



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE BANCO DE ENSAYOS PARA HOMOLOGACIÓN DE COLECTORES SOLARES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

SEBASTIÁN ANDRÉS ARANEDA HUIDOBRO

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO ROMÁN L.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAMÓN FREDERICK G.
PATRICIO JORQUERA E.

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2008

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: SEBASTIÁN ARANEDA H.
ENERO 2008
PROF. GUÍA: SR. ROBERTO ROMÁN L.

“DISEÑO DE BANCO DE ENSAYOS PARA HOMOLOGACIÓN DE COLECTORES SOLARES”

El objetivo general del presente trabajo fue el diseño de un banco de ensayos que permita la homologación de colectores solares térmicos. El diseño se realizó en base a la normativa nacional vigente NCh2919/1 y NCh2919/3, la cual posee su equivalente internacional ISO.

Actualmente existen muchas razones para creer que el uso de colectores solares térmicos se va a tornar masivo a nivel nacional. Entre estas razones se pueden nombrar el Plan Nacional de Colectores Solares Térmicos que está desarrollando la Comisión Nacional de Energía (CNE), la gran capacidad de radiación solar disponible en Chile y los variados proyectos de energía solar que se están llevando a cabo a nivel nacional. En este contexto es entonces indispensable que exista en Chile la capacidad para homologar colectores solares.

El banco de ensayos estará orientado a pruebas de desempeño térmico de colectores solares y estará ubicado en el exterior, aprovechando la radiación natural del Sol. Se analizó en particular la factibilidad de ubicación en las cercanías de Santiago, aunque el fin último es su ubicación en el Norte del país en algún laboratorio de pruebas solares. El trabajo contempló la selección del lugar de emplazamiento de la instalación, el desarrollo del diagrama de flujo del banco de ensayos, el diseño de la estructura de montaje del colector y la especificación y/o diseño de los componentes principales del banco, como son instrumentación, piping, válvulas, bomba de circulación, intercambiadores de calor, etc.

Como conclusiones principales se pueden nombrar que se logró un diseño efectivo del banco de ensayos de acuerdo a la normativa nacional y a los objetivos propuestos. Se estableció además que San José de Maipo presenta mejores condiciones de radiación para la posible ubicación del banco en comparación con Santiago. Finalmente, el costo de la instalación fue estimado en unos 50.300 USD.

*A mis padres
por estar juntos y siempre a mi lado.*

AGRADECIMIENTOS

A aquellos que me han guiado de la mejor manera en el transcurso de estos años, aquellos que me han dado los más valiosos consejos y aquellos que en las buenas y en las malas me han apoyado y han estado y estarán siempre junto a mí: MIS PADRES; Romy y Julio. Ellos son los principales mentores de lo que yo soy ahora y de lo que he logrado. GRACIAS mamá, GRACIAS papá.

Al profesor Roberto Román por haberme dado la posibilidad de trabajar junto a él y junto a su gran experiencia, por la paciencia y disposición de responder a cada duda surgida en este trabajo y por las experiencias de vida que nos transmitía.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica con los cuales logré más que una típica relación alumno profesor. Aquellos que me dieron la oportunidad de pertenecer a su cuerpo docente y aquellos con los cuales un simple saludo se convertía en algo más que un hola y chao.

A los demás miembros de mi casa: Ali, Daniela, perros (Tomás, Canela y Iwi). Por acompañarme y apoyarme siempre. Por sus agradables y necesarias interrupciones durante un transe profundo frente al computador tratando de resolver algún problema ingenieril.

A los *Fantásticos* y a todos los buenos amigos, en especial a Gonzalo, Pichu, Manuel y Nico. Por haberme dado su valiosa amistad durante los años vividos en la Universidad.

A la Rama de Montañismo de Ingeniería (RAI) y al Departamento de Comunicaciones de la Facultad, lugares de los que fue miembro y donde viví experiencias que nunca olvidaré.

En fin, a toda mi familia y a todos aquellos que estuvieron conmigo en algún momento de estos 6 años de vida universitaria. GRACIAS TOTALES.

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales y motivación	1
1.2. Objetivos y limitaciones	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.2.3. Limitaciones y alcances	3
1.2.4. Comentarios	4
2. Antecedentes	5
2.1. Marco Teórico	5
2.1.1. La energía solar	5
2.1.2. Posición del Sol	6
2.1.3. Ángulo de incidencia	6
2.1.4. El colector solar	7
2.2. Situación actual	11
2.2.1. Nivel mundial	11
2.2.2. Nivel nacional	12
2.2.3. Necesidad de realizar pruebas estándares en Chile	13
2.3. Normativa vigente	13
2.3.1. Normas NCh2919/1 y NCh2919/3	14
2.4. Banco de pruebas	14

2.4.1.	Ensayos importantes	15
2.4.2.	Componentes del banco	17
2.5.	Metodología General	18
3.	Metodología específica	19
3.1.	Comentarios	20
4.	Parámetros de diseño	21
5.	Selección del lugar de emplazamiento	22
5.1.	Factibilidad de radiación disponible	22
5.2.	Validación de datos	23
5.3.	Comparación de datos	25
6.	Diagrama de Flujo PI&D	28
6.1.	Descripción	30
7.	Diseño de estructura de montaje	32
7.1.	Descripción del diseño	33
7.1.1.	Montaje del colector	34
7.1.2.	Variación de inclinación	34
7.1.3.	Variación de azimut	35
8.	Instrumentación	37
8.1.	Mediciones	37
8.1.1.	Medición de radiación solar	37
8.1.2.	Medición de ángulo de incidencia de la radiación solar directa	38
8.1.3.	Medición de radiación de onda larga	38
8.1.4.	Mediciones de temperatura	39
8.1.5.	Medición del caudal de fluido del colector	42
8.1.6.	Medición de la velocidad del aire circundante	43

8.1.7. Mediciones de presión	44
8.1.8. Otras mediciones	45
8.1.9. Instrumentación/registro de datos	46
9. Diseño sistema de piping y componentes	48
9.1. Descripción del diseño	48
9.2. Componentes principales	54
9.3. Descripción control de temperatura	57
10.Descripción instalación	59
10.1. Sistema generación de viento	62
10.2. Estructura de montaje	62
11.Estimación del costo de la instalación	64
11.0.1. Observaciones	65
12.Metodologías y ensayos	67
12.1. Colectores con cubierta de vidrio ([1])	67
12.1.1. Montaje y ubicación del colector	67
12.1.2. Velocidad del viento sobre el colector	68
12.1.3. Ensayo de eficiencia en estado estacionario en exterior	68
12.1.4. Ensayo para determinación de constante de tiempo del colector	72
12.1.5. Ensayo para determinación de modificador de ángulo incidente del colector .	73
12.1.6. Determinación de la capacidad térmica del colector	75
12.1.7. Determinación de la caída de presión a través del colector	76
12.2. Colectores sin cubierta de vidrio ([2])	77
12.2.1. Montaje y ubicación del colector	77
12.2.2. Velocidad del viento sobre el colector	78
12.2.3. Ensayo de eficiencia en estado estacionario en exterior	78
12.2.4. Ensayo para determinación de constante de tiempo del colector	81

12.2.5. Determinación de la capacidad térmica del colector	81
12.2.6. Determinación de la caída de presión a través del colector	81
12.2.7. Ensayo para determinación de modificador de ángulo incidente del colector .	81
13. Conclusiones y comentarios	83
13.1. Conclusiones principales	83
13.2. Comentarios	83
A. Memoria de cálculo de estructura de montaje	87
A.1. Cálculo de fuerzas	88
A.1.1. Fuerza sobre barras de montaje	88
A.1.2. Fuerzas sobre resto de estructura	88
A.2. Cálculos de resistencia	90
A.2.1. Barras de montaje	90
A.2.2. Viga central	91
A.2.3. Viga soporte ruedas	92
A.2.4. Tornillo de levante	93
A.2.5. Columnas de levante	94
A.2.6. Selección de rodamientos	95
A.3. Análisis numérico	97
B. Memoria de cálculo de componentes del piping	100
B.1. Tuberías	100
B.2. Control de temperatura	101
B.2.1. IC de placas	101
B.2.2. Radiador	103
B.3. Aislación tuberías	105
B.3.1. Lado agua	105
B.3.2. Lado aire	106

B.4. Estanque expansión	108
B.5. Bombas de circulación	109
B.5.1. Bomba circuito primario	110
B.5.2. Bomba circuito secundario	111
C. Tablas radiaciones Quillayal y Geofísica	113
D. Dimensiones generales piping	119
E. Plano principal estructura de montaje	121
F. Planos de diseño estructura de montaje	123
F.1. Índice de planos	123
F.2. Planos de diseño	125

Índice de figuras

2.1. a) Irradiancia solar espectral. b) Variación de la irradiancia solar extraterrestre en el año. [6]	6
2.2. Ángulo de incidencia de la radiación directa.	7
2.3. Esquema del colector solar plano.	8
2.4. Colector de tubos al vacío. [4]	9
2.5. a) Colector de tubos al vacío. b) Colector plano con vidrio. c) Colector plano sin vidrio	10
2.6. Banco de pruebas en laboratorio CENER, Pamplona, España. a) Módulo estructura soporte. b) Módulo componentes.	15
2.7. Ejemplo curva de eficiencia de un colector.	16
5.1. Radiación directa 15 de junio. a) Quillayal. b) Depto. Geofísica	23
5.2. Radiación piranómetro de Geofísica vs. piranómetro patrón para el 11/08/2007 . . .	24
5.3. Radiación piranómetro de Quillayal vs. piranómetro patrón para el 10/06/2007 . . .	24
5.4. Comparación radiaciones Dpto. Geofísica vs Quillayal	26
6.1. Diagrama PI&D del banco de pruebas.	29
7.1. Estructura de montaje del colector con variador de inclinación y azimut.	33
7.2. Anclaje del colector en estructura.	34
7.3. Variación de inclinación del colector.	35
7.4. Variación de azimut del colector.	36
7.5. Solución posible para las ruedas de la estructura (marca DWP). www.ducasse.cl . . .	36
8.1. Piranómetro Kipp&Zonen. (www.kippzonen.com)	38

8.2.	<i>Extracto de catálogo Wika para selección de RTD.(www.wika.com)</i>	40
8.3.	<i>Sensor RTD para temperatura ambiente.(www.globalw.com)</i>	41
8.4.	<i>Sensor para temperatura de punto de rocío.(www.pce-iberica.es)</i>	41
8.5.	<i>a) Esquema sensor de turbina, [5]. b) Sensores de turbina para medición de flujo.(www.ftimeters.com)</i>	42
8.6.	<i>Anemómetro de copas.(www.globalw.com)</i>	43
8.7.	<i>Anemómetro de hilo caliente.(www.omega.com)</i>	44
8.8.	<i>a) Sensor de presión absoluta y relativa. b) Sensor de presión diferencial.(www.omega.com)</i>	45
8.9.	<i>Esquema de una red MODBUS(www.thermometricsoopr.com)</i>	46
9.1.	<i>Piping y componentes.</i>	49
9.2.	<i>Piping y componentes.</i>	50
9.3.	<i>Piping y componentes.</i>	51
9.4.	<i>Piping y componentes.</i>	52
9.5.	<i>a) Piping entrada a colector solar. b) Piping salida del colector solar</i>	53
9.6.	<i>Dimensiones generales piping.</i>	53
10.1.	<i>Banco de ensayo para colectores solares.</i>	60
10.2.	<i>Banco de ensayo para colectores solares.</i>	61
10.3.	<i>Colector montado en estructura de montaje.</i>	63
12.1.	<i>Constante de tiempo τ_c del colector ([1]).</i>	73
12.2.	<i>Modificadores típicos de ángulos de incidencia ([1]).</i>	74
A.1.	<i>Barras de montaje del colector.</i>	88
A.2.	<i>Diagrama de fuerzas de la estructura de montaje.</i>	89
A.3.	<i>Diagrama de cuerpo libre para las barras de montaje del colector.</i>	90
A.4.	<i>Diagrama de cuerpo libre de la viga central.</i>	92
A.5.	<i>Rodamiento utilizado en la estructura.</i>	96
A.6.	<i>Análisis numérico barras montaje.</i>	97

A.7. <i>Análisis numérico viga principal.</i>	98
A.8. <i>Análisis numérico sistema variación azimut.</i>	99

Índice de tablas

2.1. Normativas vigentes que se utilizarán para este trabajo.	13
5.1. Lugares posibles para ubicación del banco de pruebas	22
6.1. Números TAG con su significado.	30
7.1. Dimensiones y pesos máximos y mínimos para colectores solares.	32
8.1. Comparación exactitud RTD. (<i>Fuente: Catálogos Wika, www.wika.cl</i>)	40
8.2. Requerimientos de caudal según tipo de colector.	42
9.1. Propiedades tuberías de cobre utilizadas.	55
11.1. Valor estimado estructura de montaje del colector solar.	64
11.2. Valor estimado piping.	64
11.3. Valor estimado instrumentos y sensores.	65
11.4. Valor estimado otros componentes.	65
11.5. Valor estimado instalación completa.	65
12.1. Desviación permitida de los parámetros de medición durante un período de medición.	71
12.2. Valores de factores p_i	76
12.3. Rango mínimo de condiciones de ensayo de desempeño térmico de colectores sin vidrio.	79
12.4. Desviación permitida de los parámetros de medición durante un período de medición para colectores sin vidrio.	80
A.1. Fuerzas máximas sobre estructura según figura A.2.	90

A.2. Propiedades tornillo de levante.	93
B.1. Parámetro para cálculo de la potencia del IC de placas.	101
B.2. Parámetros para el cálculo del área del IC de placas.	102
B.3. Parámetros lado aire en radiador.	104
B.4. Parámetros típicos de radiador aleteado según [4].	104
B.5. Parámetros cálculo aislación tuberías lado agua.	106
B.6. Parámetros cálculo aislación tuberías lado aire.	107
B.7. Parámetros cálculo estanque de expansión.	108
B.8. Factores k y pérdidas de carga de componentes del circuito primario.	110
B.9. Resultados bomba circuito primario.	111
B.10. Factores k y pérdidas de carga de componentes del circuito secundario.	111
B.11. Resultados bomba circuito secundario.	112
C.1. Radiación marzo 2007.	114
C.2. Radiación abril 2007.	115
C.3. Radiación mayo 2007.	116
C.4. Radiación junio 2007.	117
C.5. Radiación julio 2007.	118

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales y motivación

A nivel nacional existen actualmente situaciones importantes que justifican el comienzo del uso masivo de artefactos orientados a aprovechar la energía solar. Dos de estas situaciones adquieren particular importancia, y se refieren a la situación energética chilena y mundial y al gran potencial nacional de energía solar disponible. Además se debe destacar que actualmente la Comisión Nacional de Energía (CNE) está desarrollando un Plan Nacional de uso de Colectores Solares Térmicos.

En cuanto a la situación energética mundial, el consumo global de energía sigue creciendo año a año y dado que los combustibles fósiles son una fuente agotable de energía, éstos disminuirían en cantidad a cifras peligrosamente bajas en un plazo no menor. A lo anterior se sumarían las grandes tensiones en el mercado debido al alza de precios. Otro factor a tener en cuenta es el impacto ambiental que está teniendo la combustión de los combustibles fósiles, ocasionando emisiones de contaminantes y ayudando al fenómeno del efecto invernadero.

En el caso de Chile, nuestro país ha mostrado gran desarrollo económico y alto consumo energético, sin embargo, no es un país productor de combustibles, por lo que hay que importar combustibles fósiles en un alto porcentaje de la demanda. Por lo anterior es que Chile está muy expuesto a posibles crisis en estas formas de energía.

Se debe entonces buscar fuentes energéticas alternativas para el desarrollo nacional. Chile es un país con gran potencial para el uso de energía solar, ya que tiene en sus desiertos los más altos índices de radiación solar del mundo. Es por esto que la Comisión Nacional de Energía (CNE) y otras instituciones están realizando proyectos de utilización de energía solar.

Una de las formas de aprovechamiento de la energía solar es a través de colectores solares. Los colectores solares cumplen la función de transformar la energía proveniente de la radiación solar en energía térmica.

La energía térmica aportada por el colector es transportada por algún tipo de fluido para alguna posterior aplicación, como puede ser calefacción, uso de agua caliente, calentamiento de piscinas, usos industriales, etc.

Dado el contexto anterior y el comienzo del uso masivo de aparatos solares a nivel nacional, se debe contar con la capacidad de probar de manera estandarizada la tecnología solar que tendrá lugar en el país.

1.2. Objetivos y limitaciones

El objetivo del banco de ensayos a diseñar será ensayar **colectores solares planos** y poseer capacidad para su homologación. El presente trabajo estará dirigido al desarrollo de este banco.

La Real Academia Española define el término **homologar** de la siguiente forma:

- Homologar: Dicho de una autoridad. Contrastar el cumplimiento de determinadas especificaciones o características de un objeto o de una acción.

Para este caso el objeto al que se le contrastará especificaciones y características serán los colectores solares.

Se debe tener en cuenta que homologar no es lo mismo que certificar. Para certificar colectores previamente el banco de pruebas debería estar certificado por algún organismo internacional y funcionar 100 % concordante a la norma, en especial en lo que se refiere a la certificación de sus cadenas instrumentales. Si bien el objetivo del banco será la homologación, el diseño se realizará siguiendo la normativa, ya que esto asegura que el banco de pruebas sea certificable cuando se requiera.

Los objetivos de este trabajo se pueden resumir entonces en los siguientes puntos:

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar un banco de ensayos experimental de colectores solares en base a la normativa nacional vigente del INN, equivalente a la normativa internacional ISO.

1.2.2. Objetivos específicos

- *Realizar un análisis de ubicación del banco de pruebas en las cercanías de Santiago:* Se analizarán, de acuerdo a las condiciones de radiación y días de sol, dos o tres localidades de la región Metropolitana para una posible ubicación del banco de pruebas.
- *Diseñar la estructura de montaje del colector:* La estructura de montaje debe poder variar el colector en inclinación y azimut.
- *Especificar y/o diseñar los componentes principales del banco:* Entre los componentes principales se pueden nombrar las válvulas, piping, bomba, instrumentación, intercambiador de calor, etc.
- *Establecer procedimientos de ensayo:* Si bien la norma establece los procedimientos generales de ensayos éstos se deben especificar de acuerdo al diseño propuesto.
- *Estimar el costo de la instalación.*
- *Realizar recomendaciones y comentarios finales del diseño a modo de conclusión:* Esto tiene como objetivo dar paso al continuo perfeccionamiento de la instalación y su posterior ampliación a varios tipos de tecnologías solares, como colectores de calentamiento de aire.

1.2.3. Limitaciones y alcances

Las principales limitaciones y alcances que se tendrán en cuenta en el diseño son los siguientes:

- *El diseño contará con la ingeniería básica y algo de la ingeniería de detalle:* El diseño de la parte de instrumentación contará solamente con la ingeniería básica. El diseño del resto de los componentes del banco (estructura de montaje, piping, etc) contará con la ingeniería básica y parte de la de detalle.
- El banco de pruebas estará orientado a pruebas de desempeño térmico de colectores y no a pruebas de calificación (como resistencia de la estructura, resistencia al shock térmico del colector, etc).
- De acuerdo a la normativa vigente, el banco de ensayos estará más orientado a pruebas de colectores planos de calentamiento de líquido.
- El banco de pruebas no será aplicable a colectores donde la unidad térmica de almacenamiento sea parte integral de colector.
- El banco de pruebas estará ubicado al aire libre, por lo que se considerarán sólo métodos de ensayo en exterior.

1.2.4. Comentarios

Cabe destacar que el alumno del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, Manuel Cifuentes, realizará una memoria paralela cuyo objetivo será el diseño conceptual y básico de un Laboratorio de Sistemas Solares a ubicarse en el norte de Chile.

Manuel Cifuentes desarrollará la ingeniería para pruebas de **sistemas solares térmicos** y para pruebas de **calificación de colectores solares**.

La memoria de Manuel Cifuentes y la memoria desarrollada en el presente informe se complementan.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Marco Teórico

Para poder realizar un proyecto relacionado con tecnologías solares hay que conocer la teoría que hay detrás de la energía solar y los tipos de tecnologías existentes, sus usos, sus ventajas y principios de funcionamiento.

2.1.1. La energía solar

La energía emitida por el Sol viaja en forma de ondas electromagnéticas (o.e.m). Las o.e.m emitidas por la superficie solar están fundamentalmente en la banda visible e infrarroja, comprendiendo longitudes de onda entre 0,2 y 5 μm . La irradiancia espectral es la intensidad de la radiación recibida en cada longitud de onda, su unidad de medida es el $W/m^2\mu m$. Cabe mencionar también que debido a la variación de la distancia Tierra-Sol, la radiación recibida en la Tierra será diferente para cada día del año. (Figura 2.1)

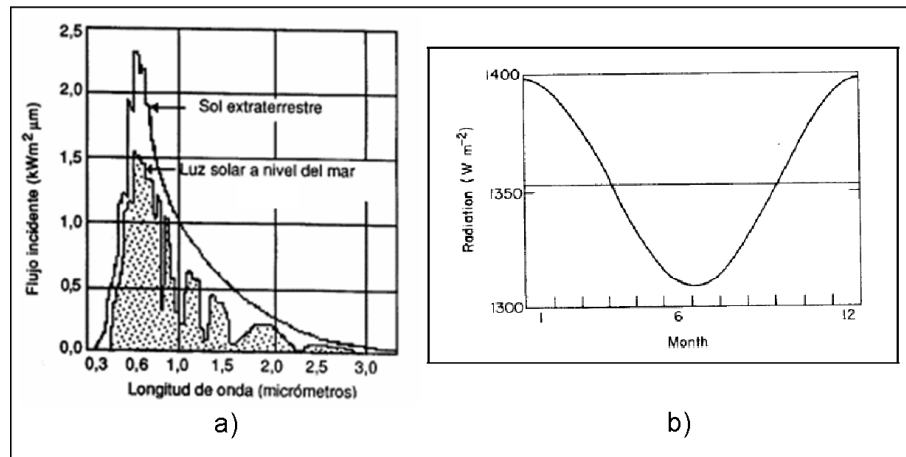


Figura 2.1: a) Irradiancia solar espectral. b) Variación de la irradiancia solar extraterrestre en el año. [6]

La radiación solar se mide comúnmente sobre un plano horizontal en algún lugar determinado de la Tierra sobre su superficie. Para ello se distinguen dos componentes de la *radiación global* o total, la componente llamada *directa* y *difusa*. La *radiación directa* es aquella que proviene directamente del disco solar atenuada en parte por la atmósfera. La *radiación difusa* es la radiación que llega a un plano horizontal, en todas las direcciones excepto la que corresponde al ángulo sólido subtendido por el disco solar. La radiación difusa está integrada por la radiación que es desviada por las moléculas y partículas en suspensión y por la reflejada debida a la interacción de la radiación directa y las nubes. El aparato para medir la radiación total se denomina piranómetro.

2.1.2. Posición del Sol

Coordenadas horizontales

Las coordenadas horizontales del Sol son: *ángulo azimutal* y *altura sobre el horizonte*.

El ángulo azimutal, A_z es el formado por la proyección sobre el plano horizontal de la línea Sol-Tierra, con la línea norte-sur. En el hemisferio sur se mide desde la dirección norte y es positivo hacia el este.

La altura solar, α , es el ángulo formado por la dirección Sol-Tierra con el plano horizontal del lugar.

2.1.3. Ángulo de incidencia

La figura 2.2 representa una superficie plana respecto a la superficie terrestre.

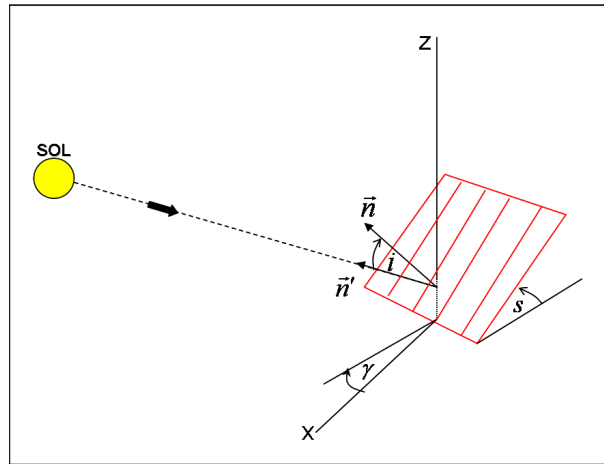


Figura 2.2: Ángulo de incidencia de la radiación directa.

De acuerdo a este sistema, una superficie plana queda orientada de acuerdo a dos ángulos: el de inclinación s y el azimutal γ . El ángulo de inclinación es aquel formado por la superficie y el plano horizontal. El ángulo azimutal (para el hemisferio sur) es el que forma, con la dirección norte, la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie, el cual se considera positivo hacia el este.

El ángulo de incidencia de la radiación directa, i , es aquel formado por la dirección desde el centro del Sol a un punto sobre la superficie irradiada, con la normal a esta superficie. De acuerdo a la figura 2.2 matemáticamente este ángulo cumple la relación $\cos(i) = \vec{n}' \cdot \vec{n}$.

2.1.4. El colector solar

La energía solar puede ser convertida en energía química, eléctrica y térmica. Interesa en especial explicar como se realiza la transformación de la radiación solar en energía térmica disponible.

El colector puede considerarse un intercambiador que transforma en calor la energía que transporta la radiación solar.

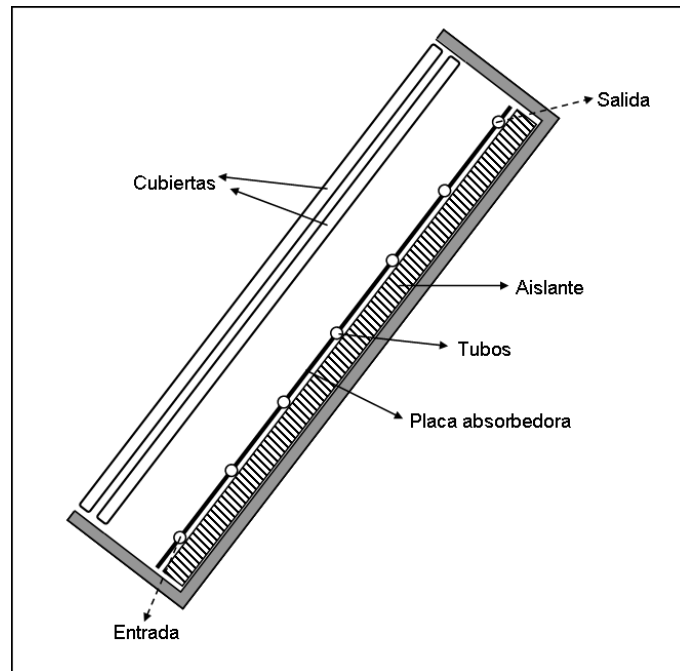


Figura 2.3: Esquema del colector solar plano.

La figura 2.3 muestra los componentes básicos que integran un colector, que son los siguientes:

- Las cubiertas (una o más) transparentes a la radiación solar.
- La placa o superficie absorbente de color negro, donde se transfiere la energía al fluido que circula por su interior.
- El aislamiento posterior que reduce las pérdidas de calor.

La radiación que atraviesa las cubiertas transparentes es absorbida por el absorbedor y de éste pasa por convección al fluido que circula por el interior.

Existen muchos diseños de colectores de placa plana, con una gran variedad de materiales diferentes. Son usados para calentar fluidos como agua, agua con aditivos de anticongelante, aire y otros fluidos. Su principal función es recolectar la máxima energía solar disponible al costo más bajo.

Tipos de colectores solares

Los principales tipos de colectores utilizados comúnmente son:

- Colectores planos con cubierta de vidrio: Son los más comunes en el uso de sistemas de calentamiento de agua.
- Colectores planos sin cubierta de vidrio: Consisten en colectores planos sin la cubierta de vidrio. Son utilizados para aplicaciones donde la temperatura demandada no sea muy alta (unos 30°C). Uno de sus usos típicos corresponde al calentamiento de piscinas.
- Colector de tubos al vacío: Consiste en filas paralelas de tubos de vidrio. A cada tubo se le elimina el aire en su interior para evitar pérdidas de calor por convección. El absorbedor y los tubos de conducción de fluido van por el interior de los tubos de vidrio. En general son mucho más caros que los colectores planos y pueden alcanzar temperaturas muy grandes (entre 77 y 177°C).
- Colectores con unidad de almacenamiento integral: Son aquellos que combinan el estanque de almacenamiento con el absorbedor en una sola unidad. La ventaja de estos sistemas de calentamiento es que no requieren otros componentes.
- Colectores de calentamiento de aire: Son aquellos en que se utiliza aire como medio de transferencia de calor en vez de líquido. Pueden ser utilizados para calentamiento de espacios cerrados, por ejemplo.

En la siguiente figura se puede observar un esquema de colector de tubos al vacío:

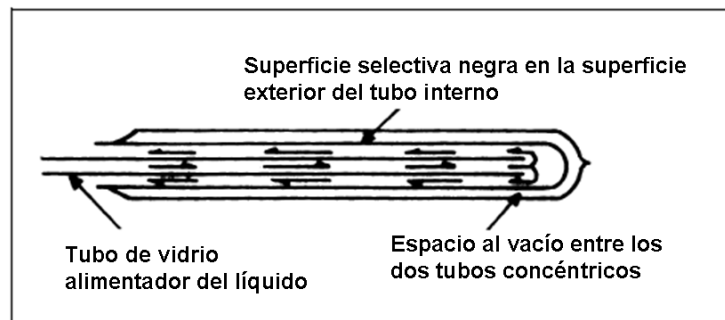


Figura 2.4: Colector de tubos al vacío. [4]

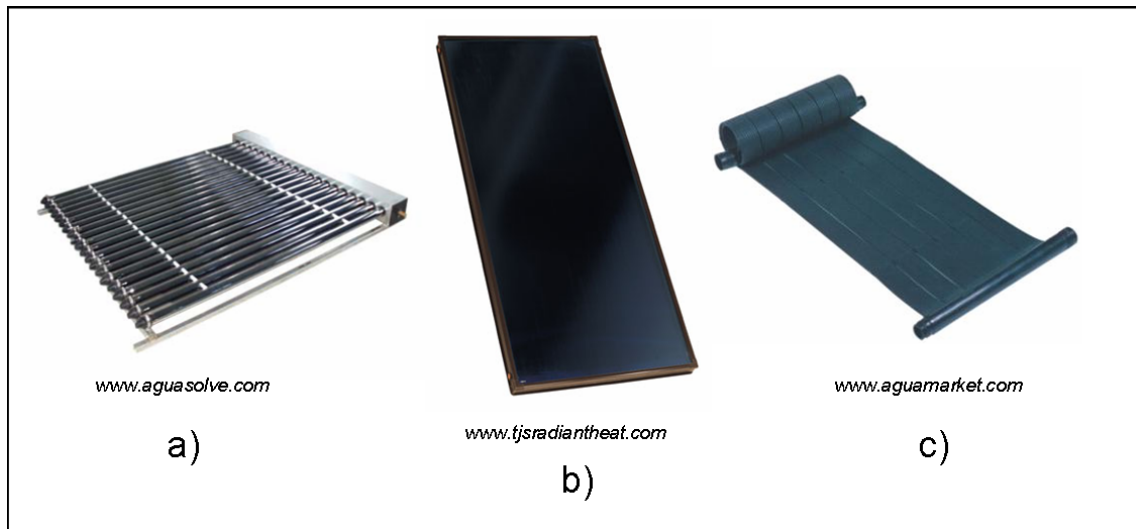


Figura 2.5: a) Colector de tubos al vacío. b) Colector plano con vidrio. c) Colector plano sin vidrio

Eficiencia del colector

La eficiencia del colector está dada por el cociente entre la energía adquirida por el fluido en su paso por el colector y la energía total solar disponible en el área del colector.

La eficiencia del colector con vidrio está dada por la siguiente relación:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{A_c G_T} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_e - T_a}{G_T} \quad (2.1)$$

Donde:

\dot{m} : Caudal másico del fluido.

C_p : Calor específico del fluido.

A_c : Área del colector.

T_s : Temperatura de salida del fluido del colector.

T_e : Temperatura de entrada del fluido al colector.

T_a : Temperatura ambiente.

F_R : Factor de eficiencia de remoción de calor del colector (valores entre 0 y 1).

τ : Transmitancia.

α : Absortancia.

U_L : Coeficiente total de pérdida de calor.

G_T : Radiación total incidente en la superficie del colector.

La eficiencia del colector sin vidrio está dada por:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{A_c\bar{G}_T} = F_R(\alpha) - F_RU_L \frac{T_e - T_a}{\bar{G}_T} \quad (2.2)$$

$$\bar{G}_T = G_T + \frac{\varepsilon}{\alpha}(E_L - \sigma T_a^4) \quad (2.3)$$

Donde:

E_L : Irradiancia de onda larga en el plano del colector.

ε : Emitancia de la superficie del colector para irradiancia de onda larga.

σ : Consante de Stefan-Boltzman.

Características principales

Los colectores solares se utilizan en conjunto con otros componentes, formando sistemas solares. Estos sistemas pueden utilizarse para calentamiento de agua para uso doméstico, calefacción, calentamiento de piscinas y usos industriales.

Entre las principales ventajas de los colectores se pueden nombrar que se utiliza una energía limpia y renovable, se pueden instalar en lugares aislados donde la gente no posee la capacidad de tener agua caliente con un combustible convencional y poseen larga vida útil (unos 40 años).

Entre las desventajas se encuentran los altos costos iniciales en los que se debe incurrir para poseer un sistema solar. Cabe decir, sin embargo, que estos altos costos iniciales se recuperarían dentro de unos 8 años, si se compara con un calentador de agua a gas. De ahí en adelante la energía sería totalmente gratuita (salvo costos de mantención y operación que son bajos para estos sistemas).

2.2. Situación actual

2.2.1. Nivel mundial

A nivel mundial el uso de colectores solares se ha incrementado en gran medida así como también el mejoramiento de la tecnología disponible, aumentando el performance y la confiabilidad de los colectores solares. Por esta razón es que se ha hecho indispensable poseer laboratorios de certificación.

Si bien el costo inicial de la instalación es alto, el uso de colectores solares va en aumento

conforme disminuyen estos costos iniciales y existen subsidios e iniciativas gubernamentales y privadas para su uso.

En el mundo ya existen laboratorios y normas que apuntan al testeo estándar de colectores solares. A modo de ejemplo se puede citar el Solar Rating and Certification Corporation (SRCC) en Washington D.C., que realiza certificaciones tanto a sistemas solares como a colectores de más de 10 compañías en Estados Unidos. La SRCC posee laboratorios especializados tanto en Canadá como en Florida [11], con bancos de pruebas y sistemas de testeo para realizar las certificaciones.

En Europa está también muy masificado el uso de estas tecnologías, existiendo laboratorios de certificación y centros solares en Austria, España, Italia, Portugal, Alemania y Grecia, entre muchos otros.

2.2.2. Nivel nacional

Como se explicó anteriormente, Chile posee gran potencial para el uso de energía solar y además se hace necesaria su implementación dada la búsqueda de formas alternativas de energías debido a la crisis de los combustibles fósiles y el gas natural.

Si bien las energías renovables presentan una participación marginal en el consumo bruto de energía en Chile, han tenido un espacio de desarrollo en el abastecimiento energético de zonas rurales. La energía solar a nivel nacional es utilizada preferentemente en la zona norte del país, en donde existe uno de los niveles de radiación más altos del mundo.

La CNE está desarrollando un Plan Nacional de uso de Sistemas Solares Térmicos en previsión de que el uso de estos sistemas se va a tornar masivo a nivel nacional. Este plan se está desarrollando en conjunto con la consultora francesa Transenergie.

La Asociación Chilena de Energía Solar (ACESOL) se está preocupando actualmente de difundir el uso de sistemas solares y ya posee varias empresas chilenas de energía solar entre sus asociados. Se estima que a nivel nacional existen unos 10.000 metros cuadrados de paneles funcionando, a diferencia de España, Brasil, Alemania o Israel donde se cuentan con alrededor de 1.000.000 de metros cuadrados instalados. Esto muestra el poco desarrollo de la tecnología térmica solar chilena en comparación con otros países. Sin embargo, la tendencia va en aumento.

En cuanto a la normativa vigente, el INN posee normas para testeo de colectores solares y sistemas solares. Estas normas están en concordancia con normativa extranjera. Recientemente, en julio del 2006, se aprobaron dos normas chilenas en el ámbito del desempeño térmico de colectores solares.

Actualmente existe en la Universidad Técnica Federico Santa María un Laboratorio de Evaluación Solar. Este laboratorio cuenta con un banco de pruebas para testear colectores solares en base a norma. Sin embargo, es necesario decir que este banco no cuenta con variador de azimut del colector.

2.2.3. Necesidad de realizar pruebas estándares en Chile

Todo producto que se comienza a utilizar en forma masiva debe contar con ciertos estándares de calidad. Estos estándares dan confianza al sector donde el producto entra ya que hay un compromiso de calidad para quien lo recibe. Es así como debe existir un organismo capaz de verificar de manera formal el funcionamiento y características de un determinado producto.

Cuando se construye un colector nacional o se importa alguno del extranjero no hay forma de comprobar que los datos del fabricante sean realmente verídicos. Tampoco existe certeza de que el fabricante entregará todos los parámetros necesarios de un colector para el diseño de una instalación.

Se hace necesario entonces contar con un laboratorio donde se le realicen pruebas normadas a colectores y sistemas solares. Dicho laboratorio necesita instalaciones que funcionen en base a normas y el personal capacitado para operarlas.

Los resultados de los ensayos entregarían las características de funcionamiento y parámetros importantes de colectores y sistemas en base a procedimientos estandarizados.

2.3. Normativa vigente

La normativa nacional vigente cuenta con normas tanto para colectores solares como para sistemas solares. Estas normas tienen su equivalente internacional ISO. Las normas en las cuales se basará este trabajo son las correspondientes a la evaluación del desempeño térmico de colectores. En la tabla 2.1 se muestran las normas principales a utilizar, su descripción y su equivalencia con normativa internacional.

Tabla 2.1: Normativas vigentes que se utilizarán para este trabajo.

Internacional	Nacional	Título
ISO 9806-1	NCh2919/1 [1]	Método de ensayo para colectores solares - Parte 1: Desempeño térmico de colectores con vidrio de calentamiento de líquido considerando caída de presión.
ISO 9806-2	NCh2919/3 [2]	Métodos de ensayo para colectores solares - Parte 3: Desempeño térmico de colectores sin vidrio de calentamiento líquido considerando caída de presión

2.3.1. Normas NCh2919/1 y NCh2919/3

Estas normas establecen los métodos que determinan el desempeño térmico de los colectores solares con vidrio y sin vidrio de calentamiento de líquido. Contiene los métodos de ensayo y procedimientos de cálculo para ensayos tanto en el exterior como en el interior (para este trabajo se utilizarán sólo los métodos de ensayo en exterior).

Los principales puntos tratados en estas normas se pueden resumir en lo siguiente:

- Montaje y ubicación del colector: estructura, orientación, irradiancia requerida, etc.
- Instrumentación: medición de temperatura, caudal, radiación, velocidad del viento, tiempo, etc.
- Instalación del ensayo.
- Ensayo de eficiencia en estado estacionario en exterior.
- Determinación de la capacidad térmica efectiva y la constante de tiempo de un colector.
- Modificador del ángulo incidente del colector.
- Determinación de la caída de presión a través del colector.
- Anexos: Formatos de hojas de registro de datos.

2.4. Banco de pruebas

Se pretende realizar un diseño modular, esto es, un módulo que corresponda a la estructura donde se montará el colector y otro módulo que contenga los componentes necesarios para el proceso de ensayo (bomba, intercambiador, instrumentos, etc.)

Se analizarán lugares de emplazamiento del diseño en las cercanías de Santiago de acuerdo a la comparación de datos reales con datos de un modelo teórico para días despejados. En particular, se tienen datos de San José de Maipo y de la ubicación de la Facultad de Ingeniería de la U. de Chile, entregados los primeros por el profesor R. Román y los segundos por el Dto. de Geofísica de esta Facultad.

Existen en el mundo bancos de prueba tanto en interior como en exterior. Para ensayos en interior se debe contar con un dispositivo de simulación de radiación solar. En la siguiente figura se puede observar un ejemplo de banco de pruebas en exterior:



Figura 2.6: Banco de pruebas en laboratorio CENER, Pamplona, España. a) Módulo estructura soporte. b) Módulo componentes.

2.4.1. Ensayos importantes

Dentro de los ensayos que se realizan en un banco de pruebas para colectores cobran especial importancia los siguientes:

Ensayo para obtener la curva de eficiencia del colector

La eficiencia de un colector está dada por la ecuación 2.1.

La curva de eficiencia es aquella que indica como varía la eficiencia, η , en función de la razón $(T_e - T_a)/G_T$. Donde T_e es la temperatura de entrada del fluido al colector, T_a la temperatura ambiente y G_T la radiación total incidente en la superficie del colector. Según la ecuación 2.1 esta curva debiera ser lineal y decreciente.

El ensayo consiste en exponer el colector a la radiación solar y medir las temperaturas del fluido y su caudal. Asimismo se determinan la temperatura ambiente y radiación en el plano del colector. Esto se realiza con el objetivo obtener diversos puntos de la curva. Lo siguiente es ajustar la mejor recta para los puntos. Un ejemplo se puede observar en la figura 2.7.

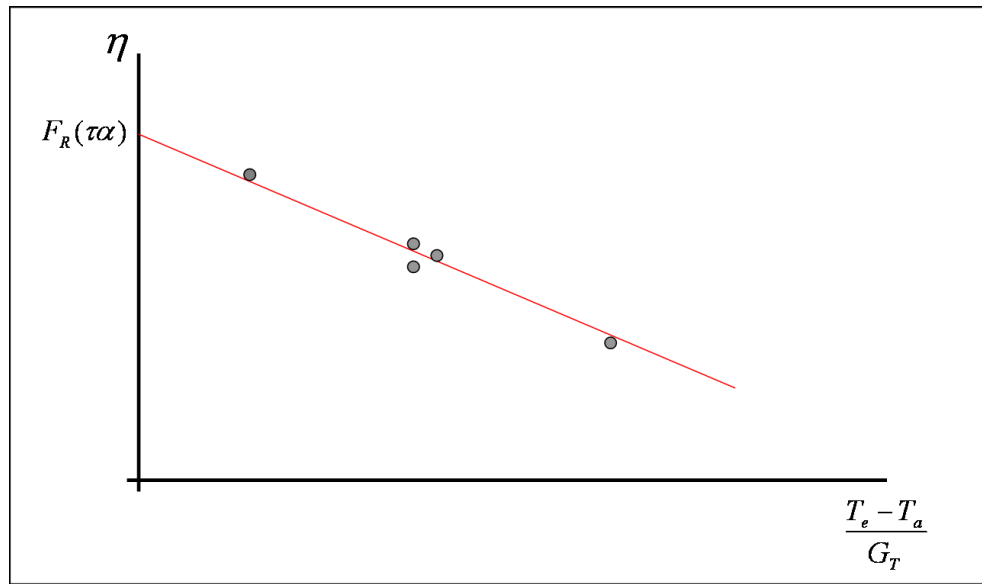


Figura 2.7: Ejemplo curva de eficiencia de un colector.

Los ensayos se realizan en general para condiciones de radiación normal. La incidencia normal queda representada por el valor de incidencia normal del producto transmitancia-absortancia, $(\tau\alpha)_n$.

De acuerdo a la curva, la eficiencia decrece a medida de que la diferencia de temperatura entre la entrada del fluido y el ambiente aumenta.

Se debe tener en cuenta que el coeficiente de pérdida de calor U_L de la ecuación 2.1 depende también de la temperatura. Además, para temperaturas altas comienza a ser importante los factores radiativos.

Si se requiere una mayor exactitud conviene entonces realizar un ajuste de segundo grado a los puntos experimentales.

Ensayo para obtener el modificador del ángulo incidente del colector

Este ensayo se realiza para obtener parámetros que indiquen el comportamiento del colector en condiciones en que no se tienen condiciones de incidencia normal de radiación en la superficie del colector.

Lo que se busca es obtener el factor modificador de ángulo incidente K_θ para diferentes ángulos de incidencia.

K_θ cumple la relación:

$$(\tau\alpha)_e = K_\theta(\tau\alpha)_n \quad (2.4)$$

Donde $(\tau\alpha)_e$ es el producto transmitancia-absortancia efectivo para un determinado ángulo de incidencia y $(\tau\alpha)_n$ es el producto transmitancia-absortancia en condiciones de incidencia normal.

El ensayo se realiza variando el ángulo de incidencia del colector.

2.4.2. Componentes del banco

Instrumentación

Es necesario contar con un sistema de instrumentación con el cual se puedan monitorear las variables físicas que es necesario medir. [5]

Un sistema de instrumentación cuenta con varios componentes, entre los que se pueden nombrar:

- Sensor: Es el elemento sensible primario y, junto con el transductor, convierte la magnitud física a medir en una señal eléctrica.
- Acondicionamiento y procesamiento de la señal: Son el conjunto de transformaciones a que es sometida la señal eléctrica a fin de extraer de ella la información que se busca.
- Registro de la señal y/o presentación: Almacenamiento de la señal o presentación adecuada de ella.

Para este trabajo probablemente se contará con un sistema de adquisición de datos a un PC. El sistema contará con un transmisor para cada sensor que transformará la señal en digital, evitando el efecto indeseado del ruido. Cada transmisor se conectará luego a una red común que estará conectada directamente al PC.

En cuanto a la elección de los elementos sensores se deben tener en cuenta temas como condiciones ambientales, exactitud, costos y tiempo de respuesta, entre otros.

Entre las mediciones que se deben realizar y las alternativas de sensores adecuados para ellas están:

- Temperatura del fluido: termocuplas, RTD (resistance temperatura devices).
- Flujo de fluido: Medidores de diferencia de presión, flujómetros de área variables (de desplazamiento positivo y turbinas), flujómetros electromagnéticos y flujómetros de ultrasonido.

- Irradiación solar: Piranómetro.
- Velocidad del viento: Anemómetro.
- Presión: Manómetro.

Piping, válvulas y bomba

Las tuberías deben ser resistentes a la corrosión y soportar hasta 120°C según la norma. Se utilizarán probablemente tuberías de metal o de HDPE (Polietileno de Alta Densidad). Deben existir válvulas en el circuito de tuberías, como válvulas de seguridad, válvulas de control de flujo y de purga. La bomba de circulación se debe encargar de circular el fluido por las tuberías y vencer las pérdidas de carga de los componentes (válvulas, codos, tuberías, etc).

Existe mucha bibliografía disponible para el análisis de válvulas, piping y bombas, en particular el ASHRAE HandBook aporta muy buena información en este aspecto. [3], [4]

Estructura

La estructura donde se monte el colector debe ser capaz de ser flexible en cuanto a la capacidad de montaje de cualquier tipo de colector, dimensiones, pesos y características. En particular debe soportar el peso del colector cargado totalmente de líquido.

El diseño debe cumplir con la norma, y para este diseño se incluirá un variador manual de ángulo de inclinación y azimut.

2.5. Metodología General

La metodología general a seguir durante el desarrollo de este trabajo será la recopilación de antecedentes, evaluación del lugar de emplazamiento del diseño, estudio y comprensión de la normativa vigente, la evaluación de las diferentes alternativas de diseño en base a la normativa estudiada y finalmente la realización del diseño propiamente tal.

Capítulo 3

Metodología específica

La metodología específica a seguir en el desarrollo de este trabajo de título es la siguiente:

1. Análisis lugar de emplazamiento.
 - a) Análisis de datos reales.
 - b) Modelación teórica.
 - c) Comparación y decisión.
2. Realización diagrama de flujo banco de pruebas y componentes.
3. Diseño estructura de montaje colector.
 - a) Análisis de resistencia.
4. Diseño módulo de componentes del banco.
 - a) Análisis instrumentación y mediciones.
 - b) Análisis de tuberías de conducción y accesorios de unión.
 - c) Análisis de bomba y dispositivos de control de flujo.
 - d) Análisis de forma de regulación de temperatura del fluido de trabajo.
 - e) Análisis de otros componentes (estanque, filtros, ventilador).
5. Realización planos generales de diseño.
6. Establecimiento de metodologías y procedimientos de ensayo de acuerdo a norma y diseño.
7. Estimación del costo de la instalación.
8. Recomendaciones y conclusiones finales del diseño.

3.1. Comentarios

Los análisis dentro de los puntos del diseño del módulo de componentes pueden ser análisis de dimensionamiento y/o especificación.

Capítulo 4

Parámetros de diseño

Para el desarrollo del diseño se tendrán en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

- **Resistencia:** Tanto la estructura de montaje del colector como el resto de los componentes debe ser resistente a las solicitaciones tanto del proceso en sí como del medio ambiente.
- **Versatilidad:** El banco de pruebas debe ser versátil para su utilización. Debe considerar el más amplio rango de colectores planos posibles y ser capaz de adaptarse en su parte conceptual a otro tipo de tecnologías relacionadas.
- **Normativa vigente:** El diseño del banco de pruebas se debe concebir de acuerdo a la normativa vigente de ensayos de colectores solares.
- **Mantenición:** El diseño debe ser pensado para poder realizar mantenciones sobre los equipos, por lo cual debe existir fácil acceso a las partes y su desmonte debe ser posible de manera sencilla cuando sea necesario.
- **Seguridad:** El banco de pruebas debe ser seguro para el operador.
- **Confiabledad:** El banco de pruebas debe ser suficientemente confiable para realizar un ensayo completo sin presentar fallas.

Capítulo 5

Selección del lugar de emplazamiento

El siguiente capítulo tiene como objetivo analizar dos posibles lugares para la ubicación del banco de pruebas para colectores solares en Santiago de acuerdo a los datos de radiación disponibles. Esto puede servir ya sea como referencia para instalar el banco en la región Metropolitana o como guía para un análisis de ubicación en otra localidad, como por ejemplo en el Norte del país.

La siguiente tabla muestra las localidades a comprar y sus características principales:

Tabla 5.1: Lugares posibles para ubicación del banco de pruebas

Localidad	Latitud °	Longitud °	Altura (msnm)
Quillayal, Comuna San José de Maipo	-33,597	-70,363	943
Dpto. Geofísica Universidad de Chile	-33,457	-70,662	547

Las localidades de la tabla anterior se escogieron preferentemente porque existen datos de radiación instantáneos para cada una de ellas a lo largo del año 2007. Además en ambas existen el personal y el espacio apropiado para instalar un banco de pruebas de este tipo.

5.1. Factibilidad de radiación disponible

La normativa establece que al momento del ensayo la irradiancia solar total en el plano de la abertura del colector debe ser mayor que $600[W/m^2]$.

Como el diseño tendrá un variador de azimut e inclinación, el colector se podrá orientar hacia el Sol, recibiendo toda la radiación directa disponible más la radiación difusa que llega al plano inclinado.

La siguiente figura muestra la radiación directa para las localidades estudiadas según el modelo

de radiación de días despejados de *Perrin de Brichambaut* para el día 15 de junio:

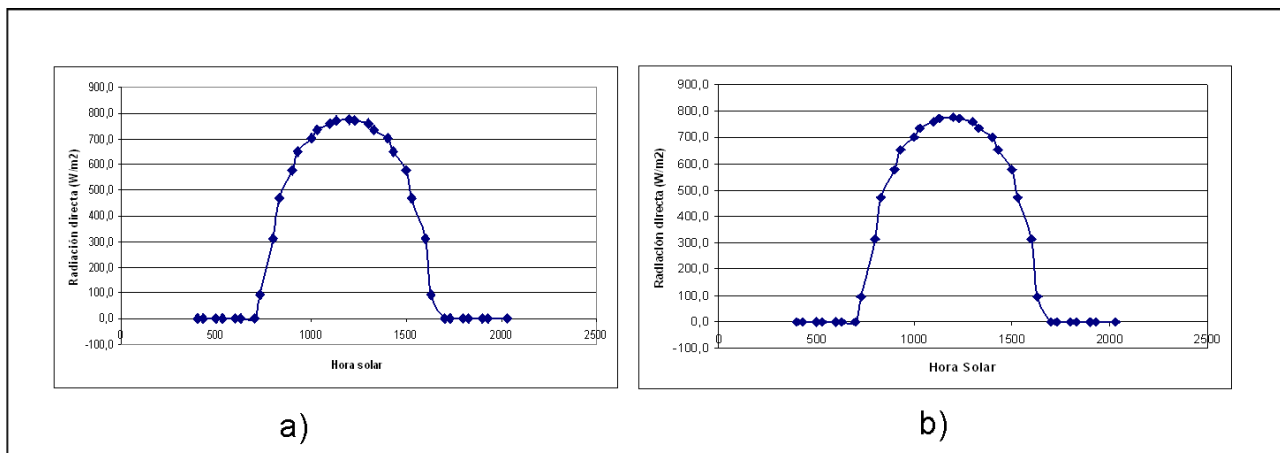


Figura 5.1: Radiación directa 15 de junio. a) Quillayal. b) Depto. Geofísica

Se puede ver de los gráficos anteriores que para un día de invierno despejado se alcanzan radiaciones directas mayores que $600 [W/m^2]$ a las cuales hay que sumarle aún la radiación difusa. En verano la radiación es aún mayor.

Se deduce entonces del análisis anterior que en ambas localidades es posible realizar pruebas.

5.2. Validación de datos

Se cuenta con datos de radiación horaria en plano horizontal cada 15 min para ambas localidades estudiadas. Estos datos son medidos con un piranómetro fotovoltaico.

Lo que se debe hacer entonces para la correcta y confiable utilización de estos datos es validarlos con algún tipo de medida patrón. En este caso se utilizó un piranómetro patrón marca Kipp&Zonen proporcionado por el profesor Roberto Román.

Para realizar lo anterior se mide la radiación del lugar de un par de días despejados utilizando al mismo tiempo el instrumento patrón y el instrumento del lugar (piranómetro fotovoltaico). Luego ambas mediciones se contrastan. Esto se logró hacer de forma efectiva tanto en el Depto. de Geofísica como en Quillayal.

Las siguientes figuras muestran la radiación medida y la radiación patrón para un día despejado en ambas localidades estudiadas:

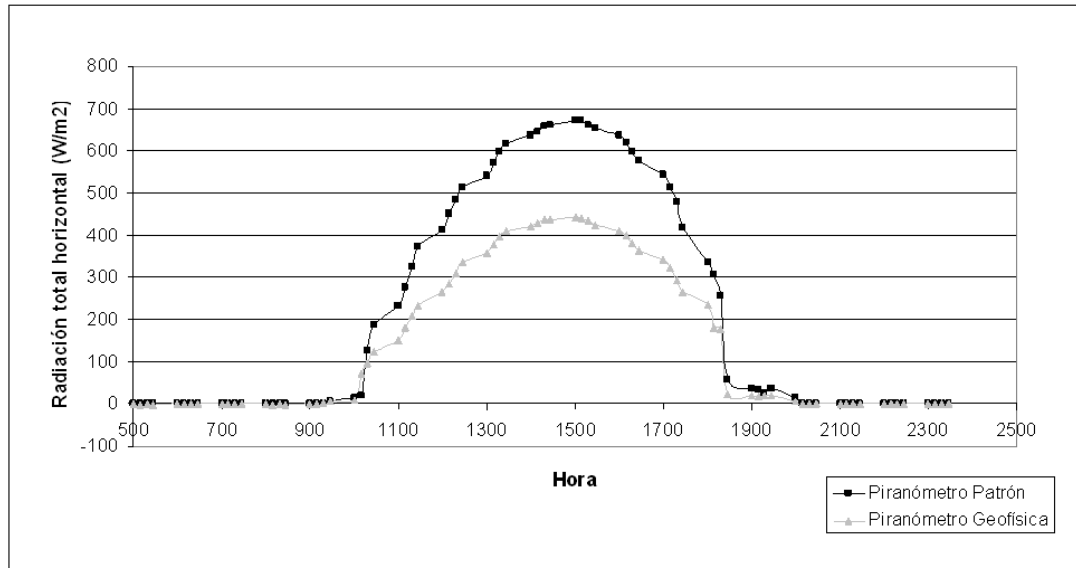


Figura 5.2: Radiación piranómetro de Geofísica vs. piranómetro patrón para el 11/08/2007

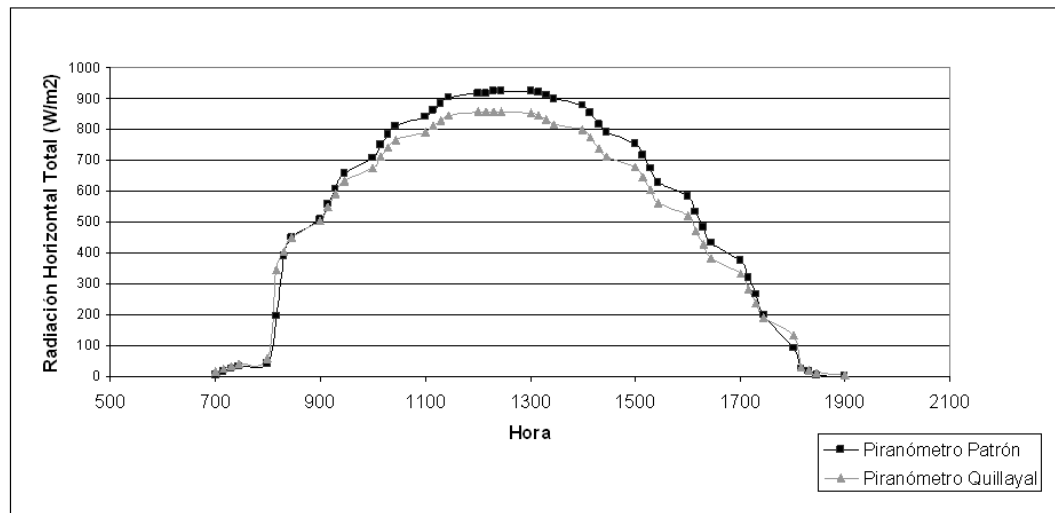


Figura 5.3: Radiación piranómetro de Quillayal vs. piranómetro patrón para el 10/06/2007

De la figura 5.2 se observa claramente que hay un error instrumental, ya que la radiación que está midiendo el piranómetro fotovoltaico ubicado en Geofísica es notablemente menor a la radiación real. Esto se puede deber principalmente a suciedad acumulada en el instrumento.

Para corregir los datos de Geofísica se obtuvo un factor de corrección utilizando dos días despejados como el de la figura 5.2. Se encontró entonces que los datos del lugar se deben ponderar por

un factor de 1,5 para aproximarlos a valores más cercanos a los dados por el piranómetro patrón (valores reales).

De la figura 5.3 se observa que los datos del piranómetro fotovoltaico en San José de Maipo están bastante cerca de los datos medidos por el piranómetro patrón. Si bien existe una diferencia, esta se puede deber a errores instrumentales típicos y aceptables. En particular se obtuvo, utilizando la misma metodología que para Geofísica, que los datos medidos por el piranómetro del lugar se deben ponderar por un factor 1,07 para aproximarlos a valores más cercanos a los dados por el piranómetro patrón.

5.3. Comparación de datos

Para comparar los datos se obtuvo la radiación total acumulada a lo largo del día para varios días y varios meses tanto para Geofísica como para Quillyal (Anexo C). Los resultados se pueden observar en las siguientes figuras:

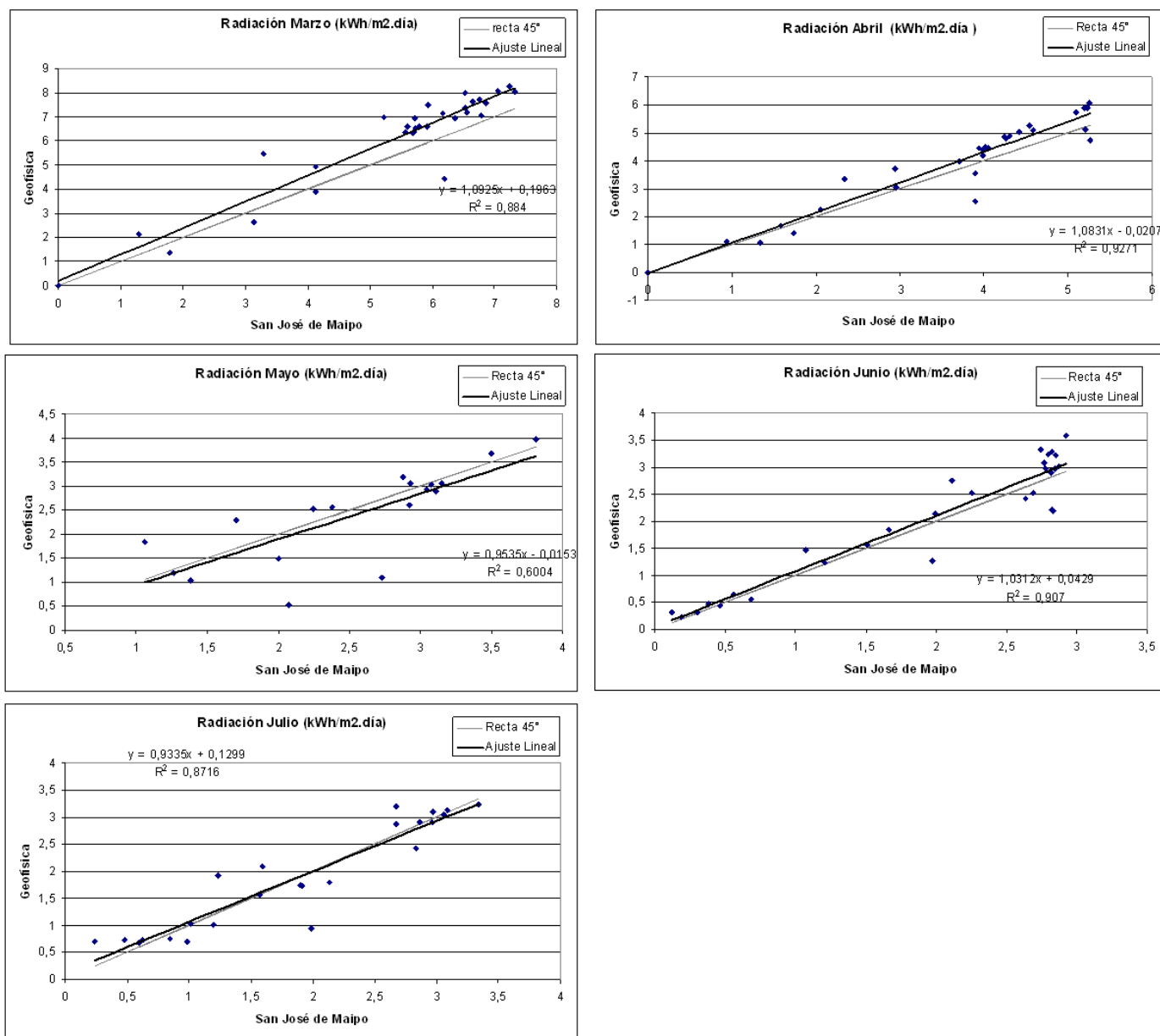


Figura 5.4: Comparación radiaciones Dpto. Geofísica vs Quillayal

De los gráficos anteriores se puede observar que:

- Comparando la recta de ajuste lineal con la recta de 45° se ve que la radiación acumulada a lo largo del día es muy similar para ambas localidades, en particular para algunos meses se observa la tendencia de que en Geofísica hay más radiación acumulada mientras que en otros meses se observa lo contrario. Como conclusión preliminar, a través de este análisis no se puede deducir que alguna localidad presente más radiación que otra.

- Independiente de las radiaciones obtenidas, se observa que el Depto. de Geofísica presenta más días nublados que Quillayal. Los días nublados en Geofísica y despejados en Quillayal son aquellos puntos que están muy por debajo de la recta de ajuste lineal. Santiago en general se ve más influenciado por la nubosidad que viene de la costa, la cual no alcanza a llegar a San José (comuna más cordillerana). Esta tendencia en general es la misma para todos los meses.

La normativa establece que las pruebas se deben realizar durante días despejados, ya que no debe existir una variación considerable de la radiación solar durante las horas centrales del día.

De lo anterior se puede deducir que el mejor lugar para instalar el banco de pruebas es en la localidad de Quillayal (San José de Maipo) por la principal razón que presenta más días despejados, lo que permite realizar más pruebas durante el año.

Se sabe además que Quillayal es una localidad más limpia que Geofísica desde el punto de vista de la contaminación del aire lo cual asegura una radiación más estable a lo largo del día.

Capítulo 6

Diagrama de Flujo PI&D

El presente capítulo tiene como objetivo presentar el diagrama de flujo tipo PI&D de la instalación. Este diagrama está en concordancia con la normativa utilizada y sirve para probar tanto colectores con vidrio como sin vidrio.

La siguiente figura presenta el diagrama PI&D propuesto para la instalación:

Tabla 6.1: Números TAG con su significado.

NÚMERO TAG	COMPONENTE
V.AL	Válvula de alivio
V.A	Válvula de aguja
V.B	Válvula de bola
V.P	Válvula de purga de aire
E	Estanque
EE	Estanque de expansión
B	Bomba
F	Filtro
A.V	Abertura de vidrio
IF	Indicador de flujo
C	Calefactor
AIS	Aislación
GV	Generador de viento
IC	Intercambiador de calor
S.F	Sensor de flujo
S.T	Sensor de temperatura
MAN	Manómetro
M.D	Manómetro diferencial
PIR	Piranómetro
ANE	Anemómetro
PG	Pirgeómetro
GNO	Gnomon

6.1. Descripción

El fluido utilizado de transferencia de calor para el ensayo del colector generalmente es agua ya sea sola o con alguna sustancia anticongelante. Se puede utilizar algún otro fluido si éste es recomendado por el fabricante del colector.

Los materiales utilizados en el circuito deben ser resistentes a la corrosión y apropiados para operaciones a temperaturas de hasta 120°C. Por esta razón las tuberías del diseño serán de cobre.

Los sensores de medición se ubican en puntos claves del circuito para realizar las medidas apropiadas del ensayo. En particular son necesarios dos sensores de flujo, uno para ensayos de colectores con vidrio y otro para ensayos de colectores sin vidrio, debido a la diferencias de caudal necesario en ambas pruebas.

Durante el ensayo es imperativo que la temperatura de entrada del fluido al colector se mantenga constante a cualquier nivel de temperatura escogida dentro del rango de funcionamiento.

Para lograr este objetivo se tienen dos etapas de control de temperatura de entrada del fluido. En la primera etapa se disminuye la temperatura del fluido que sale del colector mediante un intercambiador de calor de placas (IC-1) conectado a un circuito cerrado secundario. En una segunda etapa se ajusta la temperatura de una manera más fina a través de un calefactor eléctrico (C-1).

Por el circuito cerrado secundario circula agua a través del IC-1 llevándose el calor del fluido de trabajo del colector. Posteriormente esta agua se enfría en un radiador (IC-2) y es devuelta a un estanque abierto. El caudal de agua necesario se regula manualmente según se necesite. Se utiliza un estanque en el circuito secundario (E-3) para obtener una temperatura de salida del agua lo más pareja posible. La primera etapa de control de temperatura será explicada en detalle en un capítulo posterior.

Para la regulación del flujo en ambos circuitos se utiliza una bomba de circulación con un circuito simple by pass y dos válvulas de aguja controladas manualmente. El objetivo de esto es mantener a la bomba funcionando en una eficiencia alta para diferentes rangos de caudal.

En las partes más altas de los circuitos se deben colocar válvulas de purga de aire (V.P) para evitar la formación de burbujas de aire. Además se debe poseer una abertura de vidrio para monitorear visualmente el flujo por posibles burbujas, suciedad, etc. Se incluyen también indicadores de flujo (IF) para verificar que el fluido de trabajo esté circulando por los circuitos.

El circuito primario posee un estanque de expansión (EE) para absorber las dilataciones del fluido contenido y para mantener una presión deseada.

Para el llenado y vaciado de los circuitos se tienen estanques. El estanque de llenado se ubica en la parte más alta del circuito y el de vaciado en la parte más baja.

Capítulo 7

Diseño de estructura de montaje

En este capítulo se presenta el diseño de la estructura de montaje para el colector solar a ensayar. Previo al diseño se investigaron las soluciones actuales, observando fotografías de bancos de pruebas europeos.

De acuerdo a la normativa 2.1, la estructura de montaje del colector no debe obstruir de ninguna manera la abertura del colector, y no debe afectar significativamente la aislación posterior o lateral, a menos que se especifique de otra forma. El colector se debe montar de manera que el borde inferior esté a no menos de 0,5 m por sobre la superficie de tierra local.

Con la finalidad de realizar un diseño flexible y establecer las cargas a soportar se realizó una búsqueda de características típicas de colectores. Las características físicas máximas y mínimas encontradas se observan en la siguiente tabla:

Tabla 7.1: Dimensiones y pesos máximos y mínimos para colectores solares.

	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Peso lleno (kg)
Características máximas	3,23	2,2	0,16	98,3
Características mínimas	0,9	0,6	0,065	9,2

Dado lo anterior se diseñó una estructura flexible capaz de montar un colector de dimensiones máximas aproximadas de 3,5 x 2,5 x 0,17 [m] y de dimensiones mínimas de 0,84 x 0,54 x 0 [m].

Para efectos de cálculo de resistencia se supuso un peso máximo de colector de 100 [kg] y además se utilizó la norma de viento ([12]) para cálculo de estructuras. La memoria de cálculo de la estructura de montaje se puede ver en Anexo A.

La estructura permite tanto la variación de azimut como la variación de inclinación del colector

ensayado. Esto permite tener condiciones de incidencia normal durante una mayor cantidad de tiempo y hacer más flexible la capacidad de ensayo. El ángulo de incidencia se determina mediante un aparato simple denominado Gnomon, el cual se instala coplanar al colector solar.

En Anexo E se puede ver el plano principal de diseño. El conjunto de planos de detalle de la estructura de montaje se pueden encontrar en Anexo F.

7.1. Descripción del diseño

En la siguiente figura se observa el diseño propuesto con las partes principales que lo componen:

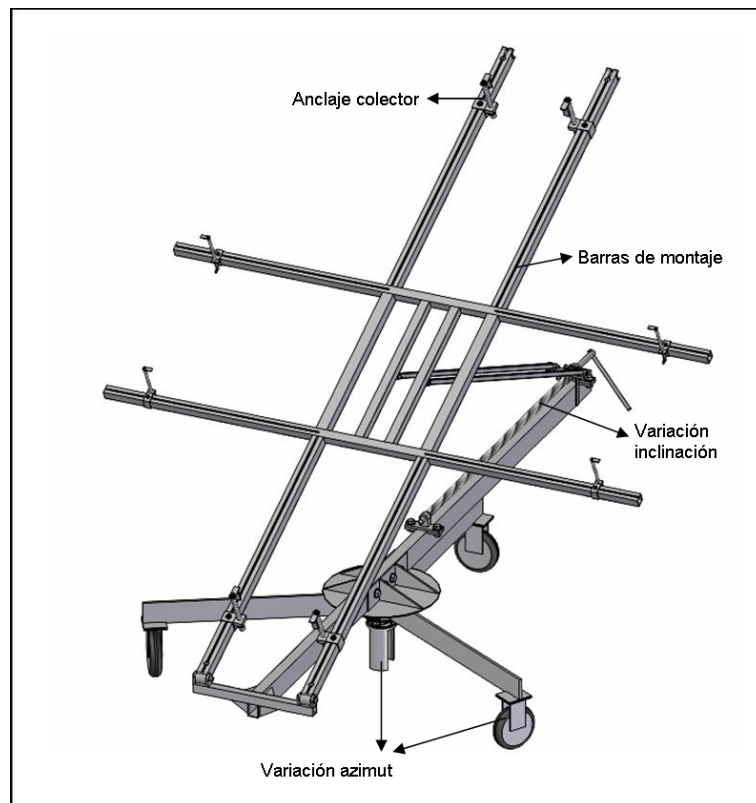


Figura 7.1: Estructura de montaje del colector con variador de inclinación y azimut.

La estructura es en su mayoría de acero y como se dijo anteriormente soporta las cargas de viento y del colector.

Las barras son de medidas estándares típicas y los rodamientos utilizados se pueden obtener de la empresa SKF. Las barras y perfiles se pueden obtener por ejemplo de la empresa chilena Sack.

Al metal de la estructura se recomienda realizarle un tratamiento de limpieza y desengrasado, con un posterior pintado anticorrosivo y resistente a la interperie.

7.1.1. Montaje del colector

El colector se monta en las barras de montaje en cruz de manera que quede lo más centrado posible. Cada barra posee rieles por los cuales se ajustan los anclajes de acuerdo a las dimensiones del colector ensayado, como se muestra en la siguiente figura:

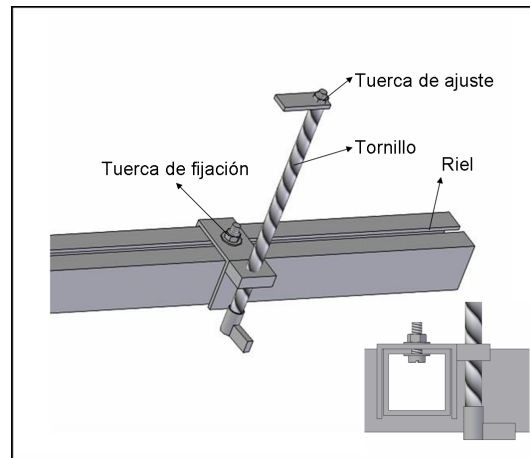


Figura 7.2: Anclaje del colector en estructura.

Para ajustar el anclaje, éste posee una tuerca de fijación que al ser soltada permite el deslizamiento por el riel. Cuando es apretada se hace presión sobre la cara interna y externa del riel, fijando el anclaje en la posición deseada.

A través del tornillo y la tuerca de ajuste se ajusta el anclaje para adaptarse a la altura deseada del colector ensayado. El colector debe quedar bien fijo debido a que puede haber ráfagas de viento que lo pueden mover durante el ensayo.

7.1.2. Variación de inclinación

Para variar la inclinación del colector se utiliza un tornillo, como se muestra en la siguiente figura:

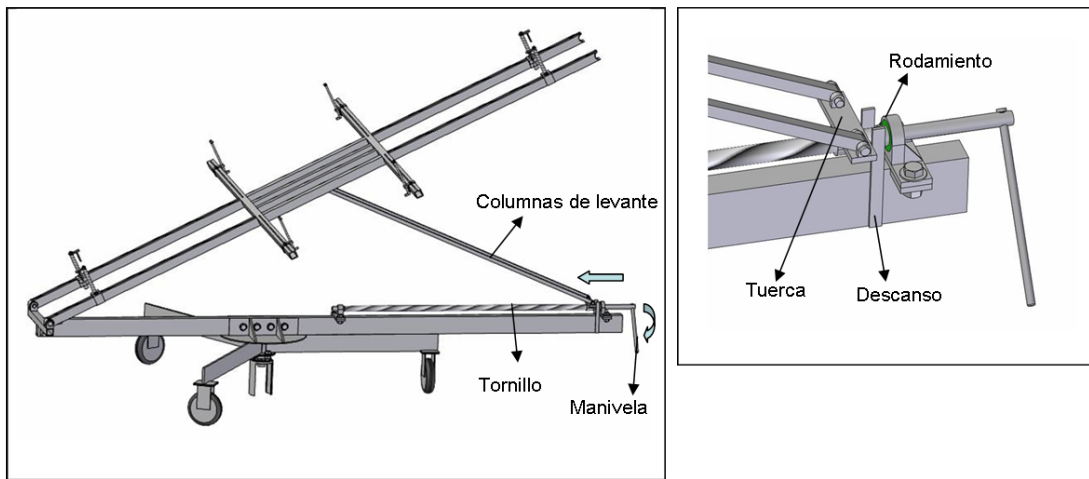


Figura 7.3: Variación de inclinación del colector.

Las columnas de levante están rotuladas en sus dos extremos. Cuando se gira la manivela el tornillo gira, permitiendo que la tuerca se mueva a lo largo de él. Esto produce que las barras de montaje del colector se inclinen para obtener el ángulo deseado.

El tornillo se apoya en su extremo izquierdo (según figura) por un buje de bronce que soporta solamente carga vertical. En su extremo derecho el tornillo se apoya en un rodamiento, el cual soporta tanto la carga vertical como la carga axial que se ejerce sobre el apoyo.

La inclinación obtenida está en un rango de aproximadamente 20° a 60° con respecto a la horizontal. Esto asegura trabajar de manera flexible sobre condiciones de incidencia normal para un día despejado, cualquiera sea la época del año.

7.1.3. Variación de azimut

Para variar el azimut la estructura cuenta con tres ruedas que giran con respecto a un centro que se alinea mediante un rodamiento:

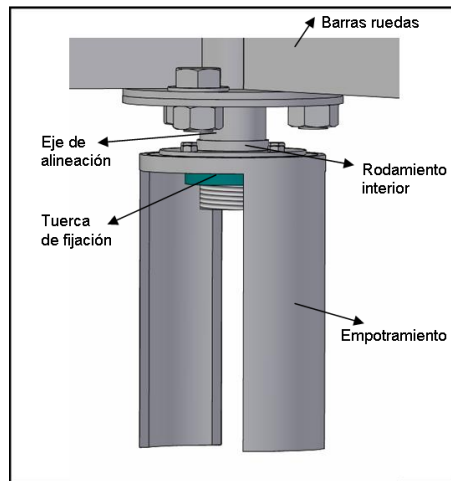


Figura 7.4: Variación de azimut del colector.

La estructura se monta sobre una base de concreto, por donde giran las ruedas. El empotramiento se encuentra en el centro del círculo de giro y se fija mediante un pollo de concreto.

Las ruedas soportan toda la carga vertical hacia abajo. Las cargas horizontales y verticales hacia arriba debido al viento son soportadas por el rodamiento interior, tuerca de fijación y eje de alineación.

Se puede realizar una graduación de ángulos y de la dirección norte sobre la base de giro para determinar el azimut con el cual se está trabajando.

Las ruedas deben ser fijas y de goma para el correcto giro por el concreto, además deben soportar una carga máxima de unos 242[kg] cada una. Una solución factible son las ruedas que ofrece la empresa chilena Ducasse marca DWP código 45358, las cuales soportan una carga de 250[kg]. La rueda se puede observar en la siguiente figura:



Figura 7.5: Solución posible para las ruedas de la estructura (marca DWP). www.ducasse.cl

Capítulo 8

Instrumentación

El siguiente capítulo tiene como objetivo realizar la ingeniería básica de la instrumentación utilizada para el ensayo de colectores solares. Se enumeran los sensores con los requerimientos según normativa y las soluciones actuales de mercado propuestas. También se dan recomendaciones sobre el Sistema de Adquisición de Datos (DAS) factible a utilizar.

Como se dispone de una norma para colectores con vidrio y otra para colectores sin vidrio (2.1) y ambas pruebas utilizan los mismos instrumentos se debe escoger el sensor de mayores requerimientos entre las dos normas estudiadas.

Se debe tener en cuenta que además de los requerimientos de precisión hay que verificar que el sensor posea un rango de temperaturas posible de trabajo acorde a la aplicación, esto es entre unos 0 y 150°C para el fluido y 0 a 30°C para el aire exterior.

El período y las condiciones de calibración están dados en [1], [2].

8.1. Mediciones

8.1.1. Medición de radiación solar

Para medir la radiación de onda corta total tanto desde el Sol como del cielo, se debe usar un piranómetro clase I. Se requiere un instrumento con un desecador que pueda ser inspeccionado para prevenir la acumulación de humedad. La condición del desecador se debe observar previo a y después de cada secuencia diaria de medición.

El piranómetro se debe montar de manera que su sensor este coplanar con el plano de la apertura del colector y no debe proyectar sombra en él. El piranómetro se debe montar a la mitad de la

altura del colector.

Existen dos empresas actuales donde se pueden obtener piranómetros de este tipo: Eppley y Kipp&Zonen. El modelo Eppley es el PSP y el modelo Kipp&Zonen es el CPM6.

En la siguiente figura se observa el piranómetro CPM6 de la empresa Kipp&Zonen:

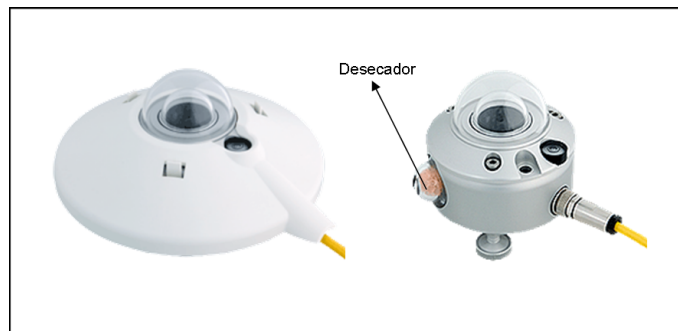


Figura 8.1: Piranómetro Kipp&Zonen. (www.kippzonen.com)

8.1.2. Medición de ángulo de incidencia de la radiación solar directa

Un dispositivo simple para medir el ángulo de incidencia se puede construir montando una vara perpendicular a una placa sobre la cual están marcados anillos concéntricos, este aparato se denomina Gnomon. La longitud de la sombra proyectada por la vara se puede medir usando los anillos y así determinar el ángulo de incidencia.

La relación está dada por:

$$\theta = \arctg\left(\frac{l}{L}\right) \quad (8.1)$$

Donde θ es el ángulo de incidencia, L la longitud de la vara y l la longitud de la sombra proyectada.

El Gnomon se debe posicionar en el plano del colector y a un lado de este.

8.1.3. Medición de radiación de onda larga

Para medir la irradiancia de onda larga se debe usar un pirgeómetro montado en el plano del colector.

Al igual que el piranómetro, el pirgeómetro se debe proveer con un desecador que se pueda

inspeccionar. La empresa Kipp&Zonen posee actualmente pirgeómetros. El modelo propuesto es el CGR 3.

8.1.4. Mediciones de temperatura

Para el ensayo del colector se requieren tres mediciones de temperatura. Estas son la temperatura del fluido a la entrada del colector, la temperatura del fluido a la salida del colector y la temperatura ambiente.

Medición de la temperatura del fluido

La temperatura del fluido en la entrada y salida del colector, además de otro puntos, se debe medir con una exactitud de $\pm 0,1^{\circ}C$ y se requiere una resolución de la señal de temperatura a $\pm 0,02^{\circ}C$.

La diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del colector (ΔT) se debe determinar con una exactitud de $\pm 0,1K$.

El sensor recomendado a utilizar es RTD (Resistance Temperatura Devices) de platino PT100 (resistencia de 100Ω a $0^{\circ}C$). La RTD incluye metal de platino puro que incrementa su resistencia a medida que la temperatura disminuye y viceversa. Un circuito electrónico mide el cambio de resistencia y transmite la señal para su procesamiento. Los sensores RTD son mucho más exactos que las termocuplas y en particular el platino presentar una respuesta muy lineal entre resistencia vs. temperatura, lo cual es deseable en cualquier sensor de medición.

Existen tres clases de RTD, clase A, clase B y clase $1/10^{th}$, sin embargo ninguna de ellas cumple con la exactitud requerida por las normas. Para solucionar esto, se requiere de una calibración especial que se ajuste de mejor manera al rango de temperaturas de trabajo. Esta calibración especial incluye un ajuste de curva no lineal conocido como la ecuación de **Callendar-Van Dusen**. Los parámetros de la ecuación de Callendar-Van Dusen son obtenidos por calibración a temperaturas conocidas del agua ($0^{\circ}C$, $100^{\circ}C$, etc).

La siguiente tabla muestra la comparación entre las exactitudes de una RTD clase A recién salida de fábrica y una RTD calibrada con la ecuación de Callendar-Van Dusen:

Tabla 8.1: Comparación exactitud RTD. (Fuente: Catálogos Wika, www.wika.cl)

Temperatura [°C]	Exactitud RTD clase A ($\pm^{\circ}C$)	Exactitud RTD calibrada (Callendar-Van Dusen) ($\pm^{\circ}C$)
0	0,15	0,02
100	0,35	0,08
200	0,55	0,15

El rango de trabajo a considerar durante el ensayo del colector es de unos 0°C a 100°C, por lo que una RTD calibrada cumple con los requerimientos de exactitud de la norma. Para lograr una buena exactitud la RTD además debe tener una conexión de tres cables.

Se debe utilizar una RTD que se puede introducir dentro de la tubería por donde circula el fluido de trabajo. Además se recomienda que esté montada sobre una vaina para facilitar el cambio y/o mantenimiento cuando se necesario. Las vainas, RTD y tubería se unen generalmente mediante uniones de hilo NPT.

La empresa de instrumentos Wika ofrece un completo catálogo para selección de RTD y vainas (thermowells), además de la calibración de Callendar-Van Dusen. A continuación se muestra un extracto de catálogo de la empresa antes nombrada:

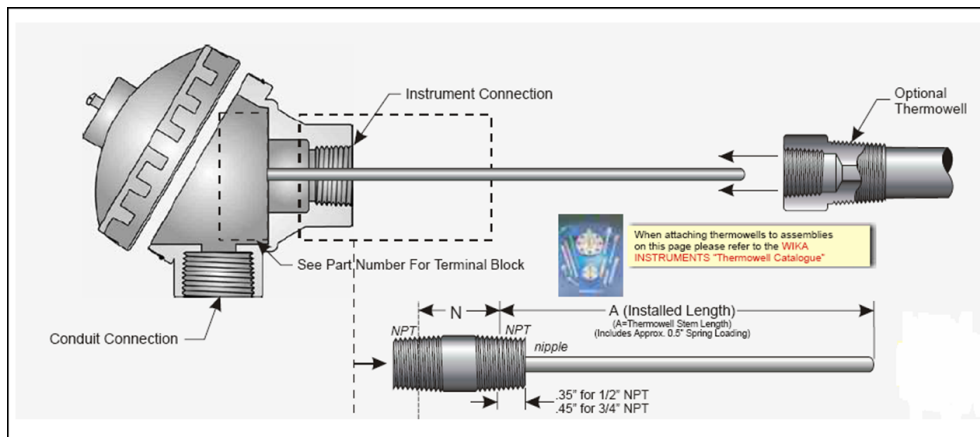


Figura 8.2: Extracto de catálogo Wika para selección de RTD. (www.wika.com)

El DAS se debe programar para medir directamente la diferencia de temperatura (ΔT) entre la entrada y salida del colector, ya que si se hace de manera independiente, el error inducido es mayor y la diferencia se obtiene con menos exactitud.

La RTD se debe montar a no más de 200[mm] de la entrada y salida del colector y su sonda debe apuntar aguas arriba. Para asegurar la mezcla del fluido en la posición de medición de temperatura, se debe colocar una curva en la tubería de conducción aguas arriba de la RTD.

Medición de la temperatura del aire circundante

La temperatura ambiente se debe medir con una exactitud de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. La temperatura de punto de rocío se debe determinar con una exactitud de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. El transductor se debe proteger de la radiación solar directa y reflejada mediante un resguardo bien ventilado, pintado de blanco.

Existen muchos sensores de temperatura ambiente estándares en el mercado. Una solución factible, la con mayor exactitud que se encontró, corresponde a un sensor de temperatura de la empresa Global Water Instrumentation modelo WE700, el cual posee una exactitud de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Este sensor corresponde a una RTD con protección para la radiación y ventilación natural. Posee una salida de corriente de 4 a 20 [mA]. La siguiente figura muestra este sensor:



Figura 8.3: *Sensor RTD para temperatura ambiente.*(www.globalw.com)

Para medir la temperatura de punto de rocío se puede utilizar un hidrómetro manual, el cual también puede medir humedad y temperatura ambiente. La empresa PCR Group posee un hidrómetro de exactitud $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ a 25°C con una resolución de $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. La siguiente figura muestra este instrumento:



Figura 8.4: *Sensor para temperatura de punto de rocío.*(www.pce-iberica.es)

8.1.5. Medición del caudal de fluido del colector

El caudal másico se puede obtener alternativamente midiendo el caudal volumétrico y conociendo la temperatura del fluido y sus propiedades de densidad, las cuales generalmente vienen especificadas.

La exactitud de la medición del caudal másico debe ser igual o mejor que $\pm 0,1\%$.

Los requerimientos de caudal para colectores con vidrio y sin vidrio son distintos, por lo que se debe utilizar dos sensores de caudal. Los sensores para esta tipo de aplicaciones son generalmente de turbina.

La siguiente tabla muestra los requerimientos de caudal según tipo de colector de acuerdo a la normativa estudiada y suponiendo una densidad del agua de $1000[kg/m^3]$.

Tabla 8.2: Requerimientos de caudal según tipo de colector.

Tipo de colector	Caudal mínimo, l/min (gal/min)	Caudal máximo, l/min (gal/min)
Con vidrio	0,3 (0,079)	15,75 (4,16)
Sin vidrio	3,6 (0,95)	52,5 (13,9)

Para mediciones de caudal de forma precisa y líquidos de baja viscosidad son recomendados generalmente flujómetros de turbina. Éstos consisten en una pequeña hélice ubicada a lo largo de la tubería. Cuando el fluido pasa a través de la hélice la hace rotar a una tasa proporcional a su caudal. La rotación es transmitida generalmente como pulsos de voltaje. Estos sensores presentan una alta exactitud ya que la hélice está montada sobre rodamientos de muy baja fricción.

La empresa Flow Technology en USA ofrece actualmente soluciones para los requerimientos de caudal de la tabla anterior. La precisión que se puede alcanzar con un sensor correctamente calibrado es de unos $\pm 0,05\%$ de la lectura. La siguiente figura muestra un esquema de flujómetros de turbina y tipos de sensores de turbina de la empresa antes mencionada:

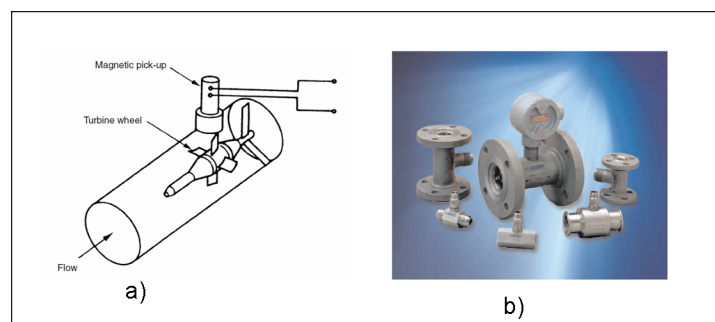


Figura 8.5: a) Esquema sensor de turbina, [5]. b) Sensores de turbina para medición de flujo. (www.ftimeters.com)

La conexión a la tubería de trabajo se puede realizar seleccionando entre hilo NPT o flange.

La salida de la señal para este tipo de sensores puede ser en frecuencia, por lo que se debe escoger un transmisor adecuado para el procesamiento de este tipo de señales.

8.1.6. Medición de la velocidad del aire circundante

Las pérdidas de calor del colector dependen de la velocidad del aire sobre él. Se utilizará un generador artificial de viento tal que se realicen pruebas donde la velocidad del aire esté entre unos 1,5[m/s] a 4[m/s].

Se deben utilizar dos sensores para medir la velocidad, uno de hilo caliente y otro de copas. El primero tiene como objetivo medir el viento en distintos puntos del colector para calcular la velocidad promedio y así obtener el factor de calibración para el anemómetro de copas, el que se sigue utilizando en la prueba. El anemómetro de hilo caliente también se utiliza para obtener la intensidad de turbulencia del viento sobre el colector. El procedimiento para lo anterior se explicará en un capítulo posterior.

Un anemómetro de hilo caliente cuenta con un alambre fino calentado a una temperatura mayor a la ambiente. Cuando el aire pasa por el hilo lo enfría, causando que varíe su resistencia. Se puede encontrar una relación entre la velocidad del aire y la resistencia del hilo caliente. La ventaja de este sensor es su alta respuesta en frecuencia, con lo cual se puede determinar la velocidad en un punto y el nivel de turbulencia existente en el aire.

La velocidad del aire circundante sobre la superficie del colector se debe medir con una exactitud de $\pm 10\%$ en el rango considerado.

En la empresa Global Water Instrumentatios se pueden encontrar anemómetros de copas de buena precisión (modelo WE550), como el que se muestra en la siguiente figura:



Figura 8.6: Anemómetro de copas. (www.globalw.com)

Este anemómetro posee una exactitud de $\pm 0,09[m/s]$ en el rango de 5 a 24 $[m/s]$ y un umbral menor a $0,5[m/s]$ (comienzo del funcionamiento). La exactitud para el rango de 1,5 a 4 $[m/s]$ debiese ser mucho mejor que $\pm 10\%$ para este caso, de lo contrario se debe realizar una calibración para este rango.

Para anemómetro de hilo caliente se puede utilizar un instrumento portátil con un sensor tipo varilla extensible y un Data Logger incorporado para el posterior análisis de datos. La varilla extensible ayuda a realizar mediciones en varios puntos y aporta la flexibilidad suficiente.

La empresa de instrumentos Omega ofrece este tipo de instrumentación, el modelo del anemómetro es el HHF2005HW y se puede observar en la siguiente figura:



Figura 8.7: Anemómetro de hilo caliente. (www.omega.com)

Con este instrumento se puede alcanzar exactitud del $\pm 5\%$ de la lectura y un rango de mediciones de los 0,2 a 20 $[m/s]$.

Los anemómetros de hilo caliente poseen una muy alta respuesta en frecuencia, lo que es necesario al momento de realizar mediciones para obtener el índice de turbulencia.

8.1.7. Mediciones de presión

La presión del fluido en la entrada del colector y la caída de presión a través del colector se debe medir con un dispositivo que tenga una exactitud de $\pm 3,5[KPa]$.

Si bien existen muchos tipos de sensores de presión, uno de los más comunes y efectivos utilizados en este tipo de aplicaciones son los que poseen un indicador de deformación ubicado en un diafragma dentro del sensor. La presión aplicada al sensor produce una deflexión en el diafragma la cual introduce deformaciones en el indicador. El indicador cambia su resistencia al deformarse en forma proporcional a la presión.

La salida eléctrica de estos sensores en general puede ser en milivolts, volts o miliampere. Se recomienda para este caso salidas de volts o miliamperes, ya que éstas se ven menos afectadas por

el ruido externo y así la exactitud se ve menos influenciada por el entorno.

La presión diferencial se mide directamente utilizando un sensor de presión diferencial, lo cual induce menos error que realizar las mediciones de manera independiente.

La empresa de instrumentos Omega posee muchos sensores de presión como los antes descritos con muy buena exactitud. Para medir la presión a la entrada del colector los modelos PX305 y PX315 (de propósitos general) cumplen con las especificaciones. Para medir la presión diferencial la serie PXM81 es adecuada.

La siguiente figura muestra los sensores de la empresa Omega antes descritos:

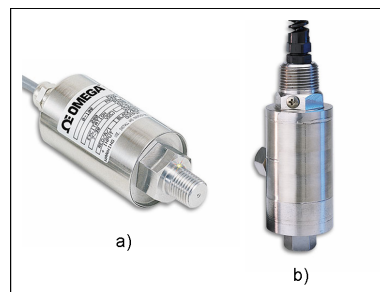


Figura 8.8: a) Sensor de presión absoluta y relativa. b) Sensor de presión diferencial. (www.omega.com)

8.1.8. Otras mediciones

Tiempo transcurrido

Se debe medir con una exactitud de $\pm 2\%$. Puede ser de forma manual o utilizando la escala temporal dada por el DAS.

Área del colector

El área del colector (absorbedor, total o abertura) se debe medir con una exactitud de $\pm 0,1\%$.

Para medición del área generalmente se utilizan guinchas de medir o reglas. Se debe ser riguroso en la medida para así lograr la exactitud requerida.

Capacidad de fluido del colector

La capacidad de fluido del colector, expresada como masa equivalente del fluido de transferencia de calor usado para el ensayo, se debe medir con una exactitud de al menos $\pm 10\%$.

Las mediciones se pueden hacer pesando el colector cuando está vacío y nuevamente cuando está lleno. Para esto se puede utilizar una báscula industrial con una buena resolución.

8.1.9. Instrumentación/registro de datos

Una solución factible y recomendable como DAS es tener una red común (como MODBUS o ETHERNET) a la cual puedan conectarse las señales de los sensores de medición transformadas previamente en digital. La idea es poder monitorear y registrar las mediciones en un computador central. Se necesitan entonces transmisores análogo-digitales. Una ventaja de esta solución es que las señales digitales no se ven afectadas por el ruido sobre los cables, por lo cual no se afectan de manera significativa la exactitud y precisión.

La siguiente figura muestra un esquema de una red MODBUS:

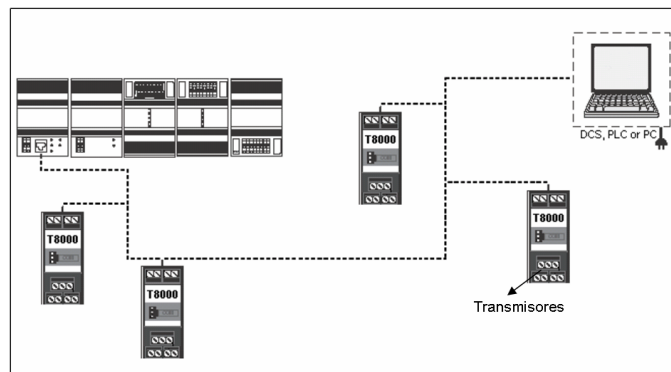


Figura 8.9: Esquema de una red MODBUS(www.thermometricscopy.com)

Para los instrumentos meteorológicos (piranómetro, pirgeómetro, anemómetro, sensor temperatura ambiente) se puede utilizar un Datalogger común donde conectar estos instrumentos para luego ver los datos en el computador central. La empresa chilena Tecnología Omega Ltda. importa instrumentos meteorológicos y en particular se pueden adquirir en ella los instrumentos descritos anteriormente así como Dataloggers para el procesamiento de sus datos.

Las normas entregan una serie de condiciones sobre la instrumentación y registro de datos. A saber:

- En ningún caso, la más pequeña división de la escala del instrumento, o sistema de instrumentos, debe ser mayor que dos veces la exactitud especificada.
- Los integradores y técnicas binarias deben tener una exactitud igual o mejor que $\pm 1\%$ del

valor medido.

- Los registradores análogos y digitales deben tener una exactitud mayor o igual que $\pm 0,5\%$ de la lectura de la escala completa, y tener una constante de tiempo de 1s o menor.
- La impedancia de entrada de los registradores debe ser mayor que 1000 veces la impedancia de los sensores o $10 M\Omega$, cualquiera sea mayor.

Capítulo 9

Diseño sistema de piping y componentes

El objetivo del presente capítulo es presentar el diseño general del sistema de piping del banco de pruebas para colectores solares.

El sistema de tuberías y componentes se desarrolló en base al diagrama PI&D presentado previamente en el capítulo 6 y está concebido para ensayar tanto colectores con vidrio como sin vidrio.

El diseño se muestra en forma general y no al cien por ciento de detalle. El objetivo es mostrar las dimensiones generales y la disposición general de los equipos a utilizar, a si como también dar guías generales de montaje y recomendaciones para una futura construcción. Se realizan también los cálculos técnicos de los equipos tal que las especificaciones obtenidas sirvan de guía para la futura selección en algún catálogo técnico. Cabe destacar que los dibujos, si bien son esquemáticos, fueron realizados con las dimensiones correspondientes a catálogos reales según los datos técnicos de los componentes, esto asegura un dibujo a escala proporcional a la realidad.

9.1. Descripción del diseño

En las siguientes figuras se presenta el diseño propuesto. En la imágenes se identifican los componentes a través de los números TAG presentados anteriormente en el diagrama PI&D de la tabla E.

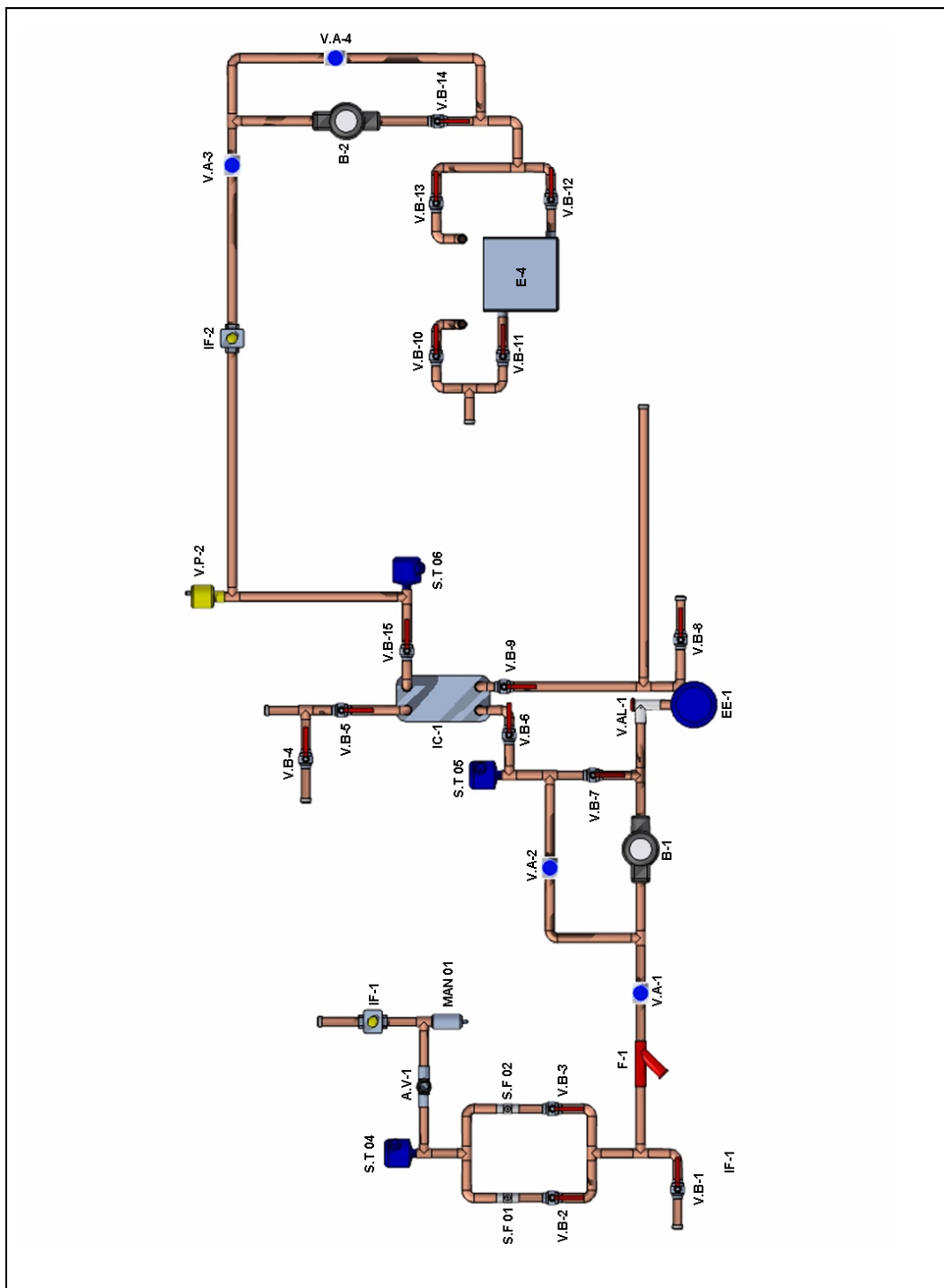


Figura 9.1: Piping y componentes.

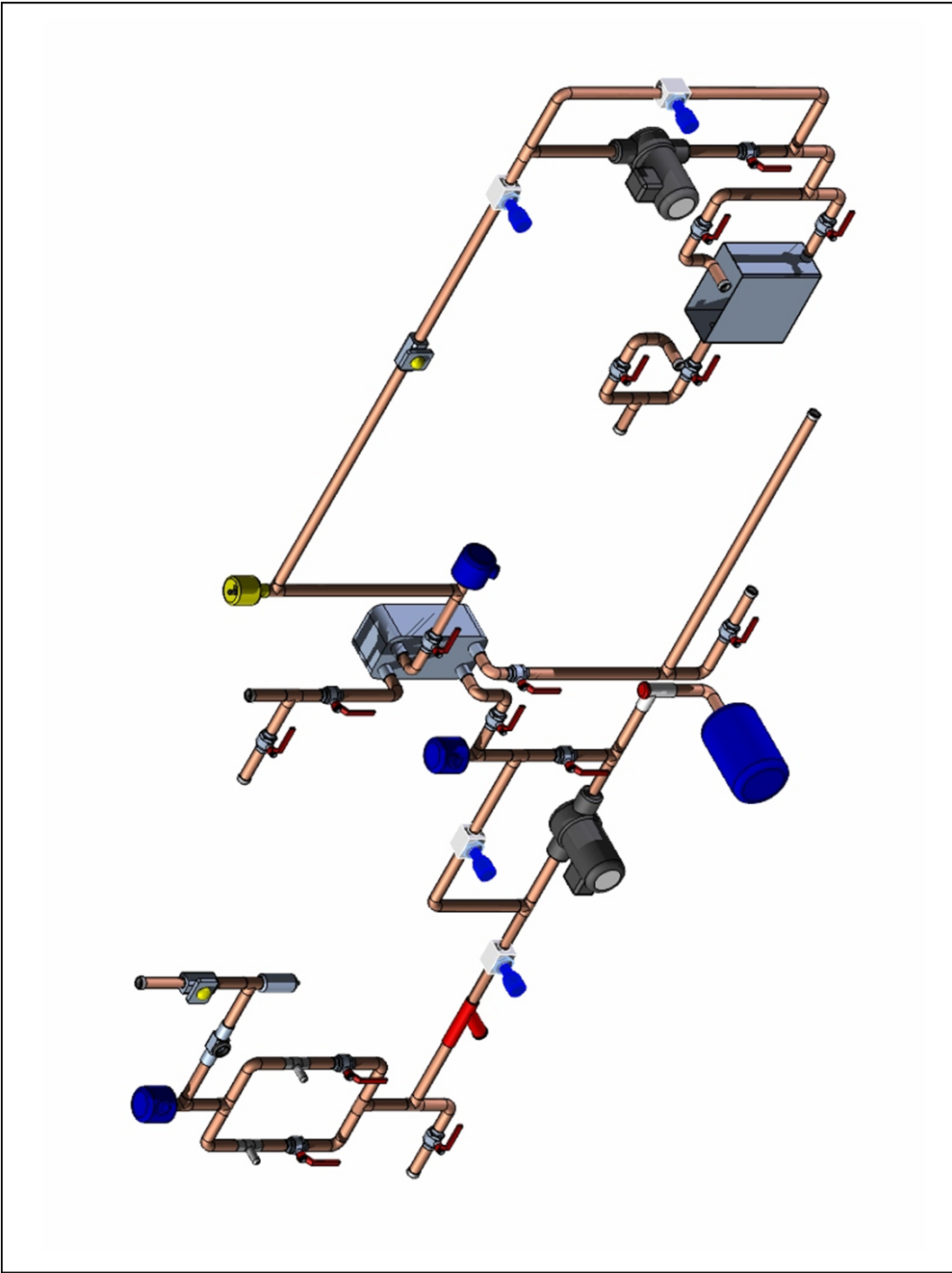


Figura 9.2: Piping y componentes.

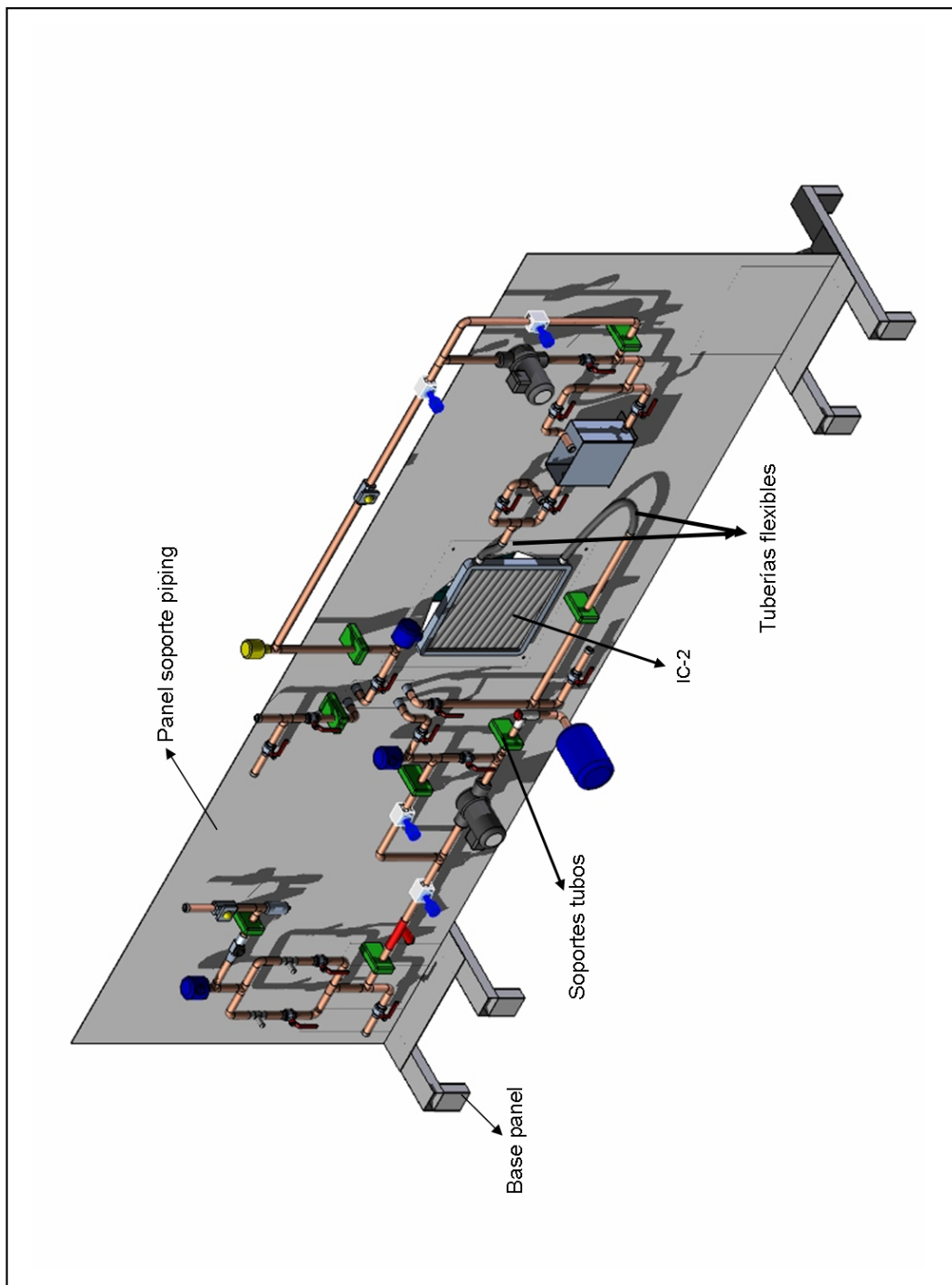


Figura 9.3: *Piping y componentes.*

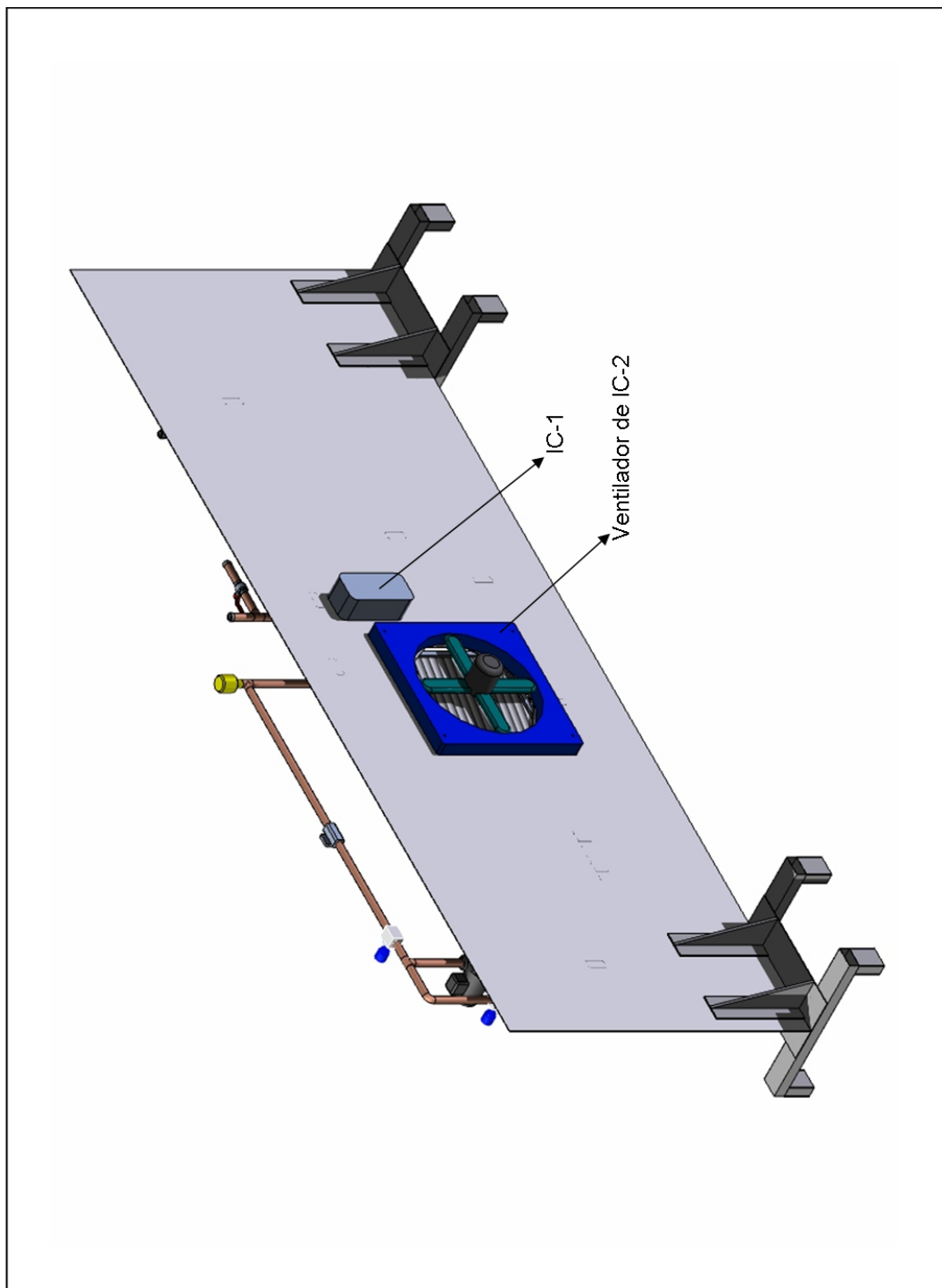


Figura 9.4: *Piping y componentes.*

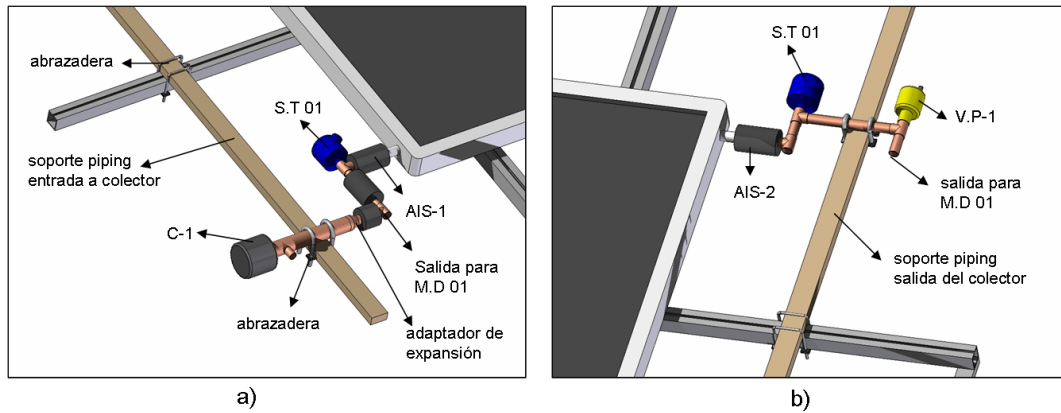


Figura 9.5: a) Piping entrada a colector solar. b) Piping salida del colector solar

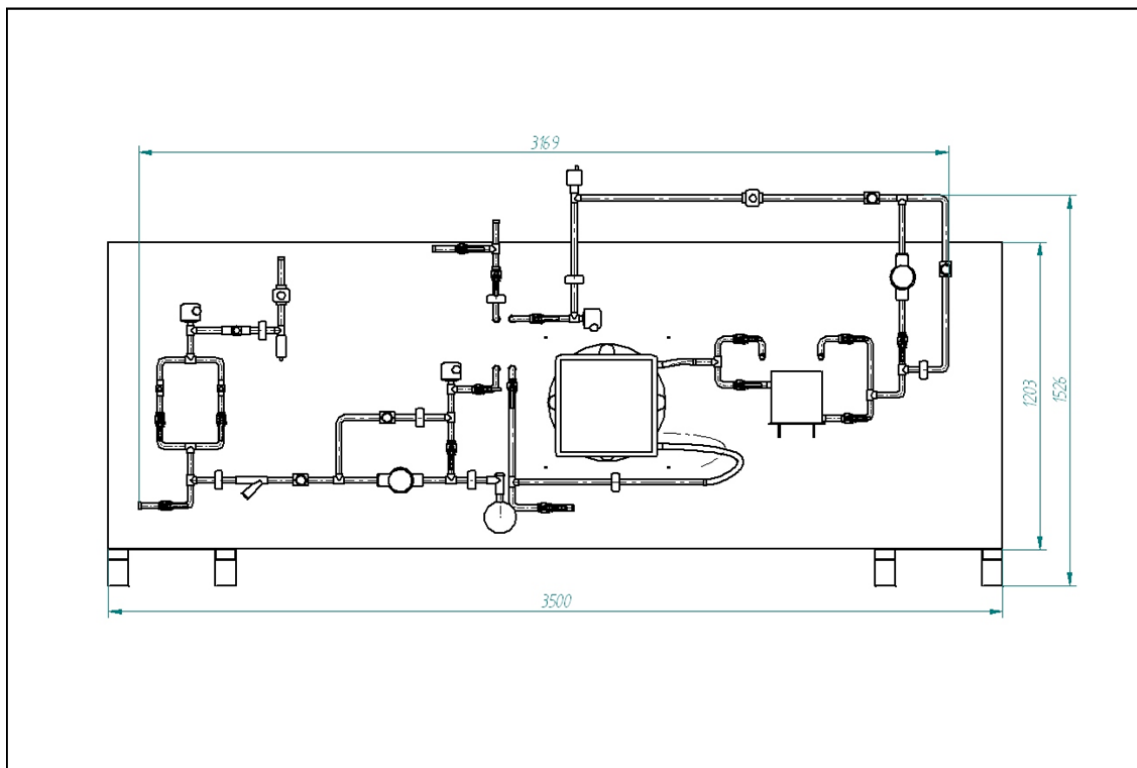


Figura 9.6: Dimensiones generales piping.

De acuerdo al diseño propuesto, la configuración espacial de las tuberías y componentes se realiza de forma vertical, permitiendo un fácil acceso para el operador. Se buscó también mantener lo más posible la configuración dada en el diagrama PI&D. Los anterior se puede observar en las figuras 9.1 y 9.2.

Para sostener el piping se recomienda un panel base rectangular, como muestra la figura 9.3.

Este panel puede ser ya sea de un material plástico o plancha metálica de acero. En el caso de material plástico, existen en el mercado paneles de poli carbonato con tratamiento de protección UV, la empresa chilena CP Chile provee de este material. Se puede utilizar también panel de chapa metálica de acero, al cual se le debe hacer un tratamiento de pintado para protección contra la corrosión y la intemperie. La base del panel a utilizar puede ser de acero común soldado y se le pueden agregar ruedas para facilitar el traslado. La idea es mantener una configuración modular, donde este caso correspondería al módulo piping. Se verá posteriormente que los distintos módulos se conectan generalmente a través de cañerías flexibles.

Algunos componentes del piping como el intercambiador de placas (IC-1), el radiador (IC-2) y el ventilador del radiador, se sostienen directamente del panel base. En particular se recomienda utilizar tubos flexibles para conectar el radiador, ya que este modo facilita la adaptación a diferentes configuraciones de radiadores. El piping se une al panel base mediante los soportes de los tubos, los cuales puede ser de material plástico atornillados directamente al panel base.

En la figura 9.5 se observa el piping de entrada y salida al colector solar (en la figura 10.3 se puede observar la estructura de montaje completa). Existen variados diámetros de entrada y salida del colector, por lo cual la adaptación para conectar el piping al colector se debe realizar específicamente para el colector ensayado y generalmente se unen a través de cañerías flexibles utilizando abrazaderas. Para sostener el piping de entrada y salida se pueden agregar barras de madera unidas mediante abrazaderas (pernos en U) a la estructura principal de montaje del colector (barras de montaje en figura 7.1). El piping de entrada y salida se sostiene también mediante abrazaderas a las barras de madera. Esta solución flexible permite conectar el colector desde su parte alta a su parte baja o al contrario. Por último, tanto el piping de entrada como de salida del colector deben tener una salida para sacar un par de tubos flexibles y conectar en ellos el manómetro diferencial.

El circuito primario (lado izquierdo del IC-1) debe trabajar a una presión de unos 3[bar] para evitar problemas de ebullición y cavitación. El circuito secundario (lado izquierdo del IC-1) trabaja a presión atmosférica, ya que los estanques que utiliza son abiertos.

Finalmente en la figura 9.6 se observan las dimensiones generales de acuerdo a la configuración propuesta.

9.2. Componentes principales

A continuación se presentan las características técnicas principales de los componentes del sistema. La memoria de cálculo y los detalles de los sistemas se muestran en Anexo B.

Muchas empresas chilenas proveen este tipo de elementos, como por ejemplo: Recal, Termotec (IC), Aquamarket, etc.

Tuberías metálicas

Se utilizan tuberías metálicas de cobre cuyas propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9.1: Propiedades tuberías de cobre utilizadas.

Tamaño U.S [in]	Tipo	Dia. ext. [mm]	Dia. int. [mm]	Espesor [mm]	P_{max} [barg]	T_{max} [°C]
3/4	L	22,23	19,94	1,65	10,3	120

De acuerdo a ASHRAE ([4]) las tuberías se deben unir mediante la técnica de soldadura por brazing, pudiéndose utilizar soldadura de plata o bronce. Los componentes del piping se unen a los tubos mediante hilos NPT o dependiendo del tipo de unión particular del componente usado.

Tuberías flexibles

Mangueras hidráulicas de 3/4 [in] resistentes a una temperatura máxima de 120°C. Un material común es caucho sintético negro sin costuras resistente a la abrasión y a agentes atmosféricos reforzado con trenza de fibra textil. La empresa argentina Goma Alsina provee actualmente este tipo de mangueras hidráulicas.

Calefactor C-1

Calefactor eléctrico de inmersión de 1,5 [kW] provisto con un control de potencia (eje. dimer). Los calefactores actuales se pueden conectar al sistema a través de hilo o flange. Como el diámetro del calefactor es mayor al diámetro interno de la tubería de 3/4, se debe proveer una cañería de mayor diámetro para insertar el calefactor. Luego ambos tubos se unen mediante un adaptador de expansión (figura 9.5).

Intercambiador de calor de placas IC-1

- Tipo: Brazed.
- Área nominal de intercambio: $1,2[m^2]$.
- Tipo de flujo: De paso simple.

Para este tipo de aplicaciones en general se utilizan intercambiadores de calor de placas ya que presentan los siguientes beneficios:

- Alta turbulencia y alta performance en transferencia de calor.
- Menor acumulación de suciedad. Menor mantenimiento.
- Flujo cruzado efectivo.
- Fácil de inspeccionar y limpiar.
- Tamaño reducido.
- Control rápido del proceso (característica más importante en este caso).

Radiador IC-2

- Área frontal: $0,16[m^2]$ ($0,4[m] \cdot 0,4[m]$).
- Área de intercambio: $25,5[m^2]$.
- Potencia de ventilación: $660[W]$.

Aislación tuberías AIS-1, AIS-2

- Material: Espuma de poliuretano.
- Espesor: $1,6[cm]$.

Las aislaciones se deben proteger mediante un revestimiento reflectante a prueba de agua. Comúnmente se usa aluminizado.

Estanque de expansión

- Tipo: cerrado.
- Capacidad: $2[L]$

El estanque de expansión absorbe las dilataciones del fluido de trabajo en el circuito primario (cerrado) debido a los cambios de temperatura.

Bombas de circulación

- Circuito primario:
 - Potencia necesaria de bombeo: $24,7[W]$.
 - Altura equivalente de bombeo: $7,35[m]$.
- Circuito secundario:
 - Potencia necesaria de bombeo: $17,3[W]$.
 - Altura equivalente de bombeo: $5,1[m]$.

Para los cálculos de las bombas se consideró un caudal de $1,26[m^3/h]$.

Capacidad piping

La capacidad máxima volumétrica de los circuitos de piping se obtiene estimando el largo de las tuberías y considerando la capacidad de los componentes principales, como el colector solar. A través de esta capacidad se pueden escoger los estanques de vaciado y llenado de los circuitos (E-1, E-2, E-5). Siempre se recomienda tener estanques de mayor capacidad de la necesaria.

- Capacidad volumétrica máxima circuito primario (incluido colector solar): $9[L]$
- Capacidad volumétrica máxima circuito secundario: $2,5[L]$

9.3. Descripción control de temperatura

Como se dijo anteriormente, es muy importante lograr una temperatura controlada a la entrada del colector solar. Para lograr esto se utiliza un intercambiador de calor de placas conectado a un circuito secundario y un calefactor eléctrico justo en la entrada del colector para la regulación final.

El área de intercambio del IC-1 se obtuvo para un caudal en particular, pero como el sistema funciona para diferentes caudales se debe regular la diferencia de temperatura en el intercambiador para aprovechar el área de intercambio calculada (que es fija). Una idea de la diferencia de temperatura en ambos lados del intercambiador se observa en los sensores RTD de temperatura S.T 05 y S.T 06. El caudal se debe establecer igual tanto en el circuito primario como en el secundario.

Se debe hacer la distinción de dos casos: la medición cuando la temperatura de entrada al colector es igual a la temperatura ambiente, y las mediciones cuando las temperaturas de entrada al colector son mayores a la temperatura ambiente.

Para el primer caso (temperatura de entrada al colector es igual a la temperatura ambiente) no se puede utilizar el radiador ya que el aire está a temperatura ambiente y esto lo restringe para ocuparlo como el fluido que saca el calor del radiador. Lo que se debe hacer entonces es apagar el radiador del circuito secundario y utilizar un estanque (E-3) tal que la capacidad de éste sea suficiente para obtener la primera medición. En este caso, en el circuito secundario no se recircula el fluido, si no que luego de sacarlo del estanque se bota o se almacena para otra aplicación. Como el período de medición según norma es de aproximadamente 15 min y el flujo máximo para las pruebas es de 0,35 [L/s] entonces se necesita un estanque de unos 315 litros. En el mercado se encuentran estanques abiertos de 500 litros.

Cuando las temperaturas de entrada al colector son mayores que la temperatura ambiente se puede utilizar el radiador como regulación. El radiador se debe proveer de un ventilador con motor eléctrico de velocidad variable, tal que se pueda tener regulación sobre el caudal de aire. Para este caso se deja de utilizar el estanque de 500 litros (cerrando las válvulas correspondientes) y se utiliza el estanque de 4 litros E-4. Aquí el circuito secundario funciona en circulación.

La diferencia de temperatura logarítmica en el intercambiador de placas se regula precalentando el circuito secundario, esto es, precalentando los estanques E-3 o E-4 (según sea el caso). El estanque de 500 litros E-3 se debe proveer con calentadores eléctricos en su interior para precalentar el agua. En el estanque pequeño E-4 no es necesario el uso de calefactores, ya que se puede precalentar apagando el ventilador del radiador y aprovechando la energía solar captada por el fluido del circuito primario.

En conclusión, la cantidad de calor que es necesaria remover del circuito primario a través del intercambiador de placas (IC-1) para lograr una temperatura estable a la entrada del colector, se regula mediante el control de la temperatura en S.T 06 precalentando los estanques. En el caso de que las temperaturas de entrada al colector sean mayores a la temperatura ambiente, se utiliza el radiador para mantener lo más estable posible la temperatura en S.T 06, ya que el circuito funciona en circulación. Cabe destacar que se debe cumplir siempre que la temperatura en S.T 06 sea menor que en S.T 05.

Para realizar el último ajuste antes de la entrada del colector, se utiliza el calefactor C-1.

Capítulo 10

Descripción instalación

El presente capítulo pretende mostrar finalmente un esquema de cómo se vería el banco de pruebas de colectores solares que se ha diseñado. Se pretende dar una idea de la escala de la instalación y cómo se conectarían los distintos componentes que se han descrito en los capítulos anteriores.

Las siguientes figuras muestran un esquema de la instalación de ensayos de colectores diseñada:

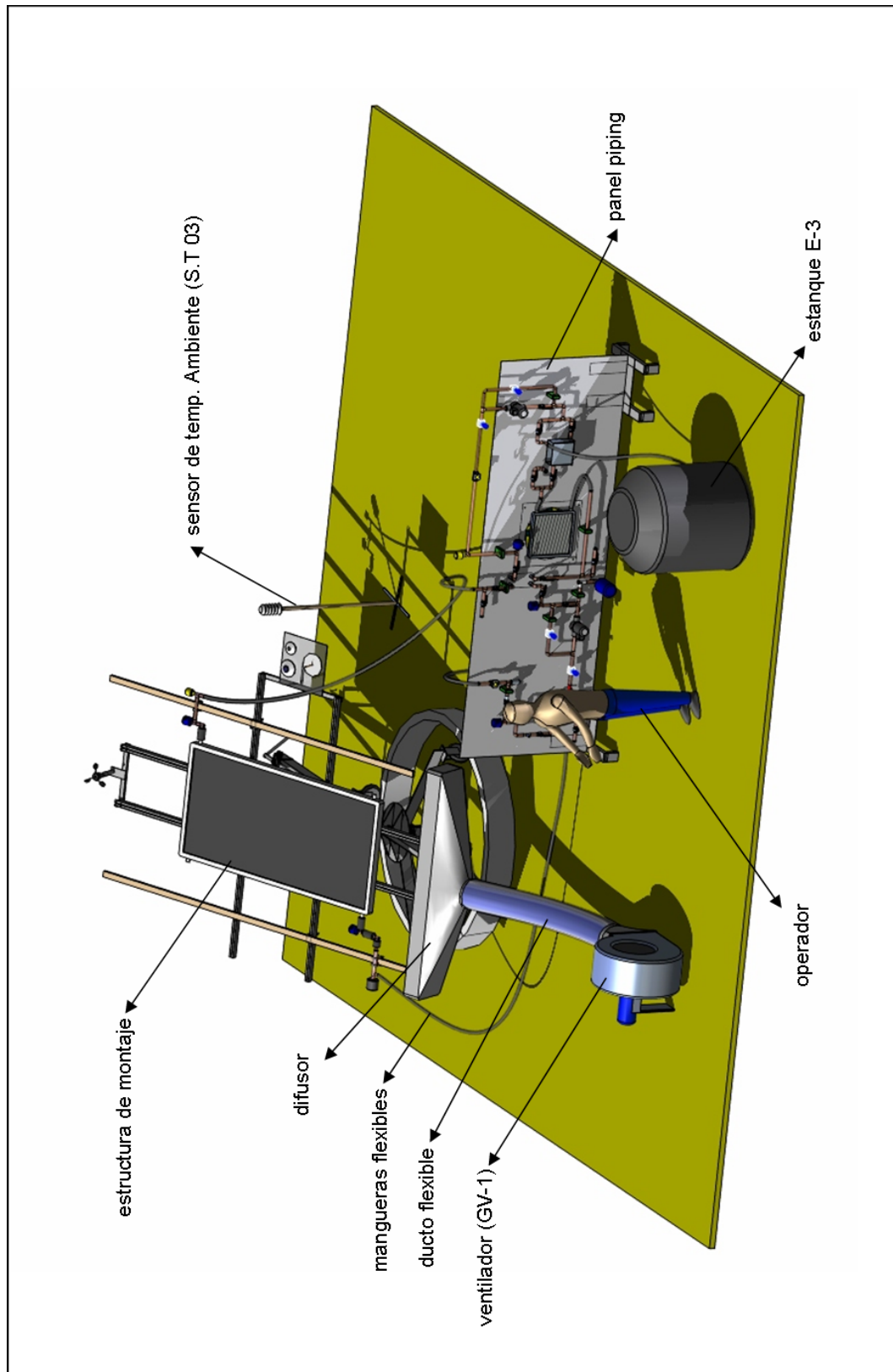


Figura 10.1: Banco de ensayo para colectores solares.

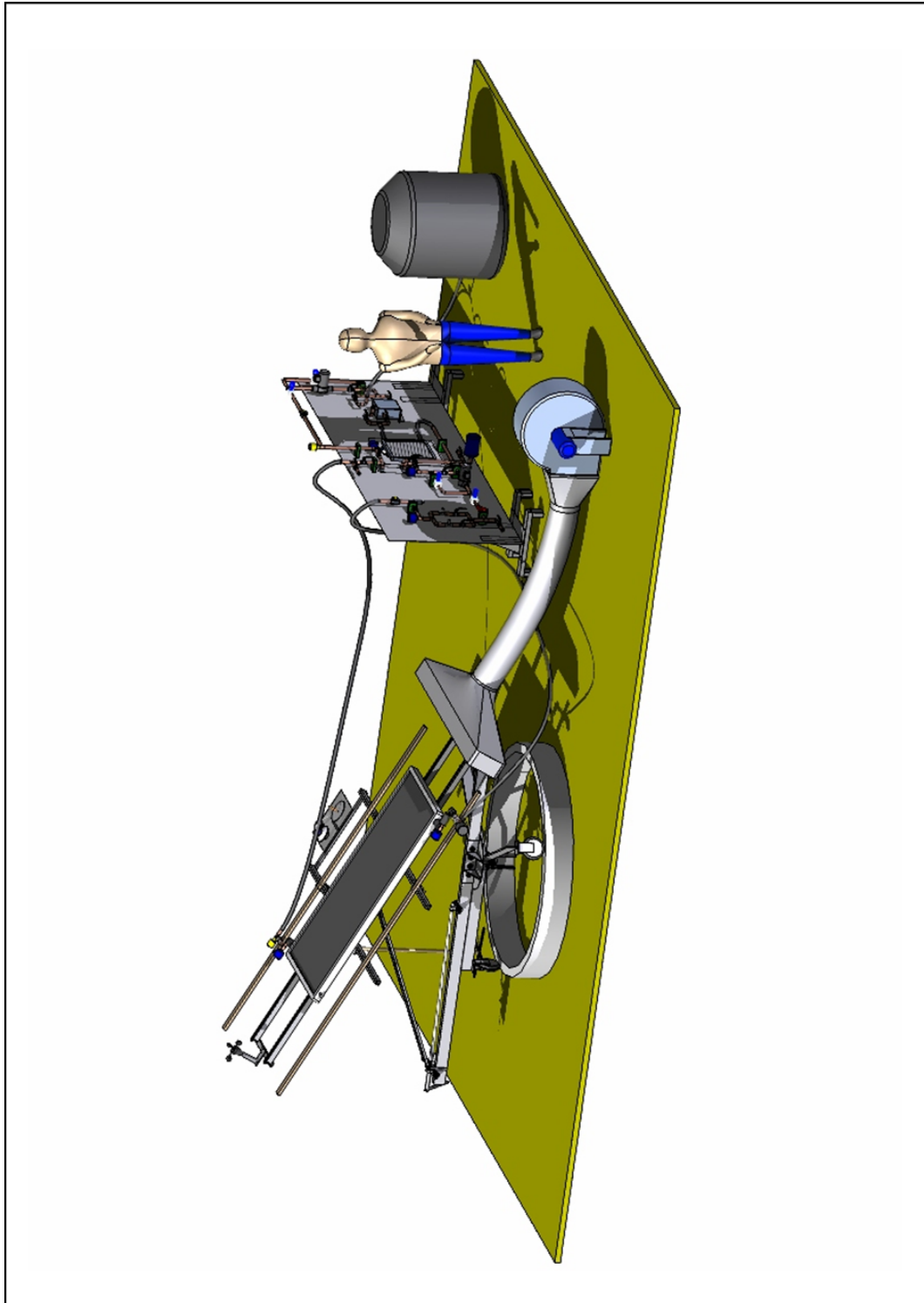


Figura 10.2: Banco de ensayo para colectores solares.

10.1. Sistema generación de viento

Tanto los colectores con vidrio como sin vidrio son sensibles a variaciones en la velocidad del viento que pasa sobre ellos. La velocidad durante los ensayos se debe ubicar entre los 2 y 4[m/s].

Se utiliza entonces un generador de viento artificial, compuesto principalmente por un ventilador centrífugo unido mediante un ducto flexible a un difusor, el cual se conecta directamente a la estructura de montaje del colector. El difusor se puede construir fácilmente de chapa metálica y conectarse a los rieles de las barras de montaje de los colectores. En el mercado se pueden encontrar ductos flexibles para ventilación contruidos de PVC y de largos de hasta 10 metros.

Si se considera un difusor de ancho $b = 2[m]$, alto $h = 0,3[m]$ y una velocidad $V = 4[m/s]$ entonces el ventilador debe ser capaz de proveer un caudal de $Q = V \cdot (bh) = 8640[m^3/h]$. La empresa chilena Airolite posee ventiladores centrífugos de este tipo.

Cabe destacar que para regular la cantidad de caudal de aire, el sistema de ventilación debe poseer una válvula de persiana en su interior. Esta solución es sobre todo factible si el ventilador cuenta con una curva característica suave. Si este no fuera el caso, el ventilador debería tener un motor eléctrico de velocidad variable.

Si el banco de ensayos se ubicara en un lugar ventoso, convendría tener una pantalla bloqueadora de viento o utilizar simplemente el viento natural si la velocidad de éste está dentro del rango de trabajo del banco.

10.2. Estructura de montaje

La estructura de montaje del colector solar se describió previamente en el capítulo 7. La siguiente figura muestra como quedaría un colector solar montado en la estructura y los instrumentos adosados a ella.

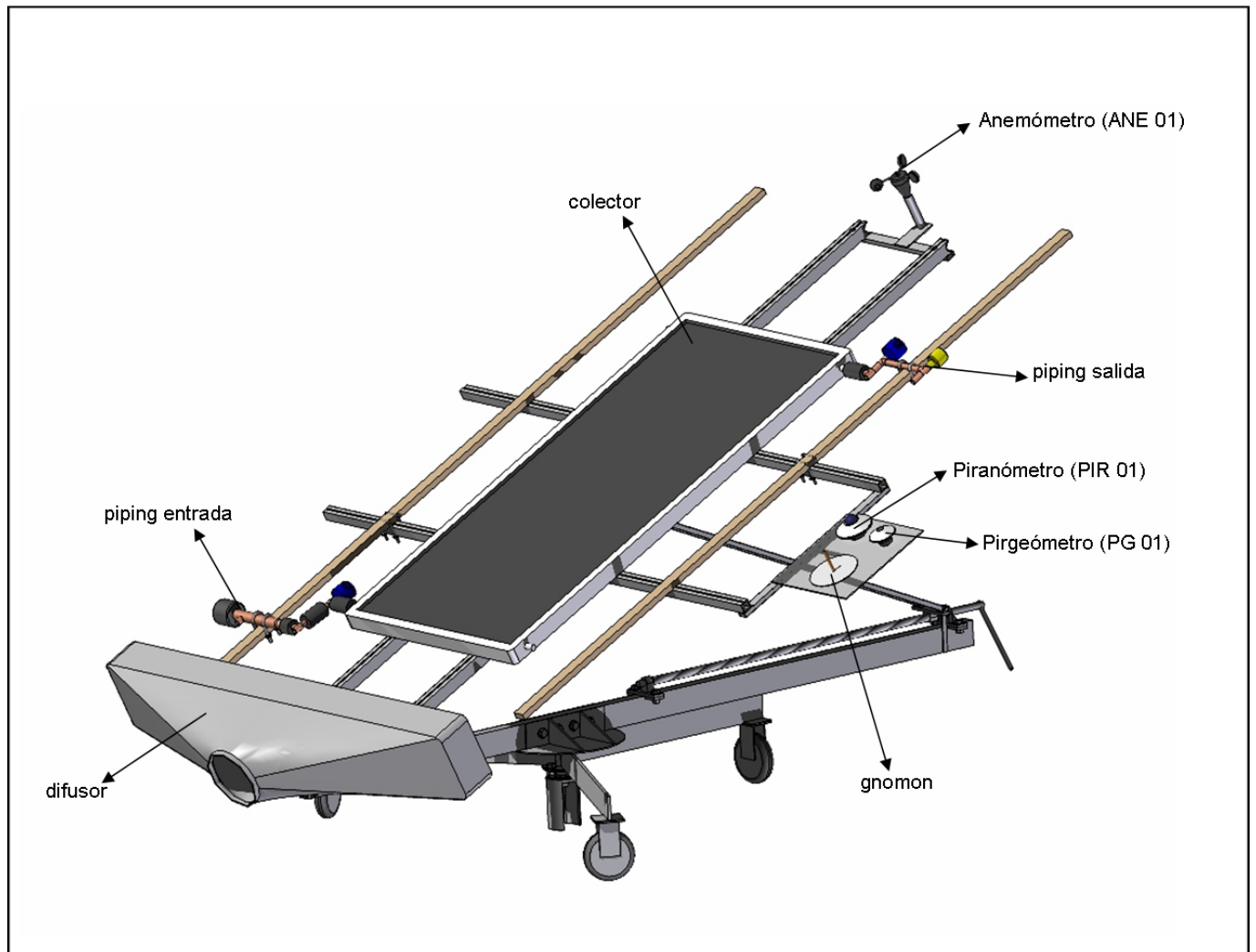


Figura 10.3: Colector montado en estructura de montaje.

El colector queda sostenido a través de anclajes (no se muestran en la figura anterior) como se explica en 7.1.1.

Los instrumentos deben quedar orientados en el mismo plano del colector solar y a un lado de éste, como se ve en la figura. El piranómetro, pirgeómetro y gnomon pueden ir montados sobre una placa de material plástico. El anemómetro debe recibir el viento que proviene del sistema artificial de generación de viento.

El piping de entrada y salida al colector se une al módulo de piping a través de mangueras flexibles. El montaje del piping de entrada y salida puede ser desde la parte alta del colector a la parte baja o al revés. Si se tratara de un colector de tubos al vacío, las conexiones de entrada y salida se encuentran en la parte alta del colector.

Capítulo 11

Estimación del costo de la instalación

El presente capítulo tiene como objetivo realizar una estimación del costo del banco de pruebas para colectores solares que ha sido descrito en los capítulos anteriores.

Las siguientes tablas muestran los valores (en USD) de las partes principales de la instalación:

Tabla 11.1: Valor estimado estructura de montaje del colector solar.

Ítem considerado	Valor aprox. (USD)
Materiales (acero y otros)	16.200
Mano de obra y consumibles (maquinado, soldadura, etc)	

Tabla 11.2: Valor estimado piping.

Ítem considerado	Valor aprox. (USD)
Materiales (Cañerías, válvulas)	10.400
Mano de obra y consumibles	

Tabla 11.3: Valor estimado instrumentos y sensores.

Ítem	Cantidad	Valor aprox./u (USD)	Total (USD)
Piranómetro	1	2400	2400
Pirgeómetro	1	2250	2250
RTD + Thermowell	5	140	700
Sensor T. amb	1	310	310
Caudalímetro	2	1000	2000
Anemómetro copas	1	900	900
Anemómetro hilo caliente	1	600	600
Manómetro	1	300	300
Manómetro diferencial	1	680	680
Transmisor	9	300	2700
Datalogger y accesorios	1	3800	3800
		Total instrumentos (USD)	16.640

Tabla 11.4: Valor estimado otros componentes.

Componente	Cantidad	Valor aprox./u (USD)	Total (USD)
IC Placas	1	300	300
Radiador	1	200	200
Bomba circulación	2	2200	4400
Ventilador radiador y motor	1	880	880
Ventilador centrífugo y motor	1	700	700
Calefactor eléctrico	3	150	450
Estanque de expansión	1	100	100
		Total componentes (USD)	7.030

Tabla 11.5: Valor estimado instalación completa.

Total instalación (USD)	50.270
Total instalación (\$ chilenos)	25.788.510

11.0.1. Observaciones

Para estimar el costo de la estructura de montaje y piping (materiales y mano de obra) se realizó una cotización en la empresa chilena Enercom [16], cuyo rubro es la construcción de sistemas mecánicos principalmente en las áreas de procesos térmicos, combustión y secado. Para realizar la cotización, se les envió la descripción y los planos de diseño principales de las partes.

El costo de la instrumentación se analizó principalmente en la empresa Omega, en cuya página Web (www.omega.com) se encuentran los precios de los sensores e instrumentos.

Los instrumentos meteorológicos (piranómetro, pirgeómetro, sensor de temperatura ambiente y anemómetro) se cotizaron en la empresa chilena Tecnología Omega Ltda.

Los componentes de la tabla 11.4 fueron cotizados en las empresas chilenas Recal y AiroLite.

Capítulo 12

Metodologías y ensayos

El presente capítulo tiene como objetivo describir de manera general los ensayos que se realizan a los colectores solares de acuerdo a la normativa utilizada ([1],[2]) y de acuerdo al diseño propuesto. Se identifican los ensayos de colectores con vidrio y colectores sin vidrio.

Antes de los ensayos, los circuitos de piping se deben llenar con el fluido de trabajo. Esto se realiza a través de los estanque de llenado E-1, E-3 o E-4. El circuito primario debe estar presurizado a unos 2 o 3 bar absolutos. Esto se puede hacer utilizando una bomba para elevar presión desde el E-1 y calibrando la válvula de seguridad V.AL-1 a la presión deseada. Otra alternativa es inyectar aire al estanque de expansión cerrado utilizando un compresor y así elevar la presión del circuito.

El formato de hojas de registro para los ensayos que se describirán se pueden ver en [1] y [2].

12.1. Colectores con cubierta de vidrio ([1])

Esta norma no es aplicable a aquellos colectores en los cuales la unidad térmica de almacenamiento es parte integral del colector, en tal magnitud que, el proceso de colección no se puede separar para el propósito de hacer mediciones de estos dos procesos. La norma tampoco es aplicable a colectores solares concentradores de seguimiento. La norma sí es aplicable a colectores de tubos al vacío y del tipo CPC.

12.1.1. Montaje y ubicación del colector

El colector solar se debe montar de manera que el borde inferior esté no menos de 0,5 [m] por sobre la superficie de la tierra local. Esto se debe regular a través de la base de concreto en la cual

se apoyen las ruedas de la estructura de montaje diseñada. La instalación de ensayo debe ser tal, que ninguna sombra esté dirigida sobre el colector durante un ensayo.

Durante los ensayos el colector se debe ubicar donde ninguna radiación solar significativa se refleje hacia él desde edificios circundantes o superficies. La reflectancia de muchas superficies toscas tales como pasto y hormigón, usualmente no es suficientemente alta para causar problemas. Las superficies a evitar en el campo de vista del colector incluyen grandes espacios de vidrio, metal o agua.

La temperatura de las superficies adyacentes al colector debe ser tan cercana, como sea posible, a la temperatura ambiente a fin de minimizar la influencia de la radiación térmica. Por ejemplo, el campo de vista exterior del colector no debería incluir chimeneas, torres de enfriamiento o escapes de vapor caliente.

12.1.2. Velocidad del viento sobre el colector

Durante el ensayo, la velocidad del aire, utilizando generador de viento artificial o viento natural, puede variar desde un extremo del colector a otro.

Se debe tomar una serie de mediciones de velocidad del aire, a una distancia de 100[mm] en el frente de la abertura del colector, en posiciones igualmente espaciadas en el área del colector. Estas mediciones se deben realizar con el anemómetro de hilo caliente descrito en 8.1.6. Para ubicar los puntos igualmente espaciados sobre el colector se puede utilizar un mallado fabricado con hilo, en el cual los hilos se crucen donde se quiera ubicar los puntos. Este mallado se debería posicionar sobre el colector para que proyecte una pequeña sombra que indique donde se debe realizar la medición.

Estas mediciones se deben realizar antes del ensayo del colector para obtener un parámetro de calibración para el anemómetro de copas, el cual seguirá midiendo la velocidad del viento durante el ensayo.

12.1.3. Ensayo de eficiencia en estado estacionario en exterior

Este es uno de los ensayos más importante de colectores solares, ya que se obtiene la curva de eficiencia para distintas condiciones de temperaturas y radiación. La curva de eficiencia es lo más importante a la hora de seleccionar un determinado colector para alguna aplicación solar particular.

Para la realización de este ensayo, el fluido de trabajo debe fluir desde la parte inferior a la parte más alta del colector, o según sea recomendado por el fabricante.

Acondicionamiento previo del colector

- El colector se debe inspeccionar visualmente y registrar cualquier daño.
- Si hay humedad formada en los componentes del colector, entonces el fluido de transferencia de calor se debe circular a aproximadamente 80°C, tanto como sea necesario, para secar la aislación y el recinto del colector. Esto se debe registrar en los resultados de ensayo. Para elevar la temperatura del fluido, éste se puede hacer circular por el circuito primario dejando previamente fuera de funcionamiento al secundario.
- Las tuberías de conducción del colector y del circuito secundario se deben ventilar del aire entrampado, por medio de las válvulas de purga V.P-1 y V.P-2 y/o mediante circulación de fluido a un caudal alto.
- El fluido se debe inspeccionar por aire retenido o partículas, mediante la apertura de vidrio A.V-1. Se debe limpiar cualquier contaminante.

Condiciones de ensayo

- Al momento del ensayo, la irradiancia solar total en el plano de la abertura del colector debe ser mayor que 600[W/m²]. Ésta se debe medir con el piranómetro PIR-01.
- Se deben tener condiciones de cielo limpio y despejado.
- Se deben tener condiciones de incidencia normal sobre la apertura del colector. Para colectores de placa plana con vidrio simple, esta condición estará usualmente satisfecha si el ángulo de incidencia de la radiación colar directa es menor que 30°C.
- El valor promedio de la velocidad del aire circundante se debe ubicar entre 2 y 4[m/s].
- A menos que se indique lo contrario, el caudal de fluido se debe fijar a aproximadamente 0,02[kg/s] por metro cuadrado del área total del colector. Esto se debe mantener estable dentro de ±1% del valor fijado. Para regular el caudal se utiliza el circuito by-pass y las válvulas de aguja V.A.

Procedimiento de ensayo

Los puntos de entrada de datos para este ensayo se deben obtener para al menos cuatro temperaturas de entrada de fluido, espaciadas uniformemente sobre el rango de temperatura de funcionamiento del colector (si el fluido de trabajo es agua, se considera adecuada una temperatura máxima de 80°C).

Se deben obtener al menos cuatro puntos de entrada de datos independientes por cada temperatura de entrada del fluido, dando un total de 16 puntos de entrada de datos. Esto generalmente se debiera realizar en cuatro días distintos.

Mediciones

Para un ensayo en general se realizan las siguientes mediciones:

- Área considerada del colector (área de abertura o área total), A .
- Capacidad térmica del fluido, c_p . Se obtiene de tablas.
- Radiación solar total sobre la abertura del colector (con PIR 01), G_T .
- Ángulo de incidencia de radiación solar directa (con Gnomon).
- Velocidad del aire circundante (con ANE 01).
- Temperatura del aire circundante (con S.T 03), T_a .
- Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del colector (con S.T 01), T_e .
- Temperatura del fluido de trabajo a la salida del colector (con S.T 02), T_s .
- Caudal del fluido de trabajo (con S.F 01 o S.F 02), m .

Para medir el caudal másico primero se mide el caudal volumétrico con S.F 01 o S.F 02, luego con la temperatura en S.T 04 se determina la densidad del fluido a través de tablas y finalmente el flujo másico es el producto de las dos variables anteriores.

Período de ensayo

El período de ensayo para un punto de entrada de datos en estado estacionario, debe incluir un período de acondicionamiento previo de al menos 15 min para ajustar la temperatura de medición correcta del fluido en la entrada, seguido por un período de medición en estado estacionario de al menos 15 min.

Como el diseño tiene la capacidad de mover el colector en inclinación y azimut, esto se aprovecha de la siguiente forma:

- Se estima la altura del Sol en las horas centrales del día y se ajusta el colector en inclinación para obtener condiciones de incidencia normal. Las estimaciones se pueden realizar por ejemplo con un modelo de radiación solar.

- Una vez fijada la inclinación adecuada para el día de medición, se varía el colector en azimut para apuntarlo al Sol durante los 15 min de acondicionamiento previo tal que el Sol pase por el centro del colector justo en la mitad de los 15 min de medición en estado estacionario. Esto se logra utilizando el Gnomon y sabiendo que el Sol varía unos $3,75^\circ$ cada 15 min, por lo cual al inicio se pone el Sol en frente del colector y luego se inclina levemente unos 2° hacia la dirección de movimiento del Sol.

Se considera que un colector ha funcionado bien en condiciones de estado estacionario en un período de medición dado, si ninguno de los parámetros experimentales se desvía de sus valores promedio en el período de medición, por más que los límites dados en la siguiente tabla:

Tabla 12.1: Desviación permitida de los parámetros de medición durante un período de medición.

Parámetro	Desviación permitida desde el valor promedio
Radiación solar	$\pm 50 [W/m^2]$
Temperatura aire circundante	$\pm 1 [K]$
Caudal másico de fluido	$\pm 1 \%$
Temp. del fluido a la entrada del colector	$\pm 0,1 [K]$

Para establecer que existe estado estacionario, los valores promedio de cada parámetro tomados en períodos sucesivos de 30 s, se deben comparar con el valor promedio en el período de medición. Esto se podría programar directamente en el DAS para ser mostrado en un computador.

Gráfico de eficiencia instantánea

La curva de eficiencia del colector solar se puede presentar ya sea utilizando como referencia la temperatura de entrada al colector T_e o utilizando la temperatura promedio en el colector $T_{prom} = (T_e + T_s)/2$.

Se define entonces la variable *temperatura reducida* como:

$$\hat{T}_i = \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \quad (12.1)$$

Donde el índice $i = e$ o $i = prom$ dependiendo de la temperatura de referencia que se utilice.

Se ajusta entonces una curva utilizando el método de los mínimos cuadrados a los puntos obtenidos experimentalmente. Esta curva puede ser cuadrática o lineal. Una curva cuadrática representa de mejor manera el efecto de que a altas temperaturas las pérdidas radiativas comienzan a influir en el sistema.

La curva de eficiencia cuadrática queda de la siguiente forma:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \hat{T}_i - a_2 G(\hat{T}_i)^2 \quad (12.2)$$

Los valores que se buscan son entonces η_0 , a_1 y a_2 . η_0 representa la eficiencia máxima, que se produce cuando la variable T_i toma el valor de T_a . El valor de G se establece en $600[W/m^2]$.

La curva de eficiencia lineal quedaría de la siguiente forma:

$$\eta = \eta_0 - U\hat{T}_i \quad (12.3)$$

Los valores que se buscan son entonces η_0 y U . Se puede ver la similitud de la ecuación anterior con la ecuación 2.1.

El valor de la eficiencia se calcula como:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{AG_T} \quad (12.4)$$

La energía realmente adquirida por el fluido de trabajo \dot{Q} se calcula como:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_s - T_e) \quad (12.5)$$

12.1.4. Ensayo para determinación de constante de tiempo del colector

Este ensayo determina el tiempo que demora el colector, bajo condiciones determinadas, en llegar de un estado estacionario a otro. Se determina la duración del transiente del colector.

Para realizar este ensayo, la irradiancia solar en el plano del colector debe ser mayor que $600[W/m^2]$. Esto es fácilmente lograble en un día despejado y variando el colector en azimut e inclinación para apuntarlo al Sol.

El procedimiento es el siguiente:

- Tapar el colector mediante una cubierta reflectante solar para protegerlo de la radiación.
- Circular el fluido en el circuito primario al mismo caudal que para el ensayo de eficiencia tal que la temperatura de entrada al colector sea igual a la temperatura ambiente. (ver 9.3).

ángulos de incidencia. Se busca entonces el producto $(\tau\alpha)$ efectivo $(\tau\alpha)_e$ tal que $(\tau\alpha)_e = K_\theta(\tau\alpha)_n$.

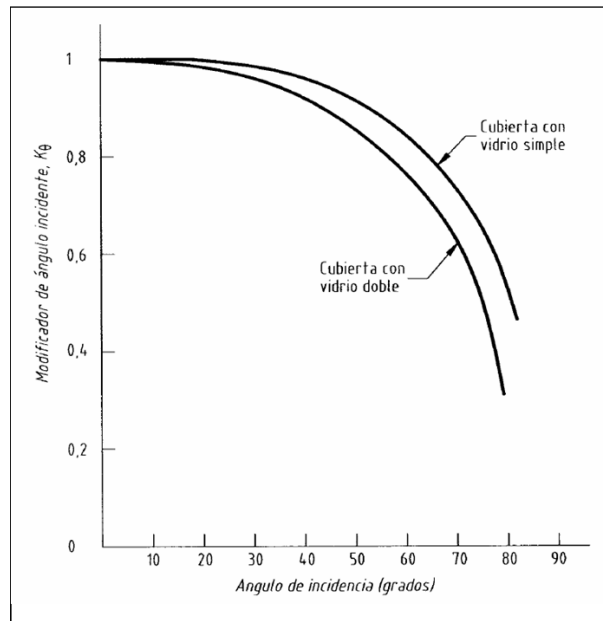


Figura 12.2: Modificadores típicos de ángulos de incidencia ([1]).

Procedimiento de ensayo

Se utiliza el Gnomon para identificar los diferentes ángulos de incidencia que se ensayarán. Durante cada período de ensayo la orientación del colector debe ser tal que éste se mantenga dentro de $\pm 2,5^\circ$ del ángulo de incidencia por el cual se está conduciendo el ensayo.

El colector se orienta para ángulos de incidencia de 0° , 30° , 45° y 60° aproximadamente.

Para obtener el factor K_θ , se debe ensayar el colector a los distintos ángulos de incidencia de acuerdo con lo descrito en 12.1.3. Alternativamente, se puede utilizar como temperatura de entrada la temperatura ambiente u otra temperatura mayor.

Si se utiliza la temperatura de entrada igual a la temperatura ambiente, el factor K_θ está dado por:

$$K_\theta = \frac{\eta_\theta}{F_R \cdot (\tau\alpha)_n} \quad (12.7)$$

Si se utiliza otra temperatura de ingreso al colector mayor, el factor K_θ está dado por:

$$K_{\theta} = \frac{\eta_{\theta} + U\left(\frac{T_e - T_a}{G_T}\right)}{F_R \cdot (\tau\alpha)_n} \quad (12.8)$$

Donde $F_R \cdot (\tau\alpha)_n = \eta_0$ es el rendimiento máximo del colector para condiciones de incidencia normal obtenido según la ecuación 12.3 (intersección de la curva de eficiencia para condición de incidencia normal con el eje de valores y).

Cabe destacar que para aquellos colectores (por ejemplo los de tubos al vacío) para los cuales los efectos del ángulo de incidencia no son simétricos con la dirección de incidencia, debe ser necesario medir los efectos del ángulo de incidencia desde más de una dirección, este método se especifica en Anexo F de [1].

12.1.6. Determinación de la capacidad térmica del colector

Un colector es una combinación de masas, cada una a diferente temperatura. Cuando el colector está en funcionamiento, cada componente responde de manera diferente a un cambio en las condiciones del sistema, por esta razón es conveniente considerar una capacidad térmica efectiva para el colector como un todo.

La capacidad térmica del colector, sin embargo, depende de las condiciones de funcionamiento y no es un parámetro único. Por esta razón se da también que no hay una constante de tiempo única para el colector, observándose que la influencia dominante en el tiempo de respuesta es el caudal de fluido.

A continuación se describe un método simple para el cálculo de la capacidad térmica. Otro método alternativo más complicado y laborioso se puede encontrar en la norma [1].

La capacidad térmica $C[J/K]$ del colector se calcula como la suma sobre todos sus componentes de:

$$\sum_i p_i \cdot m_i \cdot c_i \quad (12.9)$$

Donde m_i es la masa del componente i , c_i su calor específico y p_i su factor de peso. En la siguiente tabla se dan los factores de peso para los componentes más comunes:

Tabla 12.2: Valores de factores p_i .

Elemento	p_i
Absorverdor	1
Aislación	0,5
Líquido de transferencia de calor	1
Vidrio externo	$0,01 \cdot a_1$
Segundo vidrio	$0,2 \cdot a_1$
Tercer vidrio	$0,35 \cdot a_1$

La variable a_1 designa el segundo parámetro de la expresión de eficiencia instantánea o coeficiente de pérdida de calor.

12.1.7. Determinación de la caída de presión a través del colector

Conocer la caída de presión a través del colector es importante al momento de seleccionar, por ejemplo, las bombas de circulación a utilizar en una instalación solar.

Acondicionamiento previo

- El fluido de transferencia de calor debe fluir desde la parte inferior a la más alta del colector.
- El fluido se debe inspeccionar para asegurar que esté limpio. Esto se observa mirando el fluido por la apertura de vidrio A.V-1.
- El colector se debe descargar de aire por medio de la válvula de purga V.P-1.

Procedimiento de ensayo

La caída de presión se debe determinar para caudales que alcancen el rango probable a usar en un sistema de calentamiento solar.

En ausencia de recomendaciones dadas por el suministrador del colector, las mediciones de caída de presión se deben realizar en el rango de caudales desde 0,005 a 0,03 [kg/s] por metro cuadrado de área del colector. Estos caudales se regulan mediante las válvulas de aguja V.A-1 y V.A-2 y el circuito by-pass de la bomba de circulación.

Se deben realizar al menos cinco mediciones a valores igualmente espaciados en el rango del caudal.

Mediciones

Se deben realizar las siguientes mediciones:

- Temperatura del fluido en la entrada del colector (con S.T 01)
- Caudal de fluido (con S.F 01 o S.F 02, según sea el caso).
- Caída de presión del fluido de transferencia de calor entre las conexiones de entrada y salida (con M.D 01)

Caída de presión en los accesorios de unión

Se debe hacer una verificación cero en la caída de presión, retirando el colector desde el circuito de fluido y repetir los ensayos con los accesorios de unión de medición de presión conectados directamente juntos.

Condiciones de ensayo

Durante las mediciones de ensayo se deben cumplir los siguientes aspectos:

- El caudal de fluido se debe mantener constante dentro de $\pm 1\%$ del valor nominal.
- La temperatura de entrada del fluido se debe mantener constante dentro de $\pm 5^{\circ}C$

Presentación de resultados

La caída de presión se debe presentar en un gráfico como una función del caudal másico de fluido.

12.2. Colectores sin cubierta de vidrio ([2])

12.2.1. Montaje y ubicación del colector

Al igual que para colectores con vidrio el colector se debe montar de manera que el borde inferior esté a no menos que 0,5[m] por sobre la superficie de tierra local.

Si no se especifican las condiciones de montaje, el colector se debe montar sobre un apoyo aislado de conductancia $2 \pm 0,5 [W/m^2K]$ y la superficie superior pintada de blanco mate y ventilada en la parte posterior. Este apoyo se debería montar directamente en la estructura montaje diseñada para luego ubicar el colector sobre él.

Las redes colectoras construidas de tuberías o componentes de láminas, se deben montar con las tuberías (o láminas) espaciadas $10[\text{mm}]$ o separadas un diámetro (ancho de lámina), cualquiera sea menor.

Si el colector se suministra en unidades fijas de área mayor que $1[m^2]$, entonces se deben unir suficientes módulos entre sí (en serie o paralelo), para dar una superficie del absorbedor del sistema de ensayo de al menos $3[m^2]$.

Las demás consideraciones son equivalentes a 12.1.1.

12.2.2. Velocidad del viento sobre el colector

El desempeño de los colectores sin vidrio es sensible a la velocidad del aire adyacente al colector.

Para simular condiciones de viento naturales, se debe usar un generador de viento artificial para proporcionar una intensidad de turbulencia en el rango de 20 % a 40 %. La intensidad de turbulencia está definida como:

$$I = \frac{\sqrt{\bar{u}}}{\bar{U}} \quad (12.10)$$

Donde \bar{u} es la velocidad de fluctuación promedio tomando como referencia la velocidad del viento promedio \bar{U} .

La intensidad de turbulencia deseada se puede lograr mediante una grilla dentro del sistema de generación de viento y se mide con el anemómetro de hilo caliente en el borde principal del colector.

El procedimiento para medir la velocidad del aire circundante es el mismo que en 12.1.2.

12.2.3. Ensayo de eficiencia en estado estacionario en exterior

Acondicionamiento previo del colector

Idem que 12.1.3.

Condiciones de ensayo

- La irradiancia neta \bar{G}_T en el plano del absorbedor del colector debe ser mayor que $650[W/m^2]$.
- Se deben tener condiciones de cielo limpio y despejado.
- Se deben tener condiciones de incidencia normal sobre la apertura del colector. Para colectores de placa plana con vidrio simple, esta condición estará usualmente satisfecha si el ángulo de incidencia de la radiación solar directa es menor que 30° .
- A menos que se indique lo contrario, el caudal de fluido se debe fijar a aproximadamente $0,04[kg/s]$ por metro cuadrado del área total del colector. Esto se debe mantener estable dentro de $\pm 1\%$ del valor fijado. Para regular el caudal se utiliza el circuito by-pass y las válvulas de aguja V.A.

Procedimiento de ensayo

Idem que en 12.1.3 pero para este caso se deben obtener 8 puntos de ensayo y no 4, dando un total de 32 puntos de entrada de datos.

Para este caso, los puntos se deben evaluar para el rango de condiciones de la siguiente tabla:

Tabla 12.3: Rango mínimo de condiciones de ensayo de desempeño térmico de colectores sin vidrio.

Punto de ensayo	Irradiancia neta, $\bar{G}_T[W/m^2]$	Vel. del aire, $u[m/s]$	$(T_e - T_a)/\bar{G}_T[m^2K/W]$	Eficiencia
1	> 650	2 a 3	< 0,002	η_0
2	> 650	2 a 3	-	$0,8\eta_0$ a $0,6\eta_0$
3	> 650	2 a 3	-	$0,6\eta_0$ a $0,4\eta_0$
4	> 650	2 a 3	-	< $0,4\eta_0$
5	> 650	< 1,5	< 0,002	-
6	> 650	< 1,5	-	< $0,5\eta_0$
7	> 650	3 a 4	< 0,002	-
8	> 650	3 a 4	-	< $0,5\eta_0$

Mediciones

- Área considerada del colector (área de abertura o área total), A .
- Capacidad térmica del fluido, c_p . Se obtiene de tablas.
- Radiación solar total sobre la abertura del colector (con PIR 01), G_T .
- Irradiancia de onda larga en el plano del colector, E_L (con PG 01).
- Velocidad del aire circundante, u . (con ANE 01).

- Temperatura del aire circundante (con S.T 03), T_a .
- Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del colector (con S.T 01), T_e .
- Temperatura del fluido de trabajo a la salida del colector (con S.T 02), T_s .
- Caudal del fluido de trabajo (con S.F 01 o S.F 02), \dot{m} .

Período de ensayo

Idem que en 12.1.3, pero considerando la siguiente desviación permitida de los parámetros importantes:

Tabla 12.4: Desviación permitida de los parámetros de medición durante un período de medición para colectores sin vidrio.

Parámetro	Desviación permitida desde el valor promedio
Radiación solar	$\pm 50 [W/m^2]$
Temperatura aire circundante	$\pm 1 [K]$
Caudal másico de fluido	$\pm 1 \%$
Temp. del fluido a la entrada del colector	$\pm 0,1 [K]$
Irradiancia de onda larga	$\pm 20 [W/m^2]$
Velocidad del aire	$\pm 10 \%$

Cálculo de eficiencia y presentación de resultados

La eficiencia se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{A\bar{G}_T} \tag{12.11}$$

Donde:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_s - T_e) \tag{12.12}$$

$$\bar{G}_T = G_T + \frac{\varepsilon}{\alpha}(E_L - \sigma T_a^4) \tag{12.13}$$

En general se cumple que $\frac{\varepsilon}{\alpha} = 1$.

Una vez obtenidos los puntos se realiza una curva de ajuste usando el método de los mínimos cuadrados para obtener una función de eficiencia de la forma:

$$\eta = \eta_0 - (b_1 + b_2 u) \frac{T_e - T_a}{\overline{G_T}} \quad (12.14)$$

En que η_0 , b_1 y b_2 son los coeficientes a determinar mediante la curva de ajuste.

12.2.4. Ensayo para determinación de constante de tiempo del colector

Idem que en 12.1.4.

12.2.5. Determinación de la capacidad térmica del colector

La capacidad térmica del colector $C[J/K]$ se calcula como la suma, para cada elemento constituyente del colector (absorbedor, fluido de trabajo), del producto de su masa m_i y su calor específico c_i :

$$\sum_i m_i \cdot c_i \quad (12.15)$$

12.2.6. Determinación de la caída de presión a través del colector

Idem que en 12.1.7 pero considerando un rango de caudal de 0,02[kg/s] a 0,1[kg/s] por metro cuadrado de área de colector.

12.2.7. Ensayo para determinación de modificador de ángulo incidente del colector

Idem que en 12.1.5 pero considerando las siguientes ecuaciones para el cálculo de K_θ :

$$K_\theta = \frac{\eta_\theta}{\eta_0} \quad (12.16)$$

Cuando el ensayo se realiza con $T_e = T_a$ y:

$$K_\theta = \frac{\eta + (b_1 + b_2 u) \frac{T_e - T_a}{\overline{G_T}}}{\eta_0} \quad (12.17)$$

Cuando el ensayo se realiza con $T_e > T_a$.

Capítulo 13

Conclusiones y comentarios

13.1. Conclusiones principales

- En este trabajo se logró de manera efectiva el diseño de un banco de pruebas para colectores solares de acuerdo a la normativa nacional vigente, aprobada recientemente en Chile.
- De acuerdo a los objetivos propuestos, se logró el diseño de una estructura de montaje que pudiera variar el colector solar tanto en inclinación como en azimut.
- Los procedimientos de ensayo descritos en la normativa chilena (tabla 2.1) están acordes al diseño y son completamente aplicables en éste.
- Del análisis para localización del banco de ensayos para colectores solares se concluye, de acuerdo al estudio de las radiaciones disponibles, que San José de Maipo (localidad de Quilayayal) presenta mejores condiciones para la ubicación de la instalación si se compara con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile ubicado en Santiago.
- De un análisis, se concluye que el costo de la instalación se estima en unos 50.300 USD si se consideran principalmente la mano de obra y materiales de la estructura de montaje y piping, los sensores de la parte de instrumentación y los componentes principales del banco de ensayos.

13.2. Comentarios

- Se pretende que este trabajo sirva de apoyo para la futura construcción de un Laboratorio Solar en el norte del país. Este apoyo se refiere principalmente a:
 - Diseño de detalle de estructura de montaje para colectores solares: La estructura de montaje propuesta sirve para montar un colector solar para cualquier propósito, aumentando

sus prestaciones no sólo para el tipo de pruebas descritas en este trabajo.

- Diseño de sistema de piping para las pruebas descritas en el capítulo 12: Se propuso una solución de disposición general y ubicación del sistema de piping, así como el cálculo y la especificación de componentes como ayuda a una futura selección en catálogos técnicos.
 - Idea de presupuesto aproximado para la instalación completa.
 - Recomendaciones generales que se han hecho a lo largo de este trabajo.
- El diseño se concibió en base a los parámetros de diseño presentados en 4. En especial, se diseñó una instalación flexible y confiable capaz de montar distintos tipos de colectores y realizar variados ensayos. Además, la instalación fue pensada para poder ser desarmada y ensamblada de manera sencilla para poder realizar la operación y el mantenimiento de forma efectiva. Por último, se diseñó una instalación segura para el operador.
 - El banco de ensayos diseñado tiene la flexibilidad para ser adaptado para pruebas de otro tipo de tecnologías solares, como por ejemplo colectores de calentamiento de aire y celdas fotovoltaicas. El rediseño para estas tecnologías debería estar enfocado principalmente en la cadena instrumental y ductos de aire en el caso de colectores de calentamiento de aire.
 - Como se explicó en 1.2, el banco de ensayos fue diseñado de acuerdo a la normativa chilena disponible (tabla 2.1), por lo que si fuese construido debería poder ser certificado por algún organismo internacional externo. De esta manera, además de servir para homologar, a través del banco de ensayos se podrían certificar colectores. Sin embargo, su tarea primordial como primera versión es la homologación.
 - Si bien se diseñó y especificó gran parte del banco de pruebas, aún quedan cosas pendientes, que se deben solucionar algunas principalmente antes de la construcción y otras por algún ingeniero de alguna especialidad complementaria. Por ejemplo, es necesario un ingeniero eléctrico para ver todo el tema de la ingeniería de detalle de la parte de instrumentación y mediciones en conjunto con un ingeniero en computación para ver todo el tema del DAS y los softwares que se utilizarán en la instalación.
 - Si bien se realizó toda la ingeniería de detalle de la estructura de montaje, queda pendiente la ingeniería de detalle de la parte de piping y generación de viento correspondiente a la especificación de conexión de los elementos.

Bibliografía

- [1] Norma Chilena Oficial NCh2919/1, *Energía Solar - Métodos de ensayo para colectores solares - Parte 1: Desempeño térmico de colectores con vidrio de calentamiento de líquido considerando caída de presión.*, Primera edición, 2006.
- [2] Norma Chilena Oficial NCh2919/3, *Energía Solar - Métodos de ensayo para colectores solares - Parte 3: Desempeño térmico de colectores sin vidrio de calentamiento líquido considerando caída de presión.*, Primera edición, 2006.
- [3] *1999 ASHRAE handbook - HVAC Applications*, Atlanta, GA(US).
- [4] *2000 ASHRAE handbook - HVAC Systems and Equipment*, Atlanta, GA(US).
- [5] Alan S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, Tercera Edición, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- [6] José M. De Juana, *Energías Renovables para el Desarrollo*, Thomson-Paraninfo, España, 2003.
- [7] Junta de Castilla y León - Consejería de Industria, Comercio y Turismo; Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN). *Energía Solar Térmica: Manual del Projectista*. España.
- [8] Convenio para el Impulso Tecnológico de la Energía Solar entre IDAE y e INTA. *Instalaciones de Energía Solar Térmica, Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura*. España, octubre 2002.
- [9] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke; *Diseño en Ingeniería Mecánica*; Sexta Edición, Esitorial Mc Graw Hill, México, 2002.
- [10] *www.CNE.cl*
- [11] *www.fsec.ucf.edu*
- [12] Norma Chilena Oficial NCh432.Of71, *Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones.*, Primera edición, 1971.

- [13] Bjorn Palm, Joachim Claesson, *Plate heat exchangers, calculation methods for single and two-face flow*. ICMM2005-75092, 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, June 13-15, 2005, Toronto, Ontario, Canada.
- [14] Apuntes del Curso ME-33A, Mecánica de Fluidos.
- [15] Apuntes del Curso ME-43B, Transferencia de Calor.
- [16] *www.enercom.cl*

Anexo A

Memoria de cálculo de estructura de montaje

Para realizar los cálculos de resistencia y análisis numérico de la estructura de montaje del colector se consideran dos cargas principales, las debidas al colector y las debidas a la velocidad del viento.

El peso máximo considerado para un colector lleno de líquido durante un ensayo será de 100[kg], dado los datos de la tabla 7.1.

La fuerza que realiza el viento sobre la estructura se obtiene según la norma chilena de viento NCh432Of17 ([12]) De acuerdo a la norma los valores de las presiones debidas al viento serán proporcionales a una magnitud denominada *presión básica del viento*, q a la que se le puede aplicar la fórmula:

$$q = u^2/16 \quad (\text{A.1})$$

Donde q es la presión básica en $[kg/m^2]$ y u es la velocidad del viento en $[m/s]$.

Para este caso se puede considerar una presión básica de $q = 55[kg/m^2]$ (0 mts sobre el suelo). Para superficies inclinadas la presión perpendicular a la superficie será entonces de:

$$p_v = 1,2 \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot q \quad (\text{A.2})$$

Donde α es el ángulo de inclinación y p_v tiene unidades de $[kg/m^2]$. La presión del viento se ejerce sobre el colector solar, por lo cual se debe considerar el área total de colector para calcular

la fuerza neta.

Se considerará la situación más desfavorable en que se monta un colector plano que utilice las dimensiones máximas de la estructura, esto es 3,5 x 2,5 [m]. Además se considerará que la inclinación varía desde 20° a 60°. El viento puede incidir tanto de frente como por detrás del colector. Se considera también el peso de la estructura.

A.1. Cálculo de fuerzas

A.1.1. Fuerza sobre barras de montaje

Las barras de montaje se observan en la siguiente figura:

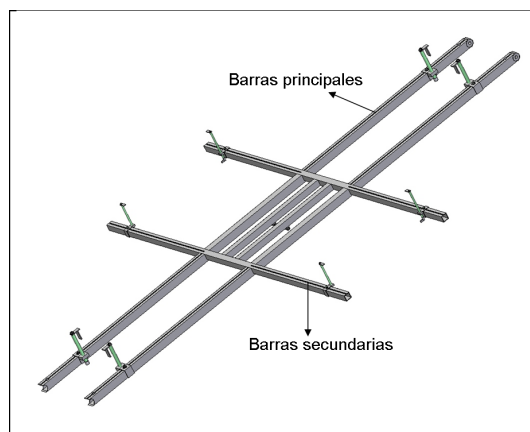


Figura A.1: *Barras de montaje del colector.*

Las máximas presiones sobre un colector montado sobre las barras se obtienen para un ángulo de inclinación de 60°. Para viento de frente se obtiene una presión de 63,2[kg/m²] y para viento por detrás, 51,1[kg/m²].

A.1.2. Fuerzas sobre resto de estructura

Las fuerzas importantes a determinar que se realizan en la estructura se pueden observar en la siguiente figura:

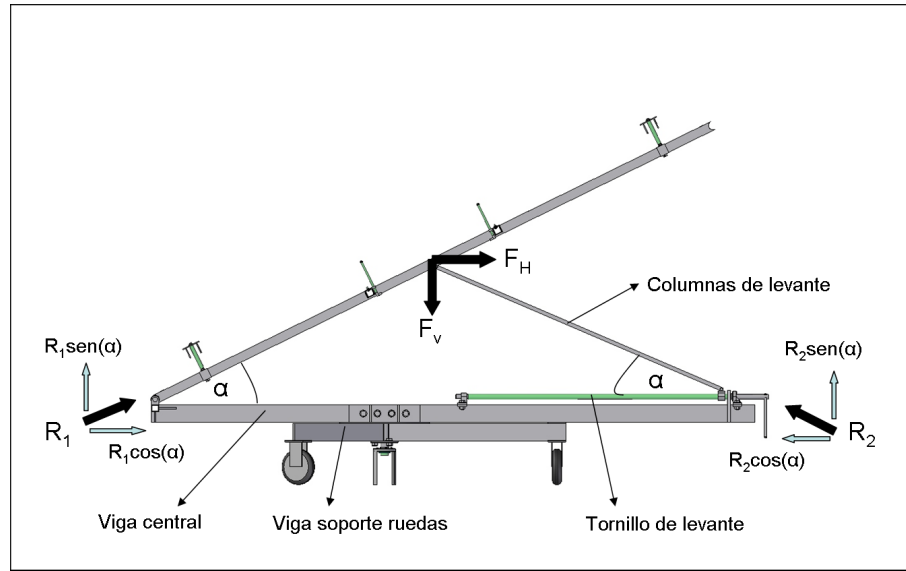


Figura A.2: Diagrama de fuerzas de la estructura de montaje.

El triángulo formado es aproximadamente isósceles. La fuerza del viento sobre la estructura de barras de montaje se puede descomponer en una fuerza vertical y una fuerza horizontal, aplicadas sobre el centro de masa del colector. Las fuerzas de viento más el peso del colector dan como resultados las fuerzas F_H y F_v .

Como el sistema es rotulado, se supone que las fuerzas R_1 y R_2 se ejercen a lo largo de las barras, como se muestra en la figura anterior.

Realizando un análisis de fuerzas se obtiene que:

$$R_1 = \frac{F_v}{2\sin(\alpha)} - \frac{F_H}{2\cos(\alpha)} \quad (\text{A.3})$$

$$R_2 = \frac{F_v}{2\sin(\alpha)} + \frac{F_H}{2\cos(\alpha)} \quad (\text{A.4})$$

La figura muestra el caso de viento por el frente. El caso de viento por detrás es igual, cambiando el sentido de F_H .

Realizando un análisis de sensibilidad para distintos ángulos y direcciones de viento se obtiene que la estructura está sometida a mayores fuerzas cuando el colector está inclinado 20° y el viento viene de frente. Los valores de las fuerzas son:

Tabla A.1: Fuerzas máximas sobre estructura según figura A.2.

F_H [kgf]	63,7
F_V [kgf]	312
R_1 [kgf]	422,2
$R_1 \text{sen}(\alpha)$ [kgf]	144,4
$R_1 \text{cos}(\alpha)$ [kgf]	396,7
R_2 [kgf]	490
$R_2 \text{sen}(\alpha)$ [kgf]	167,6
$R_2 \text{cos}(\alpha)$ [kgf]	460,5

A.2. Cálculos de resistencia

A continuación se realizan los cálculos de resistencia mediante las ecuaciones de esfuerzos de la resistencia de materiales y el criterio de falla de Tresca. Se utiliza para este caso un coeficiente de seguridad de $n = 1,7$ de acuerdo a [9] debido a que se conocen con bastante exactitud las cargas involucradas, los esfuerzos, el entorno y el material utilizado.

En las partes apernadas, se recomiendan pernos y tuercas de resistencia media, como pernos clase 5.8 y tuercas SAE grado 2.

A.2.1. Barras de montaje

El caso más desfavorable ocurre cuando el viento viene por detrás del colector. Así la fuerza es soportada por los 8 anclajes de las barras de montaje (A.1). Teniendo en consideración lo anterior y utilizando lo obtenido en la parte A.1.1 se obtiene que cada barra (tanto las principales como las secundarias) soportan en su extremo una fuerza de $F = 517[N]$.

Las barras se representan entonces como una viga empotrada con una carga en su extremo, como muestra la siguiente figura:

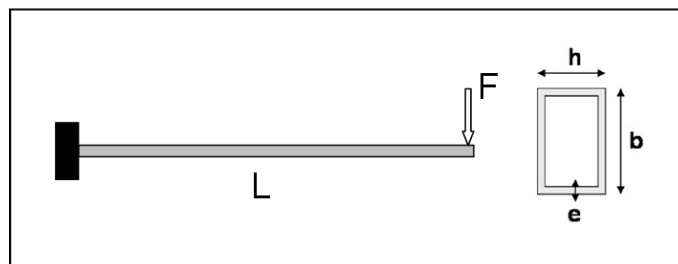


Figura A.3: Diagrama de cuerpo libre para las barras de montaje del colector.

El esfuerzo máximo está dado por la ecuación:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} \quad (\text{A.5})$$

Donde el momento máximo es $M_{max} = FL$ y W es propiedad de la sección considerada (módulo resistente). Utilizando el criterio de Tresca se obtiene que:

$$W \geq \frac{nM_{max}}{S_y} \quad (\text{A.6})$$

Donde S_y es el esfuerzo de fluencia del material. El material de las barras propuesto es un acero estructural soldable A42-27 ES cuyo $S_y = 235[MPa]$.

Barras principales

Para las barras principales de las barras de montaje se tiene que $L = 1,35[m]$, por lo que $M_{max} = 698[Nm]$. Se obtiene entonces que es necesario un $W_{min} = 5,05[cm^3]$. Se propone unas dimensiones entonces de $h = b = 5[cm]$ y un espesor de $e = 2[mm]$, con lo que se obtiene un $W = 6[cm^3]$.

Barras secundarias

Para las barras secundarias de las barras de montaje se tiene que $L = 1[m]$, por lo que $M_{max} = 517[Nm]$. Se obtiene entonces que es necesario un $W_{min} = 3,7[cm^3]$. Se propone unas dimensiones entonces de $h = b = 4[cm]$ y un espesor de $e = 3[mm]$, con lo que se obtiene un $W = 5,1[cm^3]$.

A.2.2. Viga central

La viga central es aquella en donde se apoya el tornillo de levante (figura A.2). Los esfuerzos máximos se producen en el lado derecho de la viga, donde actúa la fuerza R_2 . En este caso se tiene una fuerza tanto vertical como horizontal:

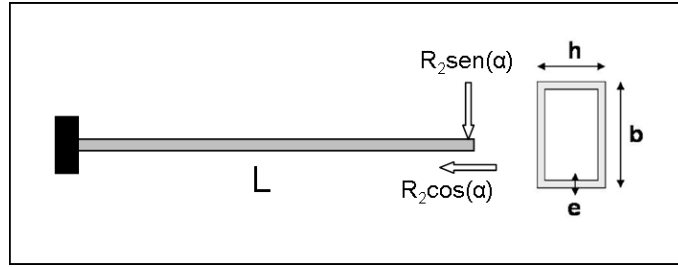


Figura A.4: Diagrama de cuerpo libre de la viga central.

Sgún tresca para que no falle la viga entonces se debe cumplir que:

$$\frac{R_2 \text{sen}(\alpha)L}{W} + \frac{R_2 \text{cos}(\alpha)}{A} \leq \frac{S_y}{n} \quad (\text{A.7})$$

Donde $A[m^2]$ es el área de la sección. El término de la izquierda de la ecuación anterior representa el esfuerzo máximo en la viga.

Si se utiliza una viga con una sección de dimensiones $h = 5[cm]$, $b = 10[cm]$ y espesor de $e = 3[mm]$ el esfuerzo máximo obtenido es de $78[MPa]$. Se necesita un material entonces con $S_y \geq 133[MPa]$.

Se propone la utilización de acero estructural soldable A42-27 ES cuyo $S_y = 235[MPa]$.

A.2.3. Viga soporte ruedas

Cada una de las tres ruedas es soportada por una viga que se une al centro de la estructura (figura A.2). La fuerza máxima aplicada sobre alguna de las ruedas del lado izquierdo de la figura A.2 se obtiene cuando el centro de masas del sistema está lo más a la izquierda posible, esto es, cuando la inclinación es de 60° . Realizando un análisis de momentos se obtiene que cada una de las ruedas de la izquierda de la figura A.2 debe soportar una fuerza vertical de $F = 2374[N]$.

La propiedad de la sección a utilizar se obtiene entonces aplicando la ecuación A.6. Con $M_{max} = FL = 2374[Nm]$ donde $L = 1[m]$.

Si se utiliza acero estructural soldable A42-27 ES se obtiene que es necesario un $W_{min} = 17,2[cm^3]$. Se propone entonces una sección rectangular maciza de lados $10 \times 1,2[cm]$.

A.2.4. Tornillo de levante

Se realizan dos análisis para el tornillo de levante. El primero consiste en verificar que una persona efectivamente pueda inclinar el colector partiendo de su estado más desfavorable. El segundo corresponde a un análisis de esfuerzos sobre el tornillo suponiendo que la tuerca está pasando por el centro de éste (punto de mayor momento). Para ambos casos se supone que se está trabajando con una velocidad de viento de unos $u = 10[m/s]$ lo que corresponde a una velocidad bastante alta.

Las propiedades del tornillo a utilizar se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla A.2: Propiedades tornillo de levante.

Largo tornillo, L [m]	1,55
Tipo de rosca	Métrica
Diámetro mayor, d [mm]	22
Paso, p [mm]	2,5
Ángulo de rosca, 2α	60

Factividad de levante

Para levantar la carga se supone que el colector está inclinado 20° (caso más desfavorable) y la velocidad del viento es de $10[m/s]$. La fuerza axial al tornillo a vencer es entonces de unos $F = 2148,4[N]$.

El torque necesario para levantar la carga está dado por la relación:

$$T_L = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec(\alpha)}{\pi d_m - fl \sec(\alpha)} \right) \quad (\text{A.8})$$

El torque necesario para bajar la carga está dado por la relación:

$$T_b = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m \sec(\alpha) - l}{\pi d_m + fl \sec(\alpha)} \right) \quad (\text{A.9})$$

Donde $d_m = d - p/2$ es el diámetro medio, l el avance ($l = p$ para este caso) y f el coeficiente de roce. Se considera para el coeficiente de roce un valor de $f = 0,2$ ([9]) dado que tanto el material del tornillo como de la tuerca son acero.

Teniendo en cuenta lo anterior se obtiene que $T_L = 31,3[Nm]$ y $T_b = 26,7[Nm]$.

Si se utiliza una manivela de 30[cm] entonces una persona debe hacer una fuerza de 11[kgf] para elevar el colector en el caso más desfavorable, lo cual es perfectamente factible.

Como $T_b > 0$ entonces el tornillo es autobloqueante.

Resistencia del tornillo

La tuerca está pasando por el centro del tornillo (momento en el cual es esfuerzo flexionante es máximo) cuando el ángulo de inclinación es aproximadamente de 44° . La fuerza vertical sobre el tornillo en esta situación es de $F_v = 961[N]$ y la fuerza axial $F_a = 1000[N]$. El torque de levante es de $T_L = 14,6[Nm]$.

Los esfuerzos son entonces de torsión (τ), flexión (σ_{x1}) y normal (σ_{x2}) y se obtienen como:

$$\tau = \frac{16T_L}{\pi d_m^3} \quad (\text{A.10})$$

$$\sigma_{x1} = \frac{F_v L / 8}{W} \quad (\text{A.11})$$

$$\sigma_{x2} = F_a / A \quad (\text{A.12})$$

Se supone una sección circular de diámetro d_m .

Obteniendo los valores de los esfuerzos anteriores se obtiene que los esfuerzos principales son $\sigma_1 = 215[MPa]$ y $\sigma_2 = -0,3[MPa]$. Así el esfuerzo de corte máximo es de $\tau_{max} = 108[MPa]$.

Utilizando $n = 1,7$ entonces se necesita un material cuyo $S_y > 183[MPa]$. Se recomienda entonces un acero SAE 1020, cuyo $S_y = 331,5[MPa]$. Este acero es fácilmente maquinable para fabricar el hilo del tornillo.

A.2.5. Columnas de levante

Las columnas de levante, 2, se pueden ver en la figura A.2. Lo importante es determinar que estas barras no se pandeen en el momento en que están sometidas a fuerza máxima. Lo anterior ocurre cuando la inclinación es de 20° sumado a la fuerza del viento de frente.

La carga crítica P_{cr} de pandeo para una columna articulada en sus dos extremos está dada por la relación:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{A.13})$$

Donde I es el momento de inercia de la sección, L el largo de la columna y E el módulo de Young del material.

El largo de la columna es de $L = 1,75[m]$ y $E = 200[GPa]$ para el acero. Para una columna de sección cuadrada de $2[cm]$ de lado y $1,5[mm]$ de espesor se obtiene una carga crítica de $P_{cr} = 4107,8[N]$.

Cada barra soporta una fuerza máxima de $F = 2403[N]$ por lo que no hay peligro de pandeo.

A.2.6. Selección de rodamientos

Existen dos rodamientos en la estructura, los cuales se pueden ver en las figuras 7.3 y 7.4. Estos rodamientos se seleccionan de acuerdo a la metodología propuesta por SKF.

Para la selección se considera la capacidad de carga estática de los rodamientos ya que giran a velocidades muy bajas y permanecen estacionarios bajo carga durante largos períodos de tiempo.

La verificación de las cargas estáticas de los rodamientos se realiza comprobando el factor de seguridad estático de la aplicación, que se define como:

$$s_0 = C_0/P_0 \quad (\text{A.14})$$

Donde C_0 es la capacidad de carga estática del rodamiento, P_0 es la carga estática equivalente y s_0 el factor de seguridad estático.

Para esta aplicación se recomiendan rodamientos rígidos de una hilera de bolas, cuya carga estática equivalente está dada por la relación:

$$P_0 = 0,6F_r + 0,5F_a \quad (\text{A.15})$$

Donde F_r es la fuerza radial sobre el rodamiento y F_a la fuerza axial.

La siguiente figura muestra el rodamiento recomendado:

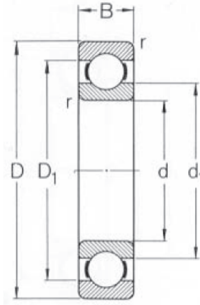


Figura A.5: Rodamiento utilizado en la estructura.

El diámetro interno del rodamiento está dado por la aplicación.

Rodamiento apoyo tornillo levante

Este rodamiento soporta unas fuerzas máximas de $F_a = 4513[N]$ y $F_r = 1648[N]$ por lo que la carga estática equivalente es de $P_0 = 3,24[kN]$.

Si se selecciona un rodamiento con un diámetro interno de $d = 20[mm]$ y un diámetro externo de $D = 47[mm]$ cuya capacidad de carga estática es de $C_0 = 7,64[kN]$ se obtiene un coeficiente $s_0 = 2,35$. Lo cual es aceptable dado el coeficiente de seguridad impuesto para los cálculos ($n = 1,7$).

Rodamiento variador de azimut

Este rodamiento soporta unas fuerzas máximas de $F_a = 372,8[N]$ y $F_r = 1579[N]$ por lo que la carga estática equivalente es de $P_0 = 1,13[kN]$.

Si se selecciona un rodamiento con un diámetro interno de $d = 45[mm]$ y un diámetro externo de $D = 58[mm]$ cuya capacidad de carga estática es de $C_0 = 6,1[kN]$ se obtiene un coeficiente $s_0 = 5,38$, lo cual es aceptable.

En la figura 7.4 se puede observar que es necesario una tuerca de fijación para fijar el eje que pasa por el rodamiento, en especial cuando el viento viene por la parte trasera y trata de levantar la estructura. Para esto se utiliza una *tuerca de fijación con mecanismo de fijación integral*, proporcionado por la misma empresa (SKF). Esta tuerca tiene una rosca M45x1,5.

A.3. Análisis numérico

Para completar el análisis de resistencia de la estructura se realizaron tres análisis numéricos con el objetivo de verificar los cálculos realizados en la parte anterior y obtener esfuerzos máximos donde no se hayan calculado.

Barras montaje

La siguiente figura muestra los esfuerzos efectivos en las barras de montaje y columnas de levante suponiendo una inclinación de 20° y viento de frente.

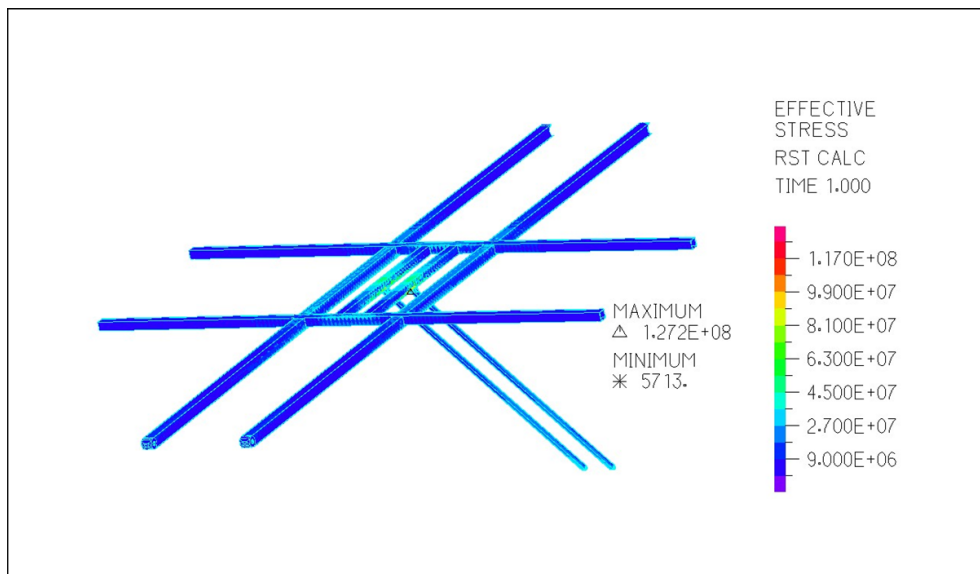


Figura A.6: Análisis numérico barras montaje.

La carga se aplicó como una presión sobre las cuatro barras de montaje dadas las fuerzas obtenidas en A.1.1.

El esfuerzo efectivo máximo ocurre en las barras de montaje donde se unen las columnas de levante y tiene un valor de $127[\text{MPa}]$. Estas barras son de acero estructural soldable A42-27 ES cuyo $S_y = 235[\text{MPa}]$ por lo que se obtiene un factor de seguridad de $n = 1,8$ lo cual es aceptable.

Se observa también que las columnas de levante están sometidas a esfuerzos del orden de los $45[\text{MPa}]$ por lo que un acero A42-27 ES es suficiente.

Viga central

La siguiente figura muestra los esfuerzos efectivos en la viga principal suponiendo una inclinación de 20° y viento de frente.

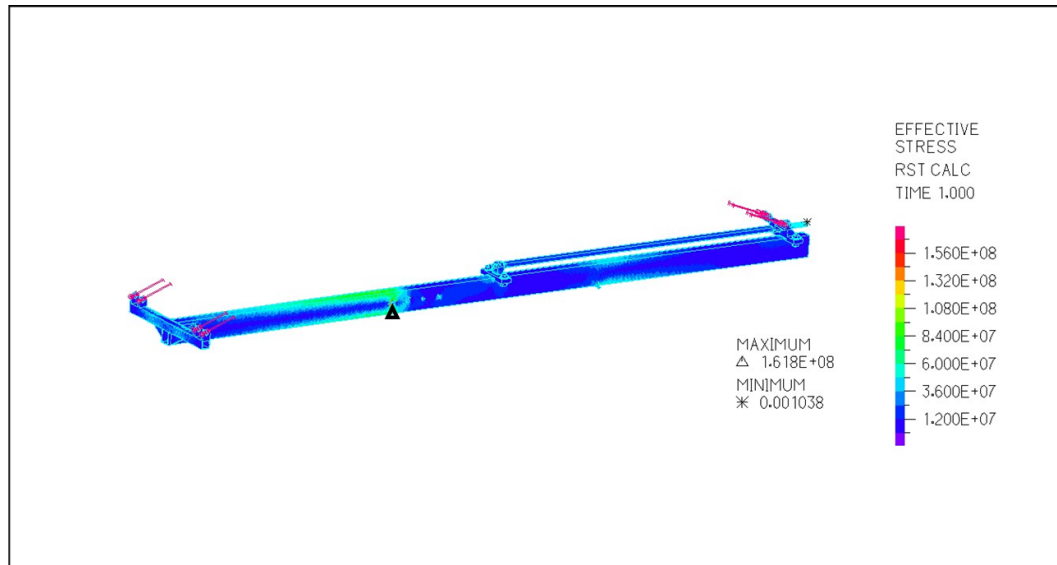


Figura A.7: *Análisis numérico viga principal.*

Las fuerzas son como se muestran en la figura y sus magnitudes se obtuvieron en la parte A.1.2.

Se observa que el esfuerzo máximo que se obtiene sobre la viga es donde ésta se une al resto de la estructura mediante pernos. El esfuerzo máximo es de $162[\text{MPa}]$. Esta viga es de acero estructural soldable A42-27 ES cuyo $S_y = 235[\text{MPa}]$ por lo que se obtiene un factor de seguridad de $n = 1,45$ lo cual es aceptable.

Se ve también que las barras de la punta izquierda de la viga central soportan de manera efectiva a las barras de montaje del colector ya que los esfuerzos son sólo del orden de unos $36[\text{MPa}]$.

El resto de la estructura de la figura anterior posee esfuerzos máximos del orden de $36[\text{MPa}]$ lo cual es bajo para un acero estructural común.

Variación azimut

La siguiente figura muestra los esfuerzos efectivos en el sistema de variación de azimut suponiendo una inclinación de 60° y viento por detrás. En estas condiciones es cuando se tienen las mayores fuerzas sobre el empotramiento central debido a que el viento trata de levantar a la estructura y las ruedas sólo soportan cargas verticales hacia abajo.

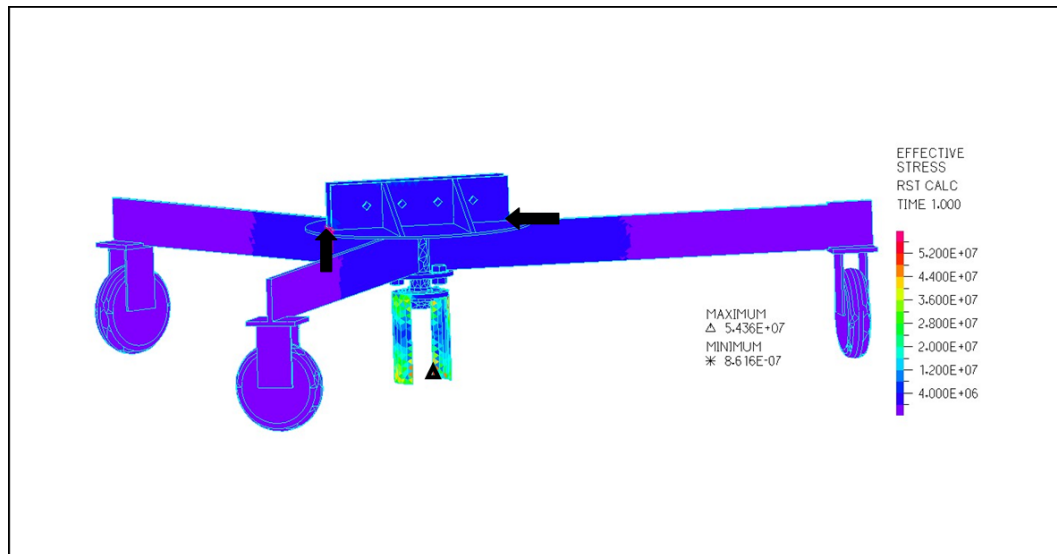


Figura A.8: *Análisis numérico sistema variación azimuth.*

Se puede observar que el esfuerzo efectivo máximo ocurre en el empotramiento y tiene un valor de 54[MPa] lo cual es bajo para un acero estructural común o acero 1020.

Se ve también que el eje que pasa por el rodamiento de variador de azimuth está sometido a esfuerzos del orden de 20[MPa]. Si se utiliza un acero SAE 1020 entonces el eje no debería fallar.

Anexo B

Memoria de cálculo de componentes del piping

B.1. Tuberías

Se recomienda para instalaciones de energía solar que el fluido de trabajo no supere la velocidad V_{max} de 3 [m/s] en las tuberías de conducción [7]. Por otro lado, el caudal máximo Q_{max} que se podría utilizar en los ensayos está dado por el ensayo de caída de presión para colectores sin vidrio ([2]) y considerando un colector de $8,75[m^2]$. Así $Q_{max} = 3,15[m^3/h]$.

El diámetro interior necesario está dado entonces por:

$$D_{in} = \sqrt{\frac{4Q_{max}}{\pi V_{max}}} \quad (B.1)$$

Se obtiene entonces que es necesario un diámetro de $D_{in} = 19,27[mm]$.

Para este tipo de aplicaciones se utilizan generalmente tuberías de cobre, ya que son más efectivas contra la corrosión que las tuberías de acero y soportan más temperatura que las tuberías de material plástico.

Según las normas utilizadas, las tuberías deben soportar una temperatura máxima de $120^{\circ}C$. El ASHRAE ([4]) recomienda para aplicaciones de circulación de agua tuberías de cobre tipo L, que pueden soportar hasta $120^{\circ}C$ y una presión de $1030[kPa]$.

Por lo anterior, para esta aplicación se utilizarán tuberías de cobre cuyas propiedades se puede observar en la tabla 9.1. La velocidad máxima sería entonces de $2,8[m/s]$.

B.2. Control de temperatura

B.2.1. IC de placas

Circuito primario

El IC de placas debe bajar la temperatura del fluido una vez que éste sale del colector solar, para así mantener una temperatura de entrada al colector constante. Se debe calcular entonces la potencia necesaria para lograr lo anterior. El IC de placas se evalúa para una situación particular (la más desfavorable) ya que como se dijo anteriormente las condiciones de ensayo son variables, dependiendo del tipo de colector, época del año, etc.

Se supone un día de verano con un colector de buena eficiencia, que se obtiene cuando la temperatura de entrada es igual a la temperatura ambiente. Los parámetros utilizados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla B.1: Parámetro para cálculo de la potencia del IC de placas.

Eficiencia máxima, η_0	0,85
Temp. entrada al colector, temp. ambiente, T_a, T_e °C	30
Área del colector A_c [m ²]	8,75
Radiación, G_T [W/m ²]	1000
Caudal másico, \dot{m} [kg/s]	0,35

El caudal está dado por la norma, considerando el área máxima que se puede instalar en la estructura de montaje.

La temperatura de salida del fluido del colector está dada por:

$$T_s = T_e + \frac{\eta_0 A_c G_T}{\dot{m} C_p} \quad (\text{B.2})$$

Evaluando los parámetros (C_p del agua se obtiene de tablas), se obtiene que $T_s = 35,1^\circ\text{C}$.

El IC entonces debe bajar la temperatura desde T_s a $T_e - 1\text{K}$, ya que el último ajuste de 1K se realiza en el calefactor antes de la entrada al colector. La potencia está dada entonces por:

$$\dot{Q}_{IC} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (\text{B.3})$$

Se obtiene para este caso que $\dot{Q}_{IC} = 9[\text{kW}]$.

Circuito secundario

Se deben tener las características en el otro lado del IC de placas (propiedades en el circuito secundario). Se dijo anteriormente que el circuito secundario se debe precalentar, por lo que se supondrá que la temperatura de entrada al IC en el circuito secundario es 4°C menos que la temperatura de salida del IC en el circuito primario, esto es, 25°C.

Utilizando la ecuación anterior, se puede obtener la temperatura a la salida del IC en el circuito secundario. Se obtiene que esta temperatura es de 31°C. Los caudales máxicos en el circuito primario y secundario siempre se mantienen iguales.

Modelamiento IC de placas (IC-1)

Para el cálculo del IC de placas se utilizó como base [13]. Los parámetros para el cálculo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla B.2: Parámetros para el cálculo del área del IC de placas.

Numero de canales, N_c	18
Lado canal, $b[mm]$	4
Ángulo canal, φ	45
Parámetro ϕ	1,25
Diametro hidráulico, $d_e[m]$	0,008
Area canal, $A[m^2]$	0,000064
Velocidad $V[m/s]$	0,076
Número de pasadas en paso simple, N_p	3

Donde $d_e = 2b$, $A = d_e^2$ y $V = \dot{m}/(\rho AN_c N_p)$.

El número de Nusselt está dado por:

$$Nu = \frac{hd_e}{k} = (0,2668 - 0,006967\varphi + 7,244 \cdot 10^{-5}\varphi^2) (20,7803 - 50,9372\phi + 41,1585\phi^2 - 10,1507\phi^3) Re^{0,728+0,0543\sin(2\pi\varphi/90+3,7)} Pr^{1/3} \quad (B.4)$$

Donde h es coeficiente de transferencia de calor, k la conductividad del agua y $Re = \rho V d_e / \mu$. Las propiedades del agua se obtienen de tablas.

La ecuación anterior es válida para un Reynolds $Re > 1000$. Evaluando se obtiene que $Nu =$

47,4 y $h = 3706,5 [W/m^2K]$.

El coeficiente global de transferencia de calor U se obtiene suponiendo dos placas planas y considerando sólo convección. Así:

$$U = \frac{1}{1/h + 1/h} = h/2 \quad (\text{B.5})$$

Se obtiene entonces que $U = 1853,2 [W/m^2K]$.

El área de intercambio está dada por:

$$A_{IC} = \frac{\dot{Q}_{IC}}{U \cdot \Delta T_{ln}} \quad (\text{B.6})$$

Se obtiene finalmente que $A_{IC} = 1,2 [m^2]$.

B.2.2. Radiador

Como las condiciones de ensayo son variables, el radiador se calcula para una situación particular. El radiador se debe proveer con un ventilador de velocidad variable para poder tener control sobre el calor removido dependiendo del ensayo realizado.

El radiador se comienza a utilizar cuando la temperatura de entrada el colector es mayor que la temperatura ambiente. Suponemos entonces una temperatura ambiente en verano de $T_a = 30^\circ C$ y una temperatura de entrada el colector de $T_e = 40^\circ C$. La eficiencia del colector disminuye y se considerará $\eta = 0,78$. Los demás parámetros se mantienen como en la tabla C.5.

Siguiendo el procedimiento de la parte anterior y suponiendo nuevamente una diferencia de $4^\circ C$ entre la temperatura de salida del IC de placas en el circuito primario y la temperatura de entrada al IC de placas en el circuito secundario, se pueden obtener las propiedades del agua a la salida y a la entrada del radiador. Las temperaturas de entrada y salida son $T_{agua}^e = 40,1^\circ C$ y $T_{agua}^s = 35^\circ C$. La potencia necesaria es de

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{m}C_p(T_{agua}^e - T_{agua}^s) \quad (\text{B.7})$$

Considerando para el agua $C_p = 4,18 [kJ/kgK]$ se obtiene $\dot{Q}_{rad} = 8,3 [kW]$.

Para el lado del aire en el radiador se consideran las siguientes características:

Tabla B.3: Parámetros lado aire en radiador.

$V_a[m/s]$	12,5
Densidad, $\rho_a[kg/m^3]$	1,2
$C_p[J/kgK]$	1005
Área de apertura, $A_a[m^2]$	0,16
$Q_a[m^3/s]$	2
$\dot{m}_a[kg/s]$	2,4
$T_{aire}^e \text{ } ^\circ C$	30
$T_{aire}^s \text{ } ^\circ C$	33,4

Donde $V_a = Q_a/A_a$ y $\dot{m}_a = \rho_a Q_a$. Se considera un radiador de lados de 20[cm]. La temperatura de entrada del aire está dada por la temperatura ambiente y la de salida se calcula a partir de \dot{Q}_{rad} .

Modelamiento radiador (IC-2)

Se seguirá la metodología propuesta por ASHRAE [4]. Los parámetros típicos de un radiador (coil) aleteado se muestran en la siguiente tabla:

Tabla B.4: Prámetros típicos de radiador aleteado según [4].

$h_{aire}[W/m^2K]$	97
$h_{agua}[W/m^2K]$	2800
Eficiencia de aleta, η	0,9
Radio de superficie, B	20
Parámetro F_s	27
$\Delta P/N_r$	55

El coeficiente global de transferencia de calor U está dado por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\eta \cdot h_{aire}} + \frac{B}{h_{agua}}} \quad (B.8)$$

Se obtiene que $U = 53,7[W/m^2K]$.

El área necesaria de intercambio es entonces:

$$A_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{U \cdot \Delta T_{ln}} \quad (B.9)$$

Se obtiene finalmente que $A_{rad} = 25,5[m^2]$.

La cantidad de columnas de tubos que son necesarias N_r se calculan como:

$$N_r = \frac{A_{rad}}{A_a F_s} \quad (\text{B.10})$$

Se obtiene que son necesarias 6 columnas de tubos. La caída de presión del lado del aire es entonces de unos $\Delta P = 330[Pa]$. La potencia del ventilador para este caso sería de $Pot_{vent} = Q_a \cdot \Delta P = 660[W]$.

B.3. Aislación tuberías

Las normas ([1], [2]) establecen que la pérdida de temperatura en la tubería de conducción entre los puntos sensores de temperatura y el colector (entrada y salida) sea menor o igual que 0,01K.

Se considerará el caso más desfavorable como un día de invierno en el cual la temperatura de entrada al colector solar es de 80°C y el caudal sea el mínimo posible (colector con vidrio de 1[m²]).

Se identifican entonces las características del agua dentro de la tubería y las características del aire que circula fuera de ella.

B.3.1. Lado agua

Las características consideradas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla B.5: Parámetros cálculo aislación tuberías lado agua.

$\dot{m}[kg/s]$	0,02
$C_p[J/kgK]$	4186
$T_e[K]$	353
$T_s[K]$	352,99
Calor perdido, $\dot{Q}[W]$	0,84
Conductividad térmica, $k[W/mK]$	0,65
Densidad, $\rho[kg/m^3]$	970
Viscosidad, $\mu[Pa\cdot s]$	0,00035
Pr	2,3
Diámetro interior tubería, $D_i[m]$	0,01995
Velocidad fluido, $V_{agua}[m/s]$	0,064
Re	3494
Nu	20,6
$h_{agua}[W/m^2K]$	672,3

Donde:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_e - T_s) \quad (B.11)$$

$$Nu = \frac{h_{agua}D_i}{k} = 0,023 \cdot Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad (B.12)$$

Además, $Re = \rho V_{agua} D_i / \mu$ y $Pr = \mu C_p / k$.

B.3.2. Lado aire

Las características consideradas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla B.6: Parámetros cálculo aislación tuberías lado aire.

Temperatura ambiente, T_a [K]	288
Densidad, ρ [kg/m ³]	1,16
Pr	0,707
Radio exterior asilación, r_2 [m]	0,023
Diámetro exterior aislación, D_e [m]	0,054
Conductividad térmica k [W/mK]	0,0263
Viscosidad, μ [Pas]	0,00001846
Velocidad, V_{aire} [m/s]	3
Re	10265,75
Nu	12,7
h_{aire} [W/m ² K]	6,14
Radio interno aislación, r_1 [m]	0,011115
Espesor aislante [cm]	1,6
Largo tubería, L [m]	0,1
Conductividad aislante, k_{ais} [W/mK]	0,021
Coefficiente global de transf. de calor, U [W/m ² K]	1,85
ΔT_{ln} °C	65
Área interna tubería, A_{in} [m ²]	0,007

Donde:

$$Nu = \frac{h_{aire} D_e}{k} = 0,193 \cdot Re^{0,466} Pr^{1/3} \quad (B.13)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{agua}} + r_1 \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_{ais}} + \frac{r_1}{r_2 \cdot h_{aire}}} \quad (B.14)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_e - T_a) - (T_s - T_a)}{\ln((T_e - T_a)/(T_s - T_a))} \quad (B.15)$$

$$\dot{Q} = A_{in} \cdot U \cdot \Delta T_{ln} \quad (B.16)$$

De la última ecuación, sabiendo los valores de \dot{Q} , ΔT_{ln} y $A_{in} = 2\pi r_1 L$ se puede despejar el valor de r_2 . Teniendo los valores de r_1 y r_2 se obtiene el espesor necesario de la aislación. La aislación considerada es espuma de poliuretano.

B.4. Estanque expansión

Los circuitos cerrados de una instalación de energía solar térmica, necesitan un estanque de expansión con el fin de absorber las dilataciones del fluido de trabajo debido a los cambios de temperatura.

Para este caso se recomienda la utilización de un estanque cerrado ya que posee una serie de ventajas con respecto a los estanques de expansión abiertos.

La capacidad del estanque de expansión se calcula a través de la siguiente expresión:

$$V_{est} = V_{instal} \cdot K \cdot \frac{P_f}{P_f - P_i} \quad (\text{B.17})$$

Donde V_{instal} es el volumen de la instalación, K es el coeficiente de dilatación del fluido de trabajo a su temperatura media y P_f es la presión absoluta máxima de trabajo. P_i es la presión absoluta de altura manométrica sobre el estanque de expansión y se calcula como $P_i = \rho gh + P_{atm}$ donde h es la altura manométrica sobre el estanque, P_a la presión atmosférica y ρ la densidad del agua.

Los parámetros se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla B.7: Parámetros cálculo estanque de expansión.

$V_{instal}[L]$ (con factor de seguridad 1,2)	8,4
K a 50°C	0,029
$h[m]$	1,2
$P_{atm}[Pa]$	101325
$P_i[Pa]$	113085
$P_f[Pa]$	300000
$V_{est}[L]$	0,4

La instalación del banco de pruebas en el circuito primario trabaja a unos $3[bar]$.

La capacidad del estanque necesaria es de $V_{est} = 0,4[L]$, sin embargo, en el mercado se pueden encontrar estanques con capacidad mínima de hasta $2[L]$, por lo que se recomienda el uso de un estanque de esta capacidad.

B.5. Bombas de circulación

Para hacer circular el fluido por el sistema de piping son necesarias bombas de circulación. En particular se necesita una bomba de circulación en el circuito primario y otra en el secundario. A través de las válvulas de aguja y los circuitos by-pass se regula el caudal necesario.

Para calcular la potencia necesaria de la bomba es necesario conocer tanto el caudal como las pérdidas de carga en presión de los componentes de la instalación.

Se pueden identificar dos tipos de pérdidas, las regulares y las singulares.

Las pérdidas regulares se refieren a las pérdidas por fricción en las tuberías de conducción y se calculan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Delta P_R = \frac{L}{D} f \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{B.18})$$

Donde L es el largo de la tubería, D el diámetro interno, f el factor de fricción y V la velocidad del fluido en la tubería.

El factor de fricción f se puede obtener a través de la ecuación explícita de Swamee y Jain dada por:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (\text{B.19})$$

Para este caso se considerarán tuberías lisas con rugosidad relativa $e/D = 0$.

Las pérdidas singulares se refieren a las pérdidas energéticas en los elementos del sistema, como válvulas, intercambiadores, codos, etc. En algunos componentes la pérdida de carga viene especificada, en otros, la pérdida de carga se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P_S = k \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{B.20})$$

Donde el factor k representa el factor de pérdida singular.

Finalmente la potencia necesaria de la bomba se calcula como:

$$P_{bomba} = C \cdot \Delta P_{total} = C(\Delta P_R + \Delta P_S) \quad (\text{B.21})$$

Donde C representa el caudal considerado.

B.5.1. Bomba circuito primario

Considerando la bomba del circuito primario, el caudal se fija suponiendo que la válvula V.A-2 está cerrada y la V.A-1 abierta. En esta condición la bomba debe ser capaz de proveer el caudal máximo que se podría necesitar en el ensayo.

La siguiente tabla muestra los factores k y las pérdidas de presión de los componentes del circuito primario:

Tabla B.8: Factores k y pérdidas de carga de componentes del circuito primario.

Elemento	Cantidad	Factor k	$\Delta P [Pa]$
Válvula de bola (abierta)	4	0,08	
Válvula de aguja	1	0,08	
Codos	8	0,75	
T	15	1	
Filtro	1	0,6	
Caudalímetro	1		20000
Indicador de Flujo	1		20000
RTD (Thermowell)	4	0,5	
Válvula de alivio	1	0,75	
Válvula de purga	1	0,75	
IC de placas	1		2400
Colector solar	1		392,3
Calefactor	1	0,5	
Cambio de área calefactor	1	0,5	

Los factores k se conocen en general para las válvulas, filtro, codos y T. Para las RTD y el calefactor se supuso que el fluido pasa por una disminución de sección. Factores k para disminuciones de sección se conocen en función de las áreas de entrada y salida.

Las pérdidas de carga de los componentes como caudalímetro y colector se obtienen de catálogos.

Considerando un caudal de $C = 1,26 [m^3/h]$ se obtiene que $f = 0,022$. El largo total de tubería es de $L = 16 [m]$ (se consideran las tuberías flexibles que van y vuelven del colector). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla B.9: Resultados bomba circuito primario.

$\Delta P_R [Pa]$	11217,4
$\Delta P_S [Pa]$	59270,4
$\Delta P_{total} [Pa]$	70487,8
Potencia necesaria, $P_{bomba} [W]$	24,7
Altura de bombeo equivalente, $H_{bomba} [m]$	7,26

Se debe cumplir entonces que la curva característica de la bomba a elegir esté lo más próxima al punto H_{bomba} vs C considerado y siempre por encima de él.

B.5.2. Bomba circuito secundario

El caudal se fija suponiendo que la válvula V.A-4 está cerrada y la V.A-3 abierta. En esta condición la bomba debe ser capaz de proveer el caudal máximo que se podría necesitar en el ensayo.

La siguiente tabla muestra los factores k y las pérdidas de presión de los componentes del circuito secundario:

Tabla B.10: Factores k y pérdidas de carga de componentes del circuito secundario.

Elemento	Cantidad	Factor k	$\Delta P [Pa]$
Válvula de bola (abierta)	5	0,08	
Válvula de aguja	1	0,08	
Codos	6	0,75	
T	6	1	
Indicador de Flujo	1		20000
RTD	1	0,5	
Válvula de purga	1	0,75	
IC de placas	1		2400
Radiador	1		13000
Salida estanque	1	0,8	
Entrada estanque	1	1	

Considerando un caudal de $C = 1,26 [m^3/h]$ se obtiene que $f = 0,022$. El largo total de tubería es de $L = 7,5 [m]$. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla B.11: Resultados bomba circuito secundario.

$\Delta P_R [Pa]$	5311,3
$\Delta P_S [Pa]$	44124
$\Delta P_{total} [Pa]$	49435,3
Potencia necesaria, $P_{bomba} [W]$	17,3
Altura de bombeo equivalente, $H_{bomba} [m]$	5,1

Anexo C

Tablas radiaciones Quillayal y Geofísica

Tabla C.1: Radiación marzo 2007.

Día del mes	Día del año	Rad. Geofísica [$kW/m^2 dia$]	Rad. Quillayal [$kW/m^2 dia$]
1	60		
2	61	8,067	7,054
3	62	8,046	7,329
4	63	8,264	7,239
5	64	8,005	6,532
6	65	7,370	6,525
7	66	7,178	6,555
8	67	7,047	6,790
9	68	7,580	6,858
10	69	7,723	6,756
11	70	7,633	6,643
12	71	7,473	5,934
13	72	6,977	5,217
14	73	5,472	3,284
15	74	4,441	6,196
16	75	6,927	6,361
17	76	7,122	6,176
18	77	6,943	5,724
19	78	6,589	5,591
20	79	6,364	5,707
21	80	6,333	5,681
22	81		
23	82	6,580	5,907
24	83	6,606	5,799
25	84	6,503	5,735
26	85	2,623	3,141
27	86	2,124	1,294
28	87	3,876	4,128
29	88	1,347	1,789
30	89	4,932	4,133
31	90	6,357	5,574

Tabla C.2: Radiación abril 2007.

Día del mes	Día del año	Rad. Geofísica [$kW/m^2 dia$]	Rad. Quillayal [$kW/m^2 dia$]
1	91	4,732	5,270
2	92	6,046	5,256
3	93	3,715	2,935
4	94	5,714	5,101
5	95	5,022	4,417
6	96	5,133	5,210
7	97	5,909	5,232
8	98	5,898	5,203
9	99	1,401	1,739
10	100	2,562	3,891
11	101	3,365	2,339
12	102		
13	103		
14	104	1,678	1,575
15	105	5,107	4,590
16	106	4,403	3,990
17	107	5,275	4,542
18	108	4,793	4,265
19	109	4,885	4,305
20	110	4,843	4,240
21	111	3,044	2,949
22	112	1,066	1,339
23	113	1,101	0,940
24	114	4,197	3,990
25	115	4,471	3,941
26	116	4,463	4,047
27	117	4,487	4,017
28	118	3,540	3,901
29	119	3,999	3,704
30	120	2,249	2,063

Tabla C.3: Radiación mayo 2007.

Día del mes	Día del año	Rad. Geofísica [$kW/m^2 dia$]	Rad. Quillayal [$kW/m^2 dia$]
1	121	2,280	1,705
2	122	3,965	3,814
3	123	3,182	2,880
4	124	2,527	2,248
5	125	3,045	2,929
6	126	2,925	3,046
7	127	3,679	3,499
8	128		
9	129		
10	130		
11	131		
12	132		
13	133		
14	134		
15	135		
16	136		
17	137		
18	138		
19	139		
20	140		
21	141	2,560	2,377
22	142	2,887	3,110
23	143	3,049	3,147
24	144	3,026	3,074
25	145	1,104	2,732
26	146	0,533	2,074
27	147	1,478	2,003
28	148	2,596	2,926
29	149	1,034	1,381
30	150	1,186	1,264
31	151	1,833	1,058

Tabla C.4: Radiación junio 2007.

Día del mes	Día del año	Rad. Geofísica [$kW/m^2 dia$]	Rad. Quillayal [$kW/m^2 dia$]
1	152	3,231	2,796
2	153	3,326	2,741
3	154	3,579	2,922
4	155	3,288	2,820
5	156	1,849	1,662
6	157	2,413	2,638
7	158	2,527	2,255
8	159	1,469	1,075
9	160	2,970	2,774
10	161	1,238	1,204
11	162	0,650	0,557
12	163	0,309	0,303
13	164	0,310	0,122
14	165	0,220	0,185
15	166	2,913	2,818
16	167	0,563	0,685
17	168	2,747	2,115
18	169	2,134	1,994
19	170	0,428	0,462
20	171	1,269	1,973
21	172	3,084	2,767
22	173	0,470	0,385
23	174	1,562	1,512
24	175	3,210	2,850
25	176	2,527	2,690
26	177	2,213	2,822
27	178	3,017	2,867
28	179	2,970	2,846
29	180	2,919	2,807
30	181	2,189	2,831

Tabla C.5: Radiación julio 2007.

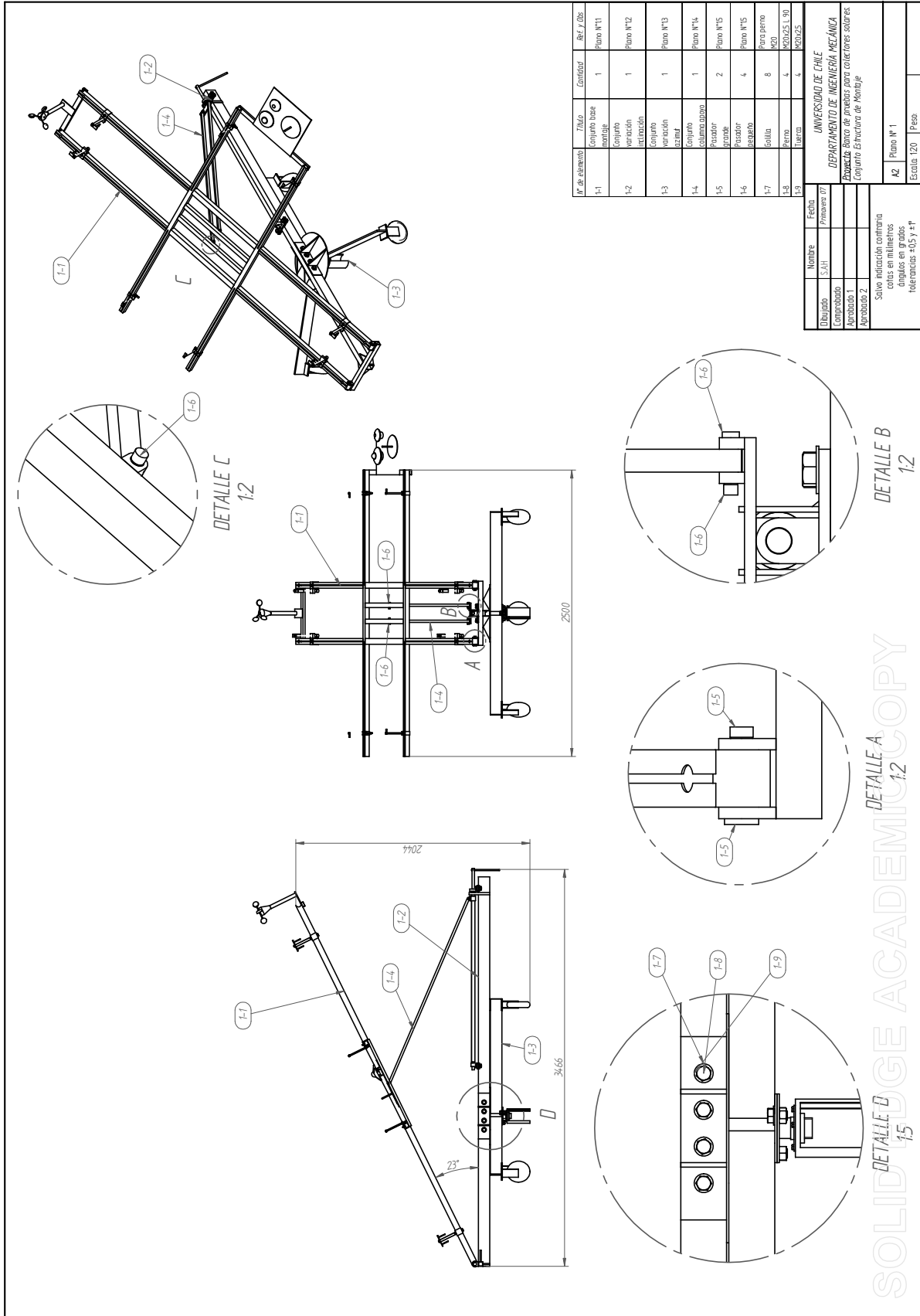
Día del mes	Día del año	Rad. Geofísica [$kW/m^2 dia$]	Rad. Quillayal [$kW/m^2 dia$]
1	182	2,411	2,831
2	183	2,908	2,862
3	184	1,735	1,898
4	185	1,784	2,136
5	186	0,703	0,238
6	187	0,947	1,986
7	188	1,713	1,910
8	189	1,918	1,238
9	190	2,902	2,967
10	191	3,048	3,056
11	192	3,101	2,971
12	193	0,702	0,979
13	194	0,679	0,594
14	195	2,095	1,591
15	196	2,875	2,671
16	197	0,728	0,479
17	198	3,128	3,089
18	199	0,755	0,848
19	200	1,022	1,013
20	201	1,559	1,572
21	202	1,008	1,194
22	203	3,200	2,671
23	204	0,732	0,628
24	205	3,243	3,335

Anexo D

Dimensiones generales piping

Anexo E

Plano principal estructura de montaje



Dibujado	Nombre	Fecha
Comprobado	S. S. A. H.	Primavera 07
Aprobado 1		
Aprobado 2		

UNIVERSIDAD DE CHILE
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
 Proyecto: Plano de montaje para colector solar
 Conjunto Estructura de Montaje

DETALLE A
12

DETALLE B
12

DETALLE C
12

DETALLE D
15

SOLID COPY

Anexo F

Planos de diseño estructura de montaje

F.1. Índice de planos

Índice de Planos

- 1 Conjunto estructura de montaje
 - 1.1 Conjunto base montaje
 - 1.1.1 Conjunto anclaje lateral
 - 1.1.1.1 Anclaje lateral, base tornillo lateral
 - 1.1.1.2 Soporte lateral, oreja lateral, tornillo lateral
 - 1.1.2 Conjunto anclaje sup/inf
 - 1.1.2.1 Anclaje sup/inf, base tornillo sup/inf.
 - 1.1.2.2 Soporte 1 sup/inf, Soporte 2 sup/inf, oreja sup/inf, tornillo sup/inf.
 - 1.1.3 Barra principal, barra horizontal
 - 1.1.4 Rótula, barra corta, unión de barra corta
 - 1.1.5 Soporte 1 instrumentos, soporte 2 instrumentos.
 - 1.2 Conjunto variación inclinación
 - 1.2.1 Conjunto tornillo de inclinación
 - 1.2.1.1 Conjunto tuerca
 - 1.2.1.1.1 Tuerca, Placa, soporte rótula
 - 1.2.1.2 Placa basal, soporte buje, buje.
 - 1.2.1.3 Soporte rodamiento, refuerzo soporte rodamiento, manivela, tornillo
 - 1.2.2 Viga central
 - 1.2.3 Barra horizontal, soporte rótula, refuerzo barra horizontal, seguro tornillo
 - 1.3 Conjunto variación azimut
 - 1.3.1 Conjunto ruedas
 - 1.3.1.1 Plataforma, círculo principal, círculo basal
 - 1.3.1.2 Placa superior, refuerzo placa superior, brazo ruedas
 - 1.3.1.3 Apoyo ruedas, apoyo viga central
 - 1.3.2 Conjunto empotramiento
 - 1.3.2.1 Empotramiento, soporte rodamiento alineación
 - 1.3.2.2 Seguro rodamiento alineación, eje alineación
 - 1.4 Conjunto columna apoyo
 - 1.4.1 Columna, rótula
 - 1.5 Pasador grande, pasador pequeño.

F.2. Planos de diseño

Los planos de diseño de la estructura de montaje se encuentran en formato pdf en el CD adjunto.