [1]; la segunda, que se deriva de la anterior,

establece las exigencias que deben tener los colectores solares en sistemas de calentamiento de agua para uso sanitario [2]. Esta norma puede ser utilizada en cualquier otra aplicación, con respecto al literal que concierne al etiquetado de los colectores solares con su información técnica y rendimiento térmico, lo que conlleva a fabricantes nacionales e importadores, a buscar medios nacionales de certificación de dicho rendimiento.

Con dichos antecedentes se espera un aumento en la comercialización de esta tecnología solar, ya sea por manufactura local o importación, y con esto la necesidad de certificación. La ESPOL por medio de sus laboratorios, requiere de la construcción de dos bancos de pruebas para colectores solares de placa plana, a fin de utilizar sus instalaciones como agentes certificadores locales del rendimiento de este tipo de sistemas.

2 Marco teórico

Colectores solares de placa plana. Son dispositivos captadores de energía solar térmica, que poseen una placa de absorción plana, la cual almacena esta energía y la transfiere a un fluido de trabajo. Esta energía térmica obtenida por el proceso antes descrito puede ser utilizada en diferentes aplicaciones que comprenden: calentamiento de agua para uso sanitario, secado de alimentos, calentamiento de agua en piscinas temperadas, entre otras [3]. Los componentes principales que conforman un colector solar de placa plana se los observa en la *Fig. 1*, a continuación.

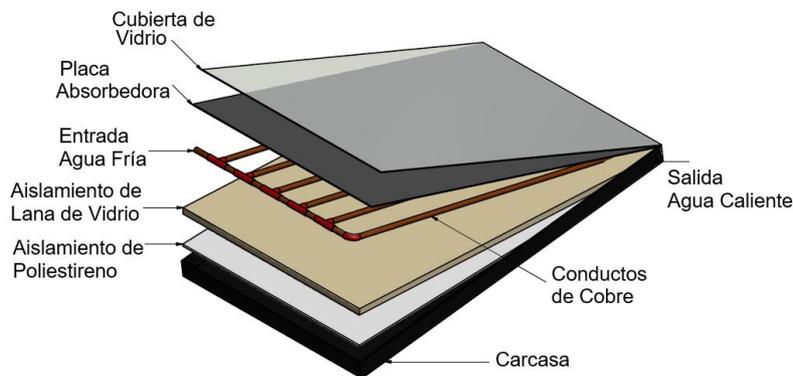


Fig. 1. Esquema de un colector solar de placa plana con los componentes que lo conforman. (Adaptado de: ingemecanica.com)

3 Metodología

La metodología empleada en el proceso de diseño de ambos bancos de prueba, se compone básicamente por tres etapas principales: búsqueda de normativas tanto nacionales como internacionales, relevantes para el desarrollo de los bancos de prueba;

determinación de alternativas de solución y por último desarrollar la ingeniería de detalle de cada uno de los bancos de prueba, con su respectivo análisis de costo para su implementación. A continuación, en la Fig 2, se muestra un diagrama esquemático de la metodología empleada.

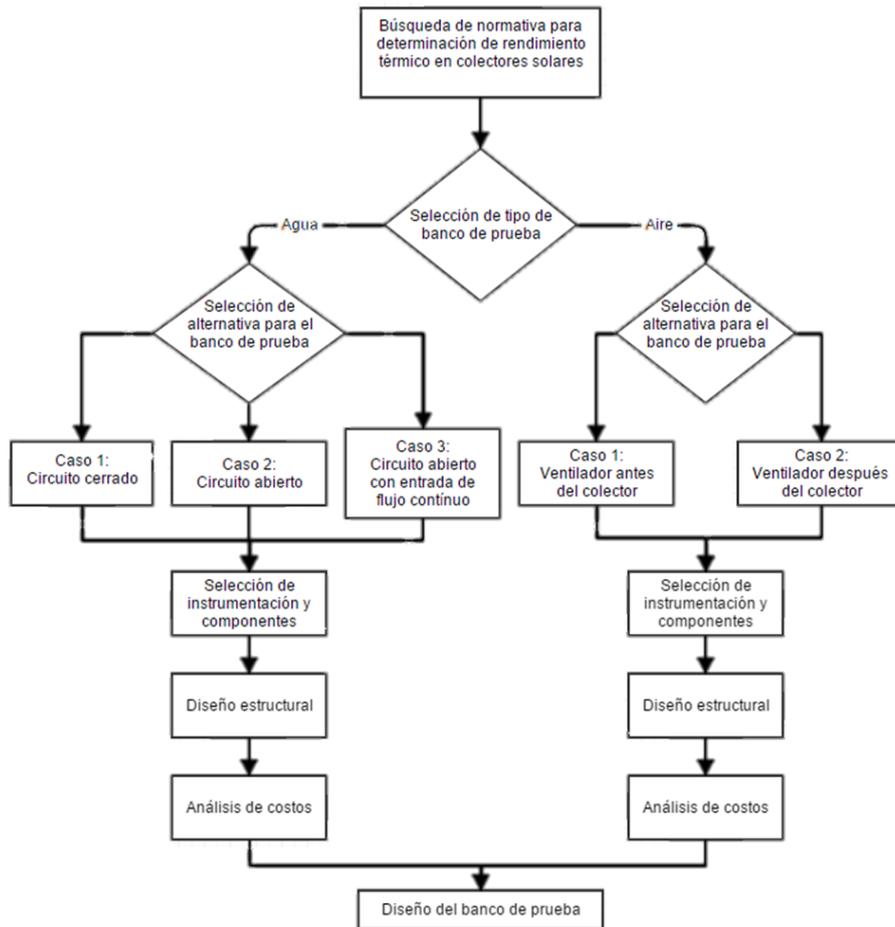


Fig. 2. Diagrama de la metodología de diseño empleada para la elaboración de los bancos de prueba. Las alternativas de solución mostradas para ambos bancos de prueba se fundamentan en la norma internacional ANSI/ASHRAE 93.

3.1 Descripción de alternativas

Con el objetivo de diseñar dos bancos de prueba capaces de determinar el rendimiento térmico de colectores solares de placa plana, se plantearon tres alternativas de solución para el banco de prueba que utiliza agua, y dos alternativas para el banco de prueba que utiliza aire como fluido caloportador. Estas alternativas de solución se basan en la

norma internacional ANSI/ASHRAE 93. A continuación se describe brevemente cada alternativa propuesta para cada banco de prueba.

Banco de prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador (Banco A). Se plantearon tres alternativas de solución: circuito cerrado, circuito abierto y circuito abierto con entrada de flujo continuo, en concordancia con la referencia número [4]. La descripción de cada una de estas se detalla, a continuación, en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Descripción de las características de cada alternativa de solución para el banco de prueba A.

Alternativas	Descripción del sistema
Circuito cerrado	La presión de trabajo de este sistema está dada directamente por la presión que ejerce la bomba de suministro. Posee un tanque de almacenamiento igualmente presurizado. Necesita una conexión externa de agua para propósitos de compensación de fluido en el que caso que llegue a evaporarse.
Circuito abierto	La presión de trabajo del sistema está dada por la energía potencial que contiene la masa de agua depositada en un tanque de almacenamiento elevado. Este sistema posee una bomba, cuya única función es de abastecer de agua al tanque de almacenamiento, debido a que este debe mantener un cabezal constante durante todo el proceso de prueba. No necesita una conexión externa de agua, por lo que puede considerarse como un sistema autónomo.
Circuito abierto con entrada de flujo continuo	Este sistema no presenta recirculación de fluido por lo tanto no posee bomba de suministro ni tanque de almacenamiento, pero si debe mantener una conexión externa de entrada de fluido para poder funcionar.

Banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador (Banco B). Para este banco de prueba, la referencia número [4], proporciona una única configuración (circuito abierto) pero con dos alternativas de solución, las cuales son: colocar el ventilador antes o después del colector. En la próxima sección se analizará cada alternativa en base a criterios de calificación para escoger la opción más óptima.

3.2 Análisis y Selección de Alternativa

Con respecto a la selección de la alternativa más apropiada para cada uno de los bancos de prueba descritos anteriormente, se procedió a enunciar cada uno de los criterios que permitirán analizar a cada alternativa para así poder elegir la mejor opción de solución y descartar las restantes. A continuación se enunciarán los criterios de decisión utilizados, la forma de calificación utilizada y las alternativas que finalmente fueron seleccionadas para diseñar los respectivos bancos de prueba.

Agua como fluido caloportador. Las tres alternativas de solución serán calificadas en base a los siguientes criterios:

- Facilidad de instalación: sencillez que muestra la configuración para poder instalar el sistema.
- Monto de inversión: valor total de la inversión necesaria para implementar el sistema.
- Facilidad de manejo: indica la viabilidad que posee el equipo para ser utilizado en la preparación y durante el ensayo de rendimiento térmico.
- Consumo energético: cantidad de energía necesaria para el funcionamiento del banco de prueba.
- Frecuencia de mantenimiento: recurrencia en la realización de operaciones y cuidados necesarios para conservar el banco de prueba en buen estado.

A continuación, en la *Tabla 2*, se muestra la matriz de ponderación en la que se analiza la importancia relativa de un criterio con respecto a otro, para así asignarle un porcentaje de peso ponderado. En este método se califica con el valor de 1 cuando el criterio “X” tiene mayor importancia que el criterio “Y”, se califica con el valor de 0.5 cuando los dos criterios tienen igual importancia, y se califica con el valor de 0 cuando el criterio “X” tiene menor importancia que el criterio “Y”. Este mismo método fue utilizado para ponderar los criterios de decisión para el banco de prueba B (aire).

Tabla 2. Matriz de ponderación de criterios para el banco de prueba A. Se muestra el porcentaje de importancia que tiene un criterio con respecto a otro, dando como resultado que el criterio con mayor peso para los autores fue el monto de inversión debido a que este sistema debe ser lo más económico posible para poder lograr el préstamo para su implementación.

Matriz de ponderación	Facilidad de instalación	Monto de inversión	Facilidad de manejo	Consumo energético	Frecuencia de mantenimiento	Σ valores +1	Ponderación (%)
Facilidad de instalación		0.0	0.5	1.0	1.0	3.5	24
Monto de inversión	1.0		1.0	1.0	1.0	5.0	33
Facilidad de manejo	0.5	0.0		1.0	0.5	3.0	20
Consumo energético	0.0	0.0	0.0		1.0	2.0	13
Frecuencia de mantenimiento	0.0	0.0	0.5	0.0		1.5	10
Total						15.0	100

Una vez definida la importancia de cada criterio, se procedió a evaluar cada alternativa con base en dichos criterios en una matriz de decisión. Dichas opciones fueron calificadas con puntuaciones entre 20 y 100, siendo 20 muy malo, 40 malo, 60 regular, 80 bueno y 100 muy bueno, estas calificaciones se observan en la columna C en la *Tabla 3*, a continuación.

Tabla 3. Matriz de decisión para el banco de prueba A. Se observa que la alternativa más viable a cumplir con las necesidades planteadas, es la configuración con circuito abierto.

Criterio	Peso ponderado (%)	Circuito cerrado		Circuito abierto		Circuito abierto continuo	
		C	Valor	C	Valor	C	Valor
Facilidad de instalación	24	40	9.6	100	24.0	60	14.4
Monto de inversión	33	60	19.8	80	26.4	100	33.0
Facilidad de manejo	20	40	8.0	100	20.0	80	16.0
Consumo energético	13	60	7.8	100	13.0	60	7.8
Frecuencia de mantenimiento	10	60	6.0	60	6.0	80	8.0
Puntuación sobre 100			51.2		89.4		79.2

Aire como fluido caloportador. De igual manera como se realizó con el banco de prueba A, se evaluarán las dos alternativas de solución en base a los siguientes criterios:

- Cumplimiento de la vida útil del ventilador: cantidad de tiempo que el ventilador va a operar correctamente con respecto a su vida útil nominal.
- Frecuencia de mantenimiento para el ventilador: recurrencia en la realización de operaciones y cuidados necesarios para mantener el ventilador en buen estado.
- Costo del ventilador: monto necesario a invertir en la compra del componente, de acuerdo a las especificaciones necesarias para cada alternativa de solución.

A continuación en la *Tabla 4*, se muestra la matriz de ponderación que determina la importancia que los autores le dan a cada criterio de decisión.

Tabla 4. Matriz de ponderación de criterios para el banco de prueba B.

Matriz de ponderación	Cumplimiento de la vida útil del ventilador	Frecuencia de mantenimiento para el ventilador	Costo del ventilador	\sum valores +1	Ponderación (%)
Cumplimiento de la vida útil del ventilador		0.0	1.0	2.0	33
Frecuencia de mantenimiento para el ventilador	1.0		1.0	3.0	50
Costo del ventilador	0.0	0.0		1.0	17
Total				6.0	100

Se observa que para el banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador, el criterio de decisión más importante fue la frecuencia de mantenimiento del ventilador debido a que, por ser la única parte en movimiento y además la que permite al sistema funcionar, mientras mayor sea el número de paradas

para realizarle mantenimiento, menor será el tiempo en el que se encuentre operable el banco de prueba y por lo tanto mayor será el tiempo en que la prueba pueda entregar resultados de rendimiento térmico.

Una vez obtenidos los porcentajes de ponderación de cada criterio, se procedió a evaluarlos con cada alternativa; cabe recalcar que se utilizó el mismo método de calificación usado para el banco de prueba A.

Para el criterio del cumplimiento de la vida útil del ventilador, se evaluó a la opción de colocar el ventilador a la entrada del colector con una ponderación de “bueno”, al contrario de “regular” para su contrincante. Esto se debe a que en el segundo caso el ventilador transportará aire ya calentado por el colector, sometándolo a esfuerzos térmicos para los cuales no está diseñado, disminuyendo su vida útil. También, cabe señalar que someter al ventilador a esfuerzos inesperados, trae como consecuencia un aumento en la frecuencia de realización de mantenimiento para su óptimo estado operativo. Consecuentemente, su valoración es “malo” para la segunda alternativa, al contrario de la primera que tendrá una frecuencia normal de realización de mantenimiento. En cuanto al criterio de costo del ventilador, en la segunda alternativa se asume un escenario en el que se decide cambiar a un ventilador diseñado para trabajar a altas temperaturas, dando lugar a un aumento en el monto de dinero a utilizarse para la adecuación.

Por las razones antes descritas, se decidió utilizar la opción de colocar el ventilador a la entrada del colector, como se puede observar, a continuación, en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Matriz de decisión para el banco de prueba B. Se observa que la alternativa óptima es la de colocar el ventilador a la entrada del colector.

Criterio	Peso ponderado (%)	Ventilador a la entrada del colector		Ventilador a la salida del colector	
		Calificación	Valor	Calificación	Valor
Cumplimiento de la vida útil del ventilador	33	80	26.4	60	19.8
Frecuencia de mantenimiento del ventilador	50	100	50.0	40	20
Costo del ventilador	17	80	13.6	60	10.2
Puntuación sobre 100			90.0	50.0	

3.3 Diseño de forma

Agua como fluido caloportador. La configuración elegida como solución para el diseño del banco de prueba A, fue la de circuito abierto. A continuación, en la *Fig 3*, se muestra el diseño de forma de dicha configuración, y en la *Tabla 5*, se detallan los instrumentos y los componentes que conforman el sistema, con su respectiva nomenclatura tomada de la norma ANSI/ISA S5.1 [5]

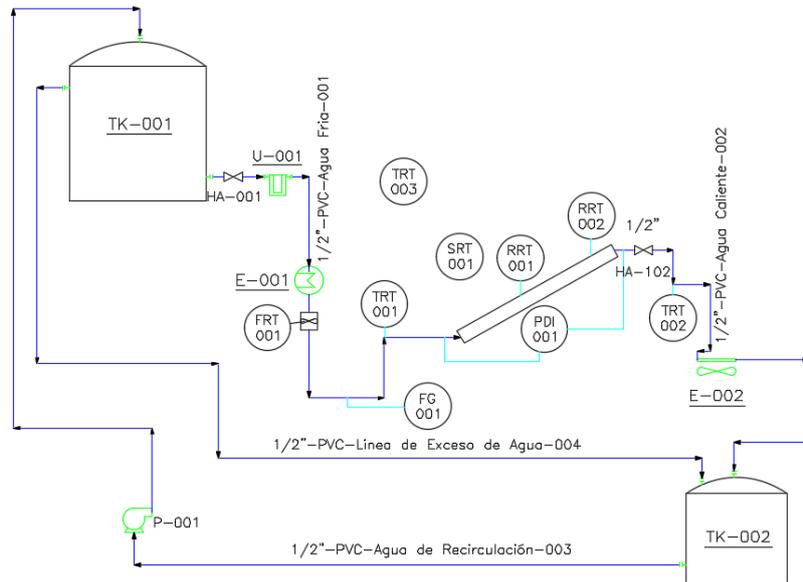


Fig 3. Diseño de forma para el banco de prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador. En la figura se observan los diferentes equipos a utilizarse como también los sensores necesarios para el funcionamiento del sistema. (Adaptado de la norma ANSI/ASHRAE 93)

Tabla 5. Descripción de componentes e instrumentación, con su nomenclatura.

Código	Descripción
TK-001	Tanque elevado de cabezal constante con capacidad de 1,100 litros
TK-002	Tanque reservorio con capacidad de 1,300 litros
HA-001	Válvula esférica
HA-002	Válvula de globo
U-001	Filtro de agua
E-001	Calentador de agua con capacidad de 13 [kW]
E-002	Intercambiador de calor con capacidad de 13 [kW]
P-001	Bomba periférica de 0.5 HP
FG-001	Segmento de manguera
TRT-001	Medidor de temperatura a la entrada del colector
TRT-002	Medidor de temperatura a la salida del colector
Continúa en la siguiente página	
Continúa de la página anterior	
TRT-003	Medidor de temperatura ambiente
RRT-001	Piranómetro
RRT-002	Piranómetro con sombra
FRT-001	Medidor de caudal
SRT-001	Anemómetro
PDI-001	Medidor diferencial de presión

Aire como fluido caloportador. La alternativa elegida para el diseño de este banco de prueba (Banco B) fue la opción de colocar el ventilador a la entrada del colector. A continuación, en la Fig 4, se muestra el diseño de forma de dicho sistema, y adicionalmente en la Tabla 6, se detallan los instrumentos y componentes necesarios para la implementación de este banco de prueba, con su respectiva nomenclatura.

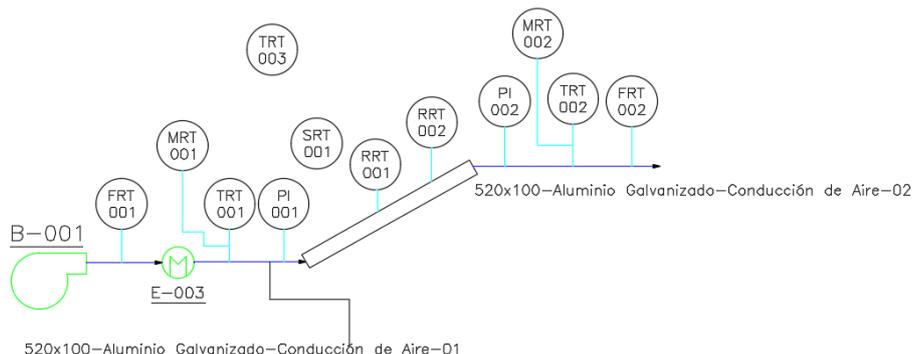


Fig 4. Diseño de forma para el banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador. Se muestran los ductos de aire necesarios para la conducción del aire, los diferentes sensores necesarios para la determinación del rendimiento térmico y varios componentes del sistema. (Adaptado de la norma ANSI/ASHRAE 93).

Tabla 6. Descripción de componentes e instrumentos, con su nomenclatura.

Código	Descripción
B-001	Ventilador centrífugo
E-003	Calentador eléctrico de potencia variable de 4 [kW]
FRT-001	Medidor de caudal a la entrada del colector
FRT-002	Medidor de caudal a la salida del colector
MRT-001	Medidor de humedad en el ducto de entrada
MRT-002	Medidor de humedad en el ducto de salida
PI-001	Medidor de presión en el ducto de entrada
PI-002	Medidor de presión en el ducto de salida
TRT-001	Medidor de temperatura a la entrada del colector
TRT-002	Medidor de temperatura a la salida del colector
TRT-003	Medidor de temperatura ambiente
Continúa en la siguiente página	
Continúa de la página anterior	
RRT-001	Piranómetro
RRT-002	Piranómetro con sombra
SRT-001	Anemómetro

3.4 Restricciones del colector solar que será sometido a prueba

Con el propósito de delimitar el alcance del diseño, el colector solar debe cumplir con ciertas características establecidas por la norma y los autores, las cuales se especifican a continuación:

- Máxima área bruta del colector: 3 m^2
- Máxima temperatura de trabajo a la salida del colector: para agua 90°C y para aire 70°C .
- El colector debe tener un solo acceso y una sola apertura de salida del fluido.
- El colector debe poseer cristal o vidrio en el área de absorción de energía solar.
- La unidad de almacenamiento térmico no debe ser parte integral del colector.
- El fluido de transferencia de calor no puede tener cambio de fase dentro del colector.

3.5 Selección de componentes

La selección de los componentes se la analiza, a continuación, para cada banco de prueba.

Agua como fluido caloportador. Los componentes del Banco A son los siguientes: tanques de almacenamiento (tanque elevado y tanque reservorio), bomba de agua, pre calentador, intercambiador de calor, filtro.

Con la finalidad de obtener la capacidad requerida de almacenamiento de agua se utiliza el siguiente principio: “El calor que gana el agua durante el transcurso del ensayo no debe variar la temperatura del agua en un valor mayor a 0.5°C ”; esto se lo establece considerando el mayor valor registrado de insolación en la zona, dicho valor se lo obtiene a partir de los valores registrados por la estación meteorológica del Laboratorio de Fuentes Renovables de Energía ESPOL (Lab. FREE) desde enero 2009 hasta diciembre 2011, como se muestran en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Radiación global solar [W/m^2] en Guayaquil. Obtenida por medio de la estación meteorológica del Lab. FREE

Mes	Año		
	2009	2010	2011
Enero	1,304	1,306	1,325
Febrero	1,400	1,400	1,357
Marzo	1,387	1,389	1,303
Abril	1,372	1,400	1,400
Mayo	1,281	1,288	1,217
Junio	1,220	1,141	1,117
Julio	1,208	1,233	1,214
Agosto	1,249	1,322	1,356
Septiembre	1,245	1,338	1,253
Octubre	1,400	1,327	1,365
Noviembre	1,290	1,354	1,233
Diciembre	1,175	1,269	1,212

El calor que gana el agua se basa en la *Ecuación (1)* donde se conoce el valor de c_p , ya que es una propiedad del agua y tiene un valor de $4.18 \frac{KJ}{Kg \times K}$ [6], Q es la calor que gana el sistema gracias al sol, el valor de la diferencia de temperatura es 0.5 y m sería la masa de agua requerida.

$$Q = mc_p \Delta T . \quad (1)$$

Con el máximo valor de la insolación en la ciudad de Guayaquil, se estima el valor de la energía (E) que llega al sistema durante el tiempo que dura el ensayo, aproximadamente es 20 minutos [4]. Tomando en consideración el valor de la radiación solar (R), la potencia de la energía solar incidente en el colector (P), el tiempo de duración de la prueba (t) y que el área máxima (A_g) establecida para el colector solar es de $3 m^2$, se obtiene:

$$P = R \times A_g . \quad (2)$$

$$E = P \times t . \quad (3)$$

Finalmente se estima que la energía que gana el sistema se convierte en calor y de esa manera utilizando la *Ecuación (1)* se obtiene la masa de agua y con dicho valor se estima la cantidad de agua en litros.

El sistema posee dos reservorios, uno de ellos provee la presión del sistema, éste es el tanque elevado, la altura a la cual se lo debe colocar debe vencer la fricción de la tubería, las pérdidas de presión en los instrumentos, además de la diferencia de presión entre la salida y entrada del colector, este último valor se lo estima calculando la presión que ejercería una columna de agua con la diferencia de altura entre la entrada y salida del colector. La altura (h) se encuentra usando geometría básica de triángulos; se relaciona y se obtiene con la *Ecuación (4)*; Siendo H el largo del soporte y θ_1 el ángulo de inclinación del colector.

$$h = \text{sen}(\theta_1) * H . \quad (4)$$

Es necesario tener todos estos datos ya que para la presión a vencer está dada por la *Ecuación (5)* la que se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli; donde P_1 es la presión a vencer, ρ es la densidad del agua, g es la gravedad.

$$P_1 = \rho g h . \quad (5)$$

Mientras la presión del sistema (P_2) también se la obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli y se encuentra expresada en la *Ecuación (6)*.

$$P_2 = \rho g h_2 . \quad (6)$$

Donde h_2 establece la altura mínima a la cual se debe colocar el tanque de almacenamiento elevado para que venza la presión P_1 .

Bomba de agua. Este equipo es utilizado para poder llevar el agua desde el tanque reservorio al tanque elevado por lo tanto solo debe vencer la presión del sistema (P_2) además debe mantener el caudal (Q_a). La norma ANSI/ASHRAE 93 nos indica el valor del flujo másico que debe poseer el sistema, considerando que la tubería utilizada por el sistema será de $\frac{1}{2}$ " se determina que el flujo másico debe ser de $0.02 \frac{kg}{s}$ por cada metro cuadrado de área bruta de colector (A_g), expresado en la Ecuación (7), pero debido a que los instrumentos de medición trabajan en función del caudal se plantea la Ecuación (8).

$$\dot{m} = \left(0.02 \frac{Kg}{s \times m^2} \right) \times A_g . \quad (7)$$

$$Q_a = \frac{\dot{m}}{\rho} . \quad (8)$$

Pre calentador de agua e intercambiador de calor. La función del pre calentador como su nombre lo indica es calentar el agua antes de su ingreso al colector solar pero su incremento no es arbitrario, éste debe ser conforme lo indica la norma ANSI/ASHRAE 93, para efectos de diseño se tomará el máximo valor que es el 90% de la diferencia de temperaturas (ΔT_{co}) entre la temperatura ambiente y la temperatura máxima a la cual puede llegar el agua luego de pasar por el colector, esta última temperatura se encuentra establecida por el fabricante del colector; todos estos valores se los utiliza en la Ecuación (9) para poder obtener la potencia máxima (P_c) necesaria que debe proporcionar el pre calentador.

$$P_c = \dot{m} c_p \Delta T_{co} . \quad (9)$$

El intercambiador de calor que se encuentra a la salida del colector debe tener la capacidad de remover la misma cantidad de calor suministrada por el pre calentador, es decir debe tener la misma potencia.

Filtro de agua. Existen varios procesos por medio de los cuales se puede filtrar el agua entre los principales podemos nombrar: filtrado, osmosis inversa y radiación UV. Dado que el agua a tratar no será para consumo humano se considera que como mejor opción al filtrado pero la norma ANSI/ASHRAE 93 establece que el filtrado debe ser mayor o igual a 200 micras.

Aire como fluido caloportador. Los componentes necesarios para el banco B son los siguientes: ducto de entrada y salida del colector, pre calentador de aire y equipo de succión de aire hacia el colector.

Ductos de aire. La norma ANSI/ASHRAE 93 dictamina que el área transversal del ducto a elegir para la conducción del aire, debe ser igual al área transversal de la entrada o salida del colector solar, cualquiera que sea menor. En estos ductos irán las estaciones de medición de presión, temperatura y flujo de aire, a una distancia definida por la norma de la entrada y salida del colector solar.

Equipo para la succión de aire. Se debe elegir un ventilador que tenga la capacidad de suministrar la cantidad requerida de aire a la presión manométrica necesaria, esto se lo observa en la ficha técnica del ventilador. En cuanto al caudal que necesita suministrar el equipo, la norma ANSI/ASHRAE 93 recomienda un valor máximo, pero este caudal está en función del área bruta del colector que será sometido a las pruebas. Adicionalmente, la norma establece como única restricción que la presión manométrica mínima a la salida del colector debe ser de 124 Pa.

Pre calentador de aire. De manera similar a lo establecido para el banco A, también el agua debe ingresar al colector a diferentes temperaturas; esto puede ser realizado incluyendo una resistencia eléctrica en el ducto de conducción de aire. La ecuación que gobierna la transferencia de calor hacia un fluido se la enuncia en la *Ecuación (10)*:

$$P_a = \dot{m}c_{pa}\Delta T_{co} . \quad (10)$$

Dicho lo anterior, P_a es la potencia necesaria que debe entregar la resistencia eléctrica al fluido para obtener el aumento de temperatura necesario. De igual modo como se realiza para el cálculo del pre calentador de agua, el incremento máximo de temperatura que debe adquirir el fluido es el 90% de la diferencia entre la temperatura máxima de trabajo del colector solar y la temperatura ambiente. Debido a que la temperatura máxima de trabajo varía de colector en colector, se escoge un delta máximo de temperatura igual a 40°C, en concordancia con los trabajos de Nzaboniman [7] y Umogbai [8]. El flujo másico de diseño es determinado acorde al caudal determinado en la sección “*Equipo para la succión de aire*” antes mencionada, asumiendo un valor constante de densidad del aire de $1.1416 \frac{kg}{m^3}$ [9], a la temperatura ambiente de Guayaquil. De mismo modo, el valor del calor específico del aire se asume constante como $1.007 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ [9], a la misma temperatura ambiente.

3.6 Condiciones de prueba

La norma internacional ANSI/ASHRAE 93 especifica ciertos parámetros que deben ser cumplidos para que la prueba sea válida. Dichos requerimientos aplican para ambos bancos de prueba y se los muestra a continuación en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Requerimientos para la realización de las pruebas para determinación de rendimiento térmico según norma ANSI/ASHRAE 93.

Parámetro		Valor
Irradiancia Solar		$> 800 \frac{W}{m^2}$
Variación Máxima de la Irradiancia Solar ¹		$\pm 32 \frac{W}{m^2}$
Irradiancia Solar Difusa ²		$< 20\%$
Temperatura Ambiente		$< 30 \text{ }^\circ\text{C}$
Velocidad de Viento ³		$2 - 4 \frac{m}{s}$
Razón de flujo fluido caloportador	Agua	$0.02 \frac{kg}{s}$ por cada metro cuadrado de área bruta de colector
	Aire ⁴	$0.01 \frac{m^3}{s}$ por cada metro cuadrado de área bruta de colector
Razón de fuga de aire		$< 0.5\%$ del flujo recomendado por el fabricante del colector o 0.5 cfm, cualquiera que sea mayor, a una presión de 249 Pa (1.0 pulg. de agua)
¹ La irradiancia solar no debe variar más que el valor dado por duraciones de 10 minutos o dos constantes de tiempo, cualquiera que sea mayor, antes y durante el periodo de muestreo. ² La razón entre la irradiancia solar difusa promedio y la irradiancia solar hemisférica total, incidentes en el colector, debe ser menor a este valor.		
Continúa en la siguiente página		
Continúa de la página anterior		
³ Debe permanecer esta velocidad de viento por la duración de cualquier periodo de prueba; antes de comenzar un periodo de prueba debe permanecer esta velocidad de viento por 30 minutos como mínimo o dos constantes de tiempo, cualquiera que sea mayor. ⁴ Para el caso de los colectores que utilizan aire, la eficiencia depende mucho de la razón de flujo, por lo tanto se recomienda realizar una segunda secuencia de prueba con una razón de flujo de $0.03 \frac{m^3}{s}$ por cada metro cuadrado de área bruta de colector.		

4 Resultados

4.1 Selección de instrumentos y componentes

Los instrumentos a utilizar varían según el tipo de banco de prueba debido a que los instrumentos han sido creados para medir un elemento en especial, ya sea agua o aire. Pero en general se utiliza la misma cantidad de instrumentos. Entre ellos podemos indicar los sensores solares, de presión, de temperatura, de velocidad del viento, de flujo y el sistema de adquisición de datos como se muestra en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Instrumentos utilizados en los bancos de prueba.

Instrumento	Banco A/Banco B
Sensor solar	Piranómetro
Sensor de Temperatura	Termocuplas tipo T
Sensor de presión	Manómetro tipo Bourdon
Sensor de velocidad del viento	Anemómetro
Sensor de flujo	Caudalímetro (Banco A) Anemómetro (Banco B)
Sistema de Adquisición de Datos	DAQ

En el sistema de adquisición de datos existe una pequeña variación entre los bancos de prueba y esta consiste que el banco de prueba B posee requiere una mayor cantidad de módulos debido a que se necesita monitorear muchos más parámetros con respecto al banco de prueba A.

Los componentes como se describió con anterioridad depende del banco de prueba por lo tanto en las Tablas 10 y 11 se muestran cuáles fueron los escogidos.

Tabla 10. Componentes seleccionados para el Banco A

Componente	Banco A
Tanque Elevado	Capacidad: 1100 litros
Tanque Reservorio	Capacidad: 1300 litros
Bomba periférica	Marca: Pedrollo Modelo: PKm60 Potencia: 0.5 HP
Filtro	Filtro estándar de polipropileno Marca: Rotoplas
Pre calentador eléctrico	Marca: ECOSMART Modelo: ECO11 Potencia: 13.6 KW

Tabla 11. Componentes seleccionados para el Banco B

Componente	Banco B
Ductos	Hechos de aluminio galvanizado A= 520X100 (mm ²)
Ventilador centrífugo	Marca: Soler & Palau Modelo: CMB2 140/059 Potencia: 0.155 KW
Pre calentador eléctrico	Potencia: 4 KW (Regulable)

Para la selección de los componentes del Banco B solo fue necesario el cálculo de la caída de presión dentro del colector y en sus ductos como se muestra en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Caída de presión, por segmentos, en los ductos de conducción del aire

Segmento	Δp (Pa)
Ducto de entrada (1 m longitud)	0.38
Ducto de salida (1 m longitud)	0.38
Colector solar	0.01
Entrada brusca al colector	0.04
Salida brusca del colector	0.08
Total	0.89 Pa

Mientras que para el Banco A fue necesario la utilización de la *Ecuación 1* hasta la *Ecuación 9* obteniendo los datos que se muestran en la *Tabla 13*.

Tabla 13. Datos calculados previo a la selección de los equipos del Banco A

	Valor
Potencia Solar, <i>Ecuación (2)</i>	$P = 4200 J/s$
Energía Solar, <i>Ecuación (3)</i>	$E = 5.04 \times 10^3 kJ$
Diferencia de Altura, <i>Ecuación (4)</i>	$h = 0.026 m$
Presión mínima, <i>Ecuación (5)</i>	$P_1 = 256.45 Pa$
Flujo másico, <i>Ecuación (7)</i>	$\dot{m} = 0.06 kg/s$
Caudal del sistema, <i>Ecuación (8)</i>	$Q_a = 60 cm^3/s = 0.95 GPM$
Potencia máxima del pre calentador, <i>Ecuación (9)</i>	$P_c = 7.52 kW$

4.2 Análisis de costo

Para poder realizar un correcto análisis del valor de inversión para la implementación de los bancos de prueba se dividieron en costos directos y costos indirectos.

Costos Directos. Estos costos comprenden varios aspectos como materiales, equipos, instrumentación, instalación y montaje.

Con la finalidad de lograr una mejor comprensión de los costos involucrados se realizó una subdivisión de los costos para cada uno de los bancos de prueba de la siguiente manera:

- Costo de instrumentación: comprende los valores de todos los instrumentos.
- Costo de componentes: comprende el valor de los equipos y componentes como tanques, bomba, entre otros.
- Costo de construcción: dentro de este rubro se encuentran todos los consumibles y mano de obra para poder implementar los bancos de prueba.
- Costo de montaje: comprende todos los accesorios necesarios para la implementación del banco de prueba, tales como tuberías, perfiles estructurales, entre otros.

Costos Indirectos. Son los valores que pueden identificarse como parte de la producción, pero que de igual manera contribuyen al costo total del proyecto. En el presente proyecto se consideran como costos indirectos los siguientes rubros:

- Costo de ingeniería: este rubro considera el valor por la planificación, desarrollo, implementación y solución de problemas del proyecto, incluyendo su diseño.
- Costo de transporte: para la compra de algunos materiales y componentes es necesario transportarlos desde el sitio de compra hasta la ESPOL.
- Imprevistos: puesto que algunas situaciones pueden quedar fuera del planteamiento del diseñador, es recomendable asumir el 2% de los costos directos.

En las *Tablas 13 y 14* se muestran los costos directos e indirectos del banco de prueba para colectores solares que poseen agua como fluido caloportador y del banco de prueba para colectores que utilicen aire como fluido caloportador respectivamente.

Tabla 13. Costos del banco de prueba A.

Costos Directos	
Instrumentación	\$ 21,380.88
Componentes	\$ 5,001.86
Construcción	\$ 200.00
Montaje	\$ 293.79
Costos Indirectos	
Ingeniería	\$ 2,500.00
Transporte	\$ 100.00
Imprevistos	\$ 537.53
Valor Total	\$ 30,014.06

Tabla 14. Costos del banco de prueba B.

Costos Directos	
Instrumentación	\$ 23,200.88
Componentes	\$ 340.00
Construcción	\$ 200.00
Montaje	\$ 429.74
Costos Indirectos	
Ingeniería	\$ 2,000.00
Transporte	\$ 100.00
Imprevistos	\$ 483.41
Valor Total	\$ 26,754.03

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se diseñaron dos bancos de prueba capaces de determinar el rendimiento térmico en colectores solares de placa plana, que utilicen como fluido de transferencia de calor agua o aire. Estos diseños fueron elaborados en concordancia con los requerimientos expuestos en la norma ANSI/ASHRAE 93, NTE INEN 2507, entre otras. En particular, la norma internacional ANSI/ASHRAE 93 propone alternativas de implementación de bancos de prueba para ambos casos de colectores solares, de las cuales se eligió la opción de ciclo abierto para colectores que utilicen agua como fluido caloportador y la opción de situar el ventilador de manera que inyecte aire hacia el colector para aquellos que utilicen aire como fluido caloportador. Estas alternativas resultaron elegidas por cumplir los criterios de calificación, evaluados en una matriz de decisión que se muestra en la sección 3.2 del presente documento.

El monto total del proyecto es de \$56,780, desglosándose en \$30,020 por el banco de prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador, y \$26,760 por el banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador. El tiempo estimado de construcción de los dos bancos de prueba es de 91 días.

5.2 Recomendaciones

La regulación de la temperatura del fluido a la entrada del colector es de vital importancia, debido a que todo cálculo de rendimiento del mismo, es directamente proporcional a dicha temperatura por lo que debe mantenerse relativamente constante. En caso de no ser posible la regulación efectiva de este factor, se recomienda agregar un segundo pre calentador justo antes de la entrada al colector.

La estructura de soporte para el tanque elevado puede ser sustituida por una elaborada de mampostería ya que esta reduciría los costos de inversión del banco de prueba para colectores solares que trabajen con agua como fluido caloportador.

En el caso de no obtener los valores requeridos de velocidad de viento, se recomienda instalar un ventilador que genere flujo de aire paralelo a la superficie del colector y mantenga una velocidad de viento de 3.5 ± 0.5 [m/s], dictaminado por la norma ANSI/ASHRAE 93 [4].

6 Agradecimientos

Este trabajo forma parte del trabajo de graduación Diseño de dos bancos de prueba para colectores solares de placa plana.

Los autores desean expresar su agradecimiento a Dios, sus seres queridos, y al LABET por su apoyo con la elaboración de este artículo.

7 Referencias

1. INEN. NTE INEN 2506: Eficiencia Energética en Edificaciones. Requisitos. (2009).
2. INEN. NTE INEN 2507: Rendimiento Térmico de Colectores Solares en Sistemas de Calentamiento de Agua para Uso Sanitario. Requisitos. (2009).
3. Kalogirou, S. Solar Thermal Collectors and Applications. Progress in Energy and Combustion Science, p. 231-295. (2004).
4. ANSI/ASHRAE. Standard 93: Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. Atlanta, GA, USA. (2013).
5. ANSI/ISA. S5.1: Instrumentation Symbols and Identification. NC, USA. (1992).
6. Cengel, Y., Boles, M. Termodinámica. Mc Graw Hill. México DF. (2012).
7. Nzabonimana, C. Testing and efficiency improvement of a solar air collector. National University of Rwanda, Butaro. (1983).
8. Umogbai, V., Iorter, H. Design, construction and performance evaluation of a passive solar dryer for maize cobs. African Journal of Food Science and Technology, pág 110-115. (2013).
9. Incropera, F. Apéndice A: Propiedades termofísicas de la materia. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta ed., pág 839. Prentice Hall. México. (1999).