

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

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

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Fernando Xavier Ortega Abril

Guillermo Isidro Urquiza Acosta

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todo lo que me ha brindado, a mi madre por ser el pilar fundamental de mi vida y a mi familia por su apoyo incondicional.

Xavier Ortega Abril

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios, por permitirme llegar a este punto de mi vida, a mis padres y mi familia por haberme apoyado durante el trayecto de toda mi carrera universitaria, y a mis amigos por estar siempre presentes.

Guillermo Urquizo Acosta

DECLARACIÓN EXPRESA

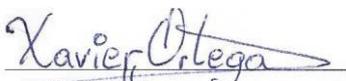
“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Fernando Xavier Ortega Abril

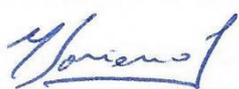
Guillermo Isidro Urquizo Acosta

Ph.D. Guillermo Soriano Idrovo

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.


Fernando Ortega


Guillermo Urquizo


Ph.D. Guillermo Soriano

RESUMEN

En el marco del cambio en la Matriz Energética y Productiva del país, se busca evitar el uso de los derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica. Como consecuencia, se procura incrementar la producción y comercialización de equipos energéticamente eficientes con la finalidad de optimizar el uso de electricidad o prescindir de ella. El Ministerio de Electricidad y Energías Renovables en conjunto con el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), promueven un plan de normalización para distintos tipos de equipos, enlistando los requisitos de eficiencia energética que deben cumplir y su correspondiente etiquetado, certificando dicha eficiencia. La Escuela Superior Politécnica del Litoral, a través de sus laboratorios, se ha propuesto constituirse como agente certificador de la eficiencia de dichos equipos, entre los que constan los colectores solares de placa plana. Como resultado, se impulsa el diseño de dos bancos de prueba capaces de determinar el rendimiento térmico de estos colectores que utilicen agua o aire como fluido caloportador, con el fin de brindar al cliente o fabricante una alternativa de certificación a nivel local y con esto proponer mejoras en el sistema.

El diseño de los dos bancos de prueba fue fundamentado en la norma internacional ANSI/ASHRAE 93, que propone alternativas para la implementación de bancos de prueba dependiendo del tipo de colector que se vaya a probar. En ambos casos, cada alternativa fue evaluada con respecto a criterios de calificación expuestos en una matriz de decisión para elegir la opción más óptima.

Se diseñaron dos bancos de prueba para colectores solares que no excedan de 3 m^2 de área bruta y cuya temperatura máxima de trabajo del fluido sea $90 \text{ }^\circ\text{C}$ para agua y $70 \text{ }^\circ\text{C}$ para aire. En relación con el banco de prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador, se optó por la configuración del banco denominada de ciclo abierto, que funciona con un tanque elevado, proporcionando al agua la energía potencial necesaria para que esta pueda recorrer todo el sistema. En cuanto al banco de prueba para colectores solares que utilizan aire como fluido de transferencia de calor, se eligió la opción de colocar el ventilador a la entrada del colector, de manera que inyecte aire hacia él. 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.

El monto de implementación para el banco de prueba que utiliza agua como fluido caloportador es de 30,020 dólares americanos, mientras que para el que usa aire es de 26,670 dólares americanos. Este valor incluye infraestructura, componentes, instrumentación, sistema de adquisición de datos y mano de obra. Simultáneamente, se planteó el cronograma de montaje de estos bancos, puesto que se espera poder construirlos en un futuro cercano.

Finalmente, 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.

Palabras Clave: rendimiento térmico, colectores solares, ensayos.

ABSTRACT

Within a change in the energetic and productive matrix of Ecuador, the use of petroleum derivatives, for obtaining electricity, is trying to be avoided. As a result, efforts are made to increase the production and marketing of energy efficient equipment in order to optimize their use of electricity or avoid it. The Ministerio de Electricidad y Energías Renovables in conjunction with the Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), promotes a standardization plan for different types of equipment, listing energy efficiency requirements to be met and their corresponding labeling, certifying such efficiency. The Escuela Superior Politécnica del Litoral, through its laboratories, has proposed to settle as a certifying agent of the efficiency of such equipment, including flat plate solar collectors. In consequence, it is encourage the design of two test benches, capable of determining the thermal efficiency of solar collectors that use air or water, as heat transfer fluid, in order to provide the customer or manufacturer an alternative of local certification and thereby propose improvements in the system.

The design of the two test benches was based on the international standard ANSI/ASHRAE 93, it proposed alternatives for the implementation of test benches depending on the collector to be tested. In both cases, each alternative was evaluated based on qualifying criteria in a decision matrix, to choose the most advantageous option.

Two test benches, were designed, for solar collectors that do not exceed 3 m² of gross area and which maximum operating temperature for the heat transfer fluid be: 90 °C for water and 70 °C for air. In relation to the test bench for solar collectors that use air as heat transfer fluid, the chosen configuration was of open loop which works with an elevated tank providing potential energy to the water, so it can traverse the entire system. As for the test bench for solar collectors that use air as heat transfer fluid, the alternative of placing the fan on the inlet of the collector was the chosen option. Both systems consist of a data acquisition equipment and sensors capable of determining parameters such as solar radiation, pressure, flow and temperature of the heat transfer fluid, for collector characterization purposes on real life conditions.

The implementation of the test bench for solar collectors that use water as heat transfer fluid has a total cost of 30,020 U.S. dollars, and for the other test bench is 26,760 U.S. dollars, this amounts includes infrastructure, components, instrumentation, data acquisition system and workforce. Simultaneously, it is outlined a schedule for mounting both systems, given the possibility of doing that in a near future.

Finally, an experimental procedure was elaborated for each test that will be performed. This test are for determining characteristic parameters that defines the solar collectors tested, which are: time constant, thermal performance and incident angle modifier.

Keywords: thermal performance, solar collectors, tests.

INDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XVIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Definición del Problema	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Específicos.....	2
1.4. Marco Teórico	3
1.4.1. Colectores solares.....	3
1.4.2. Tipos de colectores solares	3
1.4.2.1. Colectores solares concentradores	4
1.4.2.2. Colectores solares no concentradores	5
1.4.3. Energía solar en el Ecuador	6
1.4.4. Aplicaciones de colectores solares de placa plana.....	7
1.4.5. Normas aplicables al diseño de los bancos de prueba	7
1.4.6. Alcance de la norma ANSI/ASHRAE 93:2010	9
CAPÍTULO 2	11
2. METODOLOGÍA DE DISEÑO	11
2.1. Selección de alternativas	12
2.1.1. Descripción de alternativas.....	12
2.1.1.1. Agua como fluido caloportador.....	12

2.1.1.2. Aire como fluido caloportador	15
2.1.2. Matriz de ponderación	16
2.1.2.1. Agua como fluido caloportador	17
2.1.2.2. Aire como fluido caloportador	18
2.1.3. Matriz de decisión	19
2.1.3.1. Agua como fluido caloportador	19
2.1.3.2. Aire como fluido caloportador	21
2.2. Diseño de forma	22
2.2.1. Agua como fluido caloportador	22
2.2.2. Aire como fluido caloportador	24
2.3. Selección de instrumentos y componentes	25
2.3.1. Selección de instrumentos	25
2.3.1.1. Sensores solares	26
2.3.1.2. Sensores de temperatura	27
2.3.1.3. Sensor de velocidad del viento	28
2.3.1.4. Sensor de flujo	28
2.3.1.5. Sensor de presión	29
2.3.1.6. Sensor de humedad	30
2.3.1.7. Sistema de adquisición de datos (DAQ)	30
2.3.2. Selección de componentes	31
2.3.2.1. Agua como fluido caloportador	31
2.3.2.2. Aire como fluido caloportador	36
CAPÍTULO 3	41
3. RESULTADOS	41
3.1. Selección de instrumentos	43
3.1.1. Sensor de radiación solar	44

3.1.2. Sensor velocidad de viento	45
3.1.3. Sensor de flujo.....	45
3.1.4. Sensor de presión	46
3.1.5. Sistema de adquisición de datos (DAQ)	47
3.2. Selección de componentes	49
3.2.1. Agua como fluido caloportador	49
3.2.1.1. Bomba de agua.....	50
3.2.1.2. Filtro estándar de agua	51
3.2.1.3. Tanques de almacenamiento de agua	52
3.2.1.4. Pre calentador de agua	53
3.2.2. Aire como fluido caloportador	55
3.2.2.1. Ducto de conducción de aire	55
3.2.2.2. Equipo para la succión de aire	55
3.2.2.3. Pre calentador de aire	56
3.2.2.4. Aparato para la medición de fuga de aire	57
3.3. Metodología experimental	57
3.3.1. Generalidades del procedimiento experimental	57
3.3.1.1. Restricciones del colector solar que será sometido a prueba	57
3.3.1.2. Condiciones de prueba	58
3.3.1.3. Preparación para el día de ensayo.....	59
3.3.1.4. Periodo de prueba.....	59
3.3.1.5. Elección de temperatura del fluido a la entrada del colector.....	60
3.3.1.6. Cantidad de puntos de datos.....	60
3.3.1.7. Fuga de aire del banco de prueba para colectores solares que utilizan aire como fluido caloportador	61
3.3.2. Procedimiento experimental	61
3.3.2.1. Preparación de los bancos de prueba	62

3.3.2.2. Determinación de parámetros fundamentales del colector	62
3.4. Análisis de costos	68
3.4.1. Costos directos	69
3.4.2. Costos indirectos	72
3.4.3. Costos totales	73
3.5. Construcción de los bancos de prueba	74
3.5.1. Instalación de sensores solares	76
3.5.2. Instalación de los sensores de temperatura	76
3.5.2.1. Sensores de temperatura en el Banco A	76
3.5.2.2. Sensores de temperatura en el Banco B	77
3.5.3. Instalación de sensores para velocidad el viento	78
3.5.4. Instalación de sensor de flujo	78
3.5.5. Instalación del sensor de presión	78
3.5.5.1. Sensores de presión en el Banco A	78
3.5.5.2. Sensores de presión en el Banco B	79
3.5.6. Sensor de humedad	79
3.6. Cronograma de montaje	79
CAPÍTULO 4	84
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	84
4.1. Conclusiones	85
4.2. Recomendaciones	86
BIBLIOGRAFÍA	88
APÉNDICES	90

ABREVIATURAS

ACS	Agua Caliente Sanitaria
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Estándares)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado)
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
Banco A	Banco de prueba para colectores solares de placa plana que utilizan agua como fluido de transferencia de calor
Banco B	Banco de prueba para colectores solares de placa plana que utilizan aire como fluido de transferencia de calor
CONELEC	Consejo Nacional de Electricidad
<i>cm</i>	Centímetro
<i>cfm</i>	Cubic feet per minute (Pies cúbicos por minuto)
DAQ 1	Data Acquisition System (Sistema de adquisición de datos) para el banco de prueba de colectores solares que utilizan agua como fluido de transferencia de calor
DAQ 2	Data Acquisition System (Sistema de adquisición de datos) para el banco de prueba de colectores solares que utilizan aire como fluido de transferencia de calor
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
<i>GPM</i>	Galones por minutos
°C	Grados Celsius
<i>Hz</i>	Hertz
ISA	International Society of Automation (Sociedad Internacional de Automatización)
ISO	International Standards Organization (Organización Internacional para la Normalización)
<i>J</i>	Joule

<i>kg</i>	Kilogramo
<i>kJ</i>	Kilo Joule
<i>kPa</i>	Kilo Pascal
<i>kW</i>	Kilo Watt
Lab. FREE	Laboratorio de Fuentes Renovables de Energía ESPOL
<i>lbm</i>	Libras-masa
<i>psi</i>	Libras por pulgada cuadrada
<i>psig</i>	Libras por pulgada cuadrada manométrica
<i>l</i>	Litro
<i>máx.</i>	Máxima
<i>m</i>	Metro
<i>μm</i>	Micrómetro
<i>μV</i>	Microvoltios
<i>mm</i>	Milímetros
<i>mV</i>	Milivoltios
MEER	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables
<i>nm</i>	Nanómetro
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
<i>Pa</i>	Pascal
<i>pulg</i>	Pulgada
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>s</i>	Segundo
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
RTD	Resistance Temperature Detector (Termómetro de Resistencia)
<i>W</i>	Vatio

SIMBOLOGÍA

h	Altura a la cual debe estar situada la parte superior del colector (m)
H	Altura máxima del colector (m)
B	Ancho máximo del colector (m)
β	Razón entre el diámetro del agujero de la placa orificio y el diámetro del ducto.
θ_l	Ángulo de latitud solar (<i>grados</i>)
θ	Ángulo de incidencia entre los rayos solares directos y la normal de la superficie del colector solar (<i>grados</i>)
A_r	Área absorbente del colector solar (m^2)
A_g	Área bruta del colector solar (m^2)
A_a	Área de apertura del colector solar (m^2)
A_2	Área transversal del colector solar que utiliza aire como fluido caloportador (m^2)
A_1	Área transversal del ducto de conducción de aire (m^2)
Δp	Caída de presión a través del ducto, colector, placa orificio
C	Coeficiente de descarga de la placa orificio
c_p	Calor específico del fluido de transferencia de calor a presión constante ($kJ/(kg * ^\circ C)$)
Q	Cantidad de calor que adquiere el agua durante un día de trabajo (J)
Q_a	Caudal de diseño para el banco de prueba que utiliza agua como fluido caloportador (m^3/s)
f	Coeficiente de fricción entre el fluido y el ducto
U_L	Coeficiente de pérdida de transferencia de calor del colector solar ($W/(m^2 * ^\circ C)$)
ρ	Densidad del agua (kg/m^3)
ρ_a	Densidad del aire (kg/m^3)
d	Diámetro de la placa orificio (<i>pulg</i>)
D_h	Diámetro hidráulico o diámetro equivalente (m)
\dot{m}	Flujo másico (lbm/s)
η_r	Eficiencia térmica basada en el área absorbente del colector solar

η_g	Eficiencia térmica basada en el área bruta del colector solar
$\eta_{g,K}$	Eficiencia térmica obtenida por el método para determinación de factor de modificación de ángulo de incidencia, basada en el área bruta del colector solar
E	Energía solar incidente en el colector (J)
$K_{\alpha\tau}$	Factor de modificación del ángulo de incidencia para un colector solar
h_m	Factor de pérdida de carga debido a entradas o salidas bruscas (m)
h_f	Factor de pérdida de carga debido a la fricción (m)
F_R	Factor de remoción de calor del colector solar
\dot{m}_e	Flujo másico de aire a la salida del colector (kg/s)
\dot{m}_i	Flujo másico de aire a la entrada del colector (kg/s)
\dot{m}	Flujo másico del fluido de transferencia de calor, agua o aire (kg/s)
ΔT_{co}	Incremento máximo de temperatura que adquiere el aire en el colector que utiliza aire como fluido caloportador ($^{\circ}C$)
G_d	Irradiancia solar difusa incidente sobre el plano del área de apertura del colector solar (W/m^2)
G_t	Irradiancia solar global incidente sobre el plano del área de apertura del colector solar (W/m^2)
L	Longitud del ducto o colector (m)
m	Masa de agua necesaria para que no exista evaporación (kg)
$t_{f,m}$	Máxima temperatura de operación para el colector solar, recomendada por el fabricante ($^{\circ}C$)
P	Potencia de la energía solar incidente en el colector (W)
P_c	Potencia máxima del pre calentador de agua (W)
P_a	Potencia máxima del pre calentador de aire (W)
P_1	Presión a la entrada del colector (Pa)
P_2	Presión a la salida del colector (Pa)
$(\tau\alpha)_e$	Producto de transmitancia-absorbancia efectiva
$(\tau\alpha)_{e,n}$	Producto de transmitancia-absorbancia efectiva para incidencias normales al colector
R	Radiación solar incidente en el colector (W/m^2)
ϵ	Rugosidad del material que conduce al aire (m)

t_a	Temperatura del ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
$t_{f,i}$	Temperatura del fluido que entra al colector solar ($^{\circ}\text{C}$)
$t_{f,e}$	Temperatura del fluido que sale del colector solar ($^{\circ}\text{C}$)
$t_{f,e,ss}$	Temperatura del fluido a la salida del colector, en estado estable ($^{\circ}\text{C}$)
$t_{f,e,T}$	Temperatura del fluido a la salida del colector, en un tiempo T ($^{\circ}\text{C}$)
u	Velocidad del viento (m/s)
ν_a	Viscosidad del aire (m^2/s)
V	Volumen de agua necesario para el sistema del banco de prueba para colectores solares que utilizan agua como fluido caloportador (m^3)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de funcionamiento de un colector concentrador.....	5
Figura 1.2. Esquema de un tubo al vacío utilizado en colectores solares	6
Figura 1.3. Elementos que componen un colector solar de placa plana	6
Figura 2.1: Metodología de diseño para la elaboración de los bancos de prueba para colectores solares.....	11
Figura 2.2. Esquema de banco de prueba para agua con circuito cerrado	13
Figura 2.3. Esquema de banco de prueba para agua con circuito abierto	14
Figura 2.4. Esquema de banco de prueba para agua con circuito abierto y entrada continua de líquido	15
Figura 2.5. Esquema banco de prueba para colectores solares que usan aire como fluido caloportador	16
Figura 2.6. Diseño de forma del sistema para el banco de prueba para colectores solares que utilizan agua como fluido de transferencia de calor.	23
Figura 2.7: Diseño de forma del sistema para el banco de prueba para colectores solares que utilizan aire como fluido de transferencia de calor	24
Figura 2.8: Esquema de balance de energía del sistema.	32
Figura 2.9: Esquema del aparato a utilizarse para la medición de fugas de aire en colectores que usan aire.....	39
Figura 3.1: Colector solar que utiliza aire como fluido de transferencia de calor, ubicado a las afueras del Lab. FREE	41
Figura 3.2: Colector solar que utiliza agua como fluido de transferencia de calor, ubicado a las afueras del Lab. FREE.....	42
Figura 3.3: Piranómetro CMP11	44
Figura 3.4: Anemómetro RNRG 40C	45
Figura 3.5: Caudalímetro de turbina	46
Figura 3.6: Manómetro tipo Bourdon	47
Figura 3.7: Módulo NI 9219	48
Figura 3.8: NI 9972.....	48
Figura 3.9: Chasis del DAQ 1	49
Figura 3.10: Chasis del DAQ 2	49
Figura 3.11: Bomba periférica.....	51

Figura 3.12: Filtro estándar de agua.....	52
Figura 3.13: Tanque de 1100 litros.....	53
Figura 3.14: Tanque de 1300 litros.....	53
Figura 3.15: Calentador ECO 11.....	54
Figura 3.16: Ventilador centrífugo CMB2 140/059.....	56
Figura 3.17: Aparato para la medición de fuga de aire.....	57
Figura 3.18: Ejemplo de curva de fuga de aire.....	68
Figura 3.19: Mapa de ESPOL.....	75
Figura 3.20: Método para asegurar mezclado de líquidos.....	77
Figura 3.21: Representación esquemática de conexión de termocuplas.....	78
Figura 3.22: Representación esquemática de la medición de presión en los ductos de aire.....	79
Figura 3.23: Cronograma de montaje para el Banco A.....	81
Figura 3.24: Cronograma de montaje para el Banco B.....	83
Figura A.0.1: Coeficientes de pérdida de carga en entradas de ductos o tuberías ...	94
Figura A.0.2: Curva característica del ventilador CMB 2 140/059.....	95
Figura A.0.3: Curva característica de la bomba PKm60.....	95
Figura B.0.4. Elementos que componen un colector solar de placa plana.....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Subdivisión de tipos de colectores según diferentes criterios.....	3
Tabla 2.1. Matriz de ponderación de criterios para banco de prueba para agua.....	18
Tabla 2.2. Matriz de ponderación de criterios para banco de prueba para aire.....	19
Tabla 2.3. Matriz de decisión para selección de mejor alternativa para el banco de prueba para agua.....	21
Tabla 2.4. Matriz de decisión para selección de mejor alternativa para el banco de prueba para aire.....	22
Tabla 2.5: Descripción de códigos basados en ANSI/ISA S5.1.....	23
Tabla 2.6: Descripción de códigos basados en ANSI/ISA S5.1.....	24
Tabla 2.7. Requerimientos de la instrumentación necesaria para ambos bancos de prueba.....	25
Tabla 2.8: Radiación global solar [W/m ²] en Guayaquil.....	32
Tabla 3.1: Especificaciones del colector de aire.....	42
Tabla 3.2. Instrumentación seleccionada para el banco de prueba.....	43
Tabla 3.3: Especificaciones técnicas del piranómetro CMP 11.....	44
Tabla 3.4: Especificaciones técnicas del anemómetro RNRG 40C.....	45
Tabla 3.5: Especificaciones técnicas del caudalímetro de turbina FTB - 101.....	46
Tabla 3.6: Especificaciones técnicas del manómetro PGT – 30L – 15.....	47
Tabla 3.7: Componentes del DAQ 1.....	47
Tabla 3.8: Componentes del DAQ 2.....	48
Tabla 3.9: Datos calculados.....	50
Tabla 3.10: Especificaciones técnicas de la bomba PKm60.....	51
Tabla 3.11: Especificaciones técnicas del filtro estándar Rotoplas.....	52
Tabla 3.12: Especificaciones del pre calentador.....	54
Tabla 3.13: Caída de presión, por segmentos, en el ducto de conducción del aire...	55
Tabla 3.14: Características técnicas del ventilador centrífugo CMB2 140/59.....	56
Tabla 3.15: Requerimientos fundamentales para la realización de las pruebas según norma ANSI/ASHRAE 93.....	58
Tabla 3.16: Ejemplo de tabla de adquisición de datos para la prueba.....	64
Tabla 3.17: Costos de instrumentación del Banco A.....	69
Tabla 3.18: Costos de componentes del Banco A.....	69

Tabla 3.19: Costos de instrumentación del Banco B.....	70
Tabla 3.20: Costos de componentes del Banco B	70
Tabla 3.21: Costos de accesorios del Banco A.....	71
Tabla 3.22: Costo de accesorios del Banco B	72
Tabla 3.23: Costos indirectos del Banco A	72
Tabla 3.24: Costos indirectos del Banco B	73
Tabla 3.25: Costos totales del Banco A	73
Tabla 3.26: Costos totales del Banco B	74
Tabla B.0.1: Etiqueta informativa de los resultados experimentales	100

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Ensamble del banco de prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido de transferencia de calor
PLANO 2	Vista de planta del banco de prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido de transferencia de calor
PLANO 3	Vista de lateral del banco de prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido de transferencia de calor
PLANO 4	Ensamble del soporte para colector
PLANO 5	Dimensiones del soporte para colector
PLANO 6	Estructura del tanque elevado
PLANO 7	Dimensiones de la estructura del tanque elevado
PLANO 8	Ensamble del banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido de transferencia de calor
PLANO 9	Vista de planta del banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido de transferencia de calor
PLANO 10	Vista de lateral del banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido de transferencia de calor
PLANO 11	Dimensiones del baffle 1
PLANO 12	Dimensiones del baffle 2
PLANO 13	Soporte para ventilador centrífugo
PLANO 14	Dimensiones del soporte para ventilador centrífugo
PLANO 15	Soporte para ductos de entrada
PLANO 16	Dimensiones del soporte para ductos de entrada
PLANO 17	Soporte para ductos de salida
PLANO 18	Dimensiones del soporte para ductos de salida.

CAPÍTULO 1

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 conlleva su compra y explotación y producir energía libre de emisiones nocivas a la capa de ozono; impulsando así el desarrollo de los diferentes tipos de obtención de energía no convencionales por medio del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) y el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER). A través de los esfuerzos de estas entidades, creadas durante los periodos de legislación del actual gobierno, se prioriza el uso de energía sostenible en edificaciones. Como resultado de esta iniciativa surge la norma *Eficiencia Energética en Edificaciones. Requisitos* (NTE INEN 2506:2009), la cual fue creada con el objetivo de reducir el consumo energético en edificaciones, a un límite sostenible.

La norma NTE INEN 2506:2009 busca sentar un precedente con respecto al uso de energías amigables con el medio ambiente, debido a que un objetivo adicional de dicha norma es conseguir que parte de la energía consumida en alguna edificación deba proceder de una energía renovable. A partir de esta normativa surge la norma *Rendimiento Térmico de Colectores Solares en Sistemas de Calentamiento de Agua para Uso Sanitario. Requisitos* (NTE INEN 2507:2009), que establece exigencias del rendimiento térmico para colectores solares en sistemas de calentamiento de agua para uso sanitario, lo que conlleva a fabricantes e importadores de colectores solares, a etiquetarlos señalando su eficiencia energética.

1.1. Definición del Problema

Las normas ecuatorianas, sin ser obligatorias, ya forman parte de un cambio en la mentalidad de la sociedad ecuatoriana. Un ejemplo es la industria agrícola, que busca constantemente mejorar su capacidad de exportación de alimentos; por esto siempre se encuentra implementando métodos para aumentar sus niveles de producción. Uno de estos consiste en la utilización de

colectores solares de placa plana que usen aire como fluido caloportador para el secado de alimentos, ya que normalmente se los seca exponiéndolos directamente a la luz del sol, proceso que toma tiempo y además se corre el riesgo de una contaminación con bacterias, polvo, entre otros agentes externos. Actualmente, cada productor fabrica su propio sistema de secado; esta situación representa una excelente oportunidad para determinar la eficiencia térmica; y, de ser el caso, proponer mejoras para optimizar el proceso de secado.

Con estos antecedentes, se espera un aumento en la comercialización de esta tecnología solar, buscando así la manufactura local o la importación de colectores solares. Por lo mencionado, la Escuela Superior Politécnica del Litoral, que fomenta la investigación por medio de sus distintos laboratorios, requiere el diseño, para una futura construcción, de dos bancos de prueba para colectores solares de placa plana, a fin de utilizar sus instalaciones como agentes certificadores del rendimiento de este tipo de sistemas.

1.2. Objetivo General

Diseñar dos bancos de prueba para colectores solares de placa plana que sean capaces de determinar su rendimiento térmico, a fin de proporcionar certificaciones de calidad y potenciar la infraestructura instalada en la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

1.3. Objetivos Específicos

- Plantear un proyecto de dos bancos de prueba para colectores solares que utilicen agua o aire como fluido de transferencia de calor, acorde con los requerimientos expuestos en la norma ANSI/ASHRAE 93-2010, y otras normas nacionales e internacionales.
- Desarrollar la ingeniería de detalle para los bancos de prueba según la configuración seleccionada, realizar su respectivo análisis de costos y elaborar el cronograma de montaje del sistema completo.
- Elaborar la metodología experimental para el funcionamiento idóneo del sistema analizada.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Colectores solares

Se considera a este tipo de sistemas como una clase especial de intercambiador de calor, que transfiere la energía térmica de radiación solar al fluido que es transportado por el colector. El fluido que es necesario calentar, suele ser aire, agua o aceite. Esta energía térmica obtenida por el proceso antes descrito se utiliza tanto para calentar agua de uso sanitario, como para ser transportada hacia un equipo de acondicionamiento de espacio o hacia un tanque de almacenamiento térmico. (Kalogirou, 2004)

1.4.2. Tipos de colectores solares

Los colectores solares se clasifican en dos grandes grupos, colectores solares concentradores y no concentradores; estos grupos pueden ser subdivididos en otros grupos de interés como en: colectores estacionarios o seguidores solares, por tipo de absorbedor, como también por los rangos de temperatura en los cuales operan dichos tipos de colectores (Kalogirou, 2004). A continuación, en la *Tabla 1.1*, se muestra una breve caracterización de cada subgrupo de los tipos de colectores solares.

Tabla 1.1. Subdivisión de tipos de colectores según diferentes criterios

Movimiento	Tipo de colector	Tipo de Absorbedor	Razón de Concentración	Rango de Temperatura Indicativa (°C)
Estacionario	Colector de Placa Plana	Plano	1	30 – 80
	Colector de tubos al vacío	Plano	1	50 – 200
	Colector parabólico compuesto	Tubular	1 – 5	60 – 240
Continúa en la siguiente página				

Continuación de la Tabla 1.1				
Seguidor solar de un solo eje	Reflector Lineal Fresnel	Tubular	10 – 40	60 – 250
	Colector parabólico profundo	Tubular	15 – 45	60 – 300
	Colector cilíndrico profundo	Tubular	10 – 50	60 – 300
Seguidor solar de dos ejes	Disco parabólico reflector	Puntual	100 – 1000	100 – 500
	Colector Helióstato	Puntual	100 – 1500	150 – 2000
Nota: Razón de concentración se define como el área de apertura dividida para el área del receptor/absorbedor del colector.				

Fuente: Kalogirou, 2004

Este proyecto va a centrarse primordialmente en colectores solares estacionarios pero exclusivamente en colectores solares de placa plana.

1.4.2.1. Colectores solares concentradores

Este tipo de colectores se caracterizan por alcanzar temperaturas relativamente elevadas en el fluido caloportador, entendiéndose a temperaturas mayores a 100 °C. Estas temperaturas pueden ser alcanzadas debido a que se interpone un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie absorbente que transfiere esta energía al fluido. El área absorbente se disminuye para minimizar las pérdidas de calor (Duffie & Beckman, 2006). A continuación, en la *Figura 1.1*, se muestra un tipo de colector concentrador, más específicamente, se muestra un colector solar tipo cilíndrico parabólico.

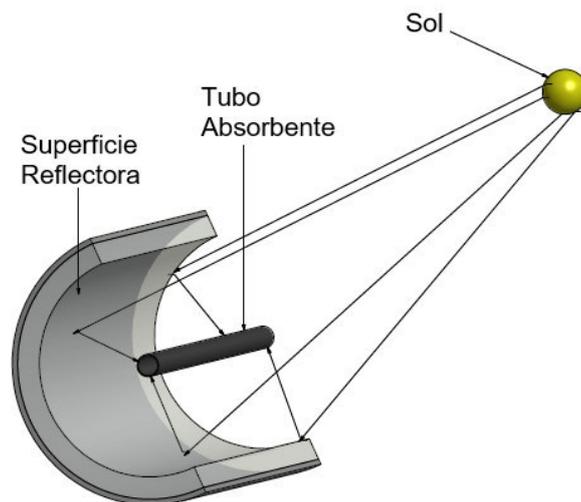


Figura 1.1. Esquema de funcionamiento de un colector concentrador

Fuente: Elaboración propia

1.4.2.2. Colectores solares no concentradores

Este tipo de colectores son diseñados para aplicaciones que requieren de temperaturas moderadas, alcanzando temperaturas hasta 100 °C. Son mecánicamente más simples que colectores solares concentradores, por lo que requieren de menos mantenimiento. Las aplicaciones más comunes, en las cuales estos colectores son utilizados, son con fines domésticos, obtención de agua caliente sanitaria o calentamiento de piscinas (Duffie & Beckman, 2006).

Colectores solares de tubos de vacío

Este tipo de colectores consisten principalmente en tubos huecos de vidrio, dentro de los cuales se encuentra una tubería que transporta el fluido caloportador. El interior de los tubos de vidrio se encuentra al vacío, de manera que entre este tubo y la tubería interior, las pérdidas de calor por convección y conducción se minimizan (Kalogirou, 2004). A continuación en la *Figura 1.2* se muestra un ejemplo de un tubo al vacío de un colector solar.

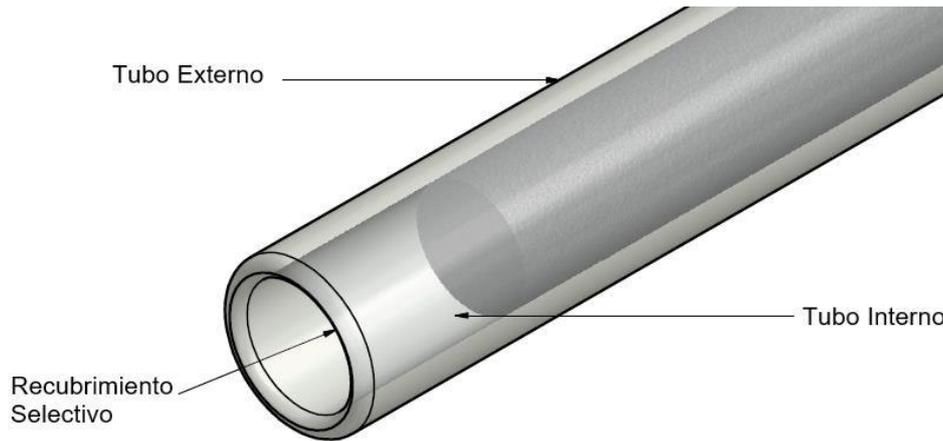


Figura 1.2. Esquema de un tubo al vacío utilizado en colectores solares

Adaptado de: www.biodisol.com

Colectores solares de placa plana

La principal característica de este tipo de colectores es que poseen una placa plana de absorción que almacena la energía solar térmica y la transfiere a un fluido que tiene la capacidad de captarla (Ver *Figura 1.3*). Los fluidos más utilizados para este tipo de colectores solares son agua y aire.

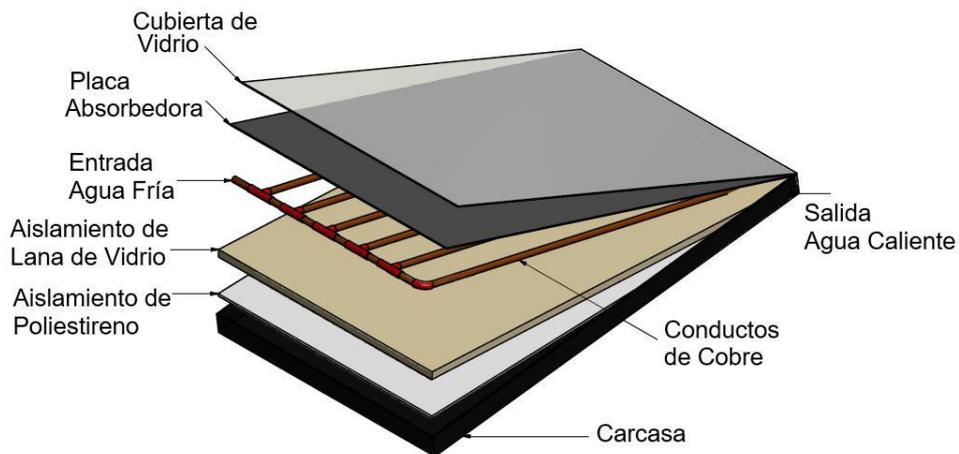


Figura 1.3. Elementos que componen un colector solar de placa plana

Adaptado de: ingemecanica.com

1.4.3. Energía solar en el Ecuador

El Ecuador durante muchos años ha sido un país dependiente de la explotación de derivados de petróleo debido a que se volvieron una fuente

principal de obtención de energía. Desde el año 2013 entró en vigencia el Plan Maestro de la Electrificación que pretende sentar un cambio en la gestión y producción de energía eléctrica; relata un claro enfoque al uso de energías amigables con el medio ambiente (CONELEC, 2013). Considerando este ámbito impuesto por el plan maestro, surge el Atlas Solar del Ecuador, con el afán de decretar el potencial térmico solar que posee cada región del Ecuador de manera que se fomente el desarrollo tecnológico en el área de energías renovables específicamente la explotación de la energía solar tanto térmica como fotovoltaica. Uno de los principales usos que se le ha dado a la energía solar en el Ecuador es la obtención de agua caliente para uso sanitario en residencias o construcciones.

1.4.4. Aplicaciones de colectores solares de placa plana

Los colectores solares de placa plana pueden utilizar aire o agua como fluido caloportador, los más comunes son los que utilizan agua ya que así producen agua caliente sanitaria (ACS) a un bajo costo y funcionan incluso con radiación difusa, es decir que no es necesario la radiación solar directa para que el colector funcione, por lo tanto este provee ACS incluso en días nublados (Kalogirou, 2004); por otra parte, el uso de aire caliente producido por los colectores solares se ve más enfocado en la industria agrícola para secado de productos orgánicos, debido a que mediante esta tecnología se consiguen mayores temperaturas, menor humedad relativa, menor contenido de humedad en el producto y es un proceso libre de bacterias y polvo, en comparación con el secado de alimentos a la intemperie (Umogbai & Iorter, 2013). Otra aplicación de calentamiento de aire es mantenimiento de temperatura en los invernaderos (Benli & Aydin, 2009).

1.4.5. Normas aplicables al diseño de los bancos de prueba

La principal aplicación de colectores solares en el Ecuador, es la obtención de agua caliente sanitaria. La norma ecuatoriana que dictamina los requisitos que deben cumplir estos sistemas es la 2507-2009, la cual hace referencia a la norma internacional ANSI/ASHRAE 93 para efectos de

determinación de rendimiento térmico; es por esto que la norma internacional fue escogida para el diseño de los bancos de prueba del presente proyecto. Adicionalmente, se utilizan normas internacionales y nacionales como soporte bibliográfico, estas se enumeran a continuación:

- Normas Internacionales

- ANSI/ASHRAE 93-2010: Métodos de Ensayo para Determinar el Rendimiento Térmico de Colectores Solares.

Norma que proporciona diferentes métodos para determinación del rendimiento térmico de colectores solares; requerimientos necesarios en los equipos e instrumentación, para el diseño y construcción de bancos de prueba para dichos colectores.

- ANSI/ASHRAE 41.1-2013: Métodos para Mediciones de Temperatura.

Norma que proporciona requerimientos y procedimientos para medición de temperatura tanto en fluido líquido como gaseoso. En este proyecto se utiliza esta norma para determinar la distancia a la cual deben estar ubicados los sensores de temperatura, tanto a la entrada como a la salida del colector, y las configuraciones necesarias para medir temperaturas con termocuplas de tipo T.

- ANSI/ASHRAE 41.6-2014: Métodos para medir humedad.

Norma que proporciona requerimientos y procedimientos para medición de humedad relativa del aire. Para el propósito de este proyecto se utiliza esta norma para determinar la razón de humedad del aire que se usa en la prueba, el cual debe tener la misma razón de humedad del aire ambiente que rodea al colector.

- ANSI/ASHRAE 41.7-2015: Métodos Estándar para la medición de flujos de gas.

Norma que proporciona procedimientos para la medición de flujos volumétricos de gases. En cuanto a lo que respecta a este proyecto, se utilizará esta norma para determinar la cantidad de aire que entrará al colector de prueba. De igual modo, esta norma proporciona requerimientos para la medición de fugas de aire, cuyos

resultados son necesarios para la determinación del rendimiento térmico de los colectores solares.

- ISO 9806-1: Métodos de Ensayo para Colectores Solares- Parte 1: Rendimiento Térmico de Colectores Solares con Cristal para Calentamiento de Fluidos.

Norma que proporciona recomendaciones técnicas adicionales a la norma ANSI/ASHRAE, en lo que respecta a posicionamiento de banco de prueba, colector e instrumentación para medición de temperatura.

- Normas Nacionales

- NTE INEN 2506-2009: Eficiencia Energética en Edificaciones. Requisitos.

Norma ecuatoriana que establece condiciones básicas que debe cumplir toda nueva construcción para reducir su consumo energético a límites sostenibles. Uno de sus incisos determina el uso de energías renovables para satisfacer un pequeño porcentaje de las necesidades de energía de la edificación.

- NTE INEN 2507-2009: Rendimiento Térmico de Colectores Solares en Sistemas de Calentamiento de Agua para Uso Sanitario. Requisitos.

Norma ecuatoriana que establece parámetros básicos de rendimiento térmico, que deben tener los colectores solares que serán utilizados exclusivamente para la obtención de agua caliente para uso sanitario. Esta norma referencia directamente a la norma internacional ANSI/ASHRAE 93:2010

1.4.6. Alcance de la norma ANSI/ASHRAE 93:2010

Esta norma indica métodos para determinar el rendimiento térmico de colectores solares, concentradores y no concentradores; pero solo es aplicable a ciertos sistemas. Estas restricciones, dictadas por la norma, incluyen lo siguiente:

- Solo aplica para colectores solares en los cuales el fluido entra al colector por un solo acceso y sale por una sola abertura. Dado el caso que el colector contenga más de una entrada y salida, se puede utilizar esta norma siempre y cuando las tuberías o ductos externos puedan conectarse para formar una sola entrada y una sola salida.
- El fluido caloportador puede ser líquido o gas, pero no una mezcla de las dos fases.
- Los procedimientos descritos en la norma son aplicables para realizar pruebas al aire libre con irradiancia solar natural o para realizar pruebas dentro del laboratorio con simulación de irradiancia solar.
- La norma provee métodos de prueba y procedimientos de cálculo de rendimiento térmico, tiempo, y respuesta angular, para un colector solar operando en estado estable o estado cuasi-estable.
- La norma no aplica para colectores solares en los cuales la unidad de almacenamiento es una parte intrínseca del colector, en tal magnitud que no es posible separar el proceso de colección solar y el proceso de almacenamiento del fluido calentado con el propósito de realizar medidas en ambos procesos.
- La norma no aplica para colectores solares sin cristal o vidrio.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

En este capítulo se describen los pasos a seguir para el diseño de los bancos de prueba. En la *Figura 2.1* se muestra un diagrama esquemático de dicho proceso.

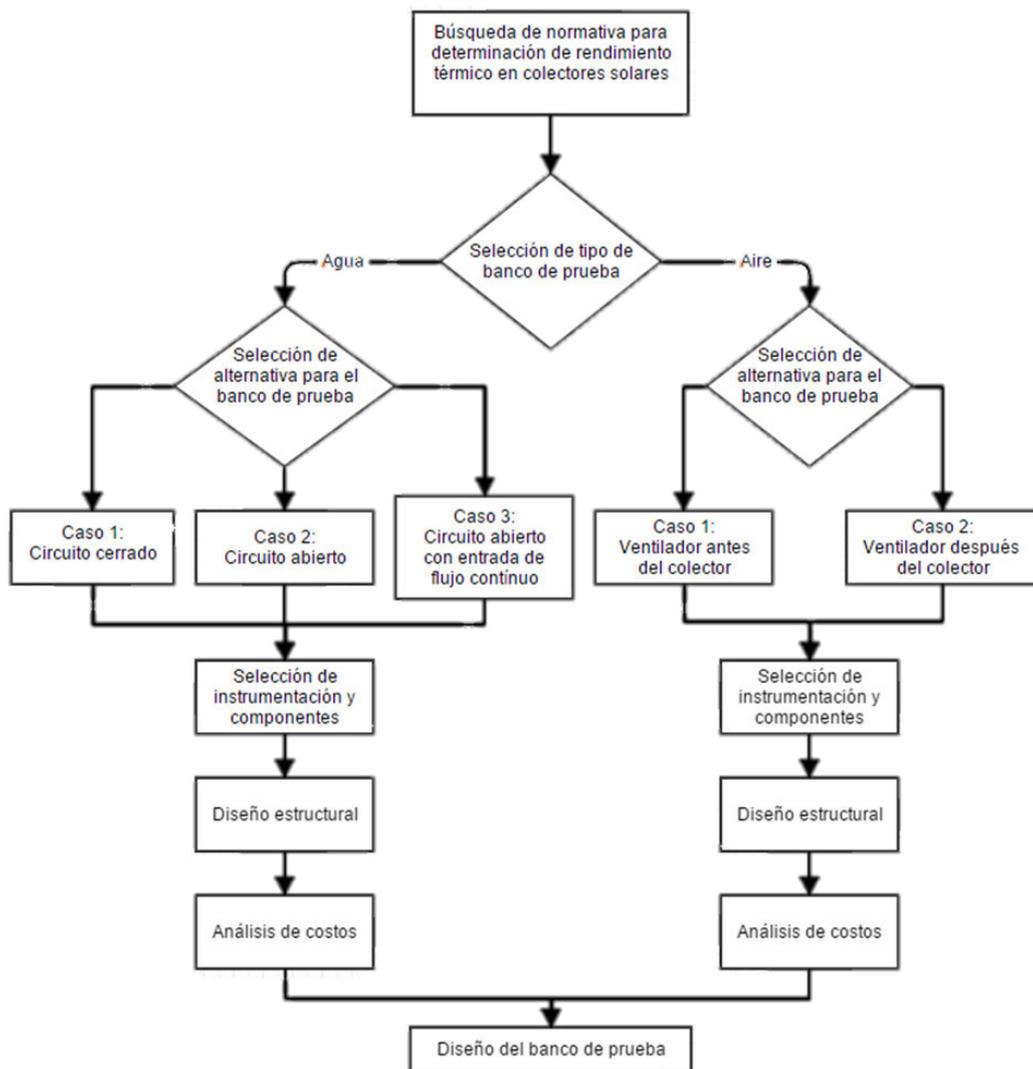


Figura 2.1: Metodología de diseño para la elaboración de los bancos de prueba para colectores solares

Fuente: Elaboración propia

2.1. Selección de alternativas

A continuación se plantean diferentes opciones de configuración para dos bancos de prueba para colectores solares, con el propósito de una posterior selección de la mejor alternativa para cada uno de estos. Se requiere un banco de prueba para colectores solares que utilicen agua, y otro para los que utilicen aire, como fluido caloportador.

2.1.1. Descripción de alternativas

A continuación se presentan y se describen las alternativas para los bancos de prueba para colectores solares que utilizan agua o aire, como fluido caloportador en las *Secciones 2.1.1.1* y *2.1.1.2*, respectivamente.

2.1.1.1. Agua como fluido caloportador

La norma ANSI/ASHRAE 93 sugiere diferentes tipos de configuraciones de sistemas para medir el rendimiento térmico de los colectores solares que funcionan con líquido, que se describen a continuación:

Caso 1: Sistema con circuito cerrado.

La presión de trabajo del sistema está dada directamente por la presión que ejerce la bomba; el tanque de almacenamiento también se encuentra a presión. Este sistema necesita de una conexión externa de agua para propósitos de compensación de fluido en el caso de que se evapore (Ver *Figura 2.2*).

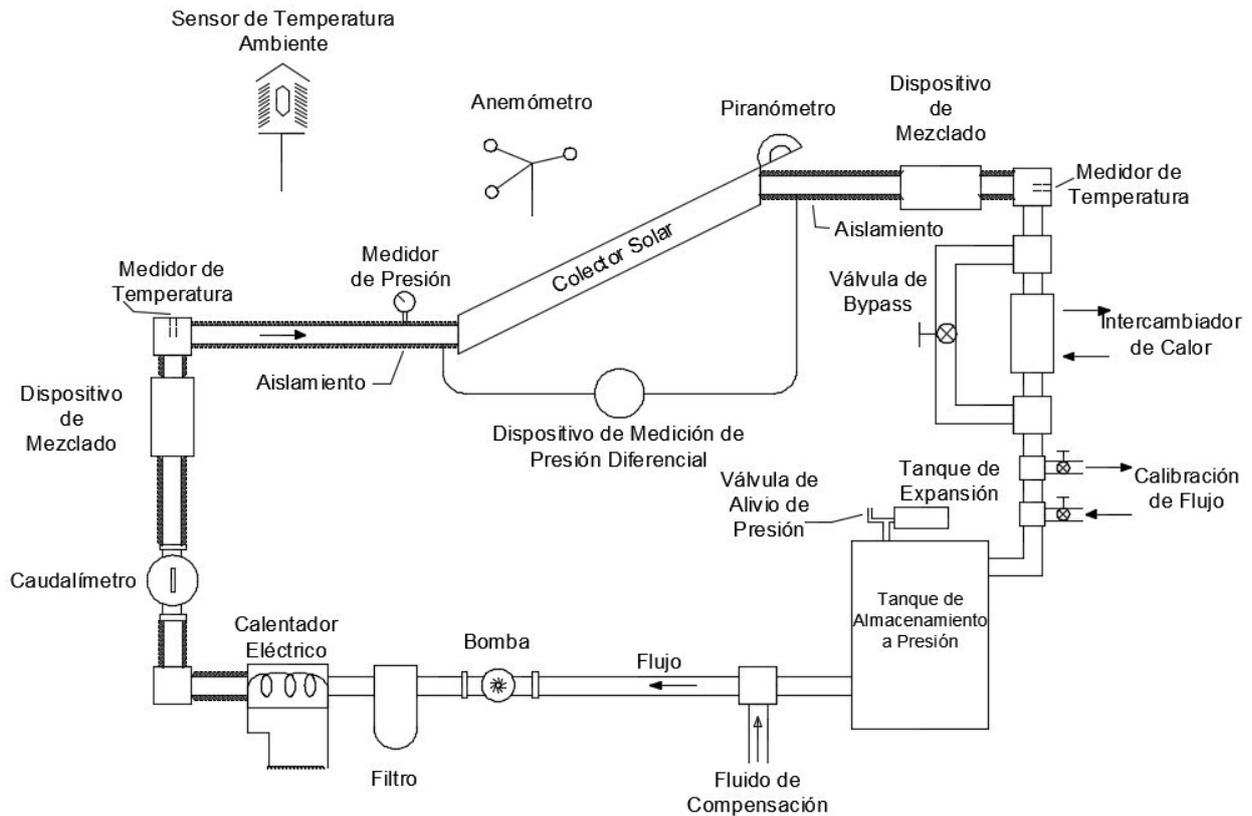


Figura 2.2. Esquema de banco de prueba para agua con circuito cerrado

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 93-2010

Caso 2: Sistema con circuito abierto.

La presión de trabajo del sistema está dada por la energía potencial que contiene una masa de agua en un tanque de almacenamiento elevado. En este caso, la bomba solo cumple la función de abastecer de agua al tanque de almacenamiento, debido a que este debe mantener un cabezal constante durante todo el proceso de prueba. Este sistema no necesita de una conexión externa de fluido, por lo que se puede considerar como un banco de prueba autónomo (Ver Figura 2.3).

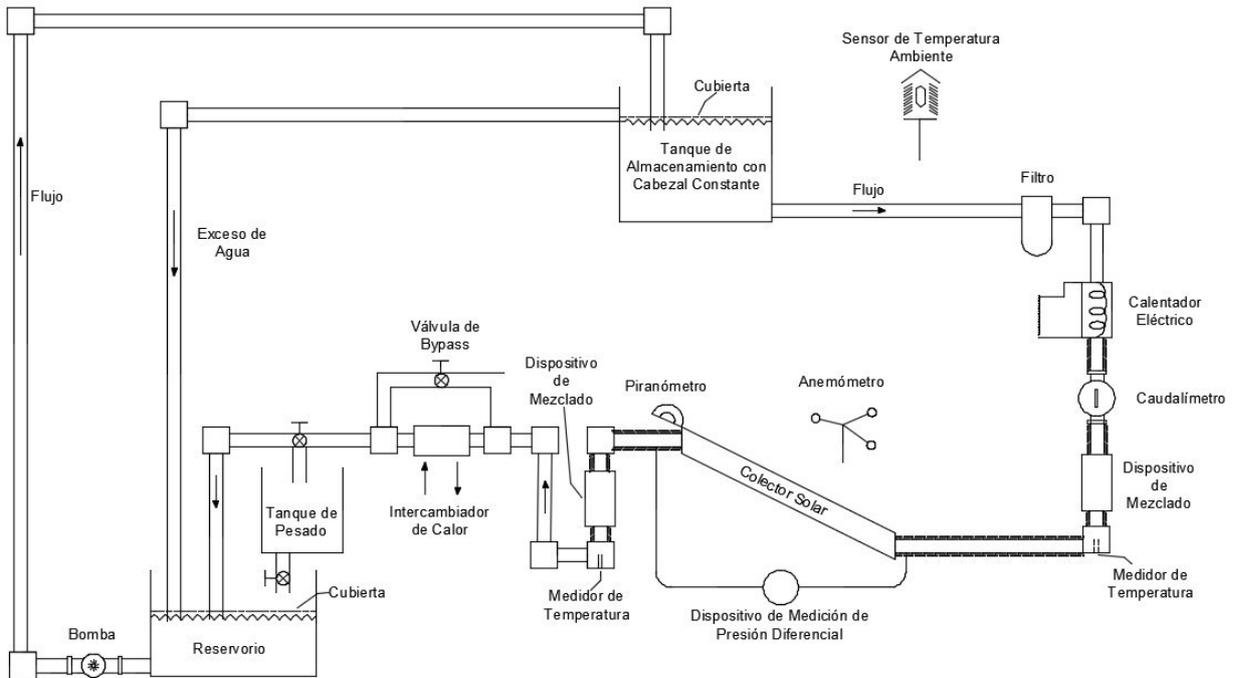


Figura 2.3. Esquema de banco de prueba para agua con circuito abierto

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 93-2010

Caso 3: Sistema con circuito abierto y entrada continua de líquido.

El fluido no se recircula en el sistema, por eso este banco de prueba necesita tener una conexión externa en todo momento para poder funcionar (Ver Figura 2.4).

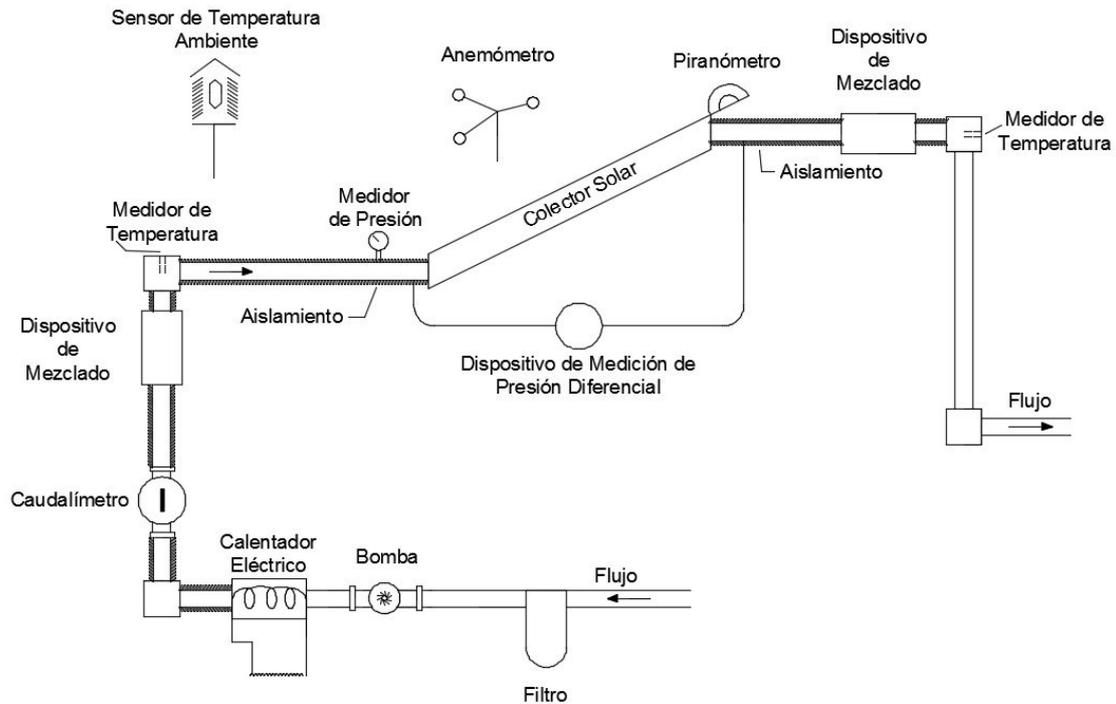


Figura 2.4. Esquema de banco de prueba para agua con circuito abierto y entrada continua de líquido

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 93-2010

2.1.1.2. Aire como fluido caloportador

Para el caso particular del diseño de este tipo de banco de prueba, la norma proporciona exclusivamente una opción denominada: “configuración de circuito abierto”. Esta opción propone dos alternativas de solución, es decir colocar un ventilador antes o después del colector solar, para que así empuje el aire hacia el colector o lo absorba a través de él, respectivamente. En la *Figura 2.5* se muestra un esquema de esta configuración.

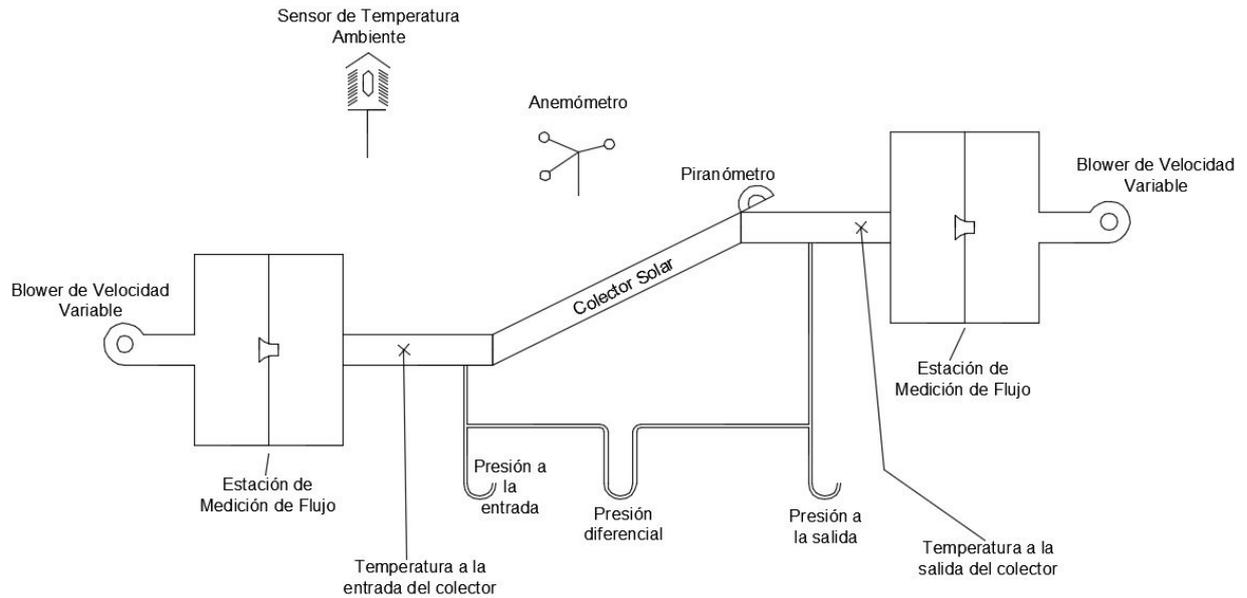


Figura 2.5. Esquema banco de prueba para colectores solares que usan aire como fluido caloportador

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 93-2010

Este banco de prueba toma aire del medio circundante y no lo recircula, dándole relativa facilidad de construcción. No obstante, debe cumplir con ciertas restricciones dictadas por la norma, la cual expresa que el ducto entre el colector y la estación de medición de presión, antes y después del colector, debe ser construido con la misma dimensión de la sección transversal. De igual manera, el área de estos ductos debe tener la misma dimensión que la entrada o la salida del colector, la que sea menor entre las dos.

2.1.2. Matriz de ponderación

Para la elección de la alternativa que más se ajuste a las necesidades, se evalúa cada criterio de decisión con los demás, para así obtener la importancia relativa de cada uno con respecto a otro, también denominado peso ponderado.

Se utiliza el siguiente método de calificación:

- Criterio "X" más importante que criterio "Y" = 1
- Criterio "X" igual de importante que criterio "Y" = 0.5
- Criterio "X" menos importante que criterio "Y" = 0

2.1.2.1. Agua como fluido caloportador

Para seleccionar alguno de los casos descritos en la *sección 2.1.1.1*, estos serán calificados sobre la base de los siguientes criterios:

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

En la *Tabla 2.1* se observa la calificación dada a cada par de criterios y el resultado del peso ponderado.

Tabla 2.1. Matriz de ponderación de criterios para banco de prueba para agua

Criterio Y Criterio X	A	B	C	D	E	Sumatoria ($\sum+1$)	Peso Ponderado
	A		0	0.5	1	1	3.5
B	1		1	1	1	5	0.33
C	0.5	0		1	0.5	3	0.20
D	0	0	0		1	2	0.13
E	0	0	0.5	0		1.5	0.10
Total						15	1.00

Fuente: Elaboración propia

2.1.2.2. Aire como fluido caloportador

Para seleccionar entre las alternativas de solución (ventilador antes o después del colector), serán considerados los siguientes criterios:

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

En la *Tabla 2.2* se muestra la calificación dada a cada par de criterios y el resultado del peso ponderado.

Tabla 2.2. Matriz de ponderación de criterios para banco de prueba para aire

Criterio X \ Criterio Y	A	B	C	Sumatoria	Peso Ponderado
				($\sum+1$)	
A		0	1	2	0.33
B	1		1	3	0.50
C	0	0		1	0.17
Total				6	1.00

Fuente: Elaboración propia

2.1.3. Matriz de decisión

Una vez obtenido el peso ponderado de cada criterio, se procede a calificar cada caso o alternativa, con los valores de: 20=muy malo, 40=malo, 60=regular, 80=bueno, 100=muy bueno; siendo 100 el límite superior.

2.1.3.1. Agua como fluido caloportador

En la *Tabla 2.3* se denominan las diferentes configuraciones para los bancos de prueba de la siguiente manera: Caso 1: Sistema con circuito cerrado; Caso 2: Sistema con circuito abierto; Caso 3: Sistema con circuito abierto y entrada continua de líquido.

Para facilitar la comprensión de la forma de evaluación de la *Tabla 2.3*, se detalla a continuación la calificación a cada criterio:

Para el criterio de facilidad de instalación (A), el Caso 2 obtuvo una calificación de 100 (muy bueno) debido a que para su instalación solo se deben realizar operaciones de ensamble de los componentes del banco de prueba, en contraste con el Caso 1 y 3, que requieren trabajos adicionales de albañilería. En particular, el Caso 1 posee un mayor número de componentes que el Caso 3, volviendo más laboriosa su instalación.

Para el criterio de monto de inversión (B), el Caso 3 obtuvo una calificación de 100 debido a que esta configuración requiere de menos componentes para su instalación, al contrario de sus contrapartes. El Caso 1 y 2 requieren la misma cantidad de componentes para la instalación del banco de prueba; sin embargo, es necesario precisar que el Caso 1 posee un tanque a presión y trabajos adicionales de conexiones de suministro de agua, aumentando el precio de esta alternativa.

Para el criterio de facilidad de manejo (C), el Caso 2 obtuvo una calificación de 100 debido a que su funcionamiento es independiente de circuitos externos de agua, solo debe controlarse la temperatura de entrada al colector, al contrario de sus contrapartes. El Caso 1 requiere de mayor control de la entrada de agua al sistema, debido a que eventualmente se debe reponer el agua que se evapora durante el proceso.

Para el criterio de consumo energético (D), el Caso 2 obtuvo una calificación de 100 debido a que no necesita de equipo adicional para su funcionamiento, ya que el movimiento de agua lo proporciona el tanque elevado, a diferencia de los otros dos casos, en los que el movimiento del fluido lo proporciona una bomba de agua. En el Caso 2, la bomba demandará menor potencia debido a que será utilizada solo para transportar agua hacia el tanque elevado. Los tres casos contienen un calentador de agua eléctrico, por lo tanto, en ese ámbito tienen una calificación similar.

Para el criterio de frecuencia de mantenimiento (E), el Caso 3 obtuvo una calificación de 80 debido a que es la configuración que posee menos componentes, por lo tanto se invierte menos tiempo en realizar un mantenimiento, disminuyendo la frecuencia con que se realiza. Dado que las configuraciones de los Casos 1 y 2 poseen similar cantidad de componentes, su frecuencia de mantenimiento se supone semejante.

Tabla 2.3. Matriz de decisión para selección de mejor alternativa para el banco de prueba para agua

Criterio	Porcentaje (%)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
		Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor
A	24	40	9.6	100	24.0	60	14.4
B	33	60	19.8	80	26.4	100	33.0
C	20	40	8.0	100	20.0	80	16.0
D	13	60	7.8	100	13.0	60	7.8
E	10	60	6.0	60	6.0	80	8.0
Puntuación sobre 100			51.2	89.4		79.2	

Fuente: Elaboración propia

En definitiva, el Caso 2 obtuvo la mayor puntuación, que fue 89.4 sobre 100. En consecuencia, se plantea esta alternativa de diseño para la implementación del banco de prueba para colectores solares que usen agua como fluido de transferencia de calor.

2.1.3.2. Aire como fluido caloportador

En relación con la forma de evaluación de la *Tabla 2.4*, a continuación se argumenta la calificación otorgada para cada alternativa:

Para el criterio del cumplimiento de la vida útil del ventilador (A), se evalúa a la alternativa de colocar el ventilador a la entrada del colector con una ponderación de “bueno”, al contrario de “regular” para la segunda alternativa. Esto se debe a que en el segundo caso el ventilador transportará aire caliente, sometiéndolo 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 de 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.

Tabla 2.4. Matriz de decisión para selección de mejor alternativa para el banco de prueba para aire

Criterio	Porcentaje (%)	Ventilador en la entrada del colector		Ventilador a la salida del colector	
		Calificación	Valor	Calificación	Valor
A	33	80	26.4	60	19.8
B	50	100	50.0	40	20
C	17	80	13.6	60	10.2
Puntuación sobre 100			90.0	50.0	

Fuente: Elaboración propia

Dado que, la alternativa de posicionar el ventilador antes del colector obtuvo la mayor puntuación, la cual fue de 90 sobre 100, se plantea esta opción de solución para el diseño del banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido de transferencia de calor.

2.2. Diseño de forma

Se elaboran los diseños de forma de cada uno de los bancos de prueba, con referencia a la norma ANSI/ASHRAE 93. En lo que respecta a la nomenclatura de la instrumentación y componentes de los sistemas, se utiliza la norma ANSI/ISA S5.1 (Ver *Figura 2.6* y *Figura 2.7*).

2.2.1. Agua como fluido caloportador

En la *Tabla 2.5* se detallan los componentes y la instrumentación utilizados en el banco de prueba de la *Figura 2.6*.

Tabla 2.5: Descripción de códigos basados en ANSI/ISA S5.1

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
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

Fuente: Elaboración propia

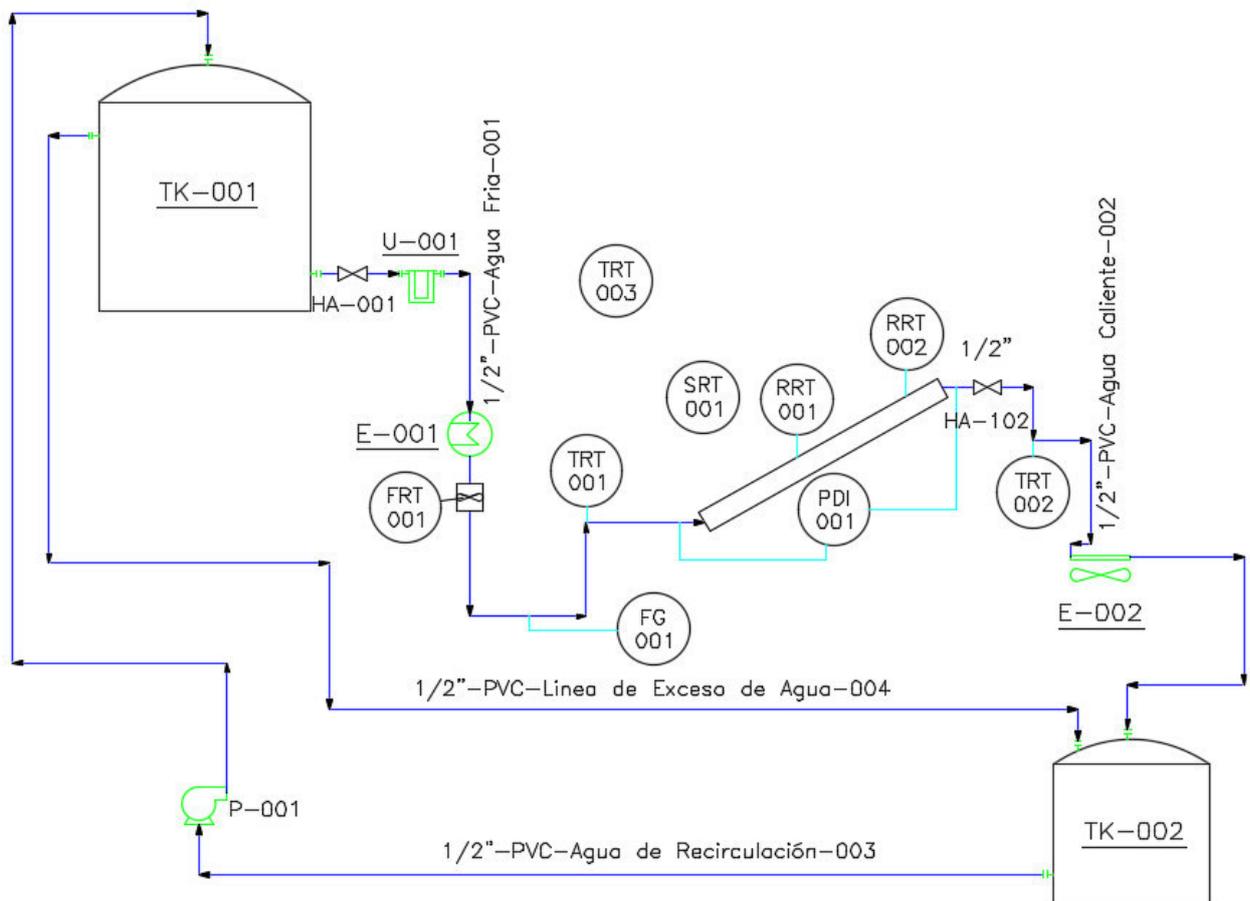


Figura 2.6. Diseño de forma del sistema para el banco de prueba para colectores solares que utilizan agua como fluido de transferencia de calor.

Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Aire como fluido caloportador

En la *Figura 2.7* se encuentran dos ductos de conducción de aire de aluminio galvanizados, uno a la entrada y otro a la salida del colector; en la *Tabla 2.6* se detallan los componentes y la instrumentación utilizados en el banco de prueba.

Tabla 2.6: Descripción de códigos basados en ANSI/ISA S5.1

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
RRT-001	Piranómetro
RRT-002	Piranómetro con sombra
SRT-001	Anemómetro

Fuente: Elaboración propia

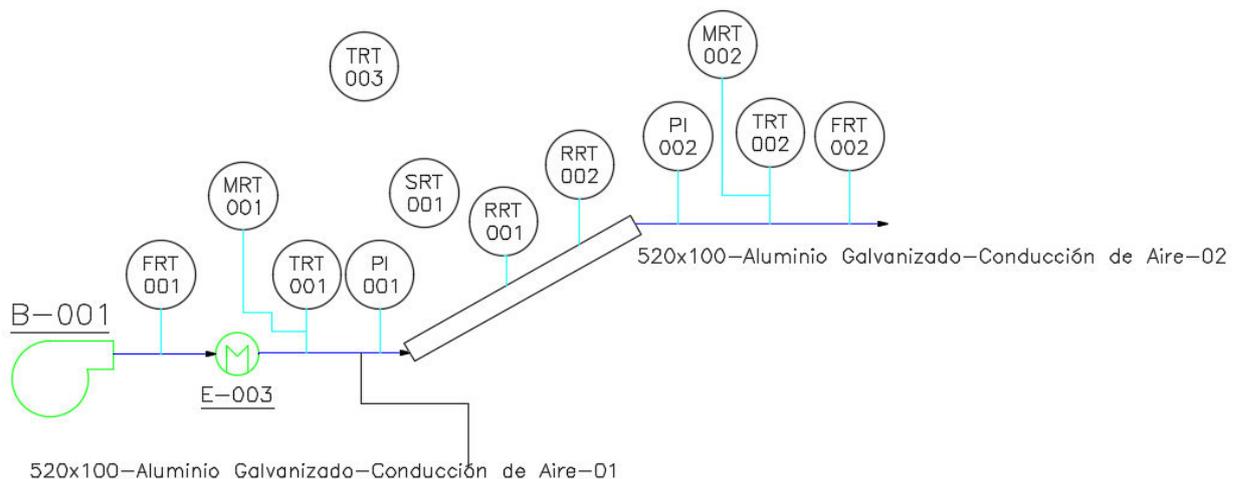


Figura 2.7: Diseño de forma del sistema para el banco de prueba para colectores solares que utilizan aire como fluido de transferencia de calor

Fuente: Elaboración propia

2.3. Selección de instrumentos y componentes

En las *Secciones 2.3.1 y 2.3.2*, se detallan las características de cada tipo de instrumento y componente necesario para la implementación de ambos bancos de prueba.

2.3.1. Selección de instrumentos

Con respecto a la instrumentación que se debe utilizar en los bancos de prueba, la norma ANSI/ASHRAE 93 tiene requerimientos que deben cumplir los sensores, tales como tiempo de respuesta, exactitud, precisión, no linealidad en la respuesta, entre otros. Los requerimientos se muestran en la *Tabla 2.7*. Se debe acotar que los instrumentos utilizados para ambos de bancos de prueba deben tener las mismas características, a menos que se especifique lo contrario.

Tabla 2.7. Requerimientos de la instrumentación necesaria para ambos bancos de prueba

Instrumentos para medición de radiación solar		
Piranómetro	Cambio en la respuesta por variaciones de temperatura: $\leq 1\%$	
	Sensibilidad dentro $\pm 2\%$ del rango espectral de 0.3 a 2.5 μm	
	No linealidad en la respuesta: $\pm 1\%$ de la irradiancia de Guayaquil	
	Constante de tiempo: Piranómetro: < 5 segundos	
	Variación en la respuesta con el ángulo de incidencia: < $\pm 1\%$ para los ángulos incidentes durante la prueba	
Variación en la respuesta con la inclinación: < $\pm 1\%$		
Instrumentos para medición de temperatura		
Termocupla	Exactitud	Temperatura: $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
		Diferencia de Temperatura: $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Precisión	Temperatura: $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
		Diferencia de Temperatura: $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Constante de tiempo: < 1 segundos		
Continúa en la siguiente página		

Continuación de la Tabla 2.7		
Instrumentos para medición de flujo		
Caudalímetro	Agua	Exactitud: $\leq \pm 1\%$ del valor medido
	Aire	Exactitud: $\leq \pm 1.5\%$ del valor medido
Instrumentos para medición de presión		
Manómetro	Agua	Exactitud: ± 3.5 kPa (0.5 psi)
	Aire	Exactitud: ± 2.5 Pa (0.010 pulg. de agua)
Instrumentos para medición de la velocidad del viento		
Anemómetro	Exactitud: ± 0.8 m/s	
Instrumento para medición de la razón de humedad en el aire		
Exactitud: ± 0.005 [kg de agua/ kg de aire seco] (libras de agua/libras de aire seco)		
Instrumentación		
División escala más pequeña: No debe ser mayor que el doble de la precisión necesaria.		
Almacenador de datos		
Exactitud: $\leq \pm 0.5\%$ de la lectura en la escala completa		
Constante de tiempo: ≤ 1 segundo		
Indicador de señal pico: Entre 50% y 100% de la escala completa		
Impedancia de entrada del almacenador: >1000 veces la impedancia del sensor o 10 Megaohms, cualquiera que sea mayor		

Fuente: Norma ANSI/ASHRAE 93-2010

Con los requerimientos ya establecidos por la norma, se procede a elegir los instrumentos para obtener las mediciones de las variables necesarias a fin de determinar el rendimiento térmico de los colectores solares. Los instrumentos escogidos deben cumplir los requerimientos mínimos, y adicionalmente deben ser de fácil adquisición en el mercado local.

2.3.1.1. Sensores solares

Para la captación de la radiación global solar en los bancos de prueba, es necesario un piranómetro. Se encontró un proveedor local que

importa equipos marca Kipp&Zonen, los cuales cumplen con los requerimientos de especificaciones técnicas que exige la norma.

2.3.1.2. Sensores de temperatura

Para realizar la medición de temperatura existen múltiples instrumentos, entre ellos termómetro de resistencia (RTD por sus siglas en inglés) y termocuplas. De acuerdo a Dobin S.A. (2015), las principales características de estos sensores son las siguientes:

- Termocuplas: son el sensor de temperatura más comúnmente utilizado en la industria. Una termocupla se compone de dos alambres de distinto material unidos en un extremo (generalmente soldados). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck), del orden de los milivoltios, el cual aumenta con la temperatura. Existe una gran variedad de tipos de termocuplas (K, J, E, T, R, S) con distintas configuraciones de alambres conductores; sin embargo, el 90% de las termocuplas usadas son del tipo J y K debido a su rango de operación (Soluciones, Diseños y Provisiones Dobin S. A., 2015)

Ventajas

- Económicas y muy robustas
- Muy fáciles de encontrar en el mercado
- Cubren amplios rangos de temperatura (-180 a 1370 °C).

Desventajas

- No tienen una alta precisión (+/- 0.5 °C)
 - No pueden extenderse a más de 10 o 20 metros del indicador por las interferencias de corriente y por el costo del cable
 - Su vida útil se reduce considerablemente al ser expuestas a altas temperaturas o a atmósferas oxidantes y reductoras.
- RTD: son sensores de temperatura resistivos. En ellos se aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento de temperatura, haya

un aumento de la resistencia eléctrica que presentan (Soluciones, Diseños y Provisiones Dobin S. A., 2015).

Ventajas

- Alta precisión, de hasta ± 0.1 °C
- Ideal para bajas temperaturas, en industrias alimenticias
- Puede ser extendido fácilmente hasta 30 metros con cable de cobre común.

Desventajas

- Un poco más costosas que los termopares
- Trabajan en un rango de temperatura limitado (máx. 700 °C)
- Frágiles, no aptos en aplicaciones donde exista mucha vibración.

2.3.1.3. Sensor de velocidad del viento

Los sensores desarrollados para poder medir la velocidad del viento son llamados anemómetros. Actualmente, se los encuentra con salida digital y analógica, dependiendo de sus aplicaciones. Tienen dos principios de funcionamiento: de rotación y de compresión.

- Anemómetro de rotación

Posee cazoletas o hélices que se encuentran acopladas a un eje central. El giro de este eje es medido, ya que es directamente proporcional a la velocidad del viento (Infoagro Systems, 2015).

- Anemómetro de compresión

Para su funcionamiento se utilizan tubos pitot, los cuales miden la presión en diferentes puntos, y por medio de estas lecturas se determina la velocidad del viento (Infoagro Systems, 2015).

2.3.1.4. Sensor de flujo

En la medición de flujo debe establecerse la variable que se detectará, ya sea de flujo volumétrico o flujo másico. La forma para medir flujo en líquidos varía con respecto a la medición de fluido en estado gaseoso.

Entre los más importantes sensores de flujo se tiene:

- Caudalímetro ultrasónico: como su nombre lo indica, utiliza señales de ultrasonido que atraviesan el fluido y luego son detectadas por el equipo. Posee un costo muy elevado y su precisión no es muy buena (Universidad Técnica Nacional de Argentina, 2016).
- Caudalímetro electromagnético: solo es aplicable para fluidos en estado líquido, no depende de la viscosidad del fluido y puede ser aplicado para flujo laminar y turbulento. Si el fluido deposita sedimentos en el dispositivo, este generará una lectura errónea (Universidad Técnica Nacional de Argentina, 2016).
- Caudalímetro de turbina: es el más preciso de todos los tipos de sensores, dado que posee piezas móviles, lo que lo hace un poco más delicado que los demás tipos de sensores. Puede ser utilizado para líquidos y gases (Universidad Técnica Nacional de Argentina, 2016).
- Rotámetro: se caracteriza por ser económico, y poseer una baja precisión. Puede ser utilizado para líquidos y gases. Contiene un indicador que flota en el fluido, mostrando el valor del caudal (Universidad Técnica Nacional de Argentina, 2016).

2.3.1.5. Sensor de presión

La medición de la presión es posible realizarla con una variedad de instrumentos, los cuales utilizan un principio físico diferente para esta acción. Tavoularis (2005), describe los diferentes instrumentos capaces de medir presión y que se detallan a continuación:

- Manómetros de tubo de vidrio: contienen líquido en su interior, y utilizan el principio físico de presión hidrostática de una columna de aire o de una sustancia inmiscible con el líquido del manómetro. La sensibilidad de este manómetro aumenta con la disminución de la densidad del líquido interior. Estos manómetros son más utilizados como instrumentos indicadores.
- Medidores de presión mecánicos: utilizan el principio físico de movimiento o deformación de algún componente dentro de su sistema. El manómetro más conocido de esta clase es el tipo

Bourdon, el cual consta de un tubo ovalado que tiende a acercarse a una forma circular cuando la diferencia entre la presión externa e interna incrementa. Estos instrumentos tienen una baja respuesta y una moderada precisión, especialmente en el 10% al 20% de sus rangos de operación.

- **Transductores eléctricos:** estos instrumentos emiten impulsos eléctricos, como resultado de desplazamientos o deformaciones inducidas por la presión. Generalmente, estos equipos requieren calibración frecuente durante el periodo de su utilización. La gran ventaja de estos transductores con respecto a los mencionados es su alta respuesta a la frecuencia, superior a los demás. La desventaja de estos dispositivos es que no miden por sí mismos la presión absoluta o manométrica, lo que miden son las fluctuaciones en la presión.

2.3.1.6. Sensor de humedad

En cuanto al banco de prueba con aire como fluido de transferencia de calor, es de especial importancia la obtención del valor del contenido de humedad, para la correcta determinación de la densidad y el calor específico del aire. El instrumento para medir la humedad específica del aire es denominado higrómetro.

2.3.1.7. Sistema de adquisición de datos (DAQ)

Permite recolectar los datos captados por los instrumentos de medición que se utilizan en los bancos de prueba, debido a que para poder determinar la eficiencia de los colectores solares es necesario realizar un muestreo que debe ser simultáneo en todos sus puntos de toma de datos, puesto que la eficiencia evaluada es instantánea.

El DAQ nos permite detectar y transmitir las señales de los instrumentos hacia un computador u ordenador, para luego ser procesadas y manipuladas por el usuario. Existen varios tipos de instrumentos de medición, dependiendo de su uso, que proporcionen una señal

específica que es receptada por el DAQ. Cada instrumento provee un tipo de señal diferente, por esto se han desarrollado varios tipos de módulos que reciben las señales y las transmiten hacia el ordenador.

2.3.2. Selección de componentes

Se determinarán los equipos y componentes adicionales que serán utilizados como parte del sistema de los bancos de prueba.

2.3.2.1. Agua como fluido caloportador

Los componentes necesarios para la implementación del banco de prueba para colectores solares que usen agua como fluido caloportador son los siguientes: estructura de soporte para el colector, tanques de almacenamiento (tanque elevado y tanque de reservorio), bomba, tuberías, accesorios de tuberías, aislamiento térmico, pre calentador de agua, intercambiador de calor y filtro.

Tanques de almacenamiento (elevado y reservorio)

Se debe realizar el cálculo de la masa de agua necesaria para que la misma, luego de todo un día de trabajo, no sufra una alteración significativa en su temperatura. Para esto, se toma como referencia la *Ecuación (1)*; donde Q es la energía calorífica, m es la masa de agua, c_p es el calor específico a presión constante, ΔT variación de temperatura.

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

En la *Ecuación (1)* se conoce el valor de c_p , ya que es una propiedad del agua y tiene un valor de $4.18 \frac{KJ}{Kg \times K}$ (Cengel & Boles, 2012); el valor de la diferencia de temperatura se lo establece por criterio propio con un valor de 0.5, ya que se desea que todo el sistema posea la suficiente agua para que, luego de todo un día de trabajo, su temperatura varíe en $0.5^\circ C$, y de esa manera no afecte a las mediciones. En la *Figura 2.8* se puede

observar un esquema del balance de energía que se realiza para obtener la masa de agua.

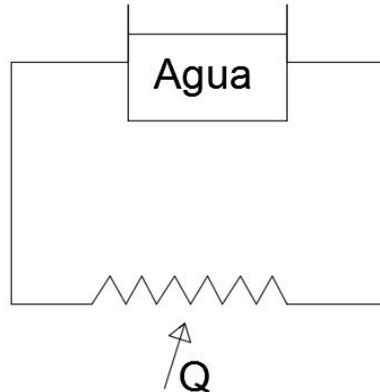


Figura 2.8: Esquema de balance de energía del sistema.

Fuente: Elaboración propia

La energía que posee el agua se la expresa con la *Ecuación (1)*, mientras que la energía que absorbe el agua proveniente del Sol se la obtiene a partir de la insolación global solar, cuyos datos fueron obtenidos en la estación meteorológica del Laboratorio de Fuentes Renovables de Energía ESPOL (Lab. FREE) y se muestran en la *Tabla 2.8*.

Tabla 2.8: Radiación global solar [W/m²] en Guayaquil

Mes \ Año	2009	2010	2011	2012
Enero	1,304	1,306	1,325	1,325
Febrero	1,400	1,400	1,357	1,357
Marzo	1,387	1,389	1,303	1,303
Abril	1,372	1,400	1,400	1,400
Mayo	1,281	1,288	1,217	1,217
Junio	1,220	1,141	1,117	1,117
Julio	1,208	1,233	1,214	1,214
Agosto	1,249	1,322	1,356	1,356
Septiembre	1,245	1,338	1,253	1,253
Octubre	1,400	1,327	1,365	1,365
Noviembre	1,290	1,354	1,233	1,233
Diciembre	1,175	1,269	1,212	1,212

Fuente: Laboratorio de Fuentes Renovables de Energía ESPOL

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 (ANSI/ASHRAE, 2010). 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:

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

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

Como se muestra en la *Figura 2.6*, la presión de diseño del banco de prueba debe vencer la diferencia de presión dada por la entrada y salida de agua del colector, por medio de la columna de agua establecida por el tanque de almacenamiento con cabezal constante.

La diferencia de altura entre la entrada y salida de agua del colector (h) está dada por su geometría, y para estimarla se usa el área del soporte del colector y su inclinación (θ_l) con respecto al plano horizontal, la que depende directamente de su ubicación geográfica, ya que posee el mismo valor de su Latitud (Terra, 2015), las medidas del soporte del colector son especificadas por los autores del trabajo y son las siguientes:

$$H = 2 \text{ m} \quad (4)$$

$$B = 1.5 \text{ m} \quad (5)$$

Siendo H el largo del soporte y B el ancho del soporte. La altura (h) se encuentra usando geometría básica de triángulos; se relaciona y se obtiene con la *Ecuación (6)*:

$$h = \text{sen}(\theta_l) * H \quad (6)$$

Es necesario tener todos estos datos ya que para la presión a vencer está dada por la *Ecuación (7)* 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.

$$P_1 = \rho gh \quad (7)$$

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 (8)*.

$$P_2 = \rho gh_2 \quad (8)$$

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 suministro de agua al tanque elevado

La selección de la bomba (P-001) de la *Figura 2.6* se la realiza tomando en consideración los siguientes parámetros: presión (P_2) y caudal (Q_a). En este caso, la presión está dada por la altura a la que la bomba necesita elevar el agua, las pérdidas de presión por fricción no son consideradas dado que la longitud de las tuberías es despreciable; el caudal está dado por el flujo másico máximo de trabajo y la densidad del agua, este flujo se encuentra dictaminado por la norma ANSI/ASHRAE 93:2010, que exige un flujo másico de (\dot{m}) 0.02 kg/s por cada metro cuadrado de área bruta de colector (A_g), expresado en la *Ecuación (9)*, ya que los instrumentos de medición usualmente trabajan con unidades en términos de caudal (Q_a) se plantea la *Ecuación (10)*.

$$\dot{m} = \left(0.02 \frac{\text{Kg}}{\text{s} \times \text{m}^2} \right) \times A_g \quad (9)$$

$$Q_a = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (10)$$

La bomba debe acoplarse a las tuberías escogidas, las que a su vez se deben adaptar con facilidad a las entradas y salidas de los componentes e instrumentos utilizados, ya que la manufactura de cada uno de ellos se encuentra normalizada.

Pre calentador de agua

Para la selección del pre calentador se requiere conocer el flujo másico del sistema, que está dado por la *Ecuación (9)*, y la diferencia de temperatura. Debido a que esta diferencia puede poseer varios valores según la norma ANSI/ASHRAE 93:2010, 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 (11)* para poder obtener la potencia máxima (P_c) necesaria que debe proporcionar el pre calentador.

$$P_c = \dot{m}c_p\Delta T_{co} \quad (11)$$

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

El proceso de filtrado o purificación del agua se lo realiza para eliminar todas las impurezas que se encuentran en el agua, como por ejemplo sedimentos, sarro, metales pesados y arsénico. Existen procesos por medio de los cuales se pueden eliminar las impurezas presentes en el

agua, entre ellos podemos nombrar filtrado, osmosis inversa, radiación UV.

- Filtrado: capaz de retener partículas iguales o mayores a $50 \mu m$ como arena, tierra y otros sedimentos, su capacidad de filtrado varía según el tamaño del filtro (Rotoplas, 2015)
- Osmosis inversa: capaz de eliminar virus, bacterias, metales pesados y sedimentos que se encuentran en el agua. Su capacidad de filtrado es mucho mayor en comparación a la realizada por filtrado sencillo (Rotoplas, 2015)
- Radiación UV: permite eliminar agentes patógenos como virus que se encuentran en el agua. Usada en laboratorios y procesos industriales ya que no altera la composición del agua. Su rango de operación está entre los 200 y 300 nm (Métodos de Purificación, 2015).

2.3.2.2. Aire como fluido caloportador

Los componentes necesarios para la implementación del banco de prueba para colectores solares que usen aire como fluido caloportador son los siguientes: ductos de aire a la entrada y salida del colector con su respectiva estructura de soporte, pre calentador eléctrico de aire, dispositivos para el mezclado de aire, un ventilador o blower para la succión del aire hacia el colector, y un dispositivo para la medición de las fugas de aire en el banco de prueba (Ver *Figura 2.7*).

Ducto para la conducción del aire

La norma ANSI/ASHRAE 93:2010 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

Para la selección de este equipo es necesaria la determinación del flujo volumétrico de aire que debe mover, y la presión manométrica que se pierde a través del sistema. 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 93:2010 recomienda un valor máximo, pero este caudal está en función del área bruta del colector que será sometido a las pruebas. Debido a esto, se utiliza un valor de caudal de diseño que toma en cuenta la delimitación establecida para el área bruta del colector.

Con respecto a la presión, la única restricción que da la norma ANSI/ASHRAE 93:2010 es que a la salida del colector exista una presión manométrica mínima de $124 Pa$. Dado que se conoce el área transversal y la longitud de los ductos de conducción de aire, conforme a la *sección "Ducto para la conducción de aire"* antes mencionada, se puede calcular la caída de presión en estos utilizando dinámica de fluidos; de igual modo para la determinación de la caída de presión en el colector. La caída de presión total del sistema lo compone la suma de todas estas caídas de presión descritas en el presente párrafo.

El ventilador seleccionado debe tener un variador de frecuencia en el motor eléctrico motriz, con el fin de cambiar la velocidad de rotación del ventilador para adaptar el flujo volumétrico necesario para cada colector de aire que vaya a ser probado.

Pre calentador de aire

Con el propósito de obtener varios puntos de datos, el procedimiento dictamina variar la temperatura del fluido a la entrada del colector. 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 (12)*:

$$P_a = \dot{m}c_{p_a}\Delta T_{co} \quad (12)$$

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 Nzabonimana (1983) y Umogbai (2013). 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 kg/m^3 (Incropera, 1999), a la temperatura ambiente de Guayaquil. De mismo modo, el valor del calor específico del aire se asume constante como $1.007 \text{ kJ/kg} \times K$ (Incropera, 1999), a la misma temperatura ambiente.

Aparato para la medición de fuga de aire

La norma ANSI/ASHRAE 93 recomienda la construcción de un aparato para la medición de las fugas de aire, tal como se muestra en la *Figura 2.9*. Este aparato utiliza una placa orificio y manómetros, colocados en una sección recta, para mediciones de flujo. Esta sección debe ser construida de acuerdo al estándar ASHRAE 41.7.

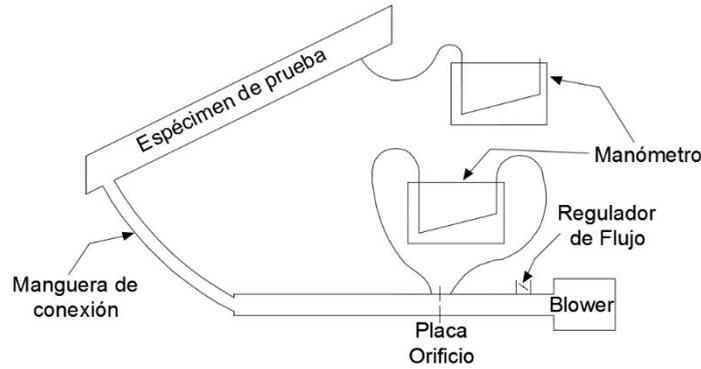


Figura 2.9: Esquema del aparato a utilizarse para la medición de fugas de aire en colectores que usan aire

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 93-2010

La determinación del flujo másico por el método de la placa orificio requiere de iteración, debido a que el coeficiente de descarga es una función del número de Reynolds, y debe ser calculado con la velocidad media del aire, la cual es desconocida hasta que el flujo másico de aire es determinado. Para comenzar la iteración se debe elegir un coeficiente de descarga de $C = 0.6$, recomendación tomada de la norma ASME MFC-3M (2004). Las iteraciones deben proseguir hasta que el coeficiente de descarga calculado, se aproxime al anterior con un valor de ± 0.005 . Las Ecuaciones (13) y (14), permiten determinar coeficiente de descarga y flujo másico, respectivamente; estas fueron obtenidas de la norma ASME MFC-3M.

$$C = 0.5959 + (0.0312 * \beta^{2.1}) - (0.1840 * \beta^8) + [(0.039 * \beta^4) * (1 - \beta^4)^{-1}] - (0.01584 * \beta^3) + (91.71 * \beta^{2.5} * Re^{-0.75}) \quad (13)$$

$$\dot{m} = 0.09970190 * C * d^2 * \sqrt{\frac{\Delta p * \rho}{1 - \beta^4}} \quad (14)$$

En las Ecuaciones (13) y (14), (d) es el diámetro de la placa orificio dado en (pulg), (Δp) es la caída de presión a través de la placa orificio en (pulg de agua), (ρ) es la densidad del aire en ($lbm/pulg^3$) y (β) es la razón entre el diámetro del agujero de la placa orificio y el diámetro del

ducto. Estas ecuaciones poseen restricciones de uso y valores específicos de constantes dependientes del instrumento utilizado para medición de flujo, para mayor información de estas restricciones, remitirse a la sección 2-4.3.1 de la norma ASME MFC-3M y a la sección 2-4 de dicha norma para la determinación de los valores constantes.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

En el presente capítulo se detalla la instrumentación y los componentes elegidos para la implementación de los bancos de prueba, tanto para colectores solares que utilicen agua como para los que utilicen aire como fluido caloportador; este último se lo realiza tomando como referencia un colector solar que se encuentra en el Laboratorio de Fuentes Renovables de Energía ESPOL (Lab. FREE), tal como se muestra en la *Figura 3.1*.



Figura 3.1: Colector solar que utiliza aire como fluido de transferencia de calor, ubicado a las afueras del Lab. FREE

Fuente: Elaboración propia

Las especificaciones del colector de la *Figura 3.1* se muestran a continuación en la *Tabla 3.1*:

Tabla 3.1: Especificaciones del colector de aire

Parámetro	Valor
Altura (m):	2
Ancho (m):	1
Espesor del colector (m):	0.24
Área de entrada al colector (m ²):	0.033
Área de salida del colector (m ²):	0.052

Fuente: Elaboración propia

Además en la *Figura 3.2* se muestra el colector solar que funciona con agua como fluido caloportador, que se encuentra en junto al Lab. FREE, dicho colector puede ser utilizado para realizar las pruebas de funcionamiento del banco de prueba.



Figura 3.2: Colector solar que utiliza agua como fluido de transferencia de calor, ubicado a las afueras del Lab. FREE

Fuente: Elaboración propia

3.1. Selección de instrumentos

Los instrumentos fueron seleccionados basándose en los requerimientos mínimos dados por la norma ANSI/ASHRAE 93:2010. Además también se consideró la facilidad de adquisición, es decir si los instrumentos se encontraban disponibles en el mercado local y su costo. Entre los aspectos considerados se encuentran las ventajas y desventajas expuestas en la *sección 2.3.1*. En la *Tabla 3.2* se enlistan los instrumentos seleccionados.

Tabla 3.2. Instrumentación seleccionada para el banco de prueba

Instrumentos para medición de radiación solar	
Piranómetro	Marca: Kipp Zonen, Modelo: CMP 11
Instrumentos para medición de temperatura	
Termocupla	Termocupla Tipo T, Marca: National Instruments
Instrumentos para medición de flujo	
Caudalímetro	Marca: OMEGA Engineering, Modelo: FTB - 101
Instrumentos para medición de presión	
Manómetro	Marca: OMEGA Engineering, Modelo: PGT – 30L – 15
Instrumentos para medición de la velocidad del viento	
Anemómetro	Sensor mecánico de tres copas, Marca: Renewable NRG Systems, Modelo: RNRG 40 C
Almacenador de datos	
National Instrument. Chasis: cDAQ-9174, Módulos: NI 9219	

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran los instrumentos seleccionados con sus respectivas características técnicas.

3.1.1. Sensor de radiación solar



Figura 3.3: Piranómetro CMP11

Fuente: Renewable NRG Systems

En la *Figura 3.3* se muestra el piranómetro seleccionado, cuyas características se observan en la *Tabla 3.3*.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas del piranómetro CMP 11

Parámetro	Valor
Rango espectral	285 a 2800 nm
Sensibilidad	7 a 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tiempo de respuesta	< 5 s
Error direccional (hasta 80 ° a 1000 W/m^2)	< 10 W/m^2
Sensibilidad de dependencia a la temperatura (-10 °C a +40 °C)	< 1 %
Rango de temperatura de operación	-40 °C a +80 °C
Irradiancia solar máxima	4000 W/m^2
Campo de visión	180 °

Fuente: Renewable NRG Systems

3.1.2. Sensor velocidad de viento

En la *Figura 3.4* se puede observar el anemómetro seleccionado, cuyas especificaciones se detallan en la *Tabla 3.4*:



Figura 3.4: Anemómetro RNRG 40C

Fuente: Renewable NRG Systems

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas del anemómetro RNRG 40C

Parámetro	Valor
Tipo de Sensor	Anemómetro de 3 copas
Rango	1 a 96 m/s
Exactitud	0.1 m/s desde 5 a 25 m/s
Rango de la señal de salida	0 a 125 Hz
Límite a la respuesta	0.78 m/s

Fuente: Proviento S.A.

3.1.3. Sensor de flujo

En general se espera un flujo relativamente uniforme y una precisión alta. Los sensores de desplazamiento positivo cumplen con esta característica. En la *Figura 3.5* se muestra el sensor de tipo turbina que es de desplazamiento positivo, este sensor de flujo fue seleccionado para ambos bancos de prueba. Funciona con fluido en estado líquido y gaseoso. En la *Tabla 3.5* se muestran las especificaciones técnicas del equipo.



Figura 3.5: Caudalímetro de turbina

Fuente: OMEGA Engineering

Tabla 3.5: Especificaciones técnicas del caudalímetro de turbina FTB - 101

Parámetro	Valor
Tipo de Sensor	Caudalímetro de Turbina
Modelo	FTB - 101
Rango	0.35 a 3.5 GPM
Exactitud	±0.5% del valor mostrado
Señal de salida	30 mV pico a pico
Rango de temperatura de trabajo	-268 a 232 °C

Fuente: OMEGA Engineering

3.1.4. Sensor de presión

En la *Figura 3.6* se muestra el sensor de presión seleccionado para ambos bancos de prueba, debido a que cumple con las características exigidas por la norma ANSI/ASHRAE 93 y sus especificaciones técnicas se encuentran en la *Tabla 3.6* que se muestra a continuación.



Figura 3.6: Manómetro tipo Bourdon

Fuente: OMEGA Engineering

Tabla 3.6: Especificaciones técnicas del manómetro PGT – 30L – 15

Parámetro	Valor
Tipo de Sensor	Manómetro
Modelo	PGT – 30L – 15
Rango	0 a 15 psig
Exactitud	0.5
Conexión	¼"
Diámetro del dial	3"

Fuente: OMEGA Engineering

3.1.5. Sistema de adquisición de datos (DAQ)

Se seleccionaron dos sistemas de adquisición de datos, uno para cada banco de prueba. En la *Tabla 3.7* y *Tabla 3.8* se muestran los componentes del DAQ 1 y DAQ 2, siendo utilizados para el banco de prueba de colectores solares que utilizan agua y aire como fluido caloportador, respectivamente.

Tabla 3.7: Componentes del DAQ 1

Ítem	Cantidad
Módulo multifunción NI 9219	2
Liberador de tensión NI 9972	2
Chasis NI cDAQ-9174 para los módulos	1

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.8: Componentes del DAQ 2

Ítem	Cantidad
Módulo multifunción NI 9219	6
Liberador de tensión NI 9972	6
Chasis NI cDAQ-9178 para los módulos	1

Fuente: Elaboración Propia

En la *Figura 3.7* se puede observar el módulo NI 9219 que fue escogido para ser utilizado en ambos bancos de prueba, esto se debe a que posee un amplio rango de aplicaciones y además permite realizar un muestreo simultáneo, lo que es esencial para el sistema.



Figura 3.7: Módulo NI 9219

Fuente: National Instruments

El dispositivo mostrado en la *Figura 3.8* son liberadores de tensión, que sirven para poder proteger al operario de riesgos eléctricos.



Figura 3.8: NI 9972

Fuente: National Instruments

En la *Figura 3.9* se puede observar el chasis NI cDAQ – 9174 que es utilizado en el DAQ 1, mientras en la *Figura 3.10* se muestra el chasis NI cDAQ – 9178 que es utilizado en el DAQ 2, la diferencia principal entre

ambos es la cantidad de módulos que pueden ser utilizados con cada uno de ellos.



Figura 3.9: Chasis del DAQ 1

Fuente: National Instruments



Figura 3.10: Chasis del DAQ 2

Fuente: National Instruments

3.2. Selección de componentes

3.2.1. Agua como fluido caloportador

Una vez mostrado los principales instrumentos se seleccionan los componentes. Para este proyecto se utilizarán tuberías y sus accesorios de $\frac{1}{2}$ pulgada, ya que esta medida predomina en las conexiones con los componentes del banco de prueba.

Para la selección de algunos componentes fue necesario realizar cálculos previos obteniendo como resultado los valores de la *Tabla 3.9*:

Tabla 3.9: Datos calculados

	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 (6)</i>	$h = 0.026 m$
Presión mínima, <i>Ecuación (7)</i>	$P_1 = 256.45 Pa$
Flujo másico, <i>Ecuación (8)</i>	$\dot{m} = 0.06 kg/s$
Caudal del sistema, <i>Ecuación (10)</i>	$Q_a = 60 cm^3/s = 0.95 GPM$
Potencia máxima del pre calentador, <i>Ecuación (11)</i>	$P_c = 7.52 kW$

Fuente: Elaboración propia

Considerando que el calor es una de las formas en las que se puede manifestar la energía, se toma el valor encontrado con la *Ecuación (3)* y se lo ingresa en la *Ecuación (1)*, despejando la masa m se obtiene un valor de 2,411 (kg), y tomando en consideración que la densidad del agua es de 1,000 (kg/m^3), se estima que el volumen de agua (V) requerido es:

$$V = 2.4 [m^3] = 2,400 [l] \quad (15)$$

La *Ecuación (15)* da el valor del volumen total de agua que se debe almacenar entre los dos tanques que posee el banco de prueba.

3.2.1.1. Bomba de agua

Para la selección de la bomba fue necesario determinar la altura a la cual debía elevarse el fluido ya que este es un parámetro fundamental.

A continuación, se muestra la bomba seleccionada, la cual es una tipo periférica como se muestra en la *Figura 3.11* y sus principales parámetros en la *Tabla 3.10*; además en la *Figura A.0.3* que se encuentra en el *Apéndice A* se muestra la curva característica de la bomba.



Figura 3.11: Bomba periférica

Fuente: Pedrollo

Tabla 3.10: Especificaciones técnicas de la bomba PKm60

Parámetro	Valor
Marca	Pedrollo
Modelo	PKm60
Potencia	0.5 HP
Caudal	5 a 40 l/min
Altura	4 a 38 m

Fuente: Pedrollo

3.2.1.2. Filtro estándar de agua

Se seleccionó un filtro estándar como se muestra en la *Figura 3.12*, debido a que el sistema no necesita agua purificada ya que no va a ser ingerida por el ser humano y únicamente se busca eliminar sedimentos, impurezas y basura que se encuentre en el agua para que esta no afecta al proceso de medición del rendimiento del colector solar; además su costo es bajo y puede ser obtenido con facilidad en el mercado local al igual que el repuesto de su filtro interno. En la *Tabla 3.11* se muestran las características sobre el filtro seleccionado.



Figura 3.12: Filtro estándar de agua.

Fuente: Rotoplas Ecuador

Tabla 3.11: Especificaciones técnicas del filtro estándar Rotoplas

Parámetro	Valor
Material	Polipropileno
Presión de trabajo	0.5 a 7 kg/cm^2
Temperatura de trabajo	4 a 60°C
Rendimiento	85% de los sólidos en suspensión mayores a 50 micras

Fuente: Rotoplas Ecuador

3.2.1.3. Tanques de almacenamiento de agua

El banco de prueba necesita dos tanques de almacenamiento de agua; uno de ellos también es llamado como reservorio ya que se encuentra al nivel del piso y es posee una mayor capacidad de almacenamiento en comparación al otro tanque que también es llamado como tanque elevado.

La cantidad de agua que se necesita almacenar fue encontrada anteriormente y su valor se encuentra especificado en la *Ecuación (15)* con un valor de 2,400 litros, luego de una búsqueda de tanques de almacenamiento se determinó que los más idóneos para el banco de prueba son un tanque cilíndrico vertical (tipo botella) de 1,100 litros y otro tanque cilíndrico horizontal de 1,300 litros siendo utilizados como tanque elevado y reservorio respectivamente, ambos tanques son Plastigama.



Figura 3.13: Tanque de 1100 litros

Fuente: Plastigama



Figura 3.14: Tanque de 1300 litros

Fuente: Plastigama

3.2.1.4. Pre calentador de agua

Para la selección del pre calentador fue necesario determinar la máxima cantidad de energía que se debe suministrar al sistema, para aquello se determinó la potencia máxima requerida, cuyo valor es 7.52 (kW) cumpliendo los requerimientos de la norma. El equipo debe poseer una potencia regulable y su potencia máxima debe ser mayor a la requerida.

En el mercado local no se encontraron calentadores de agua que cumplan los parámetros especificados anteriormente. El calentador seleccionado es importado, marca EcoSmart y modelo ECO11. En la *Tabla 3.12* se muestran las especificaciones técnicas del pre calentador eléctrico.



Figura 3.15: Calentador ECO 11

Fuente: EcoSmart

Tabla 3.12: Especificaciones del pre calentador

Parámetro	Valor
Marca	ECOSMART
Modelo	ECO11
Potencia	13.6 KW
Voltaje	240 V
Amperaje	60 A
Caudal de activación	0.25 GPM
Altura	4 a 38 m

Fuente: EcoSmart

3.2.2. Aire como fluido caloportador

3.2.2.1. Ducto de conducción de aire

Siguiendo los lineamientos de la norma ANSI/ASHRAE 93, se debe escoger la menor área transversal entre la entrada y salida del colector para dimensionar los ductos de aire. Como resultado se obtiene que el área transversal del ducto debe ser rectangular con dimensiones de 520 (mm) de ancho y 100 (mm) de altura por las dimensiones del colector de aire ubicado a las afueras del Lab. FREE.

3.2.2.2. Equipo para la succión de aire

En la *Tabla 3.13* se muestran los resultados de los cálculos de las caídas de presión que se presentan en cada segmento del banco de prueba. En total, se pierden 0.89 (Pa) en el sistema. Se requiere de una presión manométrica a la salida del sistema de por lo menos 124 (Pa), por lo tanto el ventilador debe suministrar aire a una presión de 125 (Pa) o mayor. El cálculo de estas caídas de presión (Δp) se adjuntan en el *Apéndice A*, al final del documento.

Tabla 3.13: Caída de presión, por segmentos, en el ducto 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

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el caudal de diseño para el funcionamiento del banco de prueba es de $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$, por cada metro cuadrado de área bruta del colector, conforme lo dicta la norma ANSI/ASHRAE 93:2010. Debido a la restricción de área bruta máxima de colector de 3 m^2 , determinada por los autores, el caudal de diseño resultante es de $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los cálculos representativos para la selección del ventilador, se adjuntan en el *Apéndice A*, al final del documento. Considerando ambos resultados de caudal y caída de presión, el ventilador seleccionado que cumple con estos requerimientos es el que se muestra en la *Figura 3.16*, junto a sus datos técnicos mostrados en la *Tabla 3.14*.



Figura 3.16: Ventilador centrífugo CMB2 140/059

Fuente: Soler & Palau

Tabla 3.14: Características técnicas del ventilador centrífugo CMB2 140/59

Ventilador	
Diámetro	140 mm
Ancho	59 mm
Motor	
Potencia	0.155 kW
Numero de Polos	2
Tensión de Alimentación	230 V – 60 Hz

Fuente: Soler & Palau

3.2.2.3. Pre calentador de aire

Utilizando la *Ecuación (12)*, $P_a = \dot{m}c_{p_a}\Delta T_{co}$, la cual se deriva de la ecuación de calor sensible que debe ser suministrado al aire, se selecciona una resistencia eléctrica capaz de generar calor a una potencia igual a 4 (kW).

3.2.2.4. Aparato para la medición de fuga de aire

Como se describe en la *sub-sección "Aparato para la medición de fuga de aire"* antes mencionada en el *Capítulo 2, sección 2.3.2.2*, para la construcción de este aparato es necesario un ventilador que será el mismo que se escogió en la *sección 3.2.2.2*. Se debe construir un ducto cuadrado con dimensiones de 254x254 (mm) y una longitud de 1,000 (mm), con agujeros para poder medir caída de presión a través de la placa orificio, como se muestra en la *Figura 3.17*. La construcción de este ducto recto se realizó en concordancia con la norma ASME MFC 3M.

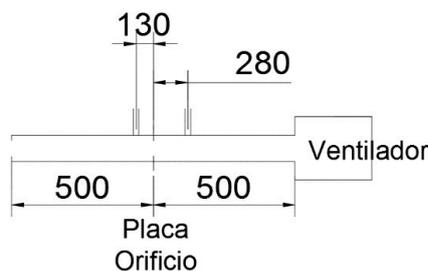


Figura 3.17: Aparato para la medición de fuga de aire

Fuente: Elaboración propia

3.3. Metodología experimental

A continuación se detalla el procedimiento que se debe seguir para la elaboración de las pruebas a realizarse en los colectores solares. El detalle de la guía experimental se adjunta en la sección de Apéndices.

3.3.1. Generalidades del procedimiento experimental

En la presente sección se especifican las restricciones para realizar las pruebas y los parámetros tanto ambientales como de configuración, que deben satisfacerse al momento de realizar las pruebas.

3.3.1.1. Restricciones del colector solar que será sometido a prueba

Con el propósito de delimitar el alcance del procedimiento experimental, el colector solar debe cumplir con ciertas características establecidas por la norma y los autores, las cuales se enlistan 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.

3.3.1.2. Condiciones de prueba

La norma ANSI/ASHRAE 93:2010 especifica ciertos parámetros que deben ser cumplidos para que la prueba sea válida. Estos requerimientos aplican para ambos bancos de prueba (Ver *Tabla 3.15*).

Tabla 3.15: Requerimientos fundamentales para la realización de las pruebas 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		$< 30^\circ\text{C}$
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 ($1.0 \text{ pulg. de agua}$)
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.		
Continúa en la siguiente página		

Continuación de la Tabla 3.15

- 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.
- 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.

Fuente: ANSI/ASHRAE 93-2010

Los valores de irradiancia solar descritos en la *Tabla 3.15*, son alcanzados en días con el cielo despejado. Es preferible escoger días con esta característica, para la toma de datos, para así aumentar la probabilidad de obtención de valores válidos para el cálculo de eficiencia térmica.

3.3.1.3. Preparación para el día de ensayo

En lo que respecta a la preparación de los bancos de prueba para el comienzo del día de prueba, el único requisito preliminar es el de eliminar el efecto del gradiente de temperatura en los instrumentos, por lo tanto estos deben ser colocados en su posición de prueba por treinta minutos, para permitirles llegar a un equilibrio térmico con el ambiente.

3.3.1.4. Periodo de prueba

Es el rango de tiempo total que se necesita para tomar un valor de eficiencia térmica instantánea. Esta eficiencia es calculada realizando mediciones durante un periodo de muestreo, donde se mantienen condiciones de estado estable. De igual modo, estas condiciones de estado estable deben mantenerse durante un periodo denominado de pre-data. Un periodo de prueba lo componen estos dos sub-periodos: pre-data y de muestreo (Rojas, Beermann, Klein, & Reindl, 2008).

El periodo de pre-data para colectores solares con soporte fijo debe ser de 15 minutos. En dicho intervalo, el fluido de transferencia de calor debe circular a través del colector con los valores apropiados de temperatura

de entrada y razón de flujo, hasta que permanezcan constantes dentro de un $\pm 2\%$, ó $\pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$ y $\pm 0.005\text{ }gpm$, cualquiera que sea mayor, respectivamente. Así mismo, en el mismo intervalo de tiempo, la temperatura ambiente no debe variar más de $\pm 1.5\text{ }^\circ\text{C}$.

Condición de estado estable se asume que existe en el momento que la temperatura del fluido, a la salida del colector, varia menos de $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ por minuto.

Cabe recalcar que antes de cada periodo de prueba, la superficie del colector así como también el área sensora del piranómetro, deben estar libre de polvo y humedad. Es particularmente importante para los instrumentos de medición de radiación solar, que la limpieza sea realizada con especial cuidado debido a que una acción abrasiva puede alterar apreciablemente las propiedades sensoras del instrumento, debido a que irregularidades en la superficie del instrumento pueden tanto bloquear o reflejar los rayos solares incidentes.

3.3.1.5. Elección de temperatura del fluido a la entrada del colector

Obtener una adecuada distribución de temperaturas a la entrada del colector es posible configurando $(t_{f,i} - t_a)$ a un 0%, 30%, 60% y 90% del valor $(t_{f,m} - t_a)$. Donde $t_{f,i}$ es la temperatura del fluido que entra al colector solar, $t_{f,m}$ es la máxima temperatura de operación para el colector solar recomendada por el fabricante y t_a es la temperatura ambiente. Se infiere que la temperatura a la entrada del colector debe cambiar a cuatro valores diferentes.

3.3.1.6. Cantidad de puntos de datos

Para la completa definición del comportamiento de la eficiencia térmica de un colector, es necesaria la obtención de 16 puntos de datos, los cuales deben cumplir con los requerimientos antes descritos en las secciones 3.3.1.2 y 3.3.1.4. Entiéndase como punto de dato a un valor

de eficiencia térmica, obtenido con alguna temperatura de fluido a la entrada del colector.

Los 16 puntos de datos comprenden: cuatro puntos de datos por cada temperatura de entrada del fluido al colector (descritas en la *sección 3.3.1.5*), dos de estos cuatro puntos de datos deben ser tomados en un periodo de tiempo antes del mediodía y los dos restantes después del mediodía, ya que así lo determina la norma ANSI/ASHRAE 93. El tiempo total estimado para la obtención de estos 16 puntos de datos, es de 20 días (Rojas, Beermann, Klein, & Reindl, 2008). Esta estimación de tiempo puede ser mayor o menor dependiendo de las condiciones climáticas.

3.3.1.7. Fuga de aire del banco de prueba para colectores solares que utilizan aire como fluido caloportador

Con respecto a los colectores solares que usan aire como fluido de transferencia de calor, debe realizarse una prueba adicional; se debe conocer cuál es la razón de fuga de aire desde el colector hacia el ambiente, debido a que puede afectar significativamente en la medición de la energía útil colectada, de ahí que en el cálculo de la eficiencia térmica se debe usar la *Ecuación (16)*, la cual toma en cuenta esta condición para la determinación del flujo másico (\dot{m}), donde \dot{m}_i es el flujo másico a la entrada del colector, \dot{m}_e es el flujo másico a la salida del colector y $t_{f,e}$ es la temperatura del fluido que sale del colector solar.

$$\dot{m} = \dot{m}_e - \frac{(\dot{m}_i - \dot{m}_e)(t_{f,i} - t_a)}{(t_{f,e} - t_{f,i})} \quad (16)$$

3.3.2. Procedimiento experimental

A continuación se redacta el procedimiento para realizar los ensayos en los dos bancos de prueba. La metodología será la misma para ambos, a menos que se especifique lo contrario.

3.3.2.1. Preparación de los bancos de prueba

- a. Determinar el área bruta del colector, ya sea por medición del mismo u obteniendo el dato del fabricante. Este dato es utilizado para determinar la razón de flujo del fluido caloportador en el banco de prueba, como se especifica en la *sección 3.3.1.2*.
- b. Colocar el colector sobre la estructura de soporte y conectar las tuberías de entrada y salida, para el caso de los colectores solares que utilicen agua; o los ductos de entrada y salida, para el caso de los colectores solares que utilicen aire.
- c. Dejar que los instrumentos lleguen a un equilibrio térmico con el ambiente por treinta minutos.
- d. Hacer circular el fluido por el banco de prueba.

3.3.2.2. Determinación de parámetros fundamentales del colector

Se deben realizar tres pruebas principales para determinar los parámetros fundamentales del colector, estos son: constante de tiempo, eficiencia térmica y factor de modificación del ángulo de inclinación del colector. Para el caso especial del colector que usa aire como fluido de transferencia de calor, se realiza una prueba adicional para determinar la razón de fuga de aire.

Para la recolección de datos, se utiliza una razón de muestreo de 5 segundos, esto es debido a que según Rojas et al. (2008), realizando una toma de datos cada 10 segundos se obtiene una adecuada distribución de datos, por lo tanto se escoge 5 segundos para mejorar la distribución de datos.

Determinación de la constante de tiempo del colector

Se define como constante de tiempo del colector, al tiempo que le toma a este aumentar la temperatura de salida del fluido en un 63.2% de la temperatura de estado estable. Dicho de otra manera, es el tiempo T que le toma a la cantidad $(t_{f,e,T} - t_{f,i})$ aumentar un 63.2% de $(t_{f,e,ss} - t_{f,i})$, donde $t_{f,e,T}$ es la temperatura del fluido a la salida del colector en un

tiempo T , $t_{f,e,ss}$ es la temperatura del fluido a la salida del colector en estado estable.

- a. Se cubre el colector con una cubierta blanca y opaca. La cubierta debe estar suspendida de la superficie del colector para permitir que el aire del ambiente circule por encima de este.
- b. Se controla que la temperatura de entrada del fluido sea lo más cercana a la temperatura ambiente, preferiblemente entre ± 1 °C, y se deja al sistema llegar a estado estable.
- c. Se remueve la cubierta abruptamente, se inicia el cronómetro y se monitorea la temperatura del fluido a la entrada y salida del colector, hasta que $(t_{f,e,T} - t_{f,i}) = 0.632(t_{f,e,ss} - t_{f,i})$. Se anota este tiempo como constante de tiempo del colector.

Determinación de la eficiencia térmica del colector

Para el transcurso del periodo de muestreo debe cumplirse lo estipulado en las *secciones 3.3.1.2, 3.3.1.4, 3.3.1.5 y 3.3.1.6*.

- a. A partir de las 9:30 am, hora local, se debe comenzar con los periodos de prueba, para asegurar suficiente irradiación solar.
- b. Para el primer periodo de prueba, se regula la temperatura del fluido a la entrada del colector a la misma temperatura del ambiente, se espera a que el colector se encuentre en estado estable y se deja circular el fluido en esa condición por 15 minutos. Luego de este tiempo se procede a tomar datos de temperatura a la entrada y salida del colector por un periodo de 5 minutos o una constante de tiempo, cualquiera que sea mayor.
- c. Se aumenta la temperatura del fluido a la entrada del colector igual a $t_{f,i} = 0.3(t_{f,m} - t_a) + t_a$, y se realiza el mismo procedimiento descrito en el paso “b”. Se debe aumentar la temperatura del fluido a la entrada del colector dos ocasiones más, iguales a $t_{f,i} = 0.6(t_{f,m} - t_a) + t_a$ y $t_{f,i} = 0.9(t_{f,m} - t_a) + t_a$.
- d. Se deben realizar los cuatro periodos de muestreo antes del mediodía, y adicionalmente, los mismos cuatro periodos después del

mediodía. Esta simetría con respecto al mediodía se la realiza para que cualquier efecto transitorio que pueda estar presente, no influya en los resultados de la prueba.

- e. Se debe anotar la hora local al comienzo y a la finalización de cada periodo de prueba.
- f. En la *Tabla 3.16* se muestra un ejemplo de la hoja electrónica que se debe realizar para la adquisición de datos. Cabe recalcar que los valores que dependen del tiempo tales como radiación, temperatura y flujo másico, deben ser divididos para el número de muestras tomadas durante el periodo de muestreo.

Tabla 3.16: Ejemplo de tabla de adquisición de datos para la prueba

Fecha	Hora Inicio (hh:mm:ss)	Hora Final (hh:mm:ss)	\overline{G}_t (W/m ²)	$\frac{G_d}{G_t}$ (%)	\overline{t}_a (°C)	\overline{u} (m/s)	$\overline{t}_{f,i}$ (°C)	$\overline{t}_{f,e}$ (°C)	$\overline{t}_{f,e} - \overline{t}_{f,i}$ (°C)	\overline{m} (kg/s)
16/02/24	9:32:15	9:53:04	900	15	28	3.2	28	60	32	0.061
16/02/24	10:15:30	10:35:40	965	14	29	3.0	45	58	13	0.063
16/02/24	11:04:02	11:25:17	1000	14	28	3.1	60	75	15	0.060
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
aa/mm/dd										

Fuente: Elaboración Propia

- g. Se debe realizar un filtro de todos los datos recolectados. Los datos que serán tomados como válidos para el cálculo de eficiencia son los que cumplen, por la duración de todo el periodo de prueba, con los requerimientos estipulados en la *sección 3.3.1.2*.
- h. Para la determinación de la eficiencia térmica del colector, se puede utilizar las *Ecuaciones (17), (18), (19) ó (20)*, como se muestra a continuación:

$$\eta_g = \frac{\dot{m}c_p(\overline{t}_{f,e} - \overline{t}_{f,i})}{A_g \overline{G}_t} \quad (17)$$

$$\eta_g = \frac{\dot{m}c_p(\overline{t}_{f,e} - \overline{t}_f)}{A_g \overline{G}_t} \quad (18)$$

$$\eta_r = \frac{\dot{m}c_p(\overline{t_{f,e}} - \overline{t_{f,i}})}{A_r G_t} \quad (19)$$

$$\eta_r = \frac{\dot{m}c_p(\overline{t_{f,e}} - \overline{t_f})}{A_r G_t} \quad (20)$$

Donde $t_f = \frac{t_{f,i} + t_{f,e}}{2}$ es la temperatura media entre la entrada y salida del colector, A_r es el área absorbente del colector solar y G_t es la irradiancia solar global incidente sobre el plano del área de apertura del colector solar.

La eficiencia térmica puede ser calculada con respecto a la temperatura media del fluido, la temperatura de entrada al colector, el área absorbente o el área bruta del colector; cualquier combinación de estos parámetros genera una caracterización efectiva del colector. Por facilidad de cálculo se utilizará la *Ecuación (17)* para determinar las eficiencias térmicas instantáneas, pero el operario puede elegir la ecuación que desee utilizar.

Es necesario aclarar que para el cálculo de la eficiencia térmica, en los colectores solares que usan aire como fluido de transferencia de calor, se debe usar el flujo másico determinado por la *Ecuación (16)*.

- i. Se debe generar la gráfica η_g vs $\frac{t_{f,i} - t_a}{G_t}$. Para obtener la ecuación de la curva se debe utilizar el método de ajuste de los mínimos cuadrados. La curva no debe ser extrapolada más allá de los límites de los datos.
- j. Al comparar la ecuación de la curva experimental con la *Ecuación (21)*, se pueden obtener valores que caracterizan a cada colector con las propiedades de colección térmica que poseen, tales como el producto de transmitancia-absorbancia efectiva $(\tau\alpha)_e$, factor de remoción de calor (F_R) , área de apertura del colector (A_a) y

coeficiente de pérdida de transferencia de calor del colector solar (U_L).

$$\eta_g = \left(\frac{A_a}{A_g} \right) F_R \left[(\tau\alpha)_e - U_L \frac{(t_{f,i} - t_a)}{G_t} \right] \quad (21)$$

Determinación del factor de modificación del ángulo de incidencia del colector

El factor de transmitancia-absorbancia efectiva de la *Ecuación (21)*, puede ser reemplazado por el valor a incidencias normales $(\tau\alpha)_{e,n}$, si se introduce un factor denominado modificador de ángulo de incidencia ($K_{\alpha\tau}$). Este factor es utilizado para que el rendimiento térmico de un colector solar pueda ser predicho bajo un amplio rango de condiciones y/o tiempo del día, utilizando la *Ecuación (22)*:

$$\eta_g = \left(\frac{A_a}{A_g} \right) F_R \left[K_{\alpha\tau} (\tau\alpha)_{e,n} - U_L \frac{(t_{f,i} - t_a)}{G_t} \right] \quad (22)$$

- a. Para definir este factor, deben realizarse un conjunto de mediciones por separado. Se realiza luego de haber encontrado la curva característica para incidencias muy cercanas a la normal, descrita en la *sección “Determinación de la eficiencia térmica del colector”*.
- b. Mediciones de eficiencia son tomadas en pares, donde cada par incluye un valor de eficiencia antes del mediodía y un segundo valor después del mediodía. El promedio del valor del ángulo de incidencia para ambos puntos de datos es el mismo. La eficiencia del colector para ese ángulo de incidencia en específico debe ser considerado igual al promedio de los dos valores. Los valores de eficiencia son determinados en acuerdo con el método utilizado en la *sección “Determinación de la eficiencia térmica del colector”*.
- c. Estos datos deben ser recolectados para ángulos de incidencia iguales a 0, 30, 45 y 60 grados, manteniendo la temperatura del

fluido a la entrada del colector lo más cercano a la temperatura ambiente.

- d. El valor del factor de modificación del ángulo de incidencia es calculado con la *Ecuación (23)*, con los cuatro valores de eficiencia encontrados en esta prueba y con el valor de $F_R(\tau\alpha)_{e,n}$, encontrado en el procedimiento en la *sección “Determinación de la eficiencia térmica del colector”*:

$$K_{\alpha\tau} = \frac{\eta_{g,K}}{\left(\frac{A_a}{A_g}\right) F_R(\tau\alpha)_{e,n}} \quad (23)$$

Con estos cuatro datos del factor de modificación se puede obtener una gráfica aproximada de la variación de este valor con respecto al ángulo de incidencia, graficando $K_{\alpha\tau}$ vs θ . Queda a elección del operario tomar más puntos de datos, con el propósito de obtener una caracterización más aproximada de este parámetro.

Determinación de la razón de fuga de aire en el colector

Las fugas de aire deben ser minimizadas sellando todas las uniones, exceptuando las que son parte integral del colector. Las fugas pueden ser medidas en los ductos de aire por separado o todo acoplado al colector. Las porciones de ducto que requieren ser sometidas a la prueba son todas las secciones que contienen estaciones de medición de temperatura, presión y flujo, así como también las transiciones para acople al colector. Esto incluye el ducto antes y después de la estación de medición de flujo, a la entrada y salida del colector, respectivamente.

- a. Las salidas de aire a la entrada y salida del espécimen de prueba deben ser selladas. Se conecta el aparato de medición de fuga al espécimen.
- b. Se permite al colector llegar al equilibrio térmico con la temperatura del aire ambiente.

- c. Se inyecta aire, al colector, y se mide la diferencia de presión entre el colector solar y el ambiente, así como también el flujo volumétrico de fuga de aire.
- d. Deben ser recolectados suficientes puntos de datos, pares de datos de presión en el colector y la fuga de aire del mismo, para permitir una interpolación precisa del escape de aire del colector entre 0 y la presión máxima de trabajo especificada por el fabricante. En caso de que no haya una presión máxima de trabajo determinada por el fabricante, el colector deberá ser probado a presiones de trabajo entre 0 y 250 (Pa) (0-1 pulg de agua). Por lo menos, cuatro puntos de datos deben ser recolectados.
- e. Una curva de fuga de aire debe ser graficada y reportada con los resultados de los demás procedimientos. Un ejemplo de curva de fuga de aire para un colector solar de placa plana es mostrado en la *Figura 3.18*.

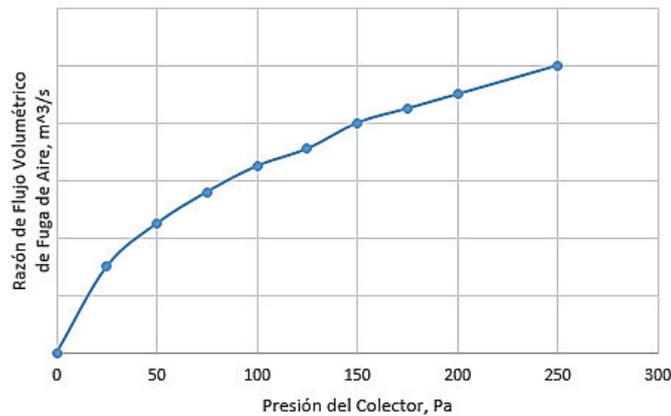


Figura 3.18: Ejemplo de curva de fuga de aire

Fuente: ANSI/ASHRAE 93-2010

3.4. Análisis de costos

A continuación se detallarán los costos directos e indirectos involucrados en la construcción de cada uno de los bancos de prueba.

3.4.1. 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 en la realización del proyecto, se los dividieron 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.

En la *Tabla 3.17* y *Tabla 3.18* se muestran los costos del banco de prueba para colectores que utilicen agua como fluido caloportador (Banco A).

Tabla 3.17: Costos de instrumentación del Banco A

Instrumento	Marca	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Caudalímetro	OMEGA	1	\$ 2,358.00	\$ 2,358.00
Termocuplas	National Instruments	3	\$ 70.00	\$ 210.00
DAQ	National Instruments	1	\$ 6,990.00	\$ 6,990.00
Medidor de presión	OMEGA	2	\$ 440.00	\$ 880.00
Piranómetro	Kipp & Zonen	2	\$ 5,221.44	\$ 10,442.88
Anemómetro	NRG Systems	1	\$ 500.00	\$ 500.00
Valor Total				\$ 21,380.88

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18: Costos de componentes del Banco A

Equipo	Marca	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Tanque Elevado	Plastigama	1	\$ 164.00	\$ 164.00
Tanque de Reservorio	Plastigama	1	\$ 261.20	\$ 261,20
Bomba	Pedrollo	1	\$ 98.99	\$ 98.99
Calentador	ECOSMART	1	\$ 400.00	\$ 400.00
Filtro	Omnifilter	1	\$ 77.67	\$ 77.67
Intercambiador de Calor	----	1	\$ 4,000.00	\$ 4,000.00
Valor Total				\$ 5,001.86

Fuente: Elaboración propia

De igual manera en la *Tabla 3.19* y *Tabla 3.20*, se muestran los costos de instrumentación, componentes y accesorios del banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador (Banco B).

Tabla 3.19: Costos de instrumentación del Banco B

Instrumento	Marca	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Caudalímetro	OMEGA	1	\$ 2,358.00	\$ 2,358.00
Termocuplas	National Instruments	17	\$ 70.00	\$ 1,190.00
DAQ	National Instruments	1	\$ 7,830.00	\$ 7,830.00
Medidor de presión	OMEGA	2	\$ 440.00	\$ 880.00
Piranómetro	Kipp & Zonen	2	\$ 5,221.44	\$ 10,442.88
Anemómetro	NRG Systems	1	\$ 500.00	\$ 500.00
Valor Total				\$ 23,200.88

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20: Costos de componentes del Banco B

Equipo	Marca	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Ventilador	Soler & Palau	2	\$ 120.00	\$ 240.00
Pre calentador	-----	1	\$ 100.00	\$ 100.00
Valor Total				\$ 340.00

Fuente: Elaboración propia

De igual modo, los costos directos deben incluir los costos de construcción y montaje de los bancos de prueba, ya que son fundamentales para la implementación de los mismos.

- Costos de construcción: dentro de este rubro se encuentran todos los consumibles y mano de obra para poder implementar los bancos de prueba. Entre ellos se especifican los siguientes:
 - Electrodo 6011 será utilizado para poder realizar los trabajos de soldadura, debido a que se necesitan construir las estructuras de soporte para el tanque elevado y para los colectores solares.
 - Disco de corte, el cual es necesario para poder cortar los perfiles estructurales.
 - Pernos de anclaje, su uso es exclusivo para sujeción del soporte del tanque elevado al piso. Su uso es necesario ya que las

estructuras se encuentran sujetas a la fuerza ejercida por la velocidad del viento, debido a la ubicación de los bancos de prueba.

- Contrataciones externas, comprende el personal necesario para poder construir los bancos de prueba, tales como soldador y ayudante.

Considerando todos los aspectos que intervienen como costos de construcción, se ha establecido un rubro de \$200 como presupuesto para estos trabajos en cada banco de prueba.

- Costo de montaje, también llamado costo de instalación, comprende todos los accesorios necesarios para la implementación del banco de prueba, tales como tuberías, perfiles estructurales, entre otros (Ver *Tabla 3.21*).

Tabla 3.21: Costos de accesorios del Banco A

Accesorios	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Tubería ½ pulg x 6000 mm	3	\$ 9.84	\$ 29.52
Codo ½ pulg x 90°	30	\$ 0.41	\$ 12.30
Uniones ½ pulg Plástico/Metal	2	\$ 4.80	\$ 9,60
Teflón ½ pulg x 12 m	5	\$ 0.35	\$ 1.75
Aislamiento térmico ½ pulg x 1800 mm	1	\$ 7.68	\$ 7.68
Aislamiento térmico codo ½ pulg	5	\$ 1.65	\$ 8.25
Válvula Esférica	1	\$ 3.76	\$ 3.76
Válvula Globo	1	\$ 4.57	\$ 4.57
TECN 100x100x2	4	\$ 29.10	\$ 116.40
TECN 30x30x3	4	\$ 24.99	\$ 99.96
Valor Total			\$ 293.79

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del banco de prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador, los principales costos de montaje son la estructura de soporte del colector y los soportes para los ductos (Ver *Tabla 3.22*).

Tabla 3.22: Costo de accesorios del Banco B

Accesorios	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Plancha de aluminio galvanizado	1	\$ 10.13	\$ 10.13
Dámper	2	\$ 25.76	\$ 51.52
Dispositivo de Mezclado	4	\$ 30.00	\$ 120.00
Plancha A36 laminada en caliente	1	\$ 98.15	\$ 98.15
TECN 30x30x3	6	\$ 24.99	\$ 149.94
Valor Total			\$ 429.74

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. 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.

A continuación, se muestran los costos indirectos del banco de prueba para colectores que utilicen agua como fluido caloportador en la *Tabla 3.23*.

Tabla 3.23: Costos indirectos del Banco A

Costos Indirectos	
Costo de ingeniería	\$ 2,500.00
Costo de transporte	\$ 100.00
Imprevistos	\$ 537.53
Total	\$ 3,137.53

Fuente: Elaboración propia

Mientras que en la *Tabla 3.24* se muestran los costos indirectos del banco de prueba para colectores que utilicen aire como fluido caloportador.

Tabla 3.24: Costos indirectos del Banco B

Costos Indirectos	
Costo de ingeniería	\$ 2,000.00
Costo de transporte	\$ 100.00
Imprevistos	\$ 483.41
Total	\$ 2,583.41

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Costos totales

Se considera como costos totales la suma de los costos directos e indirectos para cada banco de prueba, que fueron detallados en las *secciones 3.4.1 y 3.4.2*. En la *Tabla 3.25* se muestra el costo total del Banco A y en la *Tabla 3.26* se muestra el costo total para el Banco B.

Tabla 3.25: Costos totales del Banco 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
Costo Total del Banco A	\$ 30,014.06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26: Costos totales del Banco 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
Costo Total del Banco B	\$ 26,754.03

Fuente: Elaboración propia

3.5. Construcción de los bancos de prueba

La construcción de los bancos de prueba deben cumplir los siguientes parámetros:

- La base del colector solar debe estar a 500 [mm] del piso (ISO, 2010).
- El colector solar se debe colocar a una distancia mínima de 2 metros con respecto a los bordes del techo (ISO, 2010).
- El colector solar debe estar alineado con los puntos cardinales, de tal manera que el tanque elevado quede en dirección norte y el colector en dirección sur (*Ver Plano 2*), así el tanque elevado no producirá sombra alguna sobre el colector, durante todo el periodo de prueba.
- Los bancos de prueba serán instalados en el techo del edificio donde se encuentra la biblioteca de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP). En la *Figura 3.19* se muestra un mapa indicando donde se encuentra la FIMCP dentro de las instalaciones de la ESPOL.

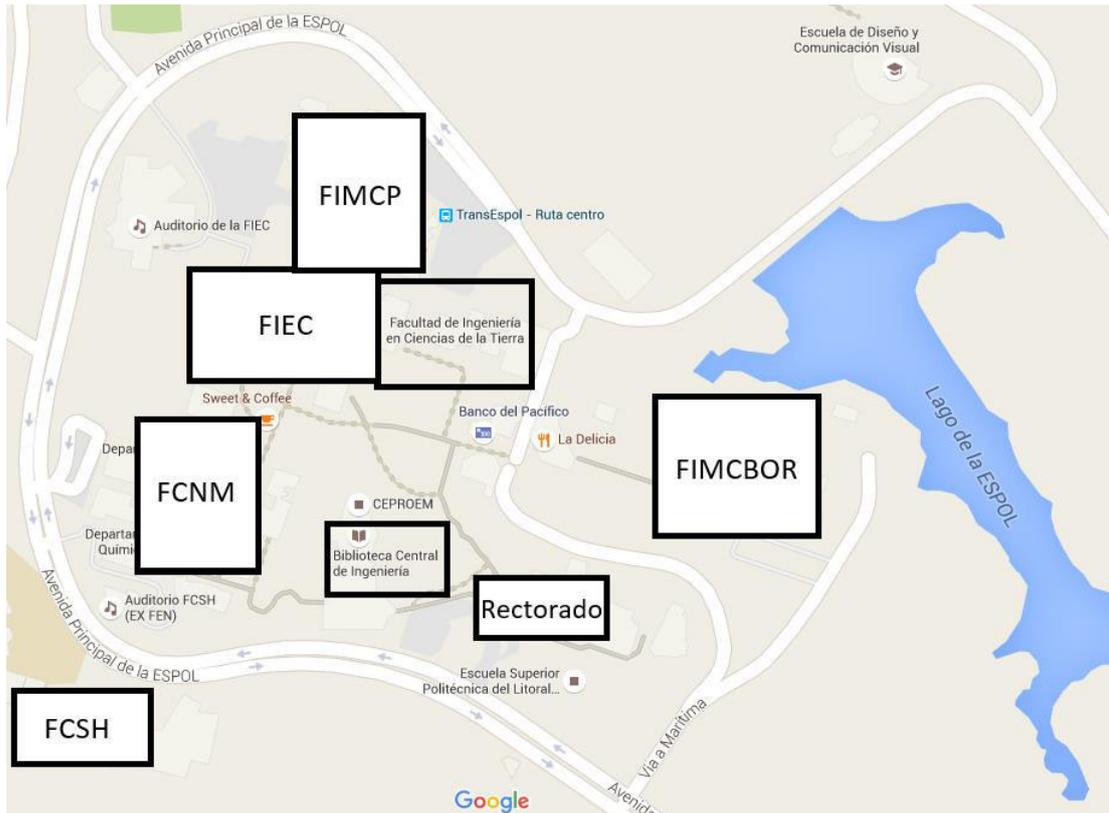


Figura 3.19: Mapa de ESPOL

Adaptado de: Google Maps

- Para poder ingresar al sitio donde serán colocados los bancos de prueba se realizará una conexión o puente desde el segundo piso del bloque 24E de la FIMCP.
- Los trabajos eléctricos solo constan como un rubro de contratación externa mas no han sido considerados a fondo en el proyecto, ya que están fuera del alcance del mismo. Sin embargo, se plantean conexiones de 120 (V), para un correcto funcionamiento de los bancos de prueba.
- A manera de verificación, se instala una sección de tubería transparente (manguera) de 50 (mm) de longitud, a la entrada del colector del Banco A; esto se realiza para tener la capacidad de observar y verificar que efectivamente el fluido ingresa sin ninguna impureza al colector, ya que aquello afectaría la eficiencia del mismo.
- En el Banco A se debe aislar térmicamente la tubería luego de la salida del pre calentador y hasta la entrada al intercambiador de calor.

A continuación se detalla la forma correcta de instalar los instrumentos de medición que se emplean en los bancos de prueba, para ello se basó en la norma ANSI/ASHRAE 93.

3.5.1. Instalación de sensores solares

Los piranómetros utilizados en ambos bancos de prueba deben ser colocados al mismo grado de inclinación del colector solar como se observa en la vista lateral del *Plano 5* (adjunto al final del documento), para una correcta medición. Se utilizan dos piranómetros por banco ya que uno de los piranómetros debe ser tapado de tal forma que no reciba la luz directa del sol y así poder medir la radiación difusa.

3.5.2. Instalación de los sensores de temperatura

Ambos bancos de prueba utilizan termocuplas tipo T para la medición de temperatura en los diferentes puntos, de entrada y salida al colector, necesarios para determinar la eficiencia de los mismos. Para la medición de la temperatura ambiente, se debe instalar una termocupla a una distancia no mayor a 10 metros del colector solar, debe de estar protegida con una cubierta para evitar la exposición directa a los rayos solares pero al mismo tiempo, esta cubierta, debe poseer una libre circulación de aire.

3.5.2.1. Sensores de temperatura en el Banco A

Las mediciones de temperatura no deben realizarse a más de 200 mm de la entrada y salida del colector solar, respectivamente. Por efectos de adaptación a cualquier colector, el punto de medición de temperatura a la salida del colector puede superar esta distancia de 200 mm, en cuyo caso se deben considerar las pérdidas de calor por la distancia. El procedimiento para determinar estas pérdidas se encuentra detallado en el *Apéndice C* de la norma ANSI/ASHRAE 93, referirse a dicha norma cuando se dé el caso.

Para mejorar la medición de temperatura en el fluido, se desea una mezcla homogénea del mismo, por lo que se utiliza un dispositivo de mezclado o en su defecto se hace cambiar la dirección de flujo mediante quiebres bruscos como se observa en la *Figura 3.20*.

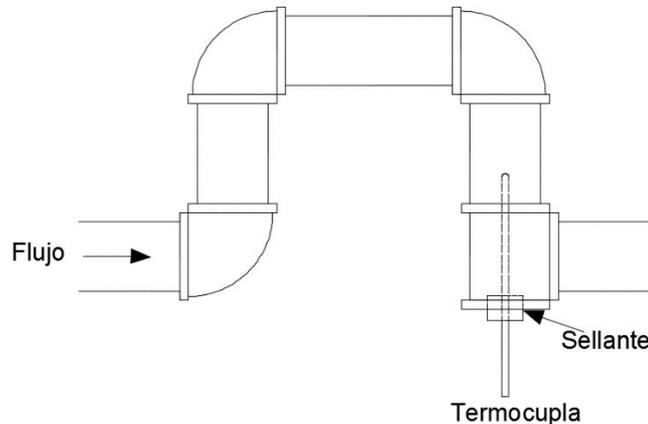


Figura 3.20: Método para asegurar mezclado de líquidos

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 41.1

La termocupla se encuentra inmersa en el fluido como se aprecia en la *Figura 3.20*, esta profundidad de inmersión no debe ser menor de 10 veces el diámetro del tubo de la termocupla (ANSI/ASHRAE, 2013).

3.5.2.2. Sensores de temperatura en el Banco B

Este banco de prueba posee dos estaciones de medición de temperatura, la primera estación se encuentra a una distancia de 114 mm de la entrada del colector y la segunda estación se encuentra a 798 mm de la salida del colector. Cada estación debe ser dividida en áreas iguales transversales, para que en el centro de cada una se coloque la termocupla. Como mínimo, se deben instalar ocho termocuplas en cada estación de medición de temperatura; estas deben conectarse en serie para determinar la diferencia de temperatura a través del colector (Ver *Figura 3.21*).

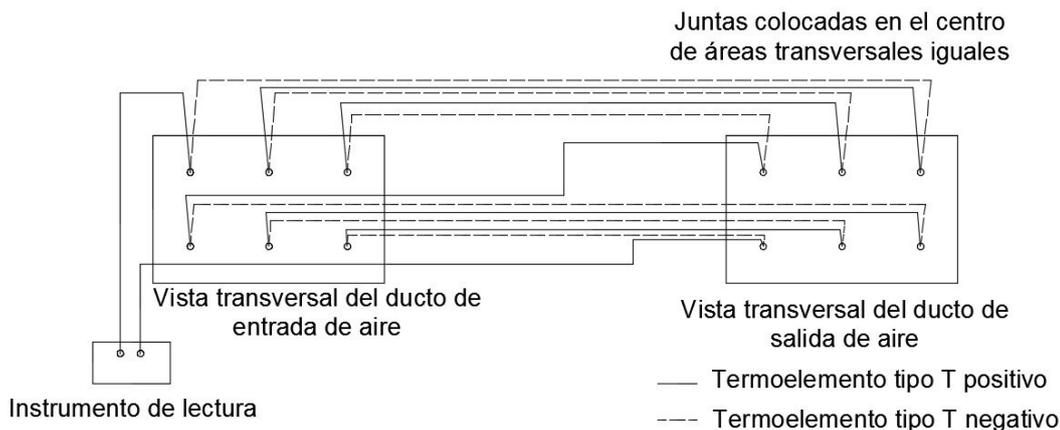


Figura 3.21: Representación esquemática de conexión de termocuplas

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 93

3.5.3. Instalación de sensores para velocidad el viento

Para la medición de la velocidad del viento en el lugar donde se desarrollarán las pruebas, ambos bancos de prueba utilizarán el mismo anemómetro, este debe ser ubicado de tal forma que las estructuras que forman parte de los bancos de prueba no representen una interferencia para él.

3.5.4. Instalación de sensor de flujo

Para el Banco A se seleccionó uno tipo turbina, que se coloca luego del pre calentador y antes del colector; en el caso del Banco B, se coloca el caudalímetro a una distancia de 1368 mm de la entrada del colector y a 912 mm de la salida del colector.

3.5.5. Instalación del sensor de presión

El banco A y B utilizan manómetros tipo Bourdon con entrada de ¼ (pulg), para poder medir la presión en el interior de las tuberías o ductos según corresponda.

3.5.5.1. Sensores de presión en el Banco A

Los manómetros son conectados directamente a la tubería, pero primero se debe realizar una reducción ya que el diámetro nominal de la tubería que se utiliza en el banco es de ½ (pulg).

3.5.5.2. Sensores de presión en el Banco B

En cada sección de medición de presión se deben realizar cuatro agujeros no mayores a 1.6 mm de donde se tomará datos de presión, dichos puntos se unen mediante mangueras y uniones tee con la finalidad de obtener una sola salida, la que se conecta al manómetro (Ver *Figura 3.22*).

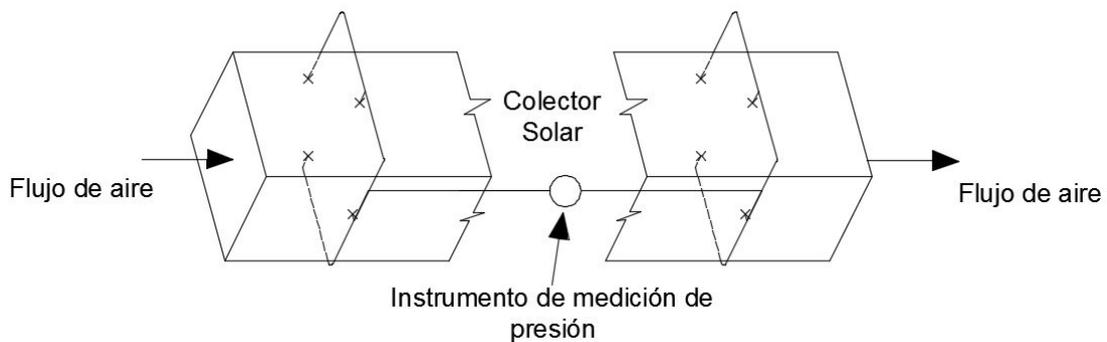


Figura 3.22: Representación esquemática de la medición de presión en los ductos de aire

Adaptado de: ANSI/ASHRAE 93

3.5.6. Sensor de humedad

El sensor de humedad solo es utilizado en el Banco B, para determinar la humedad del aire que entra y sale del colector. Se deben colocar estos sensores, a la misma distancia que son colocadas las termocuplas, a la entrada y salida del colector.

3.6. Cronograma de montaje

En la *Figura 3.23* se muestra la planificación del montaje para el banco A, las tareas principales que se deben desempeñar son: compra de materiales, elaboración de estructuras, montaje de todo el sistema, prueba de funcionamiento y corrección de errores.

La compra de materiales tiene una duración de 70 días debido a que se considera un tiempo de 60 días por importación; la elaboración de estructuras debido a que son trabajos de taller se considera un tiempo de 3 días; al montaje de todo el sistema se le asignó un tiempo de 11 días ya que se deben elaborar

trabajos adicionales, entre ellos la configuración de los instrumentos de medición; para la prueba de funcionamiento y corrección de errores se asignaron 3 días ya que se pueden encontrar algunos errores básicamente en la instrumentación; finalmente se pondrá en funcionamiento el sistema al día 87.

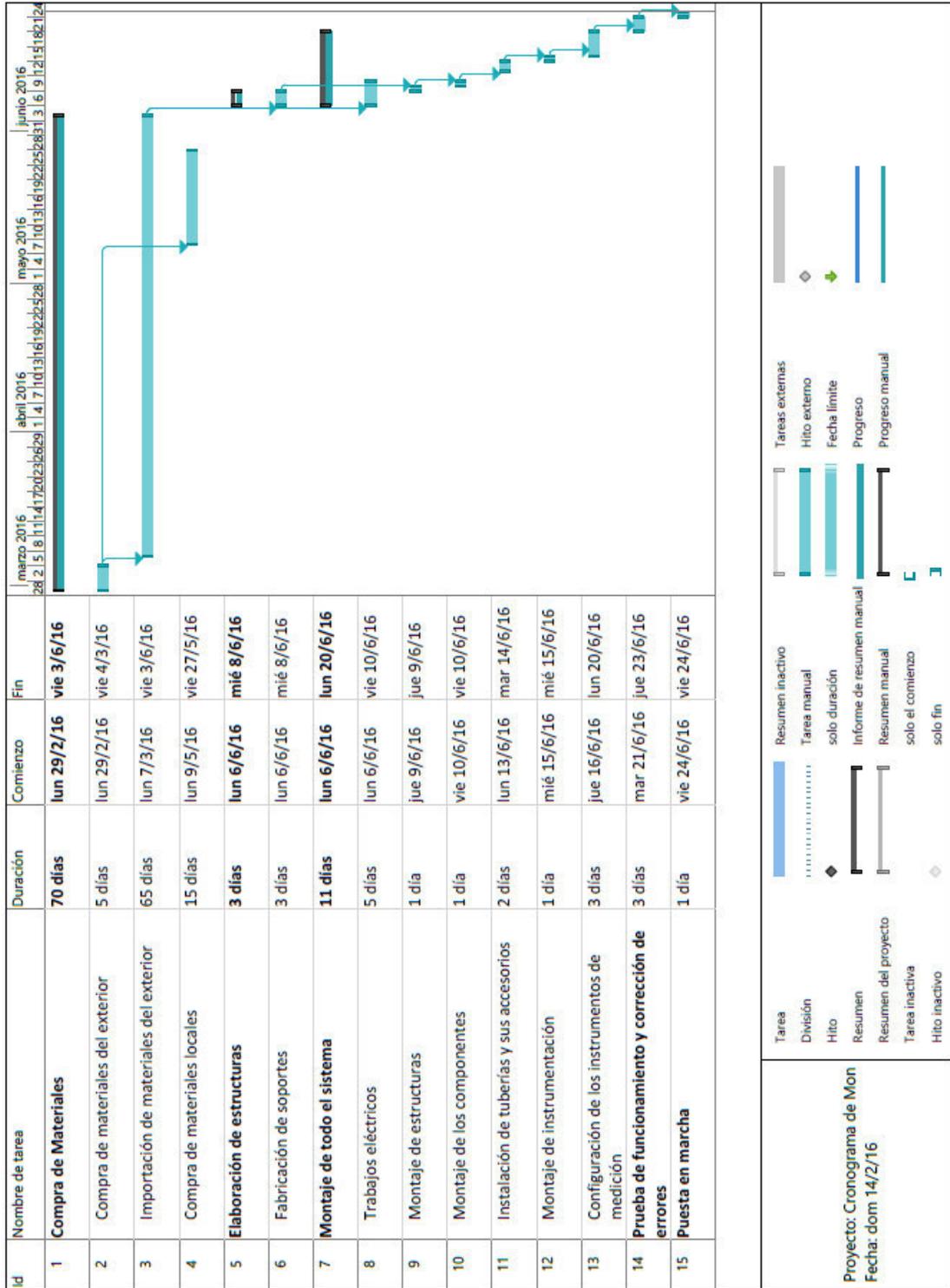


Figura 3.23: Cronograma de montaje para el Banco A

Fuente: Elaboración propia

En la *Figura 3.24* se muestra la planificación del montaje para el banco B, las tareas principales que se deben desempeñar son: compra de materiales, elaboración de estructuras, montaje de todo el sistema, prueba de funcionamiento y corrección de errores.

La compra de materiales tiene una duración de 70 días debido a que se considera un tiempo de 60 días por importación; la elaboración de estructuras debido a que son trabajos de taller se considera un tiempo de 5 días; al montaje de todo el sistema se le asignó un tiempo de 13 días ya que se deben elaborar algunos trabajos entre ellos la configuración de los instrumentos de medición; para la prueba de funcionamiento y corrección de errores se asignaron 3 días ya que se pueden encontrar algunos errores básicamente en la instrumentación; finalmente se pondrá en funcionamiento el sistema al día 91.

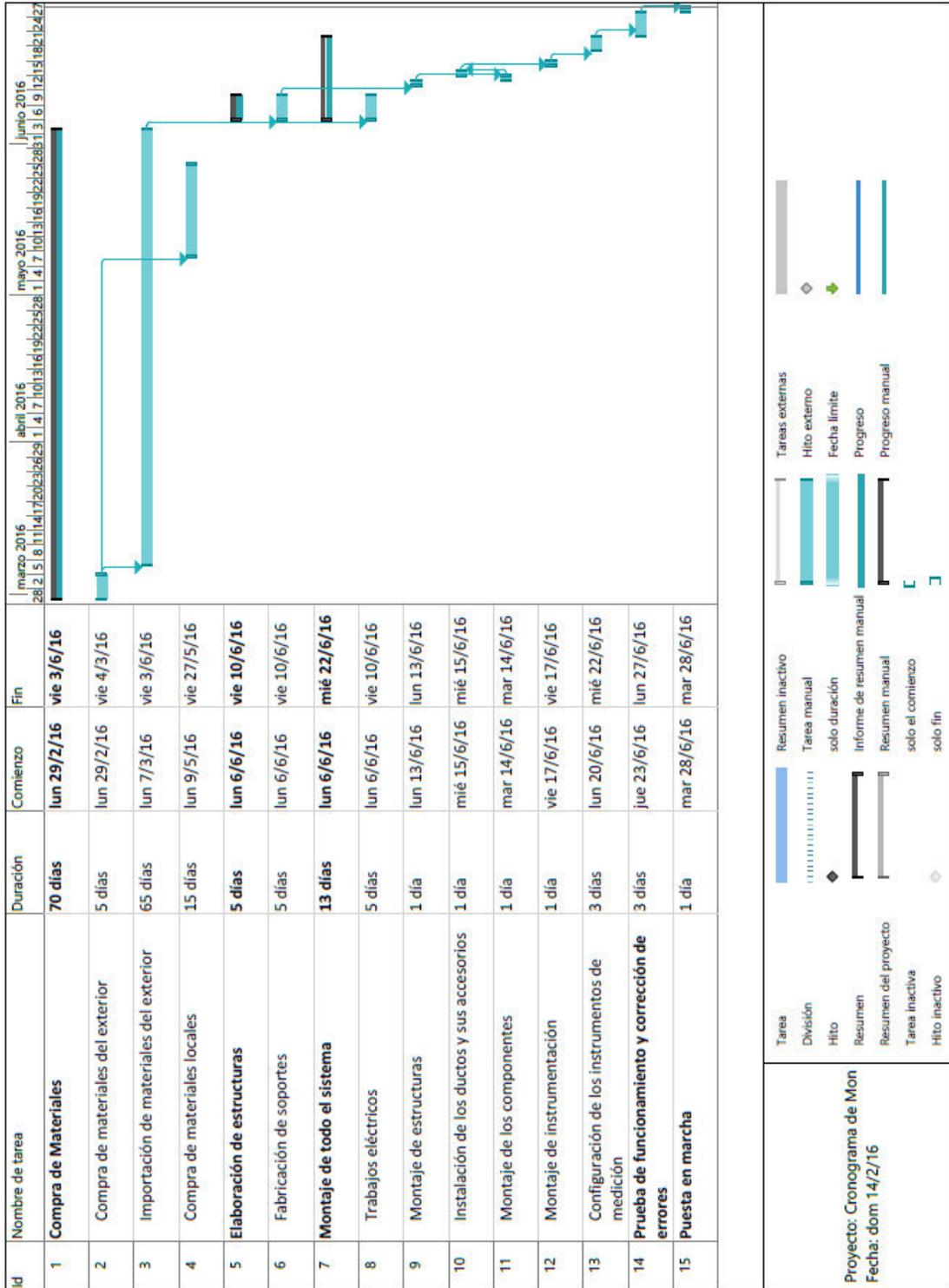


Figura 3.24: Cronograma de montaje para el Banco B

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como resultado de un cambio en la Matriz Energética y Productiva en el Ecuador, actualmente, se desarrolla un plan de normalización y etiquetado, que promueve el uso de equipos energéticamente eficientes. Este plan se lleva a cabo por medio del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables en conjunto con el INEN, cuyo objetivo último es propiciar producción de equipos con etiquetado que certifique su eficiencia energética. En concordancia con estos antecedentes, la norma técnica NTE INEN 2507 plantea requisitos de rendimiento térmico que deben tener los colectores solares que vayan a ser utilizados para calentamiento de agua para uso sanitario y su correspondiente etiquetado informativo de certificación del rendimiento térmico.

La Escuela Superior Politécnica del Litoral, a través de sus laboratorios, se ha propuesto constituirse en agente certificador del rendimiento térmico de estos colectores solares. En consecuencia, impulsa la realización de dos bancos de prueba que sean capaces de evaluar colectores solares que utilicen como fluido de transferencia de calor agua o aire, de manera que puedan reportar su curva de eficiencia térmica, brindando al cliente o fabricante una alternativa de certificación a nivel local.

Para fines de realización de ensayos de evaluación de rendimiento térmico de colectores solares de placa plana, la norma NTE INEN 2507 se remite a la norma internacional ANSI/ASHRAE 93. El presente proyecto se fundamenta en los requisitos que expone la norma ANSI/ASHRAE 93, para el diseño de dos bancos de prueba capaces de determinar dicho rendimiento.

Los principales componentes del banco de prueba para colectores que utilicen agua como fluido caloportador son: un tanque elevado con capacidad de 1,100 litros, un tanque reservorio con capacidad de 1,300 litros, un calentador eléctrico y un intercambiador de calor, ambos con una potencia de 13 kW, un filtro de agua de 50 micras y una bomba periférica de 0.5 HP.

Mientras que los principales componentes del banco de prueba para colectores que utilicen aire como fluido caloportador son: ductos de aluminio galvanizado y un ventilador centrífugo con una potencia de 0.155 KW.

4.1. 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 2.1* del presente proyecto.

Se desarrolló la ingeniería de detalle de cada banco de prueba, esto incluye la caracterización efectiva de cada sistema con los planos de implementación, componentes e instrumentación necesaria, y el cronograma de montaje estimado para la construcción de los mismos. 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.

Se elaboró el procedimiento experimental de cada ensayo para determinar los parámetros característicos del colector solar evaluado. Los ensayos a ejecutarse serían: determinación de la constante de tiempo del colector, que define el tiempo que le toma al colector obtener una variación de temperatura

desde cero insolación hasta el estado estable; determinación de la curva característica de rendimiento térmico del colector, que define el funcionamiento de este y la variación de eficiencia instantánea con respecto a un cambio en la temperatura del fluido y finalmente la determinación del factor de modificación del ángulo de incidencia, el cual define un factor que es empleado para predecir el rendimiento térmico de los colectores solares bajo un amplio rango de condiciones ambientales y/u hora del día.

Se determinó que es necesario obtener 16 puntos de datos útiles para caracterizar por completo un colector solar, estos datos son validados por los requerimientos expuestos en la *Tabla 3.15*. Esta cantidad de datos se obtienen en un tiempo estimado de 20 días de ensayos, realizando pruebas en horarios simétricos con respecto al mediodía local, a diferentes temperaturas de entrada del fluido caloportador. El tiempo de finalización del ensayo podría reducirse significativamente si se hubiese escogido el método de experimentación bajo condiciones de simulación solar, pero este método tiene un costo muy elevado tanto para la implementación como por el mantenimiento del sistema y no entrega resultados reales. La finalidad del proyecto fue de caracterizar el colector solar en condiciones reales, es por esto que se optó por el método experimental de recolección de datos al aire libre. Luego de realizar ensayos en los bancos de prueba del presente proyecto, queda a disposición para futuros trabajos, determinar la factibilidad de implementación del sistema bajo condiciones ambientales simuladas en laboratorio.

4.2. 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 razón de muestreo para la adquisición de datos en el proyecto, es de una toma de muestra cada 5 segundos. Si se desea una mejor distribución experimental se recomienda cambiar la razón de muestreo, dicho de otra manera se necesita tomar más datos en un menor intervalo de tiempo.

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.

Con el propósito de reducir el tiempo de finalización del ensayo, se recomienda optimizar el banco de prueba utilizando una estructura de soporte que siga el movimiento del sol (seguidor solar), esto permite que los rayos solares incidan de forma perpendicular a la superficie del colector en todo instante, reduciendo el tiempo de colección de datos debido a que estos pueden tomarse con mayor frecuencia.

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 (2010).

Dentro del alcance del presente proyecto no se encuentra el análisis de incertidumbre de las mediciones, para esto se recomienda revisar la guía ANSI/ASHRAE Guideline 2, Engineering Analysis of Experimental Data, en ella se encuentran ampliamente detallados los procedimientos para el análisis de datos experimentales, lo cual abarca el análisis de incertidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

- ANSI/ASHRAE. (2010). Standard 93: Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. Atlanta , GA, USA.
- ANSI/ASHRAE. (2013). Standard 41.1: Standard method for temperature measurement. Atlanta, GA, USA.
- ASHRAE. (2001). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta, GA, USA.
- ASME. (2004). *ASME MFC 3M: Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi*.
- Benli, H., & Aydin, D. (2009). Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating. *Solar Energy*, 83(12), 2109-2119.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México DF: Mc Graw Hill.
- CONELEC. (2013). *Plan Maestro de Electrificación 2013-2022*.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3rd ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons. Inc.
- Haaland, S. (Marzo de 1983). "Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow". *J. Fluids Eng.*, 89-90.
- Incropera, F. (1999). Apendice A: Propiedades termofísicas de la materia. En *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4ta ed., pág. 839). México: Prentice Hall.
- INEN. (2009). NTE INEN 2506: Eficiencia Energética en Edificaciones. Requisitos.
- INEN. (2009). NTE INEN 2507: Rendimiento Térmico de Colectores Solares en Sistemas de Calentamiento de Agua para Uso Sanitario. Requisitos.
- Infoagro Systems. (8 de Diciembre de 2015). *Infoagro*. Obtenido de Infoagro: http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80
- ISO. (2010). *9806-1: Energía Solar- Métodos de Ensayo para Colectores Solares- Parte 1: Rendimiento Térmico de Colectores Solares con Cristal para Calentamiento de Fluidos*.
- Kalogirou, S. (2004). Solar Thermal Collectors and Applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 231-295.

- Métodos de Purificación*. (8 de Diciembre de 2015). Obtenido de Purificación y tratamiento de agua: <http://agua-purificacion.blogspot.com/2010/01/tratamiento-de-agua-por-rayos.html>
- Nzabonimana, C. (1983). *Testing and efficiency improvement of a solar air collector*. National University of Rwanda, Butaro.
- Rojas, D., Beermann, J., Klein, S., & Reindl, D. (2008). Thermal performance testing of flat-plate collectors. *Solar Energy*, 82, 746-757.
- Rotoplas. (8 de Diciembre de 2015). *Filtración*. Obtenido de Rotoplas: <http://www.rotoplas.com/productos/filtracion/filtro-estandar/>
- Soluciones, Diseños y Provisiones Dobin S. A. (27 de Diciembre de 2015). *Dobin S.A.* Obtenido de Dobin S.A.: http://solucionesdobin.com/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=40
- Tavoularis, S. (2005). Pressure Measuring Instrumentation. En *Measurement in Fluid Mechanics* (págs. 180-187). New York: Cambridge University Press.
- Terra, e. p. (18 de Diciembre de 2015). *Terra Ecología Práctica*. Obtenido de Terra Ecología Práctica: <http://www.terra.org/categorias/articulos/guia-practica-de-una-instalacion-de-energia-solar-termica>
- The United States Department of Energy. (s.f.). *Improving fan system performance*. Autor.
- Umogbai, V., & Iorter, H. (2013). Design, construction and performance evaluation of a passive solar dryer for maize cobs. *African Journal of Food Science and Technology*, 110-115.
- Universidad Técnica Nacional de Argentina. (5 de Febrero de 2016). *Universidad Técnica Nacional de Argentina*. Obtenido de http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensores.pdf
- White, F. (2008). *Mecánica de Fluidos* (6ta ed.). Madrid: McGraw Hill.

APÉNDICES

Apéndice A

Cálculos Representativos

- **Selección de ventilador**

- **Datos**

$$Q = 0.09 \left(\frac{m^3}{s} \right) = 324 \left(\frac{m^3}{h} \right)$$

$$A_1 = 0.52 * 0.1 = 0.052 (m^2)$$

$$A_2 = 0.24 * 1 = 0.24 (m^2)$$

$$\rho_a = 1.1614 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ (Incropera, 1999)}$$

$$c_p = 1.007 \left(\frac{kJ}{kg * K} \right) \text{ (Incropera, 1999)}$$

$$v_a = 15.89 * 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s} \right) \text{ (Incropera, 1999)}$$

$$\epsilon_{ducto} = 0.00015 m \text{ (White, 2008, pág. 365)}$$

$$\epsilon_{colector} = 0.00026 m \text{ (White, 2008, pág. 365)}$$

- **Caída de presión en los ductos**

$$V_a = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.09}{0.052} = 1.73 \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$D_h = \frac{4A_1}{P_{m_1}} = \frac{4 * 0.052}{(2 * 0.52) + (2 * 0.1)} = 0.17 (m)$$

$$Re = \frac{V_a D_h}{\nu} = \frac{1.73 * 0.17}{15.89 * 10^{-6}} = 18509$$

$$\frac{\epsilon_{ducto}}{D_h} = \frac{0.00015}{0.17} = 0.0008$$

$$\frac{1}{f^2} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7 D_h} \right)^{1.11} \right] \text{ (Haaland, 1983)}$$

$$f_{ducto} = 0.028$$

$$h_{f_{ducto}} = f \left(\frac{L}{D_h} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) = 0.028 \left(\frac{1}{0.17} \right) \left(\frac{1.73^2}{2 * 9.8} \right) = 0.033 (m)$$

$$\Delta p_{ducto\ in} = \rho_a g h_{f_{ducto}} = 1.1614 * 9.8 * 0.033 = 0.376 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta p_{ducto\ out} = \rho_a g h_{f_{ducto}} = 1.1614 * 9.8 * 0.033 = 0.376 \text{ (Pa)}$$

- **Caída de presión en el colector**

$$V_a = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.09}{0.24} = 0.375 \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$D_h = \frac{4A_2}{P_{m_1}} = \frac{4 * 0.24}{(2 * 0.24) + (2 * 1)} = 0.38 \text{ (m)}$$

$$Re = \frac{V_a D_h}{\nu} = \frac{0.375 * 0.380}{15.89 * 10^{-6}} = 8968$$

$$\frac{\epsilon_{colector}}{D_h} = \frac{0.00026}{0.38} = 0.0007$$

$$\frac{1}{f^{\frac{1}{2}}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7 D_h} \right)^{1.11} \right] \text{ (Haaland, 1983)}$$

$$f_{colector} = 0.033$$

$$h_{f_{colector}} = f \left(\frac{L}{D_h} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) = 0.033 \left(\frac{2}{0.38} \right) \left(\frac{0.375^2}{2 * 9.8} \right) = 0.001 \text{ (m)}$$

$$\Delta p_{colector} = \rho_a g h_{f_{colector}} = 1.1614 * 9.8 * 0.001 = 0.014 \text{ (Pa)}$$

- **Caída de presión en la entrada y salida del colector**

$$h_m = K \frac{(V_a)^2}{2 * g}$$

De la *Figura A.0.1*, a continuación, se obtiene el valor de K a la entrada al colector, con un valor de $K_{in} = 0.5$ para entradas con filo vivo. El valor a la salida siempre es 1 para cualquier configuración.

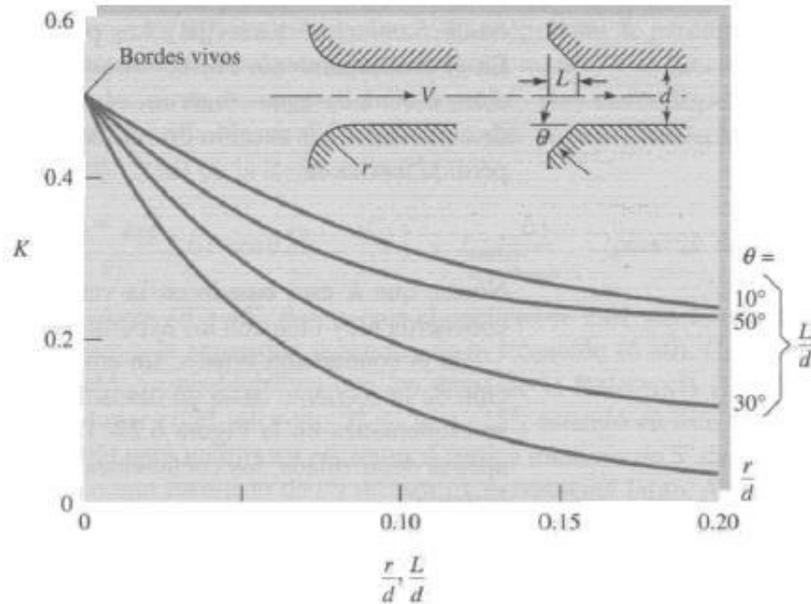


Figura A.0.1: Coeficientes de pérdida de carga en entradas de ductos o tuberías

Fuente: ASHRAE Handbook

$$h_{m\ in} = K \frac{(V_a)^2}{2 * g} = 0.5 \frac{0.375^2}{2 * 9.8} = 0.0036 \text{ (m)}$$

$$h_{m\ out} = K \frac{(V_a)^2}{2 * g} = 1 \frac{0.375^2}{2 * 9.8} = 0.0072 \text{ (m)}$$

$$\Delta p_{in\ colector} = \rho_a g h_{m\ in} = 1.1614 * 9.8 * 0.0036 = 0.04 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta p_{out\ colector} = \rho_a g h_{m\ out} = 1.1614 * 9.8 * 0.0072 = 0.08 \text{ (Pa)}$$

Con los resultados antes descritos de caudal y caída de presión, observamos en la curva de funcionamiento del ventilador aquel que pueda cumplir con estos requerimientos. Como se observa en la *Figura A.0.2*, se escogió un ventilador capaz de vencer la caída de presión del sistema y cumpla con el requerimiento que especifica la norma de tener una presión mínima de 124 (Pa) a la salida del colector.

Se observa que el ventilador se encuentra sobredimensionado, esto es para poder utilizar el mismo ventilador en otro banco de prueba con otras configuraciones de caída de presión.

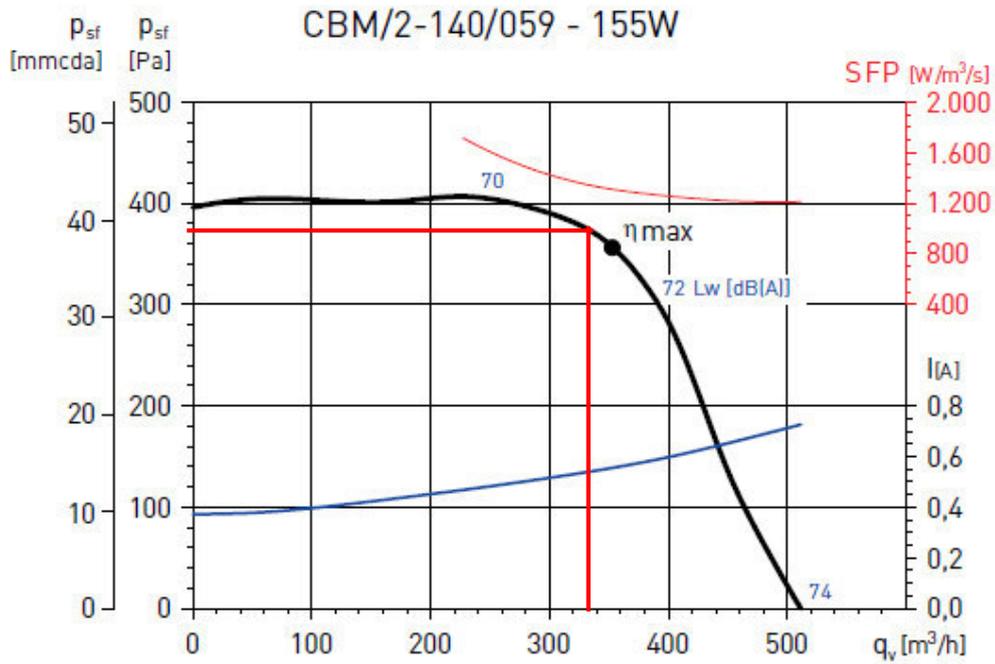


Figura A.0.2: Curva característica del ventilador CMB 2 140/059

Fuente: Catálogo de Soler & Palau

- **Selección de la bomba**

En la Figura A.0.3 se puede observar la curva característica de la bomba la cual muestra el comportamiento de la bomba en función de cabezal y caudal.

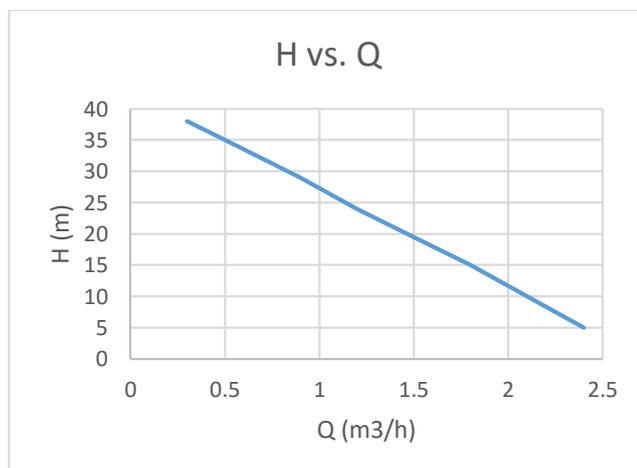


Figura A.0.3: Curva característica de la bomba PKm60

Fuente: Pedrollo

Apéndice B

Guía Experimental

Título

“Determinación experimental del rendimiento térmico de colectores solares de placa plana que utilicen agua o aire como fluido caloportador según norma internacional (ANSI/ASHRAE 93:2010)”

Objetivos

- Obtener experimentalmente el rendimiento térmico de colectores solares de placa plana.
- Obtener los parámetros principales para la completa caracterización del colector solar como: constante de tiempo y factor de modificación del ángulo de incidencia.
- Graficar la curva de rendimiento térmico experimental, obtener la ecuación de dicha curva y compararla con la ecuación de rendimiento térmico teórico para determinar constantes como factor de transmitancia-absortancia efectiva, factor de remoción de calor del colector solar, entre otros.

Marco Teórico

• Colectores solares

Se considera a este tipo de sistemas como una clase especial de intercambiador de calor, que transfiere la energía térmica de radiación solar al fluido que es transportado por el colector. El fluido que es necesario calentar, suele ser aire, agua o aceite. Esta energía térmica obtenida por el proceso antes descrito se utiliza tanto para calentar agua de uso sanitario, como para ser transportada hacia un equipo de acondicionamiento de espacio o hacia un tanque de almacenamiento térmico. (Kalogirou, 2004)

• Tipos de colectores solares

Los colectores solares se dividen en dos grandes grupos: concentradores y no concentradores. Estos últimos contienen a los colectores solares de placa plana, los que serán el centro de estudio en esta prueba.

Colectores solares de placa plana

La principal característica de este tipo de colectores es que poseen una placa plana de absorción que almacena la energía solar térmica y la transfiere a un fluido que

tiene la capacidad de captarla. Los fluidos más utilizados para este tipo de colectores solares son agua y aire.

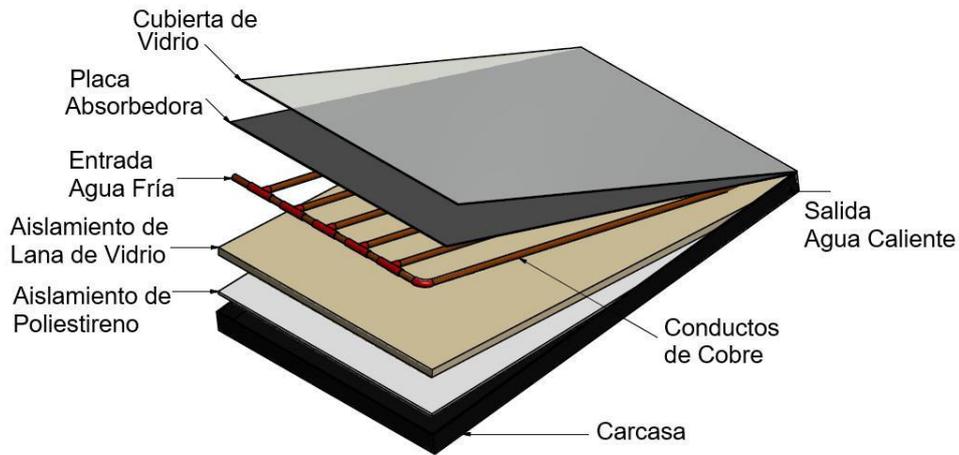


Figura B.0.4. Elementos que componen un colector solar de placa plana

Adaptado de: ingemecanica.com

- **Alcance de la norma ANSI/ASHRAE 93:2010**

Esta norma relata métodos para determinar el rendimiento térmico de colectores solares, concentradores y no concentradores, pero solo es aplicable a ciertos sistemas. Estas restricciones, dictadas por la norma, son:

- Solo aplica para colectores solares en los cuales el fluido entra al colector por un solo acceso y sale por una sola abertura. Dado el caso que el colector contenga más de una entrada y salida, se puede utilizar esta norma siempre y cuando las tuberías o ductos externos puedan conectarse para formar una sola entrada y una sola salida.
- El fluido caloportador puede ser líquido o gas, pero no una mezcla de las dos fases.
- Los procedimientos descritos en la norma son aplicables para realizar pruebas al aire libre con irradiancia solar natural o para realizar pruebas dentro del laboratorio con simulación de irradiancia solar.
- La norma provee métodos de prueba y procedimientos de cálculo de rendimiento térmico, tiempo, y respuesta angular, para un colector solar operando en estado estable o estado cuasi-estable.

- La norma no aplica para colectores solares en los cuales la unidad de almacenamiento es una parte intrínseca del colector en tal magnitud que no es posible separar el proceso de colección solar y el proceso de almacenamiento del fluido calentado con el propósito de realizar medidas en ambos procesos.
- La norma no aplica para colectores solares sin cristal o vidrio.

Descripción de los equipos

Se debe realizar una breve descripción de los siguientes equipos, explicando sus características y ventajas:

Piranómetros

Anemómetro

Termocuplas tipo T

Medidor de flujo volumétrico tipo turbina

Higrómetro

Manómetro tipo Bourdon

Procedimiento experimental

Se debe adjuntar el procedimiento descrito en el *Capítulo 3* del presente documento, para la realización de las diferentes pruebas.

Análisis de resultados y conclusiones

Se debe presentar la curva característica de rendimiento térmico experimental del colector y sus diferentes parámetros hallados como la curva del factor de modificación del ángulo de incidencia. Adicionalmente se debe presentar una etiqueta informativa con las especificaciones del colector y los resultados encontrados, como se muestra un ejemplo, a continuación, en la Tabla B.0.1.

Las conclusiones deben ir en concordancia con los objetivos planteados en el reporte y con los resultados hallados en las pruebas experimentales, dichas proposiciones deben ser incluidas en esta sección.

Tabla B.0.1: Etiqueta informativa de los resultados experimentales

Especificaciones de la prueba			
Modelo evaluado		Gob 408	
Fluido de transferencia de calor de la prueba		Agua	
Razón de flujo de la prueba		0.09 m ³ /s	
Especificaciones del Colector			
Área Bruta	3 m ²	Área de apertura	2.7 m ²
Peso en seco	60.1 kg	Capacidad de fluido	3 litros
Presión de prueba	102 kPa (abs)		
Información Técnica			
Ecuación de Eficiencia Térmica (Nota: Basada en área bruta y diferencia de temperaturas a la entrada del colector y la temperatura ambiente)		$\eta_g(\theta = 0) = 0.725 - 3.2 \left(\frac{t_{f,i} - t_a}{G_t} \right)$	
		$\eta_g(\theta \neq 0) = 0.725K_{arr} - 3.2 \left(\frac{t_{f,i} - t_a}{G_t} \right)$	
Caída de presión			
Flujo (m³/s)		Δp (Pa)	
0.091		9	
0.089		8.97	
0.089		8.99	

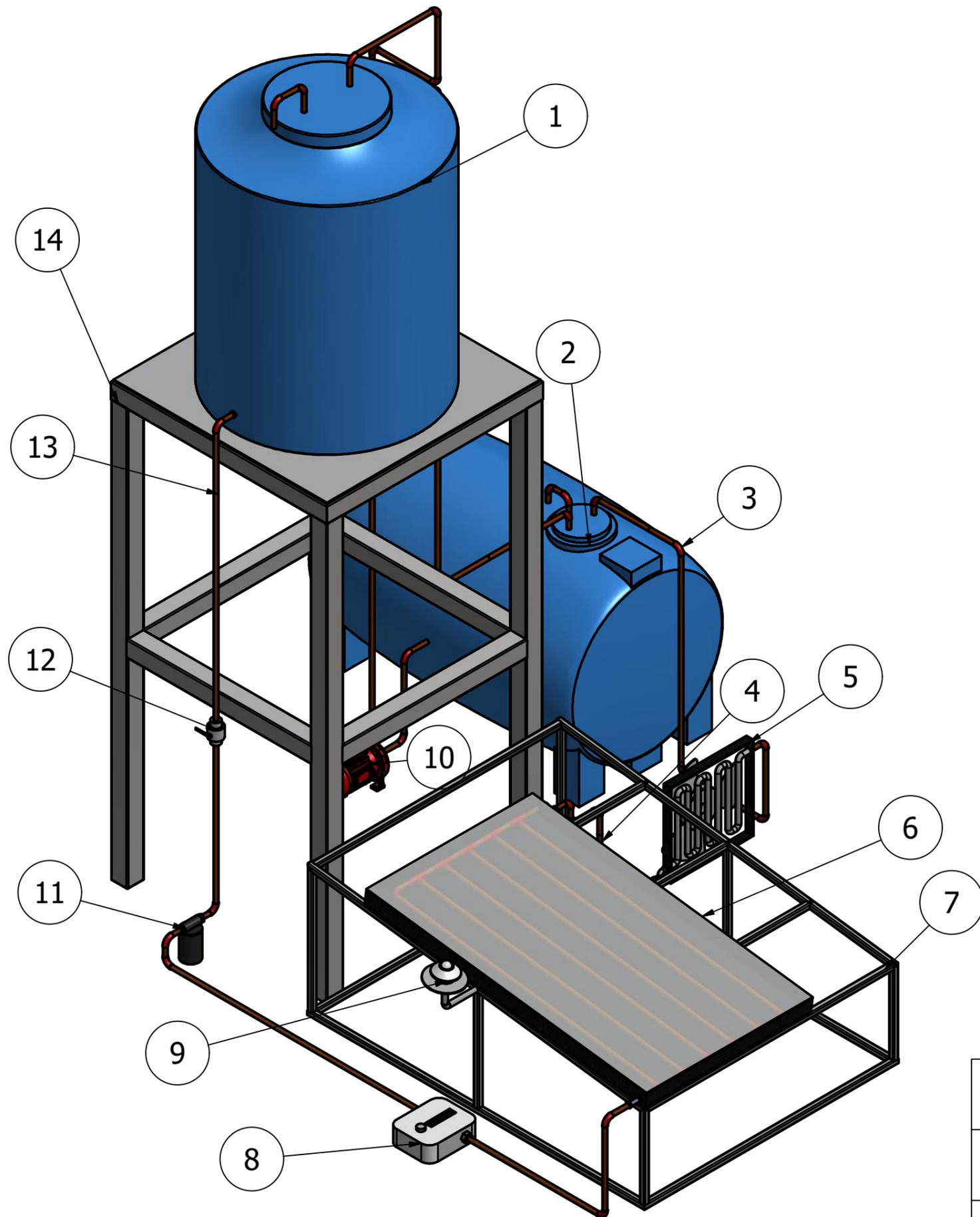
Fuente: Elaboración propia

Bibliografía

Referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del reporte deben ser incluidas en esta sección.

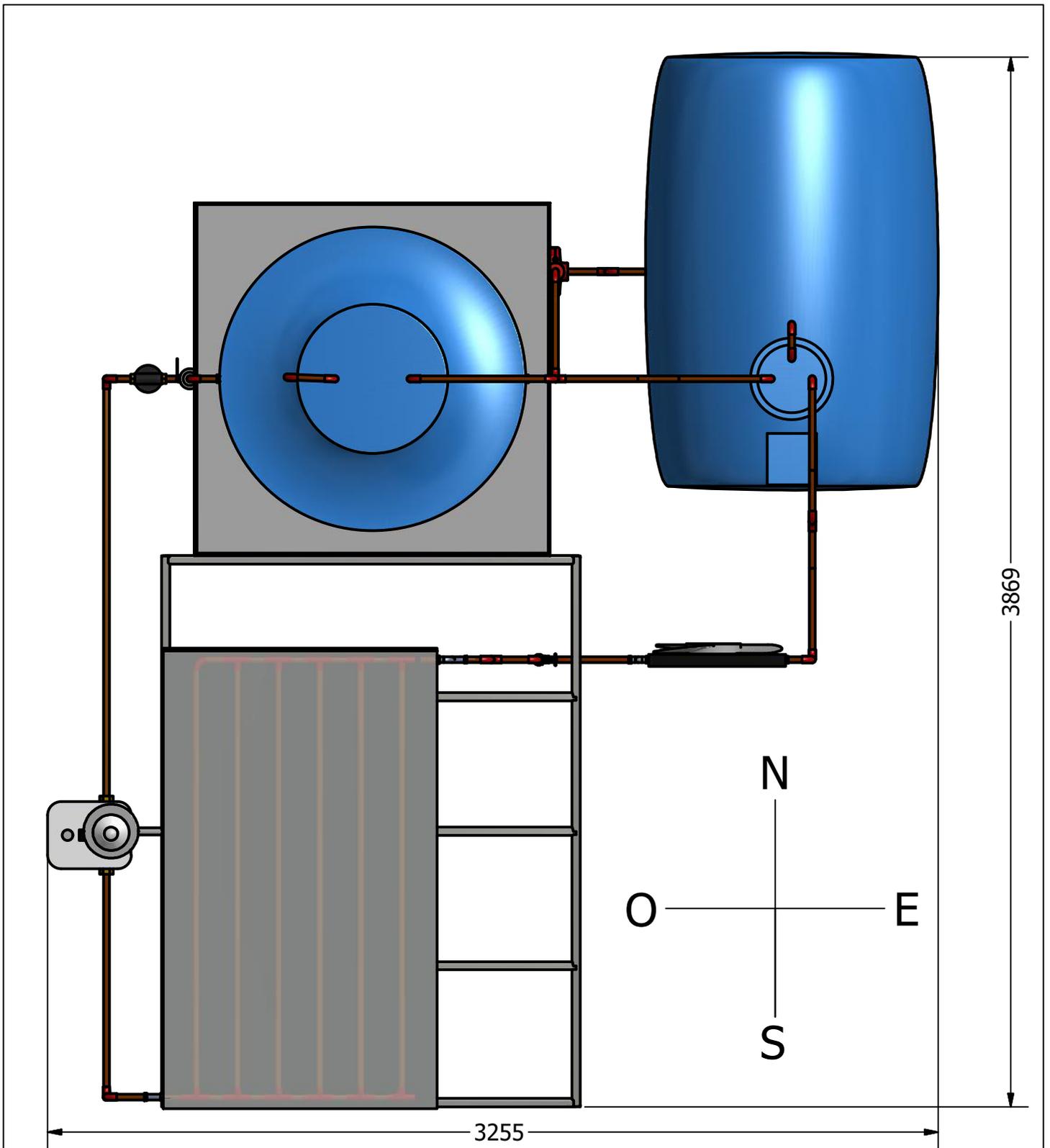
Apéndice C

Planos

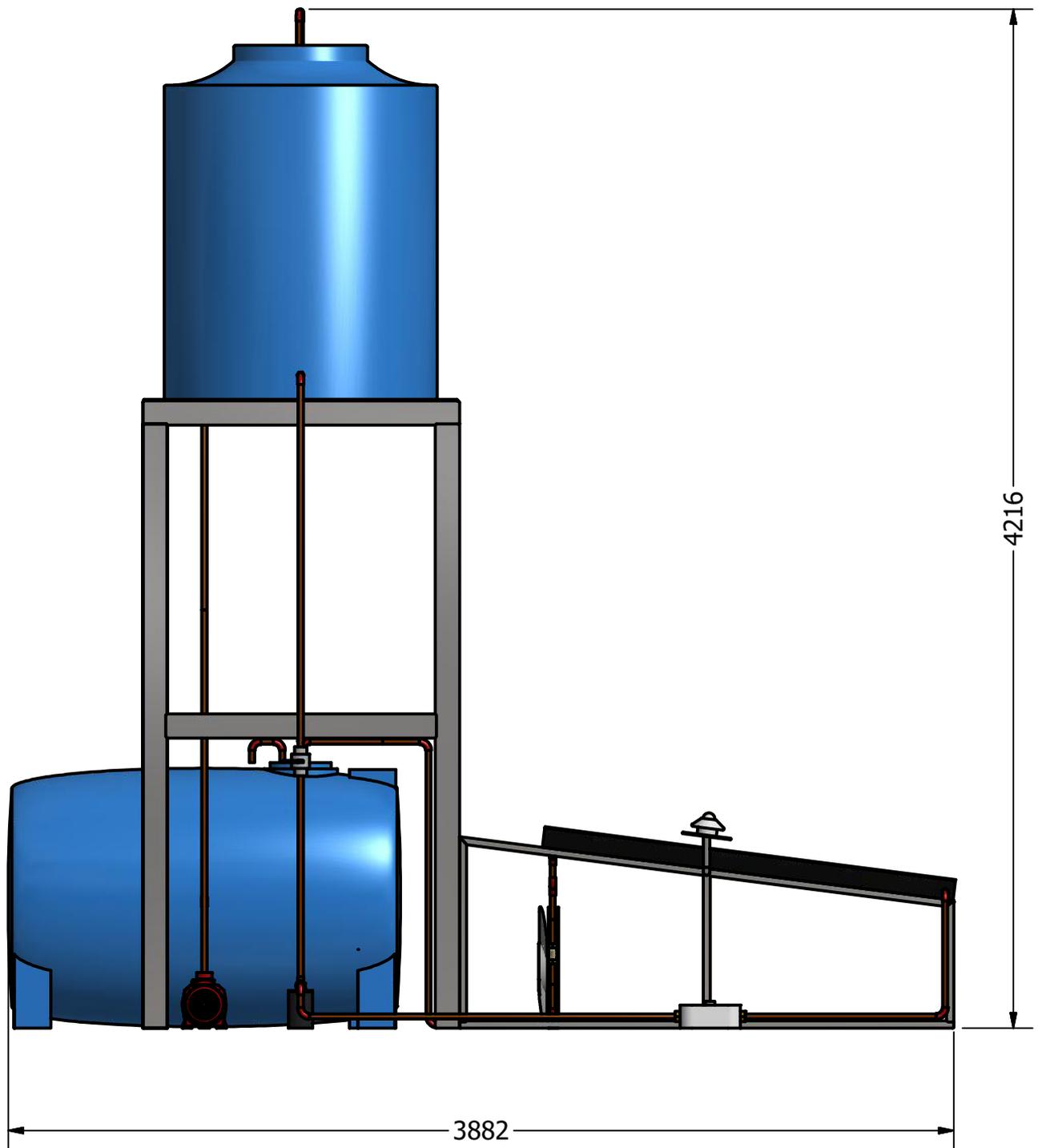


Lista de Partes		
Ítem	Cantidad	Descripción
1	1	Tanque elevado
2	1	Tanque reservorio
3	30	Codo recto 1/2"
4	1	Válvula globo
5	1	Intercambiador de calor
6	1	Colector solar
7	1	Soporte de colector solar
8	1	Precalentador
9	1	Anemómetro
10	1	Bomba de agua
11	1	Filtro de agua
12	1	Válvula esférica
13	18 m	Tubería 1/2"
14	1	Soporte de tanque elevado

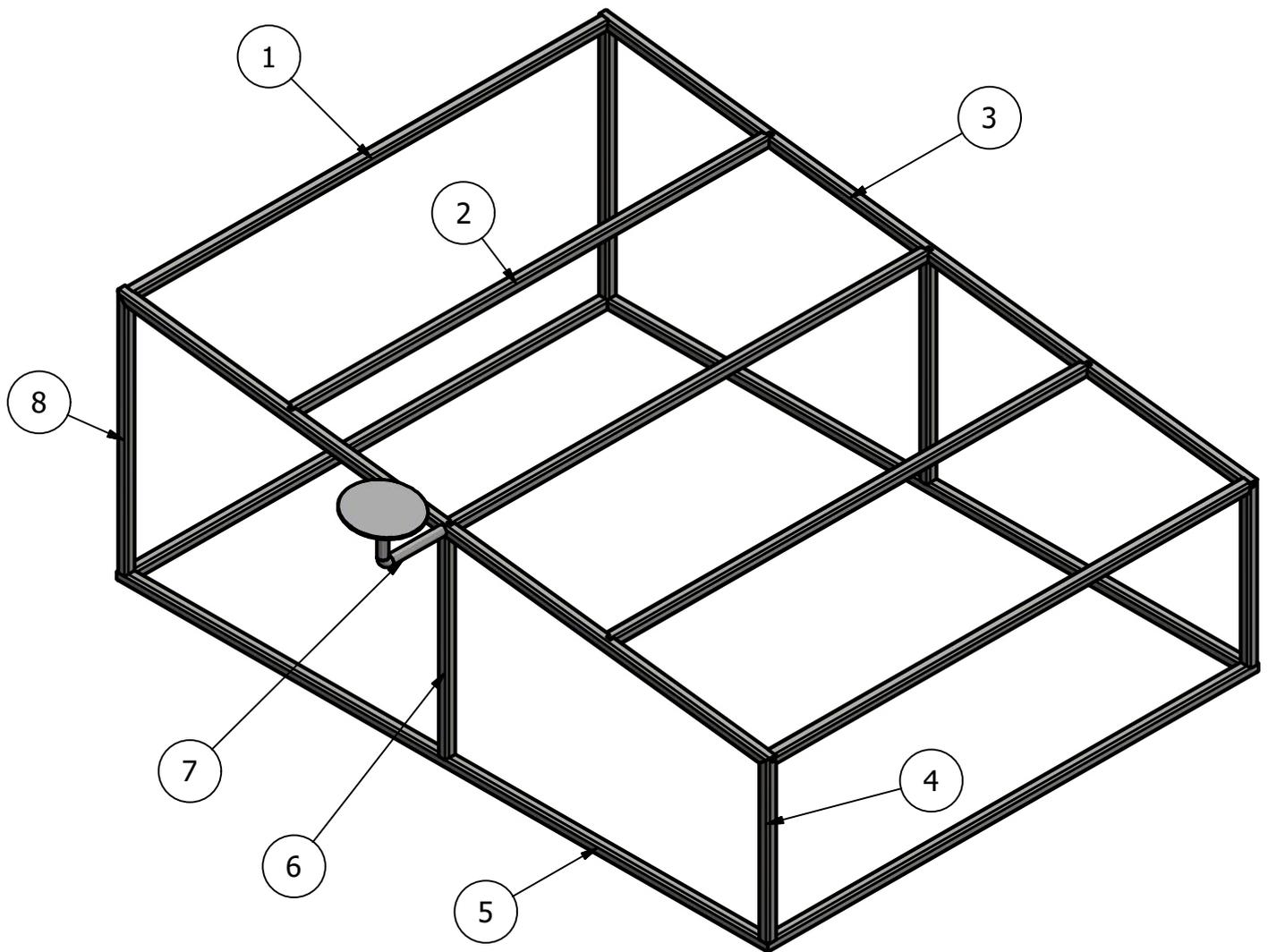
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquiza	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador	Título: Ensamble del banco de prueba		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev: 1	Escala: 1:20	Plano: 1/18



Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquiza	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador	Título: Vista de planta del banco de prueba		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:20	2/18



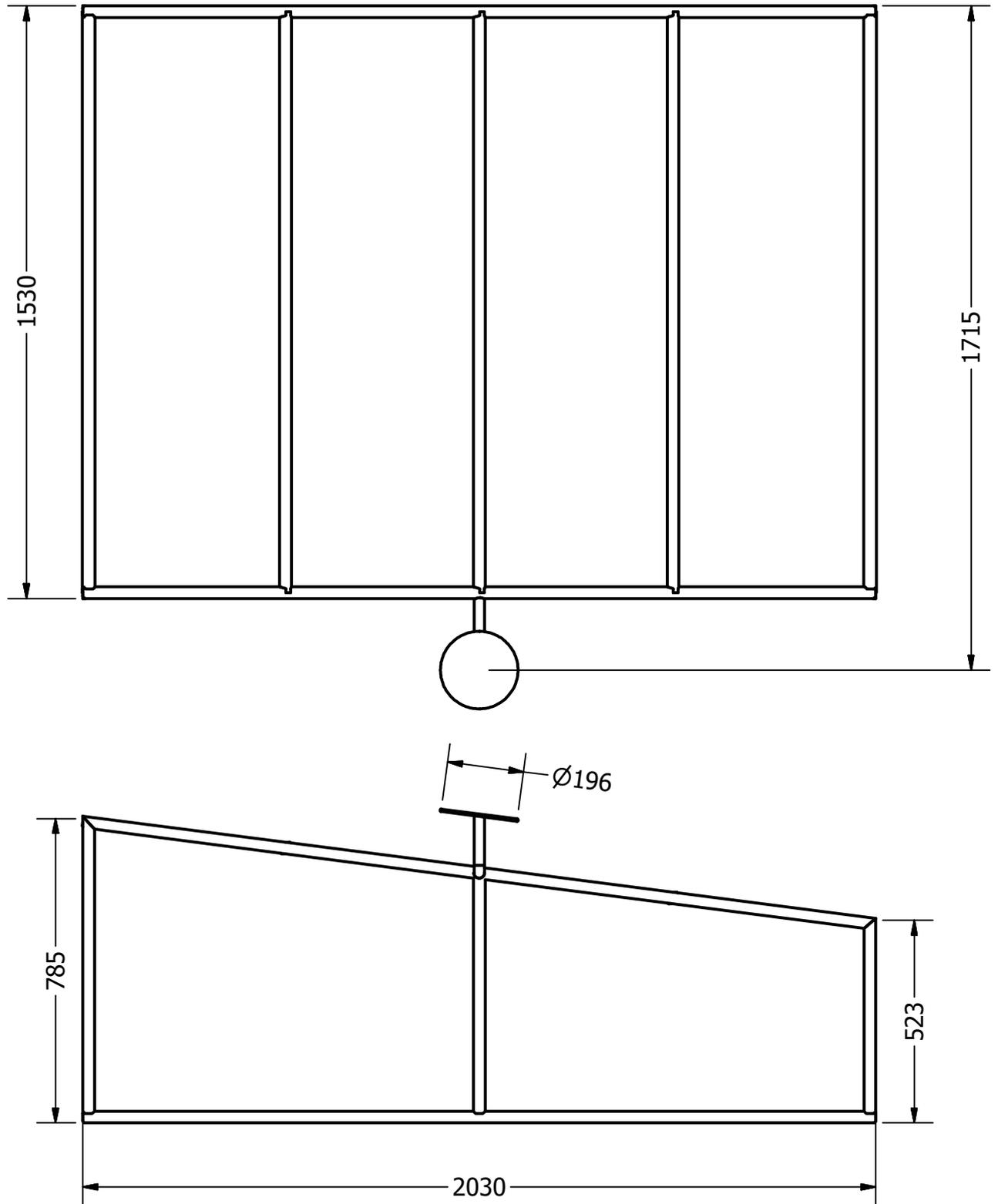
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador	Título: Vista lateral del banco de prueba		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:25	3/18



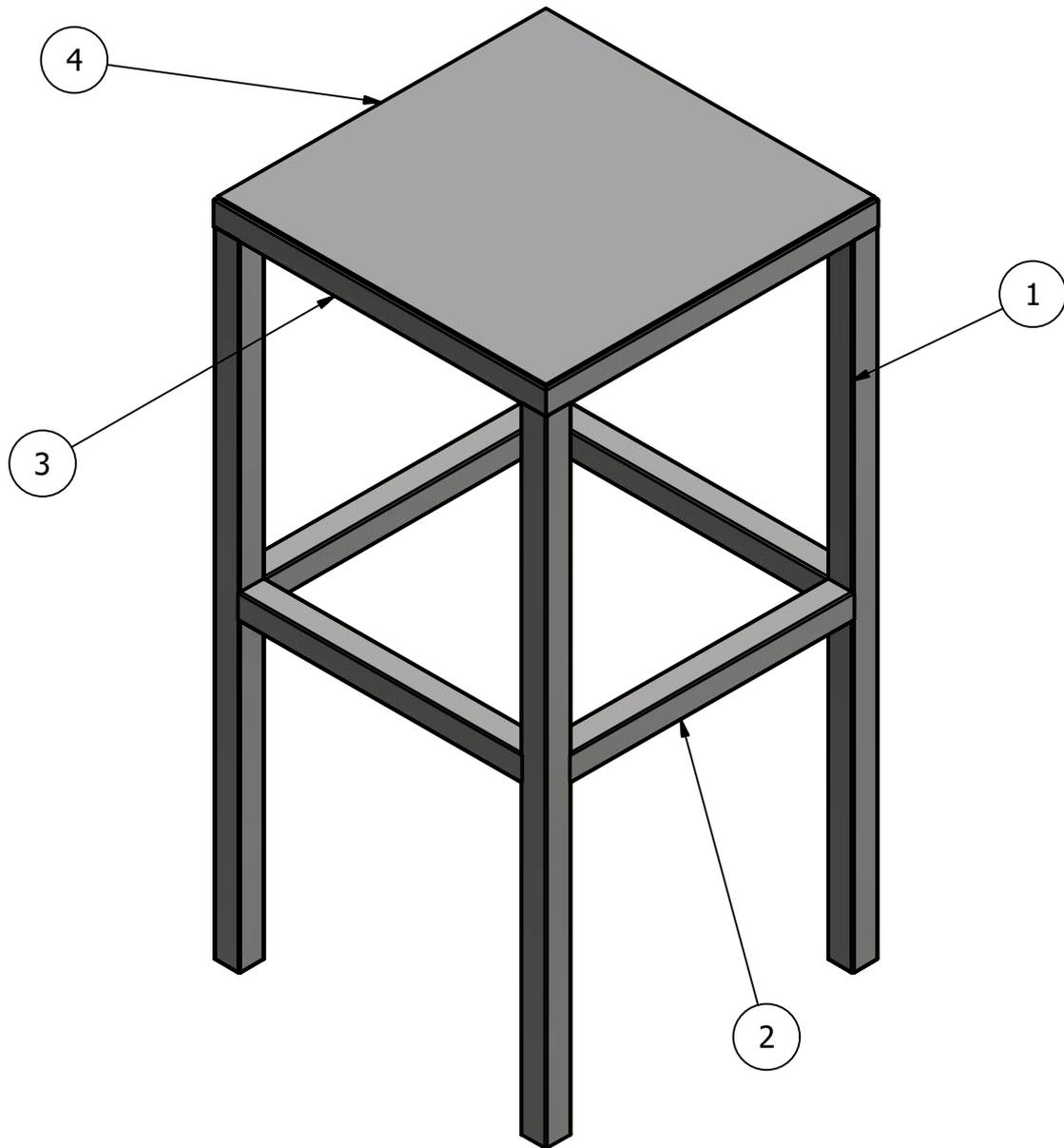
Lista de partes

Ítem	Longitud	Material	Descripción
1	6080 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 1520	Tubo estructural
2	4500 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 1500	Tubo estructural
3	4073,7 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 2036,8	Tubo estructural
4	1000 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 500	Tubo estructural
5	4040 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 2020	Tubo estructural
6	1260 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 630	Tubo estructural
7	150 mm	ISO 4019 - 26.9x2.0 - 150	Tubo estructural
8	1520 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 760	Tubo estructural

Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador	Título: Ensamble del soporte para colector		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:15	4/18

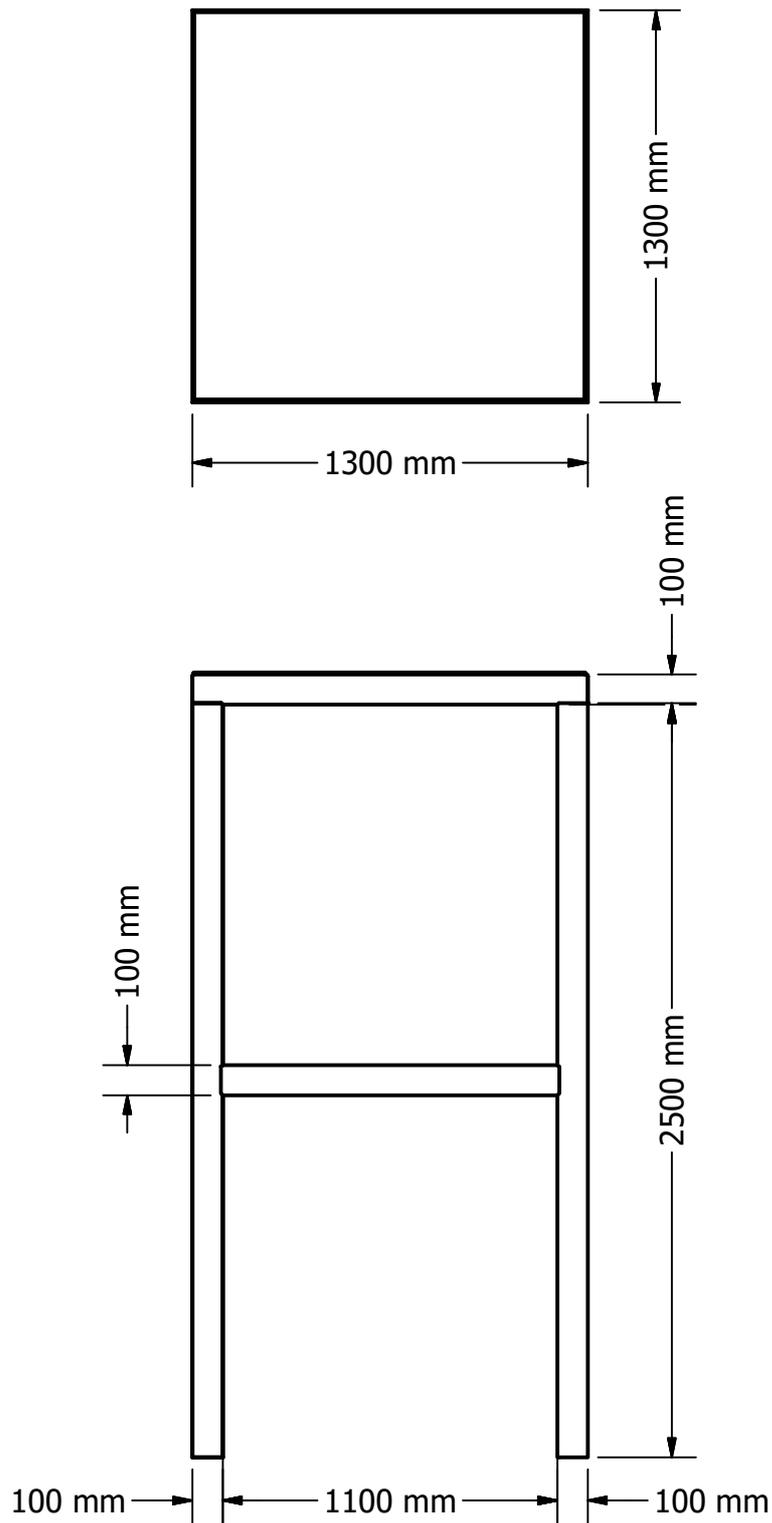


Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador	Título: Dimensiones del soporte del colector ensamblado		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:15	5/18

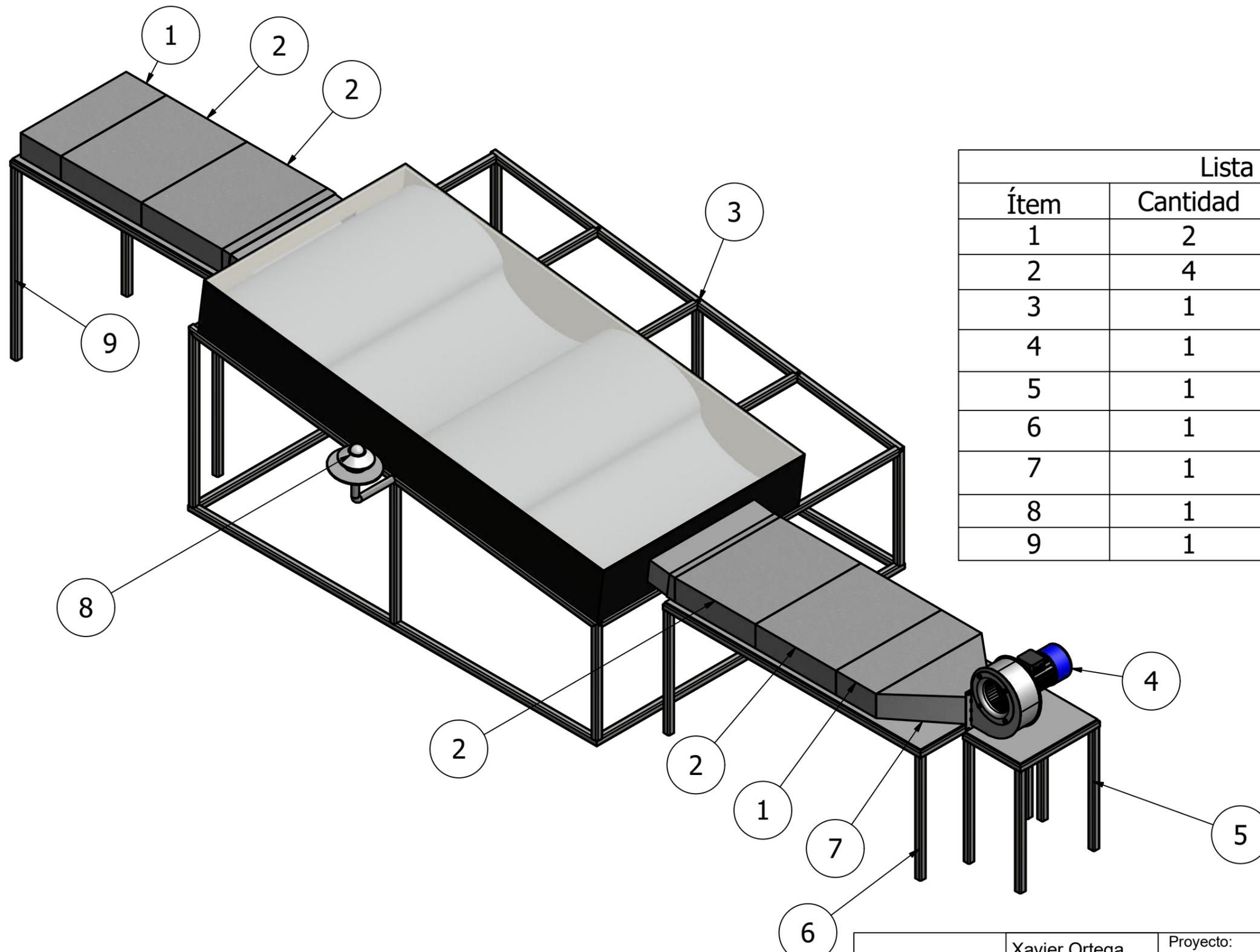


Lista de Partes			
Ítem	Longitud	Material	Descripción
1	10000 mm	ISO 4019 - 100x100x3 - 2500	Acero estructural A36
2	4400 mm	ISO 4019 - 100x100x3 - 1100	Acero estructural A36
3	5152 mm	ISO 4019 - 100x100x3 - 1288	Acero estructural A36
4	N/A	ASTM A36 - 1200x1200	Plancha ASTM A36 - 6 mm

Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador	Título: Estructura del tanque elevado		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:20	6/18

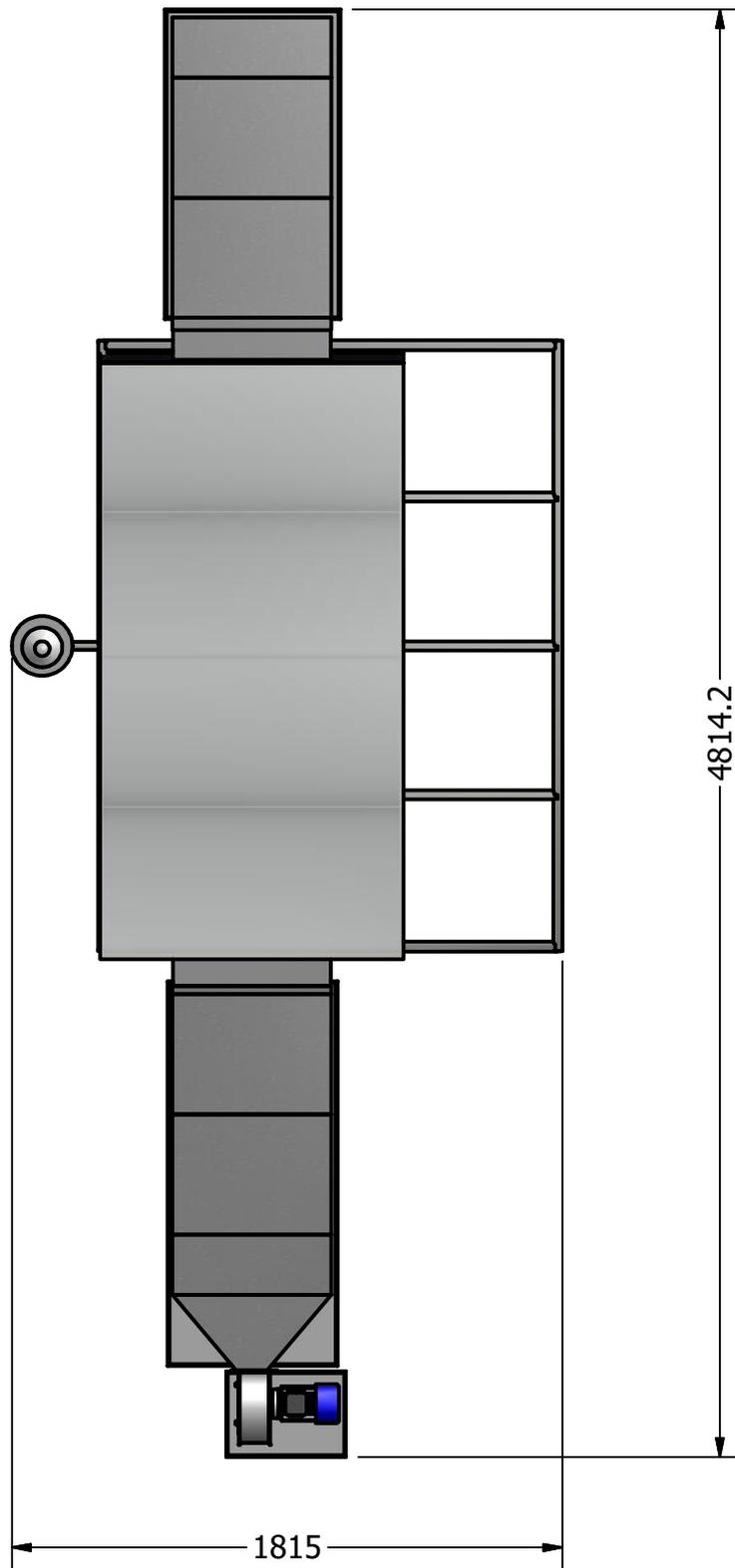


Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen agua como fluido caloportador	Título: Dimensiones de la estructura del tanque elevado		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:25	7/18

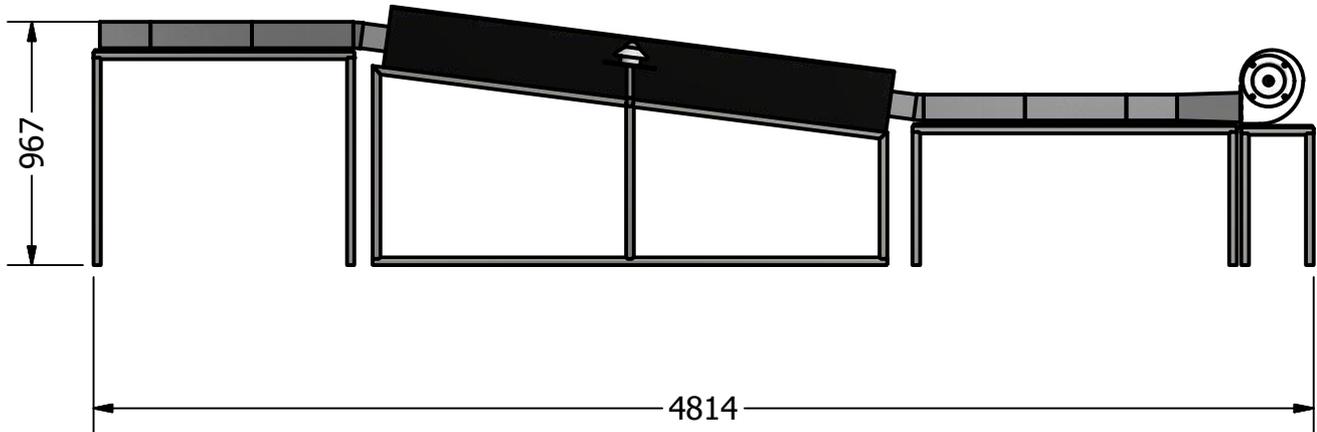


Lista de Partes		
Ítem	Cantidad	Descripción
1	2	Ducto - 200 mm
2	4	Ducto - 400 mm
3	1	Soporte Colector
4	1	Blower
5	1	Soporte Blower
6	1	Soporte Ductos de Entrada
7	1	Conexión Blower - Tubería
8	1	Piranómetro
9	1	Soporte Ductos de Salida

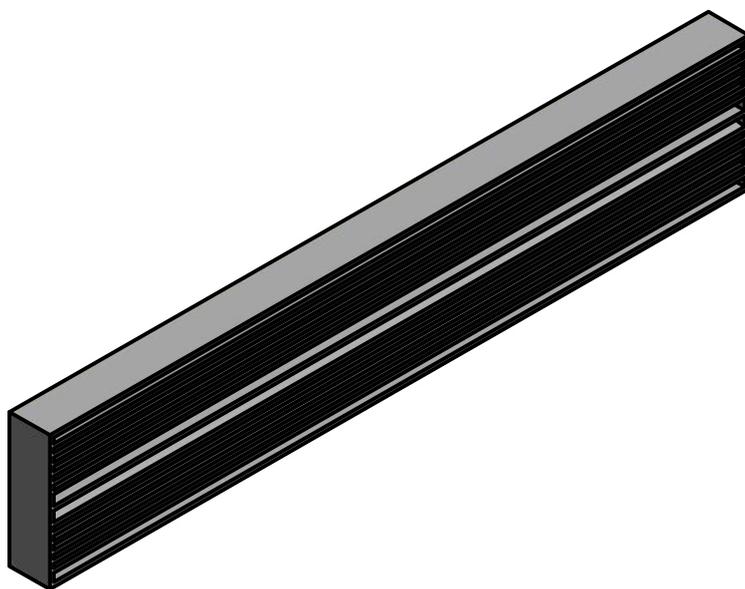
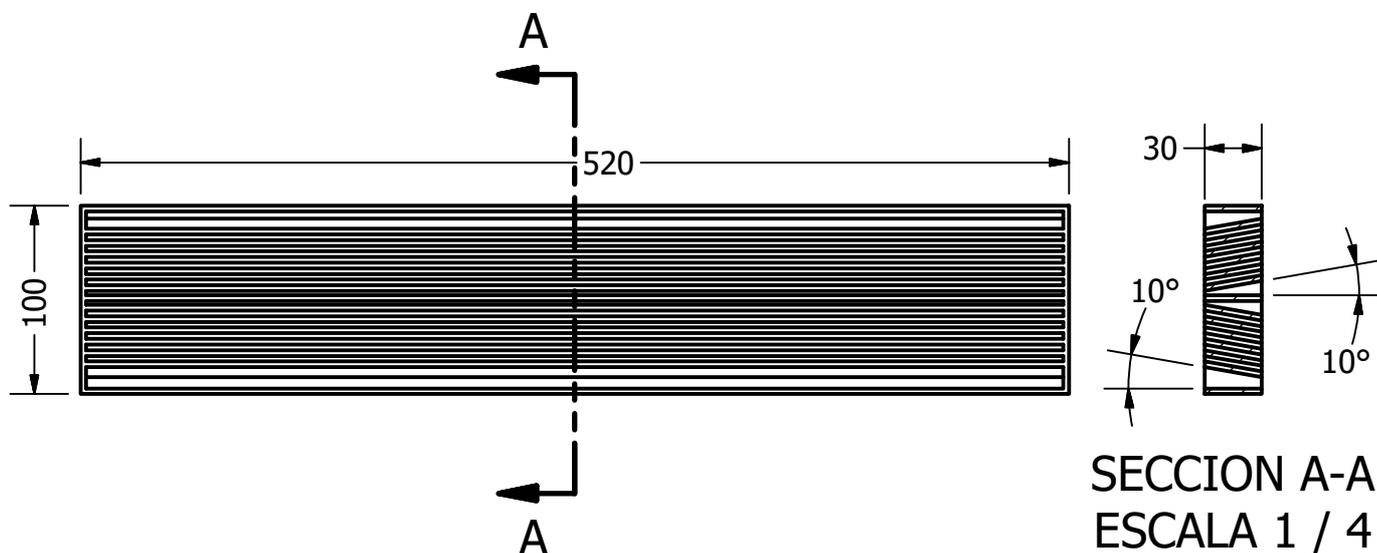
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Banco de prueba ensamblado		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:15	8/18



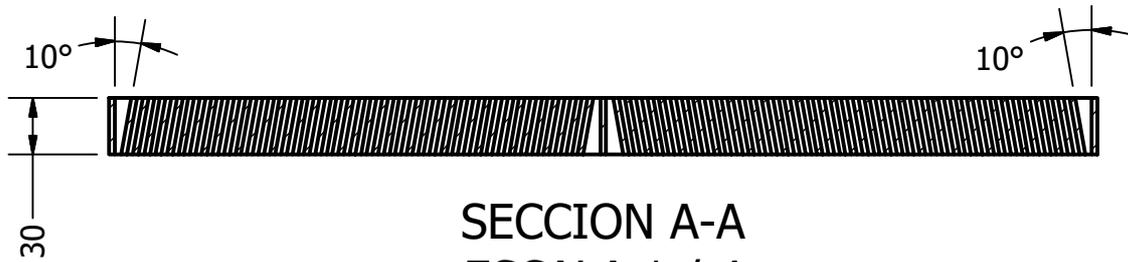
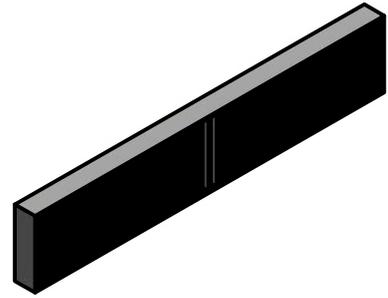
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquiza	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Vista de planta del banco de prueba		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:25	9/18



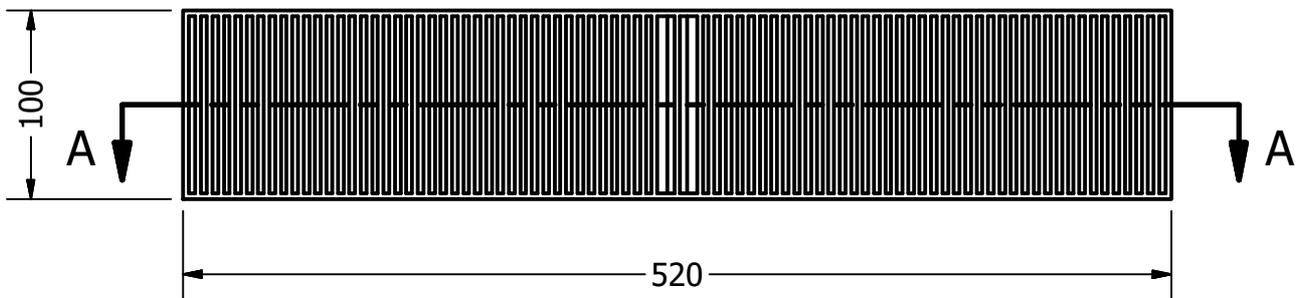
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Vista lateral del banco de prueba		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:30	10/18



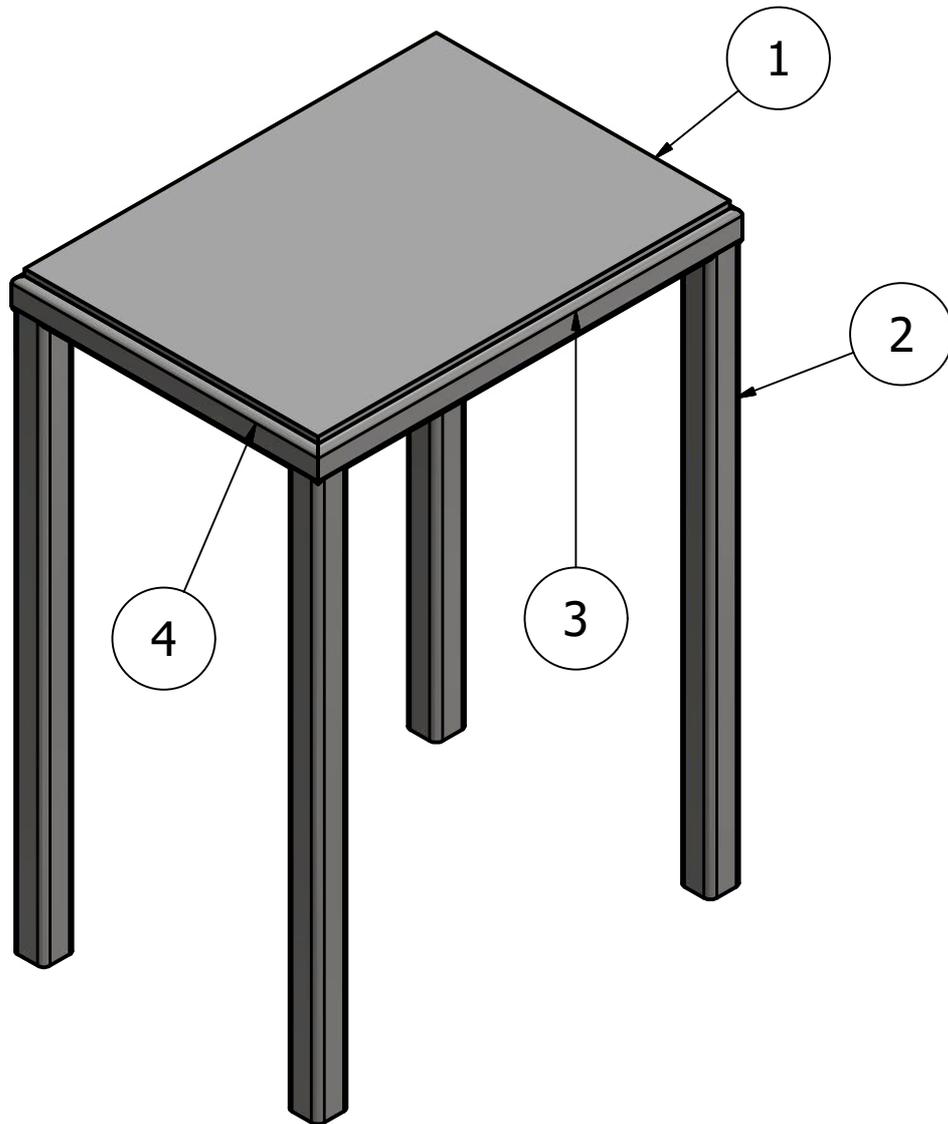
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Dimensiones del baffle 1		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:4	11/18



SECCION A-A
ESCALA 1 / 4



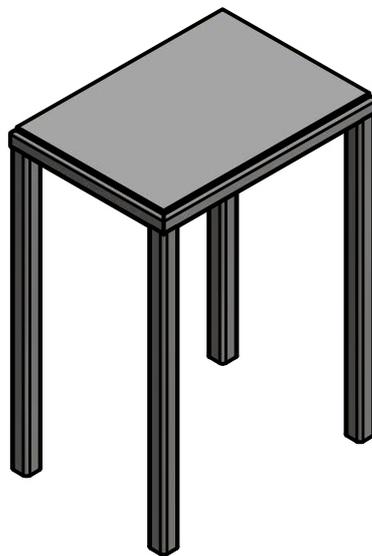
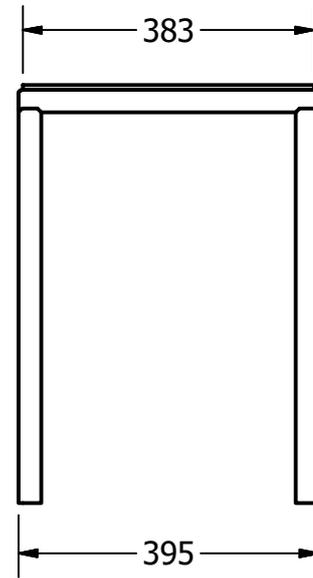
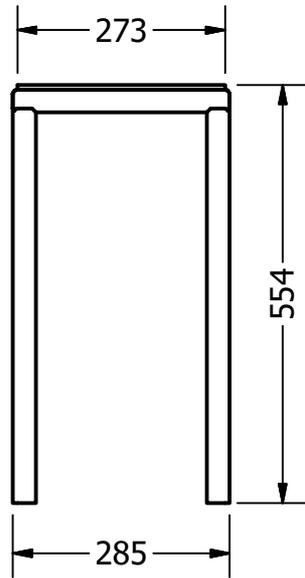
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Dimensiones del Baffle 2		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:4	12/18



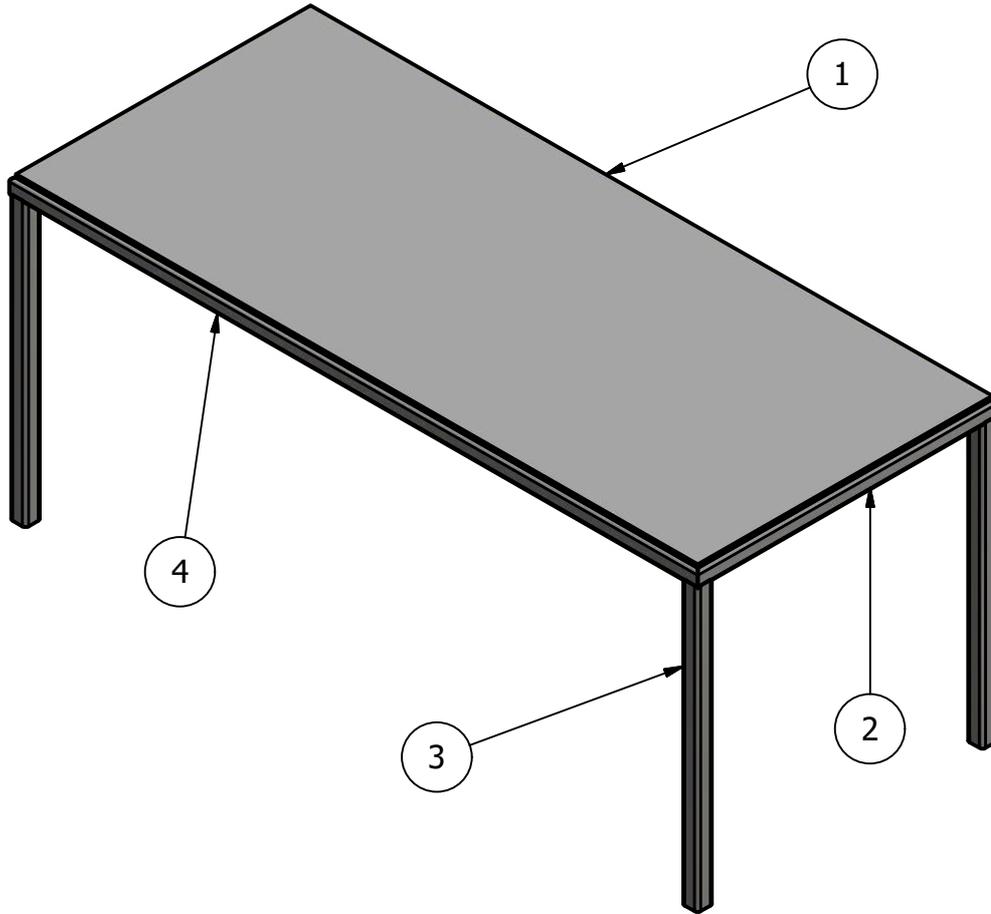
Lista de partes

Ítem	Longitud Total	Descripción
1	N/A	Plancha A36 - 6 mm - 273x383
2	2092 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 523
3	790 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 395
4	570 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 285

Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Soporte para ventilador centrífugo		
	Revisado por:		M.Sc. Carola Sánchez	Fecha: Febrero/2016	
Aprobado por:		Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:
		1		1:5	13/18



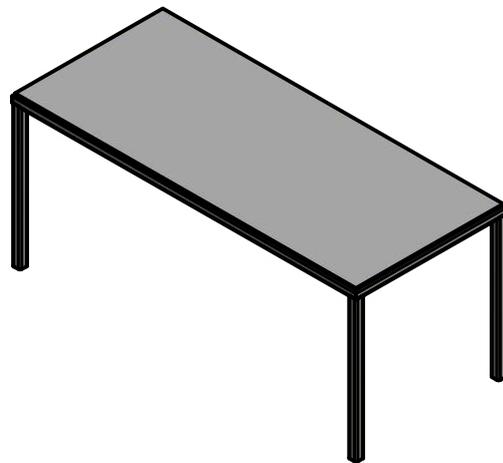
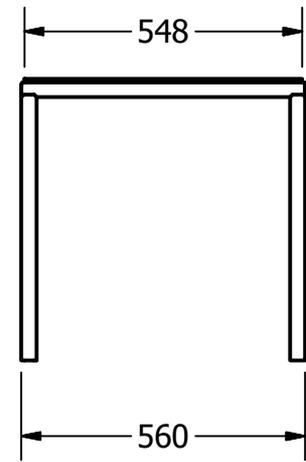
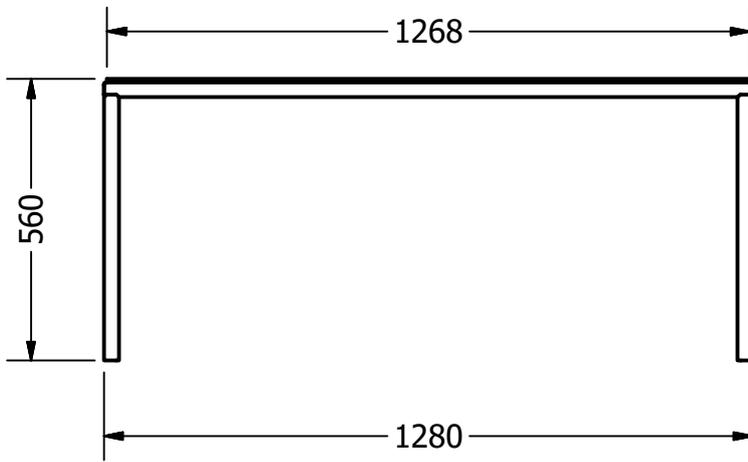
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Dimensiones del soporte para ventilador centrífugo		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:10	14/18



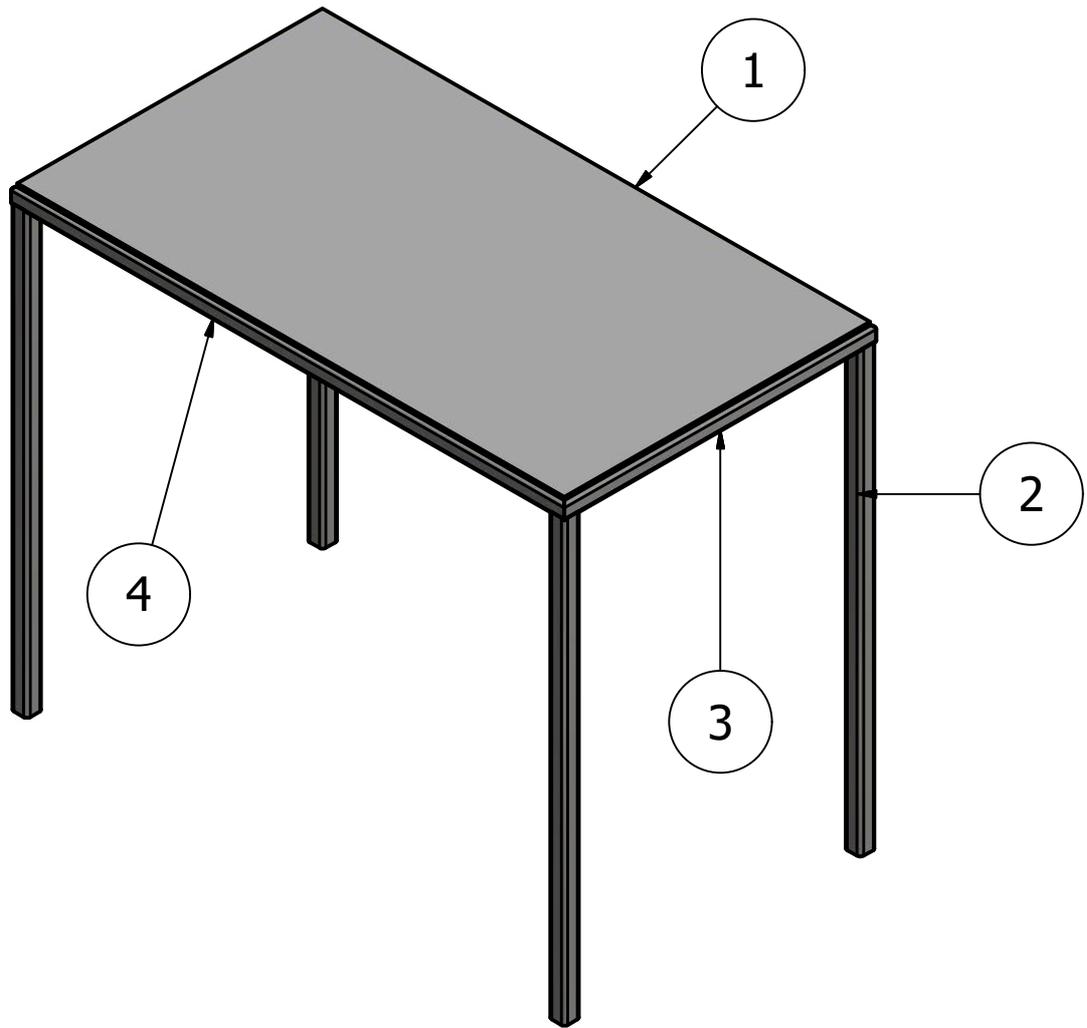
Lista de partes

Ítem	Longitud Total	Descripción
1	N/A	Plancha de ASTM A36 - 6 mm - 1268x548
2	1120 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 560
3	2116 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 529
4	2560 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 1280

Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Soporte para ductos de entrada		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:10	15/18



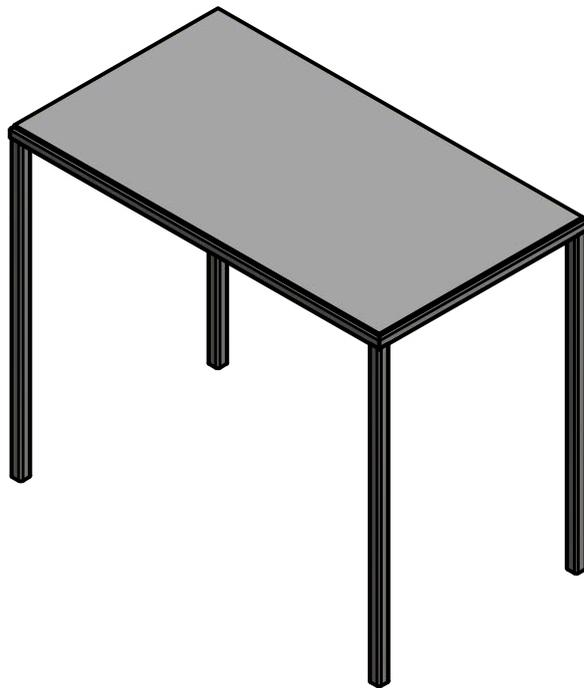
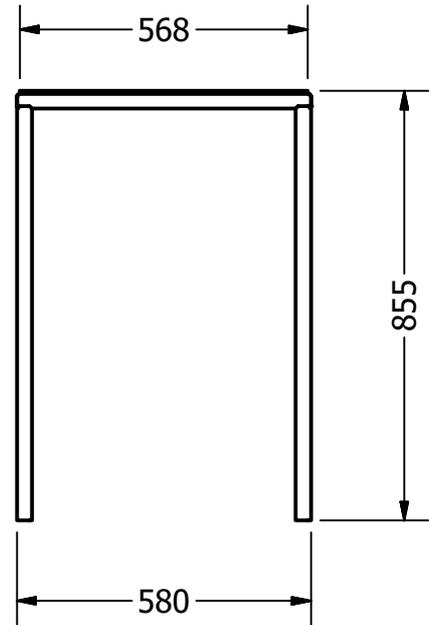
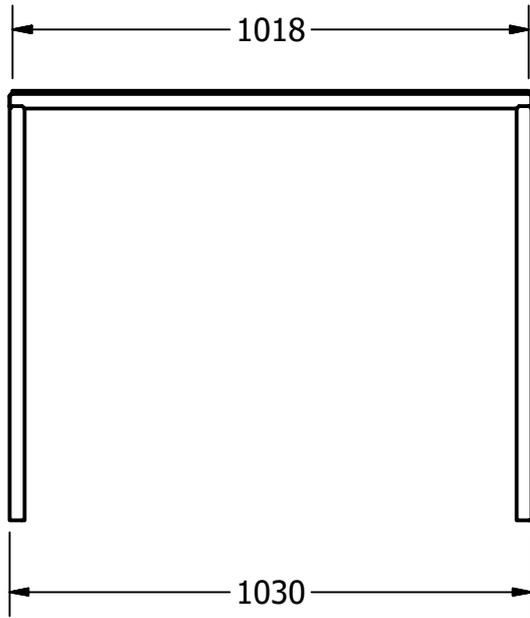
Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquiza	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Dimensiones del soporte para ductos de entrada		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:20	16/18



Lista de partes

Ítem	Longitud Total	Descripción
1	N/A	Plancha A36 - 6 mm - 1018x568
2	3296 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 824
3	1160 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 580
4	2060 mm	ISO 4019 - 30x30x3 - 1030

Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Soporte para ductos de salida		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:10	17/18



Elaborado por:	Xavier Ortega Guillermo Urquizo	Proyecto: Banco de Prueba para colectores solares que utilicen aire como fluido caloportador	Título: Dimensiones del soporte para ductos de salida		
Revisado por:	M.Sc. Carola Sánchez		Fecha: Febrero/2016		
Aprobado por:	Ph.D. Guillermo Soriano	ESPOL	Rev:	Escala:	Plano:
			1	1:15	18/18