

NORMA TÉCNICA  
PERUANA

NTP 399.400  
2001

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI  
Calle de La Prosa 138, San Borja (Lima 41) Apartado 145

Lima, Perú

*indecopi*

Norma Técnica  
Peruana

---

NORMA TÉCNICA  
PERUANA

---

NTP 399.400  
2001

---

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales-INDECOPI  
Calle de La Prosa 138, San Borja (Lima 41) Apartado 145

---

Lima, Perú

## COLECTORES SOLARES. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares

SOLAR COLLECTORS. Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors

**2001-10-31**  
**1ª Edición**

R.0126-2001/INDECOPI-CRT.Pública el 2001-11-03

Precio basado en 88 páginas

I.C.S.:75.180.01

ESTA NORMA ES RECOMENDABLE

Descriptores: Colectores solares, eficiencia energética de colectores solares

Prohibido su reproducción total o parcial

## ÍNDICE

	<b>página</b>
ÍNDICE	i
PREFACIO	iii
1. OBJETO	1
2. REFERENCIAS NORMATIVAS	1
3. CAMPO DE APLICACIÓN	2
4. DEFINICIONES Y NOMENCLATURA	3
5. CLASIFICACIONES	11
6. REQUISITOS	11
7. INSTRUMENTACIÓN	13
8. APARATOS Y MÉTODOS DE ENSAYO	17
9. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO Y CÁLCULOS	32
10. INFORME DEL ENSAYO Y DATOS REGISTRADOS	53
11. ANTECEDENTE	63
ANEXOS	
ANEXO A	64
ANEXO B	68
ANEXO C	70
ANEXO D	73
ANEXO E	75
ANEXO F	79
ANEXO G	81
ANEXO H	83
ANEXO I	86

## PREFACIO

### A. RESEÑA HISTÓRICA

A.1 La presente Norma Técnica Peruana fue elaborada por el Comité Técnico de Normalización de Uso Racional de Energía y Eficiencia Energética - Sub Comité de Colectores Solares, mediante el sistema 2 u Ordinario, utilizó como antecedente la ANSI/ASHRAE 93-1986 (RA 91).

A.2 El Comité Técnico de Normalización de Uso Racional de Energía y Eficiencia Energética - Sub Comité de Colectores Solares presentó a la Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales-CRT- con fecha 2001-06-12 el PNTP 399.400:2001, para su revisión y aprobación, siendo sometido a la etapa de Discusión Pública, no habiéndose presentado observaciones fue oficializada como Norma Técnica Peruana **NTP 399.400:2001 COLECTORES SOLARES. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares**, 1ª Edición, el 03 de noviembre del 2001.

A.3 Esta Norma Técnica Peruana utilizó como antecedente la ANSI/ASHRAE 93-1986 (RA 91). La presente Norma Técnica Peruana presenta cambios editoriales, referidos principalmente a terminología empleada propia del idioma español y ha sido estructurada de acuerdo a las Guías Peruanas GP 001:1995 y GP 002:1995

### B. INSTITUCIONES QUE PARTICIPARON EN LA ELABORACIÓN DE LA NORMA TÉCNICA PERUANA

Secretaría Programa de Ahorro de Energía (PAE) del Ministerio de Energía y Minas (MEM)

Presidente Rafael Espinoza Paredes

Secretario Alfredo Oliveros Donohue

**ENTIDAD REPRESENTANTE**

ENERSOL Raúl Ramírez Enciso

SOLARTEC Beatriz Salvador Gutierrez

Programa de Ahorro de Energía (PAE) –  
Ministerio de Energía y Minas (MEM)

Centro de Energías Renovables (CER) –  
Universidad Nacional de Energía (UNI)

Grupo de Apoyo al Sector Rural (GRUPO) –  
Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

PROCOBRE

CENERGIA

Pedro Sánchez

Guillermo Tardillo Hidalgo

Rafael Espinoza Paredes

Alexander Giano

Alfredo Oliveros Donohue

Willy Alarcón Salas

---0000000---

Prohibido su reproducción total o parcial

## INTRODUCCIÓN

La Norma ANSI/ASHRAE 93-1986 (RA 91), fue preparada por un comité formado principalmente por miembros de ASHRAE. El objetivo del comité era formular un procedimiento de ensayo con que puedan probarse colectores de energía solares, tanto bajo techo como al aire libre para evaluarlos de acuerdo a su comportamiento térmico y determinar su constante de tiempo y la variación de su eficiencia para cambios en el ángulo de incidencia de los rayos directos del sol y la normal a la abertura del colector.

Recientes cambios significativos en la tecnología del ensayo de colectores solares han creado la necesidad de actualizar esta norma. Muchos aspectos que eran considerados novedoso son actualmente de uso general y muchos otros se han vuelto obsoletos. Esta norma viene bajo la clasificación de ASHRAE: Método Estándar de Medida o Ensayo. Es una revisión de una norma emitida originalmente en 1977. Esta norma mantiene la metodología original de ASHRAE Standard 93-77. Sin embargo, se han hecho varios cambios significativos, basado en la experiencia de pruebas de muchas personas, para reducir las incertidumbres experimentales. Se han actualizado especificaciones técnicas para la instrumentación, sobre todo aquellas para las medidas de la radiación solar. Las características técnicas para los simuladores de radiación solar son nuevos y se han hecho muchos cambios en las condiciones de ensayo. Esta norma define cuidadosamente su aplicabilidad tanto a los colectores con y sin concentración, enfriados por líquidos, y colectores que usan aire como el fluido de transferencia de calor.

## COLECTORES SOLARES. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares

### 1. OBJETO

Esta Norma Técnica Peruana establece los métodos de prueba para determinar el comportamiento térmico de colectores de energía solar que usan fluidos de una sola fase y no tienen almacenamiento de energía interior significativo.

### 2. REFERENCIAS NORMATIVAS

Las siguientes normas contienen disposiciones que al ser citadas en este texto, constituyen requisitos de esta Norma Técnica Peruana. Las ediciones indicadas estaban en vigencia en el momento de esta publicación. Como toda Norma está sujeta a revisión, se recomienda a aquellos que realicen acuerdos en base a ellas, que analicen la conveniencia de usar las ediciones recientes de las normas citadas seguidamente. El Organismo Peruano de Normalización posee la información de las Normas Técnicas Peruanas en vigencia en todo momento.

#### 2.1 Normas Técnicas Nacionales

2.2.1 ANSI/ASHRAE 96:1980(RA 90) Métodos de comprobación para determinar el rendimiento de un colector solar plano. ASHRAE, Inc., 1791 Círculo Tullie NE, Atlanta, GA 30329

2.2.2 ANSI/ASHRAE 109:1986(RA 90) Método de comprobación para determinar el rendimiento térmico de un colector solar plano que contienen un líquido caliente. ASHRAE, Inc., 1791 Círculo Tullie NE, Atlanta, GA 30329

- 2.2.3 GUÍA ASHRAE 41.1:86 (RA 91) Sección de medición de temperatura. ASHRAE, Inc., 1791 Círculo de Tullie NE, Atlanta, GA 30329
- 2.2.4 ANSI/ASHRAE 41.6:1982 Método de mediciones estándares de propiedades del aire húmedo. ASHRAE, Inc., 1791 Círculo de Tullie NE, Atlanta, GA 30329
- 2.2.5 ASHRAE 41.7:1984 Método normal para medida del flujo de gas. ASHRAE, Inc., 1791 Círculo de Tullie NE, Atlanta, GA 30329
- 2.2.6 ASTM E 892:1987 Tablas estándares para el espectro solar terrestre de radiación por masa de aire 1.5 para una 37° superficie inclinada. Preparado por el comité E-44.02 de la sociedad americana de ensayos y materiales, 1916 Calle de la Raza, Filadelfia, PA 19103, 15 de septiembre de 1981

### 3. CAMPO DE APLICACIÓN

3.1 Esta Norma Técnica Peruana se aplica a colectores solares con y sin concentración y se centra en aquellos en los que un fluido ingresa al colector a través de una sola entrada y sale del colector a través de una sola salida.

3.1.1 Los colectores que contienen más de una entrada y más de una salida pueden probarse según esta NTP con tal de que la tubería externa o ductos puedan conectarse para proporcionar efectivamente una sola entrada y una sola salida.

3.2 El fluido de transferencia de calor puede ser un líquido o un gas pero no una mezcla de dos fases.

3.3 Esta Norma Técnica Peruana contiene métodos para dirigir los ensayos con radiación solar natural y bajo radiación solar simulada.

3.4 Esta Norma Técnica Peruana proporciona el método para realizar el ensayo y los procedimientos de cálculo para determinar el comportamiento térmico en el estado estacionario y cuasi estacionario, tiempo y características de la respuesta angular de colectores solares.

3.5 Esta Norma Técnica Peruana no es aplicable a aquellos colectores en los que la unidad de almacenamiento térmico es una parte integral del colector, a tal punto que el proceso de la colección y el proceso del almacenamiento no pueden separarse con el propósito de hacer mediciones en éstos.

3.6 Esta Norma Técnica Peruana no se aplica a:

3.6.1 Colectores solares sin vidrios que pueden probarse de acuerdo con ASHRAE Standard 96 y

3.6.2 Colectores en los que el fluido de transferencia de calor cambia de fase y puede probarse de acuerdo con ASHRAE Standard 109 - (RA 90). Sin embargo, un procedimiento de Ensayo sugerido para aquéllos colectores con un intercambiador de calor integral, que satisface las especificaciones 3.1. y 3.2 se da en el Anexo A y se excluye en el alcance de ASHRAE Standard 109 - (RA 90).

## 4. DEFINICIONES Y NOMENCLATURA

### 4.1 Definiciones

Para los propósitos de esta Norma Técnica Peruana se aplican las siguientes definiciones:

4.1.1 **absorbente:** Es aquella parte del colector solar que recibe la energía radiante incidente y la transforma en energía térmica. Puede contar con una superficie

receptora a través de la cual la energía es transmitida al fluido portador de calor; sin embargo, el absorbente puede ser el propio fluido portador de calor.

4.1.2 **área del absorbente:** Es el área total de transferencia de calor a través de la cual la radiación solar calienta al fluido portador de calor o el área del absorbente fluido portador de calor como en la superficie receptora, las que realizan la función absorbente.

4.1.3 **masa de aire:** Es la relación entre la masa atmosférica en la trayectoria real tierra-sol y la masa que existiría a nivel del mar si el sol estuviera directamente sobre nuestras cabezas.

4.1.4 **ángulo de captación:** Es la zona angular dentro de la cual la radiación es captada por el receptor de un concentrador. Se dice que la radiación es captada porque la radiación dentro de este ángulo alcanza el absorbente después de atravesar la apertura.

4.1.5 **ángulo de incidencia:** Es el ángulo entre la radiación solar directa y la normal al plano de abertura.

4.1.6 **tiempo solar aparente:** Tiempo basado en el movimiento angular aparente del sol en el cielo. Al mediodía solar el sol cruza el meridiano del observador.

4.1.7 **área de apertura:** Es el área máxima proyectada de un colector solar a través de la cual se capta la energía solar no concentrada.

4.1.8 **área bruta:** Es la máxima área proyectada del módulo completo de captación, incluido el conjunto de los dispositivos de montaje. Sin embargo, si el fabricante requiere que sea puesto aislamiento adicional de alguna manera a lo largo de todo o parte del perímetro (borde) del módulo de colección para que las características del comportamiento, determinadas aquí con los procedimientos de ensayo, fueran indicativas de aquellos que ocurrirían si el colector fuera parte de un sistema instalado, entonces el área bruta tendrá que ser ajustada. Si el arreglo instalado se especifica como un arreglo de una fila, entonces las dimensiones para este cálculo serán la distancia de eje a eje entre dos colectores adyacentes y la longitud del colector. Si el arreglo instalado se especifica como de dos filas o de un arreglo más grande, el área bruta es determinada por las distancias horizontal y longitudinal medidas de eje a eje de cuatro colectores adyacentes instalados en la serie.

Nota: El módulo completo de captación es la unidad de captación enviada por el fabricante para su instalación en una estructura o en un arreglo.

4.1.9 **colector con concentrador:** Es un colector solar que utiliza reflectores, lentes u otros elementos ópticos para concentrar la energía radiante que atraviesa el área de apertura hacia un absorbente cuya área superficial es más pequeña que el área de apertura.

4.1.10 **colector plano:** Es un colector solar sin concentración en el que la superficie absorbente es esencialmente plana.

4.1.11 **colector sin concentrador:** Es un colector solar en el que el flujo radiante sobre el absorbente no sea mayor que la radiación solar a través del área de apertura. Esto puede o no puede contener elementos ópticos para dirigir el flujo radiante hacia el absorbente.

4.1.12 **relación de concentración:** Para los propósitos de esta norma de ensayo, la relación de concentración de un colector solar con concentrador es la proporción del área de apertura al área del absorbente.

4.1.13 **cubierta del colector:** Es el material que cubre la apertura para proporcionar protección térmica y del ambiente.

4.1.14 **eficiencia térmica instantánea:** Es la cantidad de energía removida por el fluido portador de calor por unidad de área bruta del colector durante el periodo de tiempo especificado y dividida por la radiación solar global incidente en el colector por unidad de área durante el mismo periodo de ensayo, bajo condiciones estacionarias o cuasi estacionarias.

4.1.15 **radiación global o hemisférica:** La energía radiante solar global (o hemisférica) es la cantidad de energía solar incidente por unidad de área superficial y unidad de tiempo a través de un hemisferio sobre la superficie, expresado en  $W/m^2$  ( $Btu/(h \cdot ft^2)$ ).

4.1.16 **radiación instantánea:** Es la energía solar incidente por unidad de área y unidad de tiempo, medida en  $W/m^2$  ( $Btu/(h \cdot ft^2)$ ).

4.1.17 **radiación integrada promedio:** Es la radiación solar incidente por unidad de área durante un periodo de tiempo especificado, dividida por la duración de ese periodo.

4.1.18 **radiación total:** Es la cantidad de energía solar incidente sobre una superficie en todo el espectro solar.

4.1.19 **piranómetro:** Es un instrumento usado para medir la radiación global total incidente sobre una superficie por unidad de tiempo y unidad de área. Esta energía incluye la radiación directa, la radiación difusa del cielo, y la radiación solar reflejada por el plano frontal al colector.

4.1.20 **pirgeómetro:** Es un instrumento usado para medir la radiación atmosférica incidente a longitudes de onda mayores a  $4\ \mu\text{m}$  sobre una superficie negra a la temperatura del ambiente. La radiación solar de onda corta se excluye de la energía medida.

4.1.21 **pirheliómetro:** Es un instrumento usado para medir la radiación total directa sobre una superficie normal a los rayos del sol.

4.1.22 **estado cuasi estacionario:** Describe condiciones de ensayo de colectores solares cuando el flujo, temperatura de entrada del fluido, temperatura del colector, radiación solar, y temperatura ambiente se han estabilizado a tal punto que estas condiciones pueden ser consideradas esencialmente constantes, como se define posteriormente en la sección 9. Además, que la temperatura de salida del fluido, bajo estas condiciones, también es esencialmente constante.

4.1.23 **simulador de radiación solar:** Es un dispositivo para simular la radiación solar.

4.1.24 **colector solar:** Es un dispositivo diseñado para absorber la radiación solar incidente y transferir energía a un fluido que pasa a través de él.

4.1.25 **aire estándar:** Es el aire con una densidad de  $1,2204\ \text{kg/m}^3$  ( $0,075\ \text{lbm/ft}^3$ ) y equivalente a la del aire seco a una temperatura de  $20\ ^\circ\text{C}$  ( $70\ ^\circ\text{F}$ ) y a una presión barométrica de  $101,325\ \text{kPa}$  ( $29,92$  pulgadas de Hg).

- 4.1.26 **presión barométrica estándar:** Es 101,325 kPa (29,92 pulgadas de Hg).
- 4.1.27 **temperatura del aire ambiente:** Es la temperatura del aire que rodea al colector solar que está siendo ensayado.
- 4.1.28 **periodo de ensayo:** Es el tiempo en el que se mantienen condiciones cuasi estacionarias para cada punto de eficiencia medida.
- 4.1.29 **constante de tiempo del colector:** Es el tiempo requerido por el fluido que sale del colector solar para lograr el 63,2 % de su cambio estacionario que sigue a un cambio brusco de la radiación.
- 4.1.30 **fluido de transferencia de calor:** Es el medio, tal como aire, agua u otro fluido, que atraviesa al colector solar y lleva la energía térmica absorbida lejos de la placa absorbente del colector.

## 4.2 Nomenclatura

Para los propósitos de esta Norma Técnica Peruana se aplican las siguientes nomenclaturas:

a,b,

a',b' = constantes usadas en las ecuaciones de modificación de ángulos incidentes, adimensional.

A = área de sección transversal, m<sup>2</sup> (ft<sup>2</sup>)

A<sub>a</sub> = área frontal transparente para un colector sin concentración o el área de la apertura de un colector de concentración, m<sup>2</sup> (ft<sup>2</sup>)

A<sub>g</sub> = área de colección bruta, m<sup>2</sup> (ft<sup>2</sup>)

A<sub>r</sub> = área absorbente de un colector sin concentración o el área receptora de un colector con concentración, m<sup>2</sup> (ft<sup>2</sup>)

b<sub>o</sub> = constante usada en la ecuación de modificación del ángulo incidente, adimensional,

B = ángulo eficaz para determinar la ecuación de tiempo, grados,

C<sub>A</sub> = la capacidad de calor eficaz del colector solar, J/°C (Btu/(lbm·°F))

$c_p$	=	el calor específico del fluido de transferencia de calor, J/(kg·°C) (Btu/(lbm·°F))
E	=	la ecuación de tiempo, minutos,
$E_{\lambda_i}$	=	radiación solar espectral promedio sobre $\lambda_i$ centrado a una masa de aire de 1,5 W/(m <sup>2</sup> ·μm)(Btu/(h·ft <sup>2</sup> ·μm))
F'	=	factor de eficiencia de la placa absorbente plana, adimensional,
$F_R$	=	factor de remoción de calor del colector solar, adimensional,
G	=	radiación solar, W/m <sup>2</sup> (Btu/h·ft <sup>2</sup> )
$G_{da}$	=	componente de la radiación solar directa en el plano de apertura, W/m <sup>2</sup> (Btu/h·ft <sup>2</sup> )
$G_{DN}$	=	radiación solar directa, normal, W/m <sup>2</sup> (Btu/h·ft <sup>2</sup> )
$G_d$	=	radiación solar incidente difusa en el plano de apertura de colector, W/m <sup>2</sup> (Btu/h·ft <sup>2</sup> )
$G_{sc}$	=	constante solar, 1,353 W/m <sup>2</sup> (429,2 Btu/h·ft <sup>2</sup> )
$G_t$	=	radiación solar global incidente en el plano de apertura del colector, W/m <sup>2</sup> (Btu/h·ft <sup>2</sup> )
$h_a$	=	entalpía de la mezcla aire vapor de agua del ambiente, J/kg (Btu/lbm)
$h_{f,s}$	=	entalpía de la mezcla aire vapor de agua a la salida del colector de aire, J/kg (Btu/lbm)
$h_{f,i}$	=	entalpía de la mezcla de aire vapor de agua a la entrada del colector de agua, J/kg (Btu/lbm)
$h_L$	=	entalpía de la mezcla aire vapor de agua saliente, J/kg (Btu/lbm)
K	=	factor definido por Ecuación 9.11, adimensional
$K_{or}$	=	modificador del ángulo de incidencia, adimensional
$K_d$	=	modificador del ángulo de incidencia de radiación difusa, adimensional
$K_1$	=	modificador del ángulo de incidencia para colectores biaxiales, adimensional
$K_2$	=	modificador del ángulo de incidencia para colectores biaxiales, adimensionales
$L_{loc}$	=	longitud, grado oeste
$L_{st}$	=	meridiano estándar para la zona de tiempo local, grados oeste
LST	=	tiempo estándar local, horas decimales
LSTM	=	tiempo estándar meridiano local, grados oeste

AST	=	tiempo solar aparente, horas decimales
M	=	masa de aire, adimensional
$\dot{m}$	=	flujo de masa del fluido de transferencia de calor, kg/s (lbm/h)
$\dot{m}_e$	=	flujo de masa de aire corriente abajo, kg/s (lbm/h)
$\dot{m}_i$	=	flujo de masa de aire corriente arriba, kg/s (lbm/h)
$\dot{m}_L$	=	perdida de flujo de masa de aire, kg/s (lbm/h)
n	=	día del año que empieza en enero con $i = 1$
P	=	propiedad óptica, adimensional
$P_{f,s}$	=	presión estática del fluido de transferencia de calor a la salida del colector solar, Pa (lbf/pulg <sup>2</sup> )
$P_{f,i}$	=	presión estática del fluido de transferencia de calor a la entrada del colector solar, Pa (lbf/pulg <sup>2</sup> )
$\Delta_p$	=	caída de presión a lo largo del colector, Pa (lbf/pulg <sup>2</sup> )
$Q_{mi}$	=	flujo volumétrico de aire a la entrada del colector, m <sup>3</sup> /s (cfm)
$Q_s$	=	flujo de aire corregido a las condiciones normales, m <sup>3</sup> /s (pcm)
$q_u$	=	flujo de energía útil extraída del colector, W (Btu/h)
$t_a$	=	temperatura del aire ambiente, °C (°F)
$t_f$	=	temperatura promedio del fluido, °C (°F)
$t_{f,s}$	=	temperatura del fluido de transferencia de calor a la salida del colector, °C (°F)
$t_{f,s,T}$	=	temperatura del fluido de transferencia de calor que deja el colector en un tiempo determinado, °C (°F)
$t_{f,s,inicial}$	=	temperatura del fluido de transferencia del calor a la salida del colector, al comienzo del período de ensayo de la constante de tiempo, °C (°F)
$t_{f,i}$	=	temperatura del fluido de transferencia de calor que ingresa al colector, °C (°F)
$t_p$	=	temperatura media de la superficie absorbente para un colector sin concentración, °C (°F)
$t_c$	=	temperatura media de la superficie absorbente para un colector con concentración, °C (°F)
t	=	temperatura efectiva definida por Ecuación C-1, °C (°F)

$t_{HHL}$	=	temperatura efectiva para ensayo de pérdida a flujo de calor determinado, °C (°F)
$T$	=	tiempo, horas decimales o segundos
$T_1, T_2$	=	tiempo al principio y final de un periodo de ensayo, horas decimales o segundos
$\Delta t$	=	diferencia de temperatura, °C (°F)
$U_L$	=	coeficiente de pérdida de calor de un colector solar $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ (Btu/(h·pie <sup>2</sup> ·°F))
$W_n$	=	humedad relativa en la tobera, kg H <sub>2</sub> O/kg aire seco (lbm H <sub>2</sub> O/lbm aire seco)
$\alpha$	=	la absorptividad para la radiación solar de la superficie absorbente del colector, adimensional
$\gamma$	=	fracción de la radiación especular, reflejada desde el reflector o radiación refractada que es interceptada por el área receptora del colector solar, adimensional
$\theta$	=	ángulo de incidencia entre los rayos solares directos y la normal a la superficie del colector o a la apertura, grados
$\beta$	=	ángulo de la altitud solar, grados,
$\phi$	=	ángulo del azimut solar, grados,
$\eta_g$	=	eficiencia del colector basada en el área bruta del colector, %
$\lambda$	=	longitud de onda, $\mu m$ ,
$\lambda_i$	=	longitud de onda, específica $\mu m$ ,
$\Delta\lambda_i$	=	intervalo de la longitud de onda, $\mu m$ ,
$\rho$	=	reflectividad de una superficie reflectora a la radiación solar, adimensional
$\rho_\lambda$	=	reflectividad espectral de una superficie reflectora de radiación solar, adimensional
$\tau$	=	transmisividad de la cubierta del colector solar, adimensional
$(\tau\alpha)_e$	=	producto transmisividad absorptividad efectivo, adimensional
$(\tau\alpha)_{e,n}$	=	producto transmisividad absorptividad eficaz a incidencia normal, adimensional.
$\Omega$	=	el ángulo en Figura F.1
$\Gamma$	=	el ángulo en Figura F.1
$\psi$	=	el ángulo en Figura F.1

$\Sigma$  = el ángulo en Figura F.1

## 5. CLASIFICACIONES

**5.1 Tipos generales de colectores:** Los colectores solares pueden ser clasificados según sus características colectoras, la manera en la que están montados (es decir, estacionario o seguidores del sol), y el tipo de fluido de transferencia que emplean.

**5.1.1 Características colectoras:** Un colector sin concentración o plano es uno en el cual la superficie absorbente de la radiación solar es esencialmente plana y la apertura y el absorbente son similares en área y geometría.

Un colector de concentración es el que contiene generalmente reflectores u otro dispositivo óptico para concentrar la energía que ingresa a través de la apertura para incidir en un área absorbente de calor de superficie menor que ésta.

**5.1.2 Montaje:** Un colector solar puede montarse en una posición estacionaria con un azimut y ángulo de inclinación fijos (medidos desde la horizontal) o puede ser ajustable de modo que el ángulo de inclinación siga los cambios anuales en declinación solar; También puede diseñarse para seguir el sol en altitud y azimut (montaje altura azimut) o en su rotación diaria aparente alrededor de la tierra (montaje polar o ecuatorial).

**5.1.3 Tipo de fluido:** Un colector puede usar un líquido o un gas como medio de transferencia de calor.

**5.2 Localización del lugar de ensayo:** Son dadas todas las especificaciones técnicas para la orientación del colector, relativas a la radiación solar para localizar el sitio de ensayo en el Hemisferio Sur y las longitudes occidentales.

## 6. REQUISITOS

6.1 Se probarán colectores solares de acuerdo al conjunto de disposiciones presentadas en esta sección y en la sección 9.

6.1.1 Se prefieren los ensayos con módulos a escala completa. El tamaño del colector a ser probado será lo suficientemente grande como para que las características del comportamiento determinadas sean indicativas de aquéllas que ocurrirían cuando el colector es parte de un sistema instalado. Si el colector es modular y el ensayo se está realizando en un módulo, debe montarse y aislarse de tal manera que las pérdidas por la parte posterior y por los bordes sean características de aquéllas que ocurrirán durante el funcionamiento en un arreglo.

6.1.2 Para los ensayos a la intemperie para determinar eficiencia térmica, el colector se montará en una localización tal que no exista energía reflejada o rerradiada, de edificios circundantes o cualquier otra superficie en la vecindad de la posición de ensayo, significativa hacia el colector durante el periodo de ensayo. Se tendrá cuidado de realizar los ensayos en una localización de manera tal que se evite una elevada reflexión del piso. Si puede ocurrir una reflexión significativa, se harán provisiones para escudar al colector con el uso de un escudo no reflectivo. Además, se ubicará el banco de ensayos para que ninguna sombra alcance el colector por alguna obstrucción, en cualquier momento durante el período de ensayo.

6.1.3 El fluido de transferencia de calor usado en el colector solar durante el Ensayo será el mismo fluido recomendado por el fabricante del colector y será el mismo fluido usado a lo largo del ensayo completo y tendrá una dependencia de temperatura conocida, dadas por su densidad y calor específico en el rango de temperaturas del fluido durante el período de ensayo. El flujo de masa del fluido de transferencia de calor debe ser el mismo a lo largo de la secuencia de ensayo usada para determinar la curva de eficiencia térmica, constante de tiempo y modificadores del ángulo de incidencia para un colector dado.

Sin embargo, cuando el fabricante especifica un fluido de transferencia de calor muy viscoso (tal como aceite) para el fluido de transferencia de calor, tales fluidos pueden no ser prácticos de usar cuando se trabaja cerca de la temperatura ambiente. Por consiguiente, lo puede sustituir un fluido menos viscoso (base acuosa) para mediciones del ángulo incidente y de respuesta de tiempo, en las cuales las temperaturas de entrada del colector

pueden estar cerca de la temperatura ambiente y la temperatura de la salida puede cambiar rápidamente con el tiempo.

## 7. INSTRUMENTACIÓN

### 7.1 Medida de la radiación solar

**7.1.1 Radiómetros:** Para medir la radiación global de onda corta, tanto del sol como del cielo, se utiliza un piranómetro; y en cuanto a la medición de la componente normal directa de la radiación solar, se utiliza el pirheliómetro con seguimiento solar. Estos instrumentos deberán tener las características mínimas siguientes.

**7.1.1.1 Cambio de respuesta debido a la variación de la temperatura ambiente:** El cambio en la respuesta de los instrumentos durante los ensayos debido a las variaciones de la temperatura ambiente, deberá ser menor al  $\pm 1\%$ . Esta especificación debe ser perfeccionada utilizando la curva de la temperatura, determinada por los instrumentos correspondientes (Bibliografía A.25).

**7.1.1.2 Variación en la respuesta espectral:** Tanto el piranómetro como el pirheliómetro, deben tener una sensibilidad constante de  $\pm 2\%$ , sobre el rango del espectro desde 0,3 hasta 2,5 micrones.

**7.1.1.3 Respuesta no lineal:** A menos que la respuesta del piranómetro tenga una linealidad de  $\pm 1\%$  sobre el rango de radiación que existe durante el Ensayo, los piranómetros deben ser usados con una curva de calibración que relacione el rendimiento de la radiación con una exactitud de  $\pm 1\%$ .

**7.1.1.4 Constante de tiempo del piranómetro y pirheliómetro:** La constante de tiempo del piranómetro, definida como el tiempo requerido por el instrumento para lograr una lectura de  $1 - 1/e = 0,632$  de su lectura final después de un cambio brusco en la radiación solar, será menor a 5 segundos. La constante de tiempo para el pirheliómetro será menor a 25 segundos.

**7.1.1.5 Variación de respuesta con el ángulo de incidencia:** Idealmente la respuesta del piranómetro es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de la radiación solar directa y es constante a todos los ángulos del azimut. A menos que la desviación del piranómetro de una respuesta del coseno exacto, sea menor de  $\pm 1\%$  para los ángulos incidentes encontrados durante los ensayos, el piranómetro deberá ser utilizado con la última curva de calibración, que relaciona la respuesta al ángulo de incidencia con una exactitud dentro de  $\pm 1\%$ .

**7.1.1.6 Variaciones de respuesta con la inclinación:** A menos que la variación de la respuesta del piranómetro sea menor al  $\pm 1\%$ , para un rango de inclinaciones que va desde la horizontal hasta la inclinación más grande encontrada durante el (los) ensayo(s), el piranómetro deberá utilizarse con una curva de calibración que relacione la respuesta al ángulo de inclinación con una exactitud dentro de  $\pm 1\%$ .

**7.1.1.7 Precauciones para los efectos del gradiente de temperatura:** El instrumento utilizado durante el (los) ensayo(s), deberá ser colocado en su posición de prueba y deberá permitirse su calibración, por lo menos 30 minutos antes que comience la toma de datos.

**7.1.2 Intervalo de calibración:** El piranómetro y el pirheliómetro deberán ser calibrados dentro de los 12 meses que preceden al ensayo del colector, contrastándolos con otros, de reconocida incertidumbre relativa de calibración, frente a los estándares de medición aceptados. Cualquier cambio mayor al  $\pm 1\%$  en un periodo de un año, deberá tener como resultado una calibración más frecuente o el reemplazo del instrumento. Si el instrumento se daña en forma significativa, deberá ser calibrado o reemplazado. Todas las calibraciones deberán ser realizadas teniendo en cuenta la Escala de Referencia Mundial de Radiómetros –WRR (Bibliografía A.26).

## 7.2 Medición de temperatura

**7.2.1 Métodos:** Las medidas de temperatura deberán realizarse de acuerdo con la Guía de Medidas Estándares (ASHRAE Standard 41.1 - 1986 -RA 91).

**7.2.2 Exactitud y precisión:** La exactitud y precisión de los instrumentos, obliga a que sus dispositivos de lectura asociados, estén dentro de los límites siguientes:

	<b>Exactitud</b>	<b>Precisión**</b>
Temperatura	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 0,9 \text{ }^\circ\text{F})$	$\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 0,36 \text{ }^\circ\text{F})$
Diferencia de Temperatura	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 0,18 \text{ }^\circ\text{F})$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 0,18 \text{ }^\circ\text{F})$

\* Capacidad del instrumento para indicar el valor exacto de la magnitud medida.

\*\* Cercanía entre las medidas repetidas de la misma cantidad física.

**7.2.3 Constante de tiempo:** En la mayoría de casos de ensayos de condición casi estable, el tiempo de respuesta de los sensores de temperatura es de preocupación secundaria. Los casos en los cuales éste puede ser importante se presentan durante el tiempo de tránsito entre las medidas constantes y el ángulo de incidencia modificado por la medida del ángulo más alto utilizando el Método 2 que aparece en la sección 9.3.4.1. Por experiencia, se consideran más adecuadas las termocuplas y las termopilas con tiempos constantes menores a 1 segundo; y los termómetros de resistencia, con tiempos constantes menores a 10 segundos.

**7.2.4 Medición de la diferencia de temperatura del colector solar:** Para la medida de la diferencia de temperaturas con dispositivos, estos deben ser calibrados en el rango de temperaturas de operación y la diferencia de temperaturas encontradas en el ensayo. Los dispositivos recomendados para medir la diferencia de temperatura del fluido a lo largo del colector solar son:

- a. Una termopila tipo T
- b. Termómetros de resistencia de precisión, separados o conectados en dos brazos al circuito del puente
- c. Termómetros de precisión
- d. Termistores de precisión, separados o conectados en dos brazos al circuito del puente
- e. Pareja de Termocuplas tipo T
- f. Otros dispositivos iguales o mejores que los listados anteriormente.

### 7.3 Medidas del flujo de masa del colector

**7.3.1 De flujo líquido:** La exactitud del rango de la medida del flujo de líquido, debe ser igual o mejor que  $\pm 1,0 \%$ . El valor se mide en unidades de masa por unidad de tiempo.

**7.3.2 De flujo de aire:** Cuando el aire es usado como el fluido de transferencia, el flujo de masa será determinado como se ha descrito en la sección 8, utilizando instrumentación para mezclar y probar como se describió en ASHRAE Standard 41.1 - (RA 91). La exactitud de medida del rango del flujo de aire, corriente arriba y corriente abajo del colector, debe ser igual o mejor que  $\pm 1,5 \%$  del valor medido en unidades de masa por unidades de tiempo.

### 7.4 Instrumentación / Registradores de datos

**7.4.1 Divisiones en instrumentos de escala pequeña:** En ningún caso la división de las escalas más pequeñas del instrumento o sistema de instrumentos, excederá dos veces la precisión especificada. Por ejemplo, si la precisión especificada es  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,18^{\circ}\text{F}$ ), la escala de división más pequeña, no debería exceder  $0,2^{\circ}\text{C}$  ( $0,36^{\circ}\text{F}$ ).

**7.4.2 Registrador de datos:** Los registradores análogos y digitales utilizados deben tener una precisión mayor o igual que  $\pm 0,5 \%$  de la escala completa de lectura y tener un tiempo constante de 1 segundo o menos. La señal máxima deberá estar entre 50 % y 100 % de la escala completa.

**7.4.3 Integradores.** Los integradores digitales técnicos y electrónicos deben tener una exactitud igual o mayor que  $\pm 1,0 \%$  del valor medido.

**7.4.4 Impedancia de entrada.** La impedancia de entrada de los registradores deberá ser mayor a 1000 veces la impedancia de los sensores o un valor de 10 megaohms, cualquiera que sea el más alto.

## 7.5 Medidas de presión

**7.5.1 Medidas de presión en colectores de aire.** La caída de presión estática a través de un colector de aire y la presión estática de la corriente arriba y corriente abajo del colector, se determinará con instrumentos que tienen una exactitud de  $\pm 2,5$  Pa (0,010 pulg. H<sub>2</sub>O).

**7.5.2 Medidas de presión en colectores de agua:** La presión de la entrada al colector y el cambio de presión a lo largo del colector, debe ser medida con un dispositivo que tiene una exactitud de  $\pm 3,5$  kPa ( $\pm 0,5$  psi).

**7.6 Tiempo empleado:** Las mediciones del tiempo transcurrido deberán ser realizadas con una precisión de  $\pm 0,20$  %.

**7.7 Velocidad del viento:** La velocidad del viento deberá ser medida con un instrumento y su dispositivo de salida auxiliar para determinar la velocidad integrada promedio del viento para cada periodo de ensayo, con una precisión de  $\pm 0,8$  m/s ( $\pm 1,8$  mph).

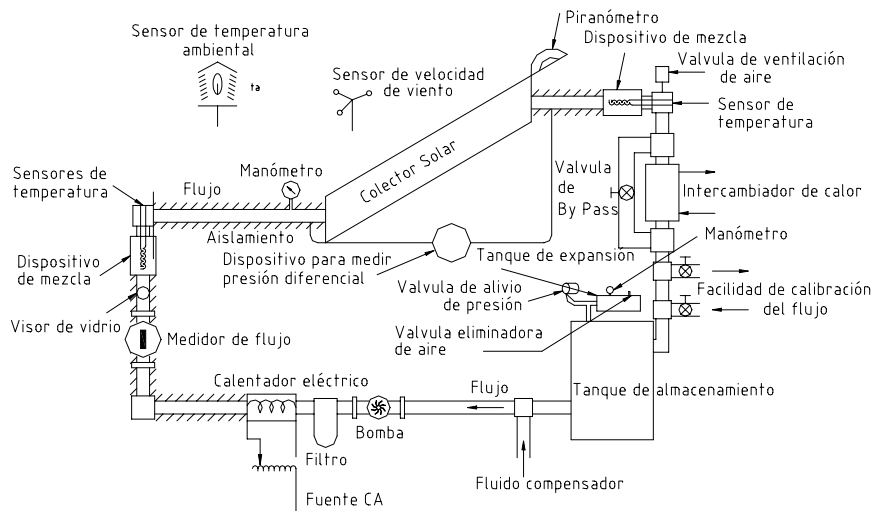
**7.8 Medida de humedad:** Cuando se usa aire como fluido de transferencia de calor, su contenido de humedad es necesario para la determinación correcta de la densidad y calor específico del aire. La humedad relativa  $W_n$  debe ser medida con una aproximación de  $\pm 0,005$  (kg de agua / kg de aire seco) (lbm de agua H<sub>2</sub>O/lb aire seco).

La medida de humedad debe hacerse de acuerdo con la norma ASHRAE 41.6.

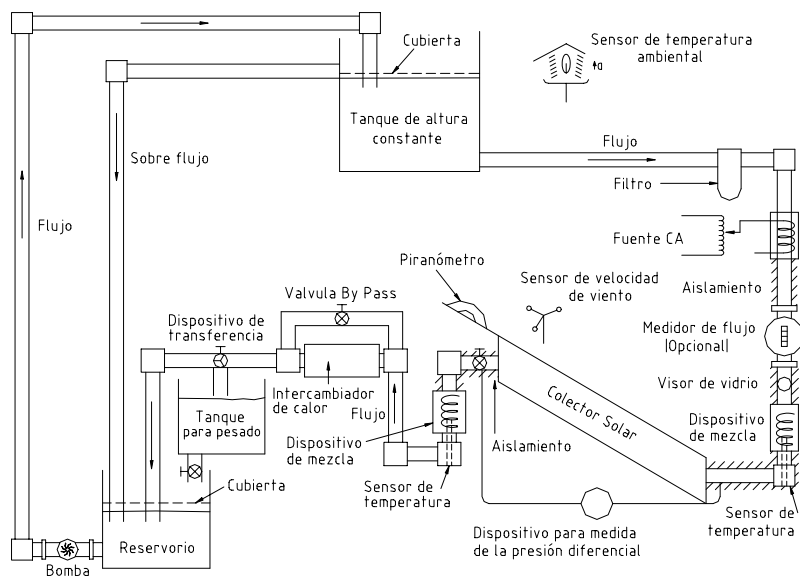
## 8. APARATOS Y MÉTODOS DE ENSAYO

**8.1 Líquido como fluido de transferencia:** Las figuras 1, 2 y 3 muestran configuraciones de ensayo para probar colectores solares empleando líquido como fluido de transferencia, son representativas en vez de exactas y no se dibujan a escala. Cualquiera de estas configuraciones es aceptable, con tal que las condiciones de ensayo especificadas aquí, sean satisfechas. Cuando el fluido de transferencia en circulación es susceptible a las

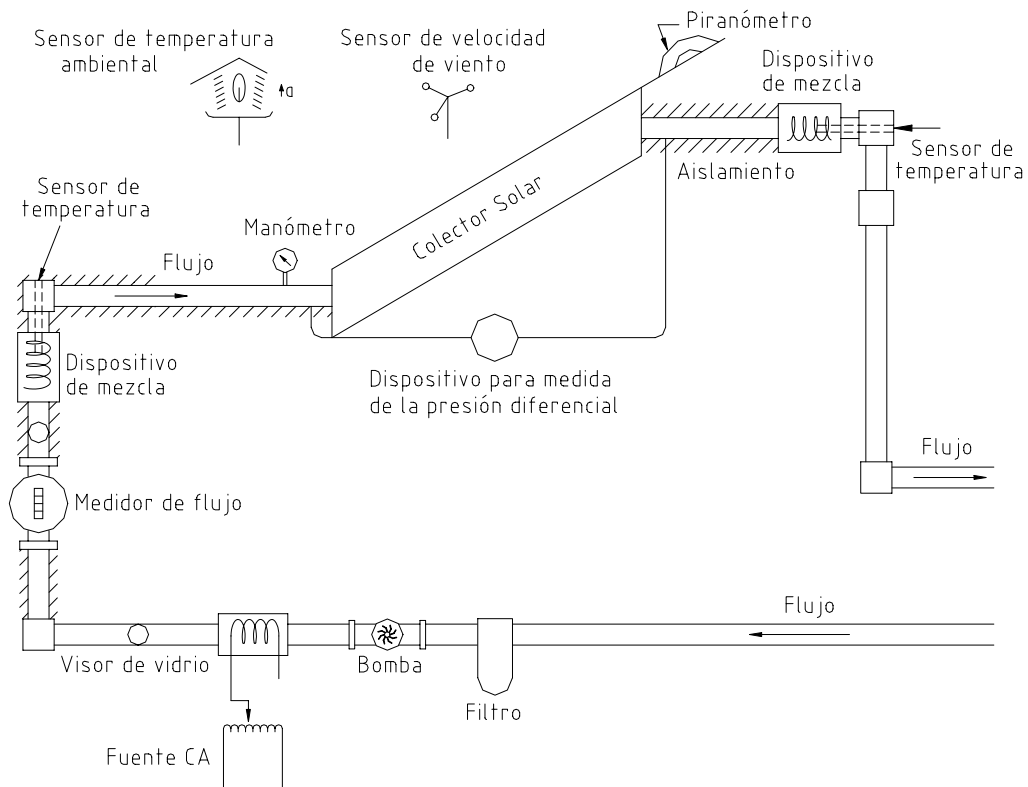
pérdidas por evaporación (véase Figura 2), se tendrá cuidado para asegurar que las propiedades del fluido no cambien.



**FIGURA 1 – Configuración para ensayo de un colector solar de circuito cerrado cuando el fluido de transferencia de calor es un líquido**



**FIGURA 2- Configuración para ensayo de un colector en circuito abierto cuando el fluido de transferencia de calor es un líquido**



**FIGURA 3 – Configuración para ensayo en circuito abierto cuando el fluido es suministrado continuamente**

**8.1.1 Colector solar:** Los colectores solares deben ser montados en forma aislada, en el banco de ensayos y de una forma tal, que permita un flujo de aire irrestricto alrededor de toda su superficie (vea también sección 6.1).

**8.1.2 Temperatura ambiente:** Las mediciones de las temperaturas ambientales, deben ser representativas de las condiciones de la temperatura ambiente que existe alrededor del colector durante el ensayo. Cualquiera de los dos métodos siguientes es aceptable para efectuarlas. Método (1): el sensor de temperatura ambiente debe ser colocado dentro de una caja ventilada con su base a 1,25 m (4,1 pies) sobre la tierra, y con su puerta mirando al sur, para que los rayos del sol no caigan sobre el sensor cuando se abra la puerta. La caja del instrumento se pintará de blanco por fuera y no debe estar cerca de ninguna obstrucción a 2 veces la altura de la misma obstrucción. (por ejemplo: árboles, cercos, construcciones, etc.). Método (2): el sensor de temperatura ambiente se colocará en una cápsula al vacío, localizada al menos a 150 mm (6 pulgadas) detrás del colector bajo ensayo y protegida de la radiación solar directa (vea Norma ASHRAE 41.1 - (RA 91)).

**8.1.3 Radiación solar:** Las medidas de la radiación solar deben ser reportadas en función del tiempo solar aparente para el lugar de ensayo (véase Anexo B).

El piranómetro debe cumplir los requisitos especificados en la sección 7.1; y debe estar montado de forma tal que su sensor esté en el mismo plano del plano de apertura del colector. Este no debe causar en ningún momento sombras sobre la apertura del colector. No debe ser montado de modo que reciba un porcentaje de la radiación terrestre que es desaprovechada cuando es recibida por el colector. Por el contrario, debe ser montado adyacente a la mitad superior de la periferia del colector o en su parte superior central y orientado para que las salidas de los colectores estén localizados al sur de la superficie receptora, resguardados del sol para minimizar el calentamiento de las conexiones eléctricas.

Debe tenerse cuidado también en minimizar la energía reflejada o reirradiada del colector solar al piranómetro. Algunos piranómetros son suministrados con escudos. Cuando no ocurre así son susceptibles de error, debido a las reflexiones de radiación que se originan debajo del plano del sensor.

El componente normal de la radiación solar directa debe ser medido utilizando un pirheliómetro con seguimiento solar, que cumpla las especificaciones dadas en la sección 7.1.

**8.1.4 Medición de la diferencia de temperaturas a lo largo del colector solar:** La diferencia de temperatura del fluido de transferencia entre la entrada y la salida del colector solar debe ser medida de acuerdo con lo indicado en la sección 7.2.

Para minimizar los errores en la medida de temperatura cada sonda se localizará tan cerca como sea posible del ingreso o salida del colector solar debiendo esta ser colocada dentro de un dispositivo mezclador, tal como se muestra en las figuras 1, 2 y 3. Además, el conducto o tubería entre el dispositivo mezclador y el colector debe estar aislado de modo tal, que el intercambio de calor entre este y el ambiente, no cause un cambio de temperatura, para cualquier periodo de ensayo, mayor a 0,05 °C (0,09 °F) entre cada dispositivo mezclador y el colector. El Anexo C contiene un procedimiento para evaluar las pérdidas de calor del conducto y corregirla.

**8.1.5 Medidas adicionales de temperatura:** La temperatura del fluido de transferencia en cada una de las dos posiciones citadas arriba, podrá ser medida colocando sensores apropiados en los dispositivos de mezcla (salvo el caso donde se emplean

termómetros de precisión para determinar diferencias de temperatura). Ver Norma ASHRAE 41.1 (RA91).

**8.1.6 Presión en el circuito de ensayo y a través del colector solar:** Deben tomarse provisiones para determinar la presión manométrica del fluido de transferencia entrante y la caída de presión a lo largo del colector solar. Para los requisitos de exactitud, vea sección 7.5. La presión se medirá usando agujeros de presión estáticos taladrados. Los bordes de los agujeros en la superficie interior de la tubería estarán libres de rebabas. El diámetro del agujero no excederá 40 % del espesor de la pared o 1,6 mm (1/16 pulg.) Los agujeros de presión deben estar colocados entre la entrada y salida del colector y la sección correspondiente de medición de temperatura. Si la entrada y salida están a elevaciones diferentes cuando se hacen las medidas debe hacerse entonces una corrección para la carga estática.

**8.1.7 Dispositivo para acondicionar el líquido:** El dispositivo acondicionador controlará en todo momento, durante el periodo de prueba, la temperatura del fluido a la entrada del colector dentro de  $\pm 0,05$  °C ( $\pm 0,09$  °F) del valor de ensayo deseado. Como se muestra en la Figura 1, en el caso de un banco de prueba de circuito cerrado se requiere un intercambiador de calor para enfriar el fluido de transferencia y un calentador eléctrico de resistencia, ajustable en línea, para controlar la temperatura de entrada a los valores prescritos en los ensayos.

Se recomienda también un intercambiador de calor al emplear un banco de prueba de circuito abierto, similar al de la Figura 2, para enfriar el líquido a la salida y minimizar pérdidas por evaporación, disminuyendo de este modo errores de pesaje en la determinación gravimétrica del flujo de masa. La Figura 3 muestra un sistema de circuito abierto en el que el fluido no recircula.

**8.1.8 Equipo adicional.** Se proporcionará una bomba y otros dispositivos para ajustar el flujo del fluido de transferencia de calor a las situaciones relativas mostradas en las Figuras 1, 2 y 3. Dependiendo del diseño del banco de prueba, para un control apropiado, puede requerirse una válvula reguladora adicional en la línea que precede al colector solar. Cuando se utiliza la configuración de circuito abierto que se aprecia en las Figuras 2 y 3, debe emplearse una válvula reguladora en la línea de salida, tan cerca como sea posible al colector. Cuando se estén variando las temperaturas de entrada y/o velocidades de flujo esta válvula es necesaria para controlar la presión interna (absoluta) del colector, evitando una posible ebullición del fluido.

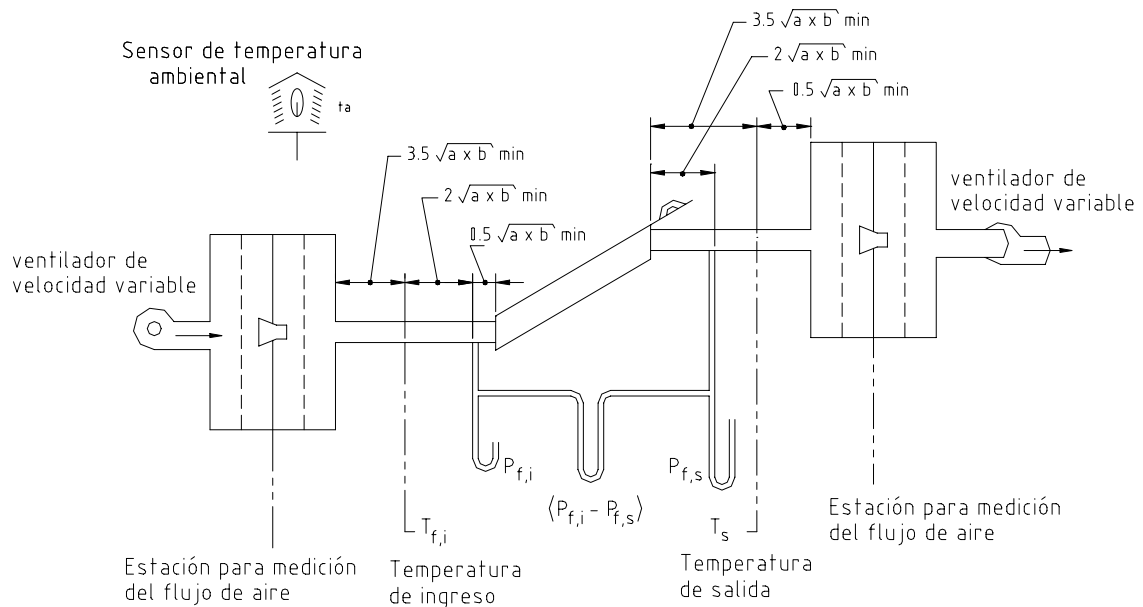
En la configuración de prueba de circuito cerrado, como se muestra en la Figura 1, deben instalarse: un tanque de almacenamiento, uno de expansión, una válvula de ventilación y una válvula de alivio de presión, para estabilizar el flujo y permitir al fluido de transferencia expandirse y contraerse libremente en el sistema. Para la prueba de circuito cerrado dependiendo del diseño, a veces se añade un tanque de expansión y una válvula de alivio entre la bomba y el colector.

Deben instalarse filtros y un visor de vidrio dentro del aparato, para asegurar que el paso del fluido a través del colector esté libre de contaminantes, incluso de las burbujas de aire y de otros gases no condensables.

**8.1.9 Ensayo al exterior, condiciones del viento:** La medición de velocidad se hará muy cerca del colector, a una altura que corresponde a la altura media del colector y a una ubicación sin obstáculos al viento y de modo que el sensor no produzca una sombra sobre el colector durante las pruebas. Para cada periodo de prueba se determinará también la dirección del viento.

**8.2 Aire como fluido de transferencia:** La configuración de ensayo recomendada para el colector solar que usa aire como fluido de transferencia es un sistema de circuito abierto, como el mostrado en la Figura 4. Se harán mediciones de flujo, tanto corriente arriba como corriente abajo del colector. Se recomienda que el soplador se localice corriente abajo del colector para producir una presión manométrica negativa en el mismo. En caso que el colector sea usado en una condición presurizada, el soplador puede ponerse corriente arriba.

Prohibido su reproducción total o parcial



**FIGURA 4 – Configuración de ensayo para colectores solares cuando el fluido de transferencia es aire**

El aire usado en el ensayo del colector no deberá introducir errores en la medición del comportamiento debido a mezclas de aire de niveles de humedad absoluta diferentes, proveniente de fugas en el colector. Configuraciones que permitan mezclar aire de diferente humedad relativa debido a fugas en el colector tendrán dispositivos para medir los cambios en los volúmenes relativos de aire y vapor de agua, para que puedan tenerse en cuenta los efectos en la determinación de la eficiencia del colector. Para colectores ensayados bajo presión negativa, la fuente recomendada de aire es la del ambiente introducida en un punto cercano al colector que se ensaya.

Otras configuraciones de ensayo son aceptables de modo que el flujo sea medido tanto corriente arriba como corriente debajo de tal manera que las condiciones de ensayo especificadas puedan ser satisfechas.

**8.2.1 Colector solar:** (véase sección 8.1.1).

**8.2.2 Temperatura ambiente:** (véase sección 8.1.2).

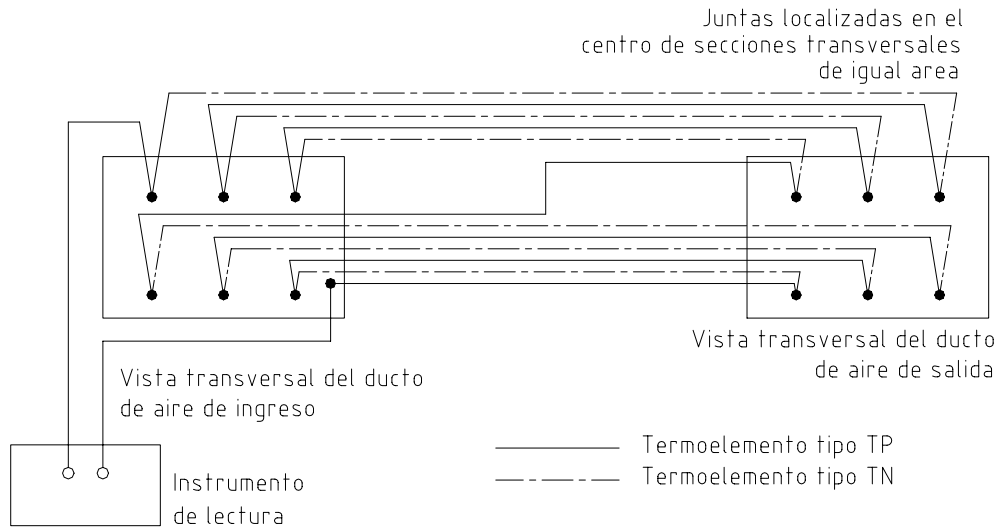
**8.2.3 Radiación solar:** (véase sección 8.1.3).

**8.2.4 Ductos de ensayo:** Los ductos de aire entre el colector solar y la estación de medición de presión, corriente arriba y corriente abajo del colector, serán de la misma sección transversal. El área de la sección transversal de estos conductos en la sección de medición de presión será igual al área de entrada o salida del colector, cualquiera sea el más pequeño.

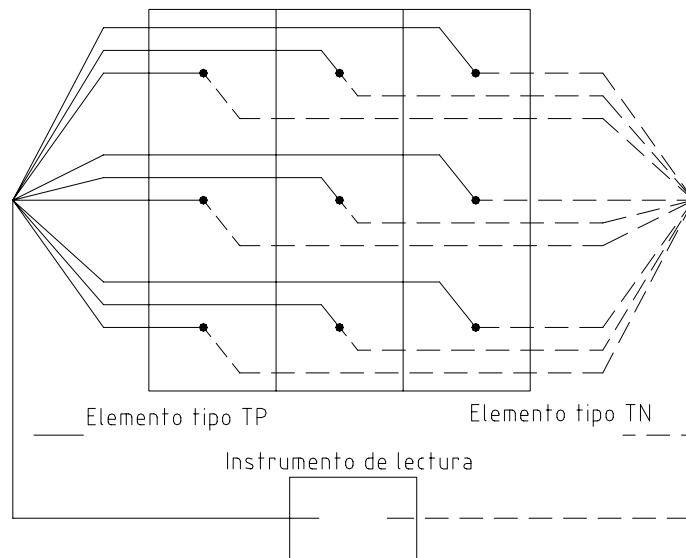
**8.2.5 Medida de la diferencia de temperaturas a través del colector:** Si se usan termocuplas para medir las temperaturas, se fabricarán mallas de termocuplas localizadas como se muestra en Figura 5. Habrá un mínimo de ocho termocuplas en una malla en el conducto de ingreso y salida del ducto de ensayo. Las termocuplas se localizarán en el centro de áreas concéntricas, iguales conforme se ilustra en las Figuras 5a-5c.

Durante todas las pruebas, la variación espacial de temperaturas en una determinada sección recta del aire a la entrada y salida de los ductos de ensayo deberá estar a menos de  $\pm 0,5$  °C ( $\pm 0,9$  °F) en la ubicación de los sensores de temperatura. La variación se verificará antes del ensayo y se utilizarán los instrumentos y procedimientos descritos en la Norma ASHRAE 41.1 (RA 91). Si la variación excede los límites anteriores se instalarán dispositivos de mezcla para lograr este grado de uniformidad de temperatura. En el Anexo A, Bibliografía 27, se discute sobre el posicionamiento y comportamiento de varios tipos de mezcladores de aire. Los sensores de temperatura deben localizarse tan cerca como sea posible de la entrada y salida del colector solar.

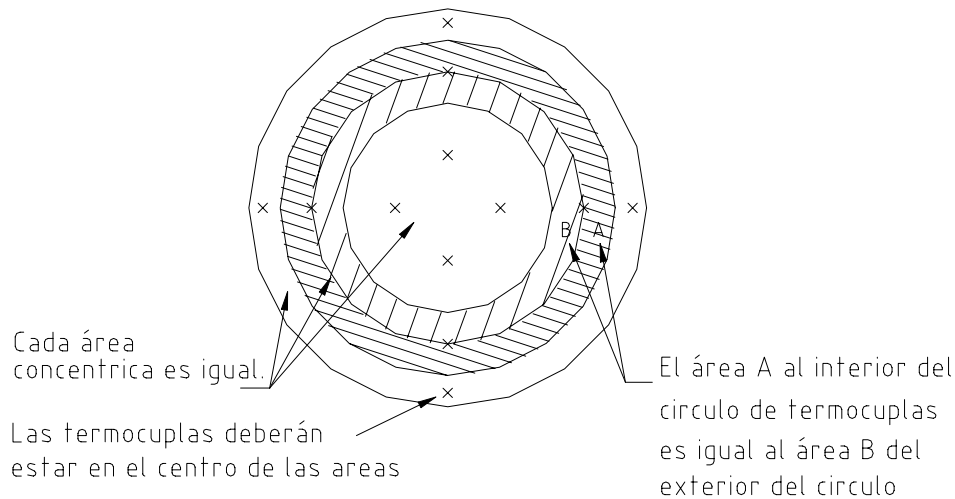
Se aislarán los ductos de entrada y salida de aire de tal manera que la pérdida o ganancia de calor calculado, del aire del ambiente no causaría un cambio de temperatura de más de 0,3 °C (0,5 °F) entre las ubicaciones de los medidores de temperatura y el colector para cualquier periodo de ensayo. El Anexo C contiene un procedimiento para evaluar las pérdidas de calor en el ducto y las correcciones para ellas.



**FIGURA 5a - Esquema del arreglo de termopilas utilizados para medir la diferencia de temperaturas a lo largo del colector solar**



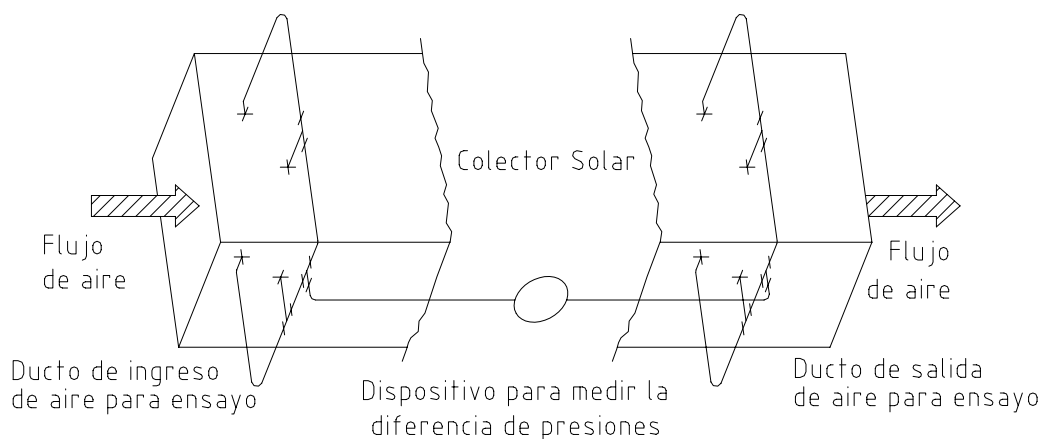
**FIGURA 5b – Esquema de malla de termocuplas de la misma área. Un mínimo de 8 juntas deberán localizarse en el centro de las secciones transversales de la misma área y conectarse en paralelo para obtener una lectura promedio. El conjunto de todas las termocuplas deben tener cápsulas de la misma longitud.**



**FIGURA 5c – Distribución de termocuplas en un ducto circular para una malla de igual sección transversal**

**8.2.6 Sensores de medición de temperatura:** Se usarán sensores y dispositivos de lectura que reúnan los requisitos de exactitud y precisión indicados en la sección 7.2, para medir las temperaturas en las ubicaciones de los ductos de aire a la entrada y salida mostrados en Figura 4, y de acuerdo con la Norma ASHRAE 41.1 (RA 91). Es requisito cubrir los sensores de temperatura para minimizar efectos de la radiación.

**8.2.7 Presión en el circuito de ensayo y a través del colector solar:** Las estaciones de medición de presión deben tener cuatro agujeros externos con manifold de presión como el mostrado en la Figura 6.



**FIGURA 6 – Representación esquemática de la medición de la caída de presión a través de un colector solar cuando el fluido de transferencia de calor es aire**

Las presiones en el circuito de prueba y la caída de presión por el colector solar se medirán usando agujeros de toma de presión estáticos y un manómetro o un transductor de presión diferencial. Los bordes de los agujeros en la superficie interior del conducto estarán libres de rebabas. El diámetro del agujero no excederá en 40 % el espesor de la pared o 1,6 mm (1/16 pulgada). Se harán provisiones para determinar la presión absoluta del fluido de transferencia entrante. Para los requisitos de exactitud, véase sección 7.5.

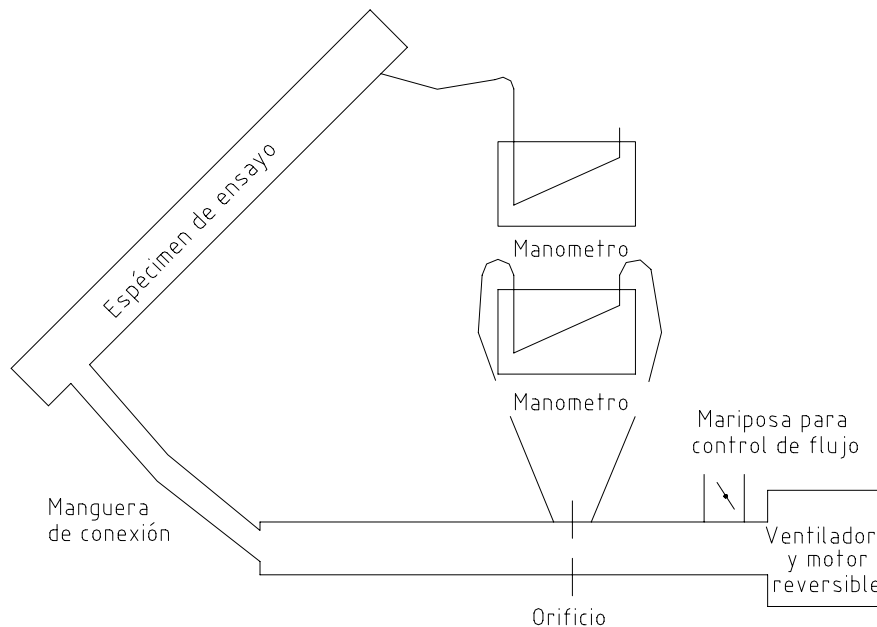
Se proporcionarán estaciones de medición corriente arriba y corriente abajo del colector como se ilustra en la Figura 4.

Para colectores ensayados bajo presión manométrica negativa, la presión manométrica a la entrada del colector, estará debajo de la presión atmosférica por lo menos 124 Pa (0,5 iwg) mínimo o la máxima presión de operación aceptable especificada por el fabricante, cualquiera que sea más pequeña. Para colectores probados bajo presión positiva, la presión de la medida a la descarga del colector será 124 Pa (+ 0,5 iwg) la mínima presión de operación aceptable especificada por el fabricante, cualquiera que sea más pequeña.

**8.2.8 Dispositivo de ensayo para pérdidas de aire:** Las pérdidas de aire debidas al circuito del ensayo pueden tener un efecto significativo en los resultados cuando se ensaya un colector. Las pérdidas de aire del circuito de ensayo serán minimizadas sellando todas las juntas, excepto aquéllas que son parte del colector, o el montaje del colector del fabricante. Las pérdidas de aire del circuito de ensayo, excluyendo la del colector será

menos de 0,5 % del flujo de operación recomendado por el fabricante o 0,5 pie<sup>3</sup>/min, cualquiera que sea el mayor, a 249 Pa (1 iwg) y que será determinado por un ensayo de pérdidas de aire estático (véase sección 9.7). La porción del ducto del circuito que requiere el ensayo incluirá todas las secciones del ducto de trabajo que contienen estaciones de medición de temperatura - presión -, o flujo usadas para medir el comportamiento del colector y accesorios/ductos de transición usados para el montaje del colector. Esto incluye el conducto de entrada antes de la estación de medición del flujo al colector y el conducto de salida del punto de descarga de colector a la salida de la estación de medición de flujo. Las secciones aplicables del circuito de ensayo pueden ser desoldada y ensayada separadamente o conjuntamente para determinar la pérdida de aire.

El método para medir la pérdida de aire puede utilizar equipos o dispositivos que permitirán la determinación de la verdadera pérdida volumétrica con una exactitud de  $\pm 3\%$ . El dispositivo de ensayo para medir las pérdidas recomendadas se muestra en la Figura 7. Este dispositivo utiliza un orificio o boquilla montada en una sección recta de cañería, un motor y ventilador, y un regulador de tiro de flujo. Se instalan cánulas de toma de presión en cualquier lado del orificio y se conectan a un manómetro para la medida del flujo. La sección de la cañería recta que contiene el orificio o la boquilla debe construirse de acuerdo con ASHRAE Standard 41.7 (RA 91) .



**FIGURA 7 – Esquema del dispositivo utilizado para medir la pérdida de aire en los colectores de aire**

**8.2.9 Dispositivo acondicionador de aire:** El dispositivo acondicionador controlará la temperatura de bulbo seco del medio de transferencia que entra al colector solar, dentro de  $\pm 1$  °C ( $\pm 1,8$  °F) del valor de ensayo deseado, en todo momento durante el periodo de ensayo. Se seleccionarán su capacidad de calentamiento y de enfriamiento para que la temperatura de bulbo seco del aire que ingresa al dispositivo acondicionador pueda elevarse o bajarse a la cantidad requerida para satisfacer las condiciones del ensayo aplicables a la sección 9.

**8.2.10 Contenido de humedad:** Cuando el aire es el fluido de transferencia y el panel de prueba se opera a una presión negativa, el contenido de humedad del fluido de prueba debe ser igual al contenido de humedad del aire que rodea al panel de prueba.

**8.3 Ensayo bajo techo con un simulador de radiación solar:** Para determinar el comportamiento térmico en estado estacionario de un colector solar bajo condiciones controladas de viento y temperatura ambiente puede utilizarse un simulador solar en lugar del ensayo al aire libre. Un simulador típico usado para probar el comportamiento térmico de un colector solar se describe en el Anexo A, Bibliografía 28.

Los simuladores solares empleados en los procedimientos de ensayo tendrán las características mínimas siguientes y se usarán de acuerdo con las pautas y limitaciones nombradas.

**8.3.1 Calidades especiales:** El simulador proporcionará una distribución espectral que replique razonablemente la luz natural del sol, definido por el espectro solar de una masa aérea estándar de 1,5. Este espectro estándar se da en la ASTM E-892.

El valor espectral del producto transmisividad por absorptividad a incidencias normales o cualquier otro producto de propiedades ópticas que caracterizan al colector bajo ensayo, calculado usando el espectro del simulador solar moderado, no diferirá por más de 3 % del valor del producto de la transmisividad por absorptividad calculada usando el espectro normal. Las propiedades ópticas espectrales pertinentes serán proporcionadas por el fabricante del colector bajo ensayo. En el Anexo D se presenta un método de cálculo de valores espectrales.

La medida de las calidades espectrales del simulador solar estará en el plano del colector encima del rango de la longitud de onda de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $2,6 \mu\text{m}$  y se determinará en  $0,1 \mu\text{m}$  o los anchos de banda más pequeños.

Se obtendrán medidas espectrales en el simulador solar y se informarán cada 500 horas (por lo menos) de funcionamiento del simulador. Para cierto tipo de lámparas, como las de diseño halide, se recomienda que la determinación espectral inicial sea realizada después que las lámparas han atravesado su periodo de precalentamiento. La cantidad de energía térmica infrarroja (por encima de  $3,5 \mu\text{m}$ ) en el plano del colector se medirá adecuadamente y se reportará (véase sección 8.3.7).

**8.3.2 Mediciones del ensayo y uniformidad de radiación:** La radiación solar simulada se medirá en el plano del colector solar ensayado. El plano de Ensayo se tomará como la cubierta frontal del colector sin concentración de vidrio, o el plano de apertura de un colector de concentración.

Desde que la intensidad de la radiación solar simulada normalmente varía un poco con la apertura del colector, el valor de la radiación sobre el plano de ensayo será representativo del promedio de la medida de la radiación tomada sobre malla rectangular con espaciamiento máximo de 15 cm (6 pulg.). El instrumento utilizado para medir la radiación en el plano de ensayo será equivalente al especificado para ensayos al aire libre u otro instrumento calibrado en el simulador de radiación solar contra dicho instrumento. La uniformidad de la radiación será tal que la medida más alta y más baja de valores de radiación no se desviará del valor medio por más de  $\pm 10 \%$ . También, las variaciones de la radiación pueden ocurrir durante el intervalo de ensayo debido a la inestabilidad del suministro eléctrico y cambios en la salida de la lámpara con la temperatura y tiempo de funcionamiento. El valor medio de la radiación no variará por más de  $\pm 3 \%$  en el periodo de ensayo. El valor de la radiación reportado y usado en el cálculo del comportamiento térmico será representativo del promedio de los valores experimentados, durante el periodo del ensayo.

**8.3.3 Colimado:** Para los colectores sin concentración típicos, el colimado será tal que por lo menos 90 % de la energía recibida en cualquier punto en el plano del colector ensayado provendrá desde una región del simulador solar comprendida dentro de un ángulo subtendido de  $20^\circ$  o menos, cuando se ve desde el punto del colector. Esta restricción limita el uso de simuladores a colectores concentradores con proporciones de concentración menores de 3:1. Sin embargo, un grado más alto de colimación puede requerirse para ciertos colectores de concentración, particularmente aquellos con proporciones de concentración más altas (cerca de 3:1). Para estos casos, debe demostrarse que hay suficiente colimación relativa al colector. Esto puede ser demostrado con correlaciones de los ensayos bajo techo y al aire libre.

**8.3.4 Flujo de aire a través de colector(es) en ensayo bajo techo:** Se usarán ventiladores u otros medios para establecer un flujo de aire substancialmente uniforme a través del colector durante los períodos de ensayos previos y ensayos reales. La temperatura del flujo de aire estará dentro de  $\pm 1$  °C (1,8 °F) de la temperatura del ambiente medida como se prescribe en la sección 8.1.2. La dirección del flujo de aire debe originarse en un plano horizontal y dirigirse hacia el colector dentro de 30° del plano vertical que contiene la línea central del simulador de radiación. Este viento simulado se mantendrá a una velocidad media de 3,5 ( $\pm 0,5$ ) m/s [7,6 ( $\pm 1,0$ ) mph] y se medirá antes y después de cada periodo de ensayo en un plano vertical normal a la dirección de la corriente libre, 150 mm (6 pulgadas) de la cubierta exterior del colector. La medida de la velocidad del aire debe ser un valor medio, medido sobre al menos 1 m<sup>2</sup> al centro de la apertura con una desuniformidad de no más de 10 % del valor medio.

**8.3.5 Variaciones de temperatura de ambiente:** El rango aceptable de la temperatura del ambiente para un ensayo con el simulador solar estará entre 15 °C (59 °F) y 30 °C (86 °F). Durante cualquier periodo de prueba, la temperatura del ambiente no variará por más de  $\pm 1,5$  °C ( $\pm 2,7$  °F).

**8.3.6 Ángulo de inclinación:** El ángulo de inclinación del colector durante el Ensayo estará entre 30° y 60° a menos que exista otra especificación dada por el fabricante del colector. El ángulo de inclinación permanecerá constante a lo largo del periodo de ensayo.

**8.3.7 Longitud de onda de la radiación:** Se medirá la radiación infrarroja (térmica) entre 3,5  $\mu\text{m}$  y 50  $\mu\text{m}$  en el plano de la apertura del colector con un pirgeometro u otro instrumento equivalente. Se medirá la radiación infrarroja durante el periodo de ensayo, en el plano de la apertura del colector, y no excederá aquella del cuerpo negro teórico a temperatura del ambiente en más de 50 W/m<sup>2</sup> (16 Btu/(h·ft<sup>2</sup>)).

## 9. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO Y CÁLCULOS

### 9.1 General

El comportamiento térmico de un colector solar es determinado en parte, mediante valores obtenidos de eficiencia instantánea para una combinación de valores de radiación incidente, temperatura ambiente, y temperatura de ingreso del fluido. Esto requiere mediciones

experimentales del valor de la radiación incidente sobre el colector solar, así como del flujo de la energía que se añade al fluido de transferencia, conforme este atraviesa al colector bajo condiciones estacionarias o cuasi estacionarias. Además, se realizan pruebas para determinar las características del tiempo de respuesta de los colectores y como varía la eficiencia térmica en estado estacionario con ángulos de incidencia entre la radiación directa y la normal al área de apertura del colector, para diversas posiciones del sol y del colector.

Los procedimientos descritos en este documento han sido desarrollados para controlar las condiciones de ensayo, de modo que puedan obtenerse curvas de eficiencia bien definidas con un mínimo de dispersión de datos.

## 9.2 Ecuaciones básicas del comportamiento

### 9.2.1 Eficiencia térmica

**9.2.1.1 Colectores para calentar líquidos:** El comportamiento de un colector solar sin concentración, que opera bajo condiciones de estado estacionario, puede ser exitosamente descrito mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{q_u}{A_a} &= G_t F_R (\tau\alpha)_s - F_R U_L (t_{f,i} - t_a) \\ &= \frac{\dot{m}}{A_a} C_p (t_{f,s} - t_{f,i}) \end{aligned} \quad (9.1)$$

Una ecuación muy similar puede usarse para describir el comportamiento de un colector con concentración, es decir,

$$\begin{aligned} \frac{q_u}{A_a} &= G_{da} F_R (\tau\alpha)_s \rho\gamma - F_R U_L \frac{A_r}{A_a} (t_{f,i} - t_a) \\ &= \frac{\dot{m}}{A_a} C_p (t_{f,s} - t_{f,i}) \end{aligned} \quad (9.2)$$

Si la eficiencia del colector solar se define como

$$\eta_g = \frac{\text{energía real útil recogida}}{\text{energía solar interceptada por el área bruta del colector}} \quad (9.3)$$

Entonces la eficiencia de un colector sin concentración se expresa como:

$$\begin{aligned}\eta_g &= (A_a / A_g) F_R [(\tau\alpha)_s - U_L \frac{(t_{f,i} - t_a)}{G_t}] \\ &= \dot{m} C_p (t_{f,s} - t_{f,i}) / A_g G_t\end{aligned}\quad (9.4)$$

La eficiencia térmica de un colector con concentración se expresa como:

$$\begin{aligned}\eta_g &= (A_a / A_g) F_R [(\tau\alpha)_s \rho\gamma - (A_r / A_g) U_L (t_{f,i} - t_a) / G_{da}] \\ &= \dot{m} C_p (t_{f,s} - t_{f,i}) / A_g G_{da}\end{aligned}\quad (9.5)$$

La ecuación 9.4 indica que si la eficiencia  $\eta_g$ , para un colector sin concentración, se gráfica en función de  $(t_{f,i} - t_a)/G_t$ , dará como resultado una línea recta, mostrando una  $U_L$  constante. La pendiente es igual a  $(A_a/A_g) \cdot F_R \cdot U_L$  y la intersección con el eje Y es igual a  $(A_a/A_g) F_R (\tau\alpha)_s$ . Igualmente, para colectores con concentración, la ecuación 9.5 produce una correlación lineal entre la eficiencia térmica y el parámetro  $(t_{f,i} - t_a)/G_{da}$ . El eje Y es interceptado en  $(A_a/A_g) F_R (\tau\alpha)_s \rho\gamma$ , y la pendiente es  $F_R U_L$ .

En realidad,  $U_L$  no es siempre una constante, sino una función de la temperatura de la placa absorbente del colector y de las condiciones ambientales. Además, los productos  $(\tau\alpha)_s$ ,  $(\tau\alpha)_s \rho\gamma$ , varían con el ángulo de incidencia entre la radiación solar y el colector. La figura 8 muestra los resultados de un ensayo típico.

No obstante una representación lineal de la curva de eficiencia sería suficiente para muchos colectores solares, algunos pueden requerir el uso de ajustes de mayor orden (véase Anexo A, Bibliografía 29).

**9.2.1.2 Colectores para calentamiento de aire:** No obstante las ecuaciones 9.4 y 9.5 caracterizan el comportamiento térmico de colectores tanto de aire como también de colectores para calentar líquidos, en el primer caso son más comunes las pérdidas significativas del fluido de transferencia de calor, por lo que la medición de la energía útil obtenida deben tomarse en cuenta los flujos a la entrada y salida del colector.

Definiendo como positiva la pérdida del flujo de masa al ingreso, se tiene:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_s - \dot{m}_i \quad (9.6)$$

la energía útil colectada puede determinarse por alguno de los dos métodos de ensayo siguientes:

**9.2.1.2.1 Ensayo con presión manométrica negativa en colectores para calentamiento de aire:** En esta configuración con pérdidas ( $\dot{m}_L > 0$ ), aire a temperatura ambiente es arrastrado en la corriente de aire calentada en el colector. La ganancia de energía útil real en esta situación es

$$q_u = \dot{m}_s h_{f,s} - (\dot{m}_i h_{f,i} + \dot{m}_L h_a) \quad (9.7)$$

Donde el término entre paréntesis es el flujo de entalpía total entrante. Despreciando los efectos de la transferencia de humedad entre corrientes de aire diferentes y asumiendo el calor específico constante, la ecuación 9.7 puede expresarse en términos de las cantidades medidas como:

$$q_u = \dot{m}_s c_p (t_{f,s} - t_{f,i}) + (\dot{m}_s - \dot{m}_i) C_p (t_{f,i} - t_a) \quad (9.8)$$

Por conveniencia, en expresiones subsecuentes para los sistemas con pérdidas significativas, las ecuaciones 9.1 y 9.8 pueden combinarse para definir una transferencia de calor eficaz al flujo de masa  $\dot{m}$  para los sistemas de calentamiento de aire, es decir:

$$\dot{m} = \dot{m}_s + (\dot{m}_s - \dot{m}_i)(t_{f,i} - t_a)/(t_{f,s} - t_{f,i}) \quad (9.9)$$

que puede usarse para los cálculos en las secciones 9.4 y 9.5.

La ecuación 9.4 puede usarse como la base para graficar las eficiencias medidas en función de  $(t_{f,i} - t_a)/G_r$  donde  $t_{f,i}$  se toma como la temperatura promedio ponderada del flujo de masa pérdida y el de entrada.

**9.2.1.2.2 Ensayo con presión manométrica positiva en colectores para calentamiento de aire:** En esta configuración con pérdida ( $\dot{m}_L < 0$ ), el aire caliente escapa del colector al medio ambiente con una pérdida adicional de energía útil. Además de la salida del flujo de entalpía, el colector también introduce una infiltración del aire ambiente en la carga con un flujo de masa igual a la pérdida del colector. Por consiguiente, el colector proporciona un flujo de entalpía  $\dot{m}_s h_{f,s} + (-\dot{m}_L) h_a$  a la carga. Con el flujo de entalpía a la entrada de  $\dot{m}_i h_{f,i}$ , un balance de entalpía para este caso da de nuevo la ecuación 9.7 (con la debida consideración en el signo de  $\dot{m}_L$ ). Por consiguiente, las ecuaciones 9.8 y 9.9 se aplican también al ensayo con presión manométrica positiva.

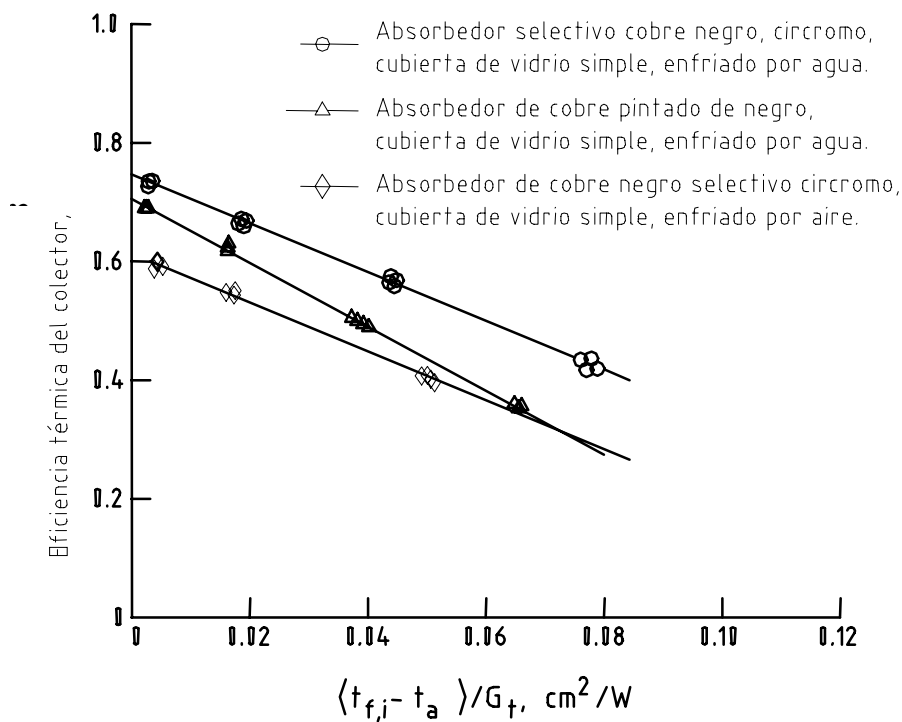


FIGURA 8 – Ejemplo de curvas de eficiencia térmica

**9.2.2 Constante de tiempo del colector:** Es necesario determinar la respuesta de tiempo del colector solar para poder evaluar el comportamiento transitorio del colector y para seleccionar los intervalos de tiempo apropiados para los ensayos de eficiencia en estado estacionario o cuasi estacionario. Siempre que las condiciones transitorias existan, las igualdades definidas por las ecuaciones 9.1 hasta 9.9 no gobiernan el comportamiento

térmico del colector, desde que la parte de la energía solar absorbida se usa para calentar el colector y sus componentes o parte de la energía perdida resulta enfriando el colector.

Un ejemplo de la ecuación que gobierna el comportamiento transitorio de un colector solar usando un colector sin concentración es:

$$\frac{C_A}{A_a} \frac{dt_f}{dT} = F_R G_t (\tau\alpha)_s - F_R U_L (t_{f,i} - t_a) - \frac{\dot{m} c_p}{A_a} (t_{f,s} - t_{f,i}) \quad (9.10)$$

Si (a) la radiación solar  $G_t$  se cambia súbitamente y se mantiene constante, y si (b)  $(\tau\alpha)_s$ ,  $U_L$ ,  $t_a$ ,  $\dot{m}$  y  $c_p$  pueden ser considerados constantes para el periodo transitorio, y si (c) la velocidad de cambio de la temperatura de salida del fluido de transferencia con el tiempo es relacionada con la velocidad de cambio de la temperatura promedio del fluido de transferencia con el tiempo por

$$\frac{dt_f}{dT} = K \frac{dt_{f,s}}{dT} \quad (9.11)$$

donde, de Bibliografía 30.

$$K = \frac{\dot{m} c_p}{F U_L A_a} \left[ \frac{F}{F_R} - 1 \right] \quad (9.12)$$

entonces la ecuación 9.10 puede resolverse para dar la temperatura de la salida del fluido de transferencia como una función de tiempo:

$$\frac{F_R G_t (\tau\alpha)_s - F_R U_L (t_{f,i} - t_a) - (\dot{m} c_p / A_a) (t_{f,s,T} - T_{f,i})}{F_R G_t (\tau\alpha)_s - F_R U_L (t_{f,i} - t_a) - (\dot{m} c_p / A_a) (t_{f,s, inicial} - T_{f,i})} = e^{-[\dot{m} c_p / K C_A] T} \quad (9.13)$$

La cantidad  $KC_A / \dot{m} c_p$  es conocida como constante de tiempo y es el tiempo requerido por la cantidad del lado izquierdo de la ecuación 9.13 para cambiar de 1,0 a 0,368, donde  $0,368=1/e$ .

**9.2.3 Modificador del ángulo de incidencia de un colector:** El factor efectivo de transmisividad por absorptividad  $(\tau\alpha)_s$  en la ecuación 9.4 y  $(\tau\alpha)_s \rho\gamma$  en la ecuación 9.5 puede ser reemplazado por el valor a incidencia normal,  $(\tau\alpha)_{s,n}$ , o  $[(\tau\alpha)_s \rho\gamma]_n$ , respectivamente, con tal de que otro factor llamado el modificador del ángulo de incidencia,  $K_{\alpha\tau}$  sea introducido en la ecuación 9.4, y se vuelve entonces

$$\eta_g = (A_a / A_g) F_R [K_{\alpha\tau} (\tau\alpha)_{s,n} - U_L \frac{(t_{f,i} - t_a)}{G_t}] \quad (9.14)$$

La Ecuación 9.5 se vuelve

$$\eta_g = (A_a / A_g) F_R \{ K_{\alpha\tau} [(\tau\alpha)_s \rho\gamma]_n - (A_r / A_a) U_L (t_{f,i} - t_a) / G_{da} \} \quad (9.15)$$

Entonces, para los colectores sin concentración

$$(\tau\alpha)_s = K_{\alpha\tau} (\tau\alpha)_{s,n} \quad (9.16)$$

y para los colectores con concentración

$$(\tau\alpha)_s \rho\gamma = K_{\alpha\tau} [(\tau\alpha)_s \rho\gamma]_n \quad (9.17)$$

Para una amplia variedad de colectores solares sin concentración puede mostrarse que,  $K_{\alpha\tau}$  debe variar con el ángulo de incidencia según la siguiente expresión general:

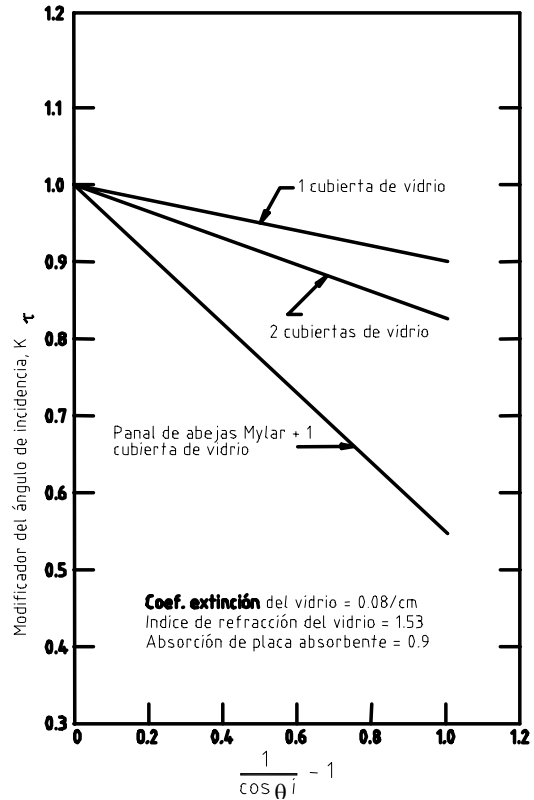
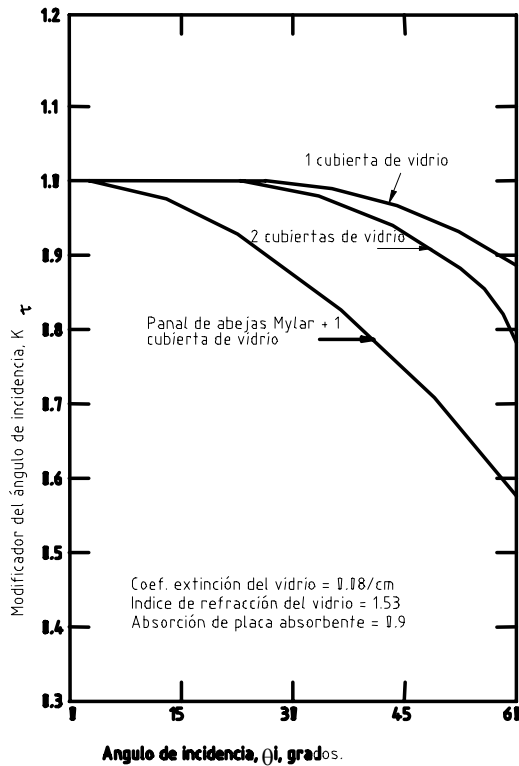
$$K_{\alpha\tau} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (9.18)$$

La Figura 9 muestra la variación de  $K_{\alpha\tau}$  con el ángulo incidente para tres colectores solares. La Figura 10 muestra la gráfica de  $K_{\alpha\tau}$  como una función de  $[(1/\cos\theta) - 1]$ , verificando la aplicabilidad de la forma general de ecuación 9.18.

La importancia del modificador del ángulo incidente en los procedimientos de ensayo perfilados aquí, es que los valores de eficiencia térmicos son determinados para el colector en o cerca de las condiciones de incidencia normales. Por consiguiente, la intersección de la curva de eficiencia con el eje Y es igual a  $(A_a/A_g) F_R (\tau\alpha)_{s,n}$  para un colector sin concentración y  $(A_a/A_g) F_R[(\tau\alpha)_{s,\rho\gamma}]_n$  para un colector con concentración. Una medición separada se dirige para determinar el valor de  $K_{\alpha\tau}$  para que el comportamiento del colector pueda predecirse bajo una gama amplia de condiciones y/o horas del día utilizando las ecuaciones 9.14 y 9.15.

En el Anexo E se ilustran técnicas para usar la curva de eficiencia normal y los modificadores del ángulo incidente para calcular la salida de energía durante todo el día. El tiempo solar aparente o factor coseno, para tales determinaciones, debe ser considerado, conforme la hora del día varía cuando las columnas “Directo Normal” de las Tablas E.2 a E.7 son usadas para determinar la radiación solar. El factor coseno ha sido incluido en el valor de la radiación efectiva de todas las otras columnas de estas tablas.

**9.2.3.1 Colectores que requieren más de un modificador del ángulo de incidencia:** Se reconoce que hay colectores para los que  $K_{\alpha\tau}$  no es simétrico con respecto a la dirección de radiación solar incidente. Algunos colectores sin concentración, con cubierta o absorbentes de diseño asimétrico y colectores que usan reflectores pueden requerir la determinación de modificadores del ángulo incidente en más de un plano para considerar la respuesta asimétrica a la radiación, ya que el azimut solar y los ángulos de elevación varían a lo largo del día.



**FIGURA 9 – Modificador del ángulo de incidencia para tres colectores solares planos, con pinturas no selectivas del absorvedor**

**FIGURA 10 – Modificador del ángulo de incidencia para tres colectores solares planos, con pinturas no selectivas del absorvedor**

Los colectores estacionarios de concentración lineal requieren la determinación del modificador del ángulo incidente dentro del plano de enfoque de sus reflectores en un plano paralelo al eje longitudinal del reflector, y además pueden requerir la determinación de un modificador del ángulo incidente adicional a un ángulo intermedio, como por ejemplo a 45° respecto al reflector. Para el caso de colectores de tubos al vacío,  $K_{\alpha\tau}$  puede expresarse como un producto simple de dos modificadores del ángulo incidente separados, tomados en dos planos de simetría mutuamente perpendiculares. Un modificador del ángulo incidente debe determinarse de acuerdo con los procedimientos del Anexo F para las direcciones de altitud y azimut mutuamente perpendiculares.

Los colectores con seguimiento de concentración requieren la determinación separada del modificador del ángulo incidente dentro del plano de enfoque y en un plano paralelo al eje longitudinal del reflector. El modificador del ángulo incidente anterior puede usarse para establecer la exactitud requerida por el mecanismo de seguimiento para el concentrador. Este procedimiento se ilustra en Anexo G.

### 9.3 Procedimiento de ensayo

En el primer ensayo del comportamiento de un colector solar se determina su constante de tiempo. El método para realizar este ensayo se explica en la sección 9.3.2. Luego que este finaliza se realizan una serie de ensayos de eficiencia térmica como se explicó en la sección 9.3.3. Finalmente, se determina el modificador del ángulo incidente del colector como una función de ángulo incidente de acuerdo con la sección 9.3.4.

#### 9.3.1 Condiciones del ensayo

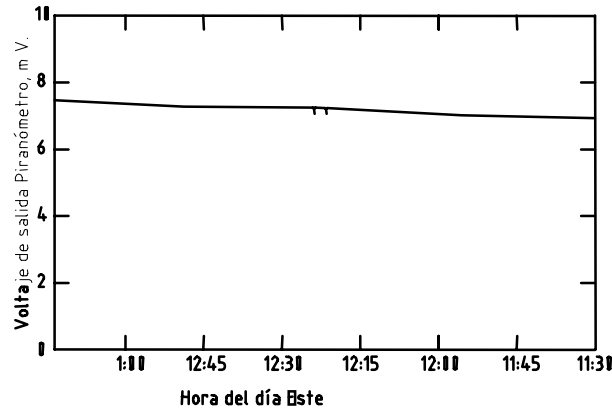
**9.3.1.1 Pruebas al aire libre:** En las pruebas realizadas al aire libre para determinar la eficacia térmica o modificador del ángulo incidente, se cumplirán las siguientes condiciones de ensayo.

**9.3.1.1.1 Valores mínimos de la radiación solar:** Se realizarán ensayos de modo tal que la radiación solar global promedio total, medida sobre una superficie normal a la radiación directa no sea menor a  $790 \text{ W/m}^2$  ( $250 \text{ Btu/ft}^2\cdot\text{h}$ ).

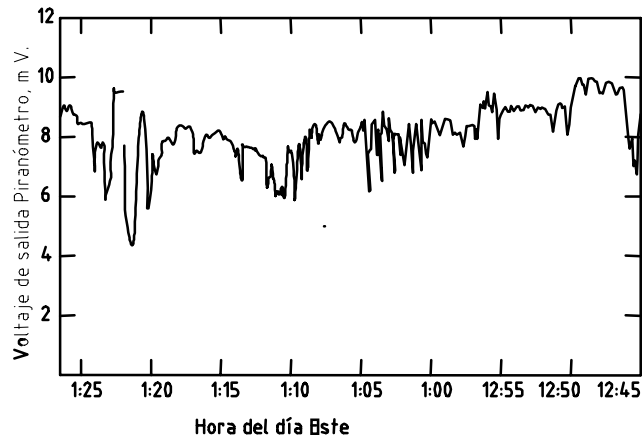
**9.3.1.1.2 Variaciones máximas de la radiación solar:** Se realizarán ensayos durante los periodos cuando el cielo esté claro (es decir, substancialmente libre de nubes) tal que la variación de la radiación solar en el plano de apertura no varía más de  $\pm 32 \text{ W/m}^2$  ( $\pm 10 \text{ Btu/ft}^2\cdot\text{h}$ ) en periodos de 10 minutos o dos veces la constante de tiempo, cualquiera sea el mayor, esto durante el periodo previo como durante la toma de datos.

Cualquiera que se use, integradores electrónicos o registradores de pluma sobre bandas continuas, pueden ser utilizadas para determinar los valores de la radiación solar integrada incidente. Sin embargo, un registrador de banda con una velocidad de banda recomendada de  $30 \text{ cm/h}$  ( $12 \text{ pulg./h}$ ) o mayor, debe usarse siempre para monitorear la salida del piranómetro asegurando que la radiación incidente ha permanecido estable durante el periodo de ensayo. Las Figuras 11 y 12 muestran el registro de radiación solar incidente

sobre una superficie horizontal. Mientras que las condiciones de la Figura 11 serían absolutamente aceptables para obtener valores de eficiencia, aquéllos de la Figura 12 no lo serían.



**FIGURA 11 – Radiación solar incidente sobre una superficie horizontal, en Gaithersburg, MD, Marzo 13, 1974**



**FIGURA 12- Radiación solar incidente sobre una superficie horizontal, en Gaithersburg, MD, Marzo 11, 1974**

**9.3.1.1.3 Radiación difusa:** Los ensayos deben realizarse durante los periodos en que la media de la radiación difusa en el plano de la apertura del colector no es mayor que 20 % de la radiación hemisférica total en el mismo plano. En orden de determinar e informar el porcentaje de la radiación solar difusa, para cada valor de eficiencia, se requiere del uso de un pirheliómetro y un piranómetro como se discutió en la sección 8.1.3. El componente difuso de la radiación solar en el plano de apertura es:

$$G_d = G_t - G_{DN} \cos \theta \quad (9.19)$$

**9.3.1.1.4 Rango de la temperatura ambiente:** El rango de la temperatura ambiente para todos los puntos de la prueba reportados comprendidos en la curva de eficacia será menor a 30 °C (54 °F).

**9.3.1.1.5 Condiciones del viento:** Para las medidas dirigidas a determinar la eficiencia térmica y modificador del ángulo de incidencia, la velocidad media del viento estará entre 2,2 y 4,5 m/s (5 y 10 mph) durante cualquier periodo de prueba y un mínimo de 10 minutos o dos constantes de tiempo, cualquiera sea el mayor, para el colector bajo ensayo sólo antes del comienzo del periodo de prueba. Algunos colectores con un vidrio pueden requerir un tiempo más largo de hasta 20 minutos o cuatro constantes de tiempo, cualquiera sea el mayor. Esto es porque el tiempo de respuesta térmica del vidriado puede ser mucho más lento que para la placa del absorbente.

Para los casos en los que las condiciones naturales del viento no satisfacen el requerimiento de arriba, el viento natural puede complementarse con viento artificial de acuerdo con sección 8.3.4 para que la velocidad promedio del viento pueda reunir los requisitos declarados en los párrafos precedentes.

**9.3.1.1.6 Flujo de transferencia de calor del fluido:** El flujo del fluido de transferencia de calor a través del colector se normaliza a un valor para todos los datos tomados. Los valores recomendados de flujo por unidad de área (frontal transparente o apertura) para las pruebas son 0,02 kg/(s·m<sup>2</sup>) (14,7 lbm/(h·ft<sup>2</sup>)) cuando un líquido es el fluido de traslado de calor y 0,01 m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>) (2 cfm/ft<sup>2</sup>) de aire estándar cuando el fluido de transferencia de calor es aire. Para calentadores de aire, la eficiencia es mucho más una función del flujo que cuando los colectores usan un líquido como fluido de transferencia de calor y se recomienda una segunda secuencia de ensayos usando, 0,03 m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>) (6 cfm/ft<sup>2</sup>).

Se reconoce que en algunos casos el colector se habrá diseñado para una proporción de flujo muy diferente que especificó anteriormente. En tales casos debe usarse el flujo de diseño y debe registrarse en los resultados de la prueba.

**9.3.1.2 Ensayo bajo techo:** Para pruebas realizadas bajo techo con un simulador de radiación solar para determinar el comportamiento térmico o modificador del ángulo de incidencia, se deben cumplir las siguientes condiciones de pruebas.

**9.3.1.2.1 Radiación solar:** Será utilizado un piranómetro montado de acuerdo con la sección 8.1.3 para medir la radiación.

El valor mínimo de la radiación durante cada periodo de Ensayo estará de acuerdo con la sección 9.3.1.1.1.

La radiación durante cada Ensayo debe ser constante de modo tal que las variaciones de la radiación no varíen más del  $\pm 3\%$  del valor promedio (véase sección 8.3.2).

**9.3.1.2.2 Temperatura del ambiente:** (véase sección 8.3.5.)

**9.3.1.2.3 Condiciones del viento:** (véase sección 8.3.4.)

**9.3.1.2.4 Flujo del fluido de transferencia de calor:** (véase sección 9.3.1.1.6.)

**9.3.2 Determinación experimental de la constante de tiempo del colector:** El ensayo de un colector solar para determinar su constante de tiempo puede ser realizado por los siguientes métodos:

La temperatura a la entrada del fluido de transferencia,  $T_{f,i}$ , se ajusta tan estrechamente como sea posible (preferentemente dentro del  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $\pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ]) a la temperatura del ambiente y se controla como se especificó en la sección 8.1.7 u 8.2.9 mientras circula el fluido de transferencia a través del colector a una velocidad de flujo especificada en la sección 9.3.1.1.6 mientras se mantiene un estado a condiciones estacionarias o cuasi estacionarias con un flujo de radiación solar incidente mayor que  $790\text{ W/m}^2$  ( $250\text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2$ ). La energía solar incidente se reduce entonces abruptamente a cero ya sea tapando al colector del sol o cerrando el simulador solar. La primera debe estar acompañada más apropiadamente girando el colector solar hacia el sur (sobre un bastidor móvil) o obscureciendo con una cubierta, opaca y blanca. La cubierta debe ser suspendida de la superficie del colector de modo que se permita pasar el aire ambiente sobre el colector antes de empezar el ensayo transitorio.

Las temperaturas del fluido de transferencia a la entrada,  $t_{f,i}$ , y a la salida,  $t_{f,s}$ , son monitoreados continuamente como una función del tiempo hasta que:

$$\frac{t_{f,s,T} - t_{f,i}}{t_{f,s, inicial} - t_{f,i}} < 0,30 \quad (9.20)$$

La constante de tiempo real es el tiempo T requerido por la cantidad  $[(t_{f,s,T} - t_{f,i}) / (t_{f,s, inicial} - t_{f,i})]$  para cambiar desde 1,0 a 0,368.

**9.3.3 Determinación experimental de la eficiencia térmica del colector:** En los ensayos orientados a determinar la eficiencia térmica en condiciones de radiación incidente casi normales, el ángulo de incidencia deberá estar en el rango en que el modificador del ángulo incidente no varíe en más de  $\pm 2 \%$  de su valor a incidencia normal. Para los ensayos orientados a determinar el modificador del ángulo incidente, la orientación del colector debe ser tal que el colector se mantenga dentro de  $\pm 2.5$  grados respecto al ángulo de incidencia, a lo largo del periodo de ensayo.

**9.3.3.1 Distribución de temperaturas al ingreso del colector:** Una distribución aceptable de temperaturas al ingreso del colector es la obtenida dando valores a  $(t_{f,i} - t_a)$  de 0, 30, 60, y 90 % del valor de  $(t_{f,i} - t_a)$ , obtenida a una temperatura ambiente ( $t_a$ ) determinada para el ensayo y según las recomendaciones de máxima temperatura de operación del colector del fabricante. Una distribución alternativa aproximada podría obtenerse a partir de 0, 30, 60, 90 % de la diferencia entre  $(A_a/A_g) F_R (\tau\alpha)_{e,n}$  y la eficiencia del colector. Para algunos colectores solares y fluidos de transferencia de calor, este rango de temperaturas de ingreso puede estar restringido por otras consideraciones, en cuyo caso al no ser permitida la extrapolación de la curva de eficiencia la temperatura de ingreso debe estar en el rango aceptado (cabe señalar que una estándar nominal requiere una distribución de temperatura diferente de ingreso).

**9.3.3.2 Número de datos:** Por lo menos se tomarán cuatro datos para cada valor de  $t_{f,i}$ . Para el caso en que el aparato de ensayo sea de bastidor fijo, dos de los cuatro datos deben ser tomados durante el periodo que precede al mediodía solar y los otros dos deben ser tomados en el periodo siguiente, los periodos específicos deben escogerse de modo que los datos representen tiempos simétricos con respecto al medio día solar. Este requisito se hace de modo que el efecto transitorio que pueda presentarse no distorsione los resultados del ensayo cuando estos sean utilizados para propósitos de diseño. El requisito para obtener los datos igualmente divididos entre la mañana y la tarde no es mandatorio cuando el

ensayo se hace con un montaje con elevación y azimut. Todos los datos del ensayo deben ser reportados en adición a la curva ajustada (véase sección 10) de modo que cualquier desviación en la eficiencia debida solamente al nivel de temperatura de operación del colector pueda ser depurada en el informe del ensayo. La curva será definida por puntos que representen valores de la eficiencia determinados por la integración de los datos en un periodo igual a la constante de tiempo o cinco minutos, cualquiera que sea el mayor, como se determinó en la sección 9.3.2. La eficiencia para el periodo de ensayo, es obtenida del cociente entre la energía integrada del colector y la energía integrada de la radiación solar incidente (Ver sección 9.5.)

**9.3.3.3 Condiciones de estado estacionarias:** Con la finalidad de obtener condiciones estacionarias o cuasi estacionarias para procesos de captación solar, el fluido de transferencia de calor debe estar circulando a través del colector a valores apropiados de temperaturas de ingreso y flujo de masa hasta que ellos permanezcan constantes dentro de rangos de  $\pm 2\%$  de temperatura o  $\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), y  $\pm 2\%$  del flujo de masa o  $\pm 0,005\text{ gpm}$  ( $0,000315\text{ L/s}$ ), cualquiera que sea el mayor; en ambos casos los datos para calcular los valores de la eficiencia serán tomados durante 15 minutos antes de cada periodo. Así mismo la temperatura ambiente no variará en más de  $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $2,7\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) durante este mismo intervalo. El intervalo de tiempo arriba especificado no es aplicable cuando se alcancen las condiciones estacionarias con radiación solar simulada.

Si un montaje con elevación y azimut a incidencia normal es utilizado para el ensayo a la intemperie, el intervalo de tiempo arriba especificado debe reducirse a cinco minutos o a la mitad de la constante de tiempo del colector, cualquiera que sea el mayor.

**9.3.3.4 Control del polvo y humedad:** Antes del periodo(s) de ensayo se limpiarán y secarán las superficies de la cubierta del colector así como las cubiertas expuestas del piranómetro(s) y pireliómetro. Si la polución local o el polvo ha formado un depósito sobre las superficies transparentes, la limpieza debe llevarse a cabo muy suavemente, preferentemente después de retirar la mayoría del material suelto con aire o después de humedecerlo para prevenir el encostramiento de la superficie. Esto es particularmente importante para los instrumentos medidores de radiación solar, ya que tal acción abrasiva puede alterar apreciablemente las propiedades transmisivas originales de las cubiertas.

Se verificará el piranómetro(s) antes de comprobar si hay cualquier acumulación de vapor de agua dentro de la cubierta de vidrio. No se permitirá el uso de piranómetros húmedos (humedad visible).

### 9.3.4 Determinación experimental del modificador del ángulo incidente del colector

**9.3.4.1 Los colectores sin concentración y con concentración estacionarios:** El ensayo de colectores solares para determinar el modificador del ángulo incidente puede ser hecho por cualquiera de los dos métodos que veremos mas adelante. Sin embargo, durante cada periodo de ensayo, la orientación del colector será tal que este se mantenga dentro de  $\pm 2,5^\circ$  con respecto al ángulo de incidencia para los que se realiza el ensayo.

Para colectores (ejemplo, los colectores de tubo al vacío) en los cuales los efectos del ángulo incidente no son simétricos respecto a la dirección de la radiación incidente, será necesario medir los efectos del ángulo incidente para más de una dirección, conforme se ilustra en el Anexo G.

Método 1: Este método es aplicable para ensayos bajo techo usando un simulador solar, o ensayo al aire libre usando un banco móvil (con montaje de colector elevación-azimut) para que la orientación del colector pueda ajustarse arbitrariamente con respecto a la dirección de la radiación solar incidente.

El colector se orienta para que el ensayo con los ángulos de radiación solar incidentes entre éste y la dirección de la radiación solar directa para las cuatro condiciones de la prueba sean, respectivamente y aproximadamente 0, 30, 45, y 60 grados. Se recomienda que estos datos se tomen durante un solo día. Para algunos colectores con características de comportamiento óptico inusuales, serán más apropiados otros ángulos de incidencia.

Para cada dato, la temperatura de ingreso del fluido de transferencia de calor se controlará, tan cerca como sea posible, [dentro de  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $\pm 1,8^\circ\text{F}$ )] a la temperatura ambiente. Se determinaran cuatro valores distintos de eficiencia de acuerdo con la sección 9.3.3.

Método 2: Este método es aplicable para ensayos a la intemperie usando un banco de pruebas estacionario, cuando la orientación del colector no puede ser ajustada arbitrariamente con respecto a la dirección de la radiación solar incidente (salvo ajustes en la inclinación).

Para cada dato, la temperatura de ingreso del fluido de transferencia se controlará, en lo posible en el rango de  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $\pm 1,8^\circ\text{F}$ ) de la temperatura ambiente. Los valores de

eficiencia son determinados en pares, donde cada par incluye un valor de eficiencia antes del medio día solar y un segundo valor después del mediodía solar. El ángulo incidente promedio entre el colector y el rayo solar para ambos puntos es el mismo. La eficiencia del colector para el ángulo incidente específico será considerada igual al promedio de los dos valores. En general los valores de eficiencia son determinados de acuerdo con el método descrito en la sección 9.3.3. Como con el método 1, los datos deben tomarse para los ángulos incidentes de aproximadamente 0, 30, 45, y 60 grados. Para algunos colectores con características de comportamiento óptico inusuales, serán necesarios otros ángulos incidentes.

### 9.3.4.2 Colectores con seguimiento en un solo eje

**9.3.4.2.1 Ángulo incidente, eje longitudinal:** El colector es orientado de modo tal que la proyección de la radiación sobre el plano de apertura del concentrador es paralela al eje longitudinal del receptor cuando el concentrador está enfocado. El ángulo de incidencia es el ángulo formado por la intersección de la normal al plano de apertura y el rayo incidente.

El modificador del ángulo de incidencia se medirá de acuerdo con el método 1 de la sección 9.3.4.1. Si la fuente de la radiación es un simulador de radiación solar, debe coincidir la colimación especificada en la sección 8.3.3 con la relación de concentración del colector que se está ensayando.

**9.3.4.2.2 Ángulo incidente perpendicular al eje de seguimiento:** Esta prueba se realiza para determinar el ángulo de aceptación del colector que a su vez puede ser usado para determinar la precisión del seguimiento requerido por el colector, conforme se ilustra en el Anexo G.

La temperatura de ingreso del fluido debe ser controlada tan cerca como sea posible [preferentemente en el rango de  $\pm 1$  °C ( $\pm 1,8$  °F)] a la temperatura del aire que rodea al colector a lo largo del periodo de ensayo. Pueden ser usados cualquiera de los siguiente 3 métodos de ensayo:

**Método 1 (Eje Norte - Sur):** El ensayo debe hacerse aproximadamente al mediodía solar cuando el ensayo se realiza al aire libre y con montaje para seguimiento en un eje norte - sur. El colector se ajusta a una posición entre 7,5 a 10° delante del sol y se mantiene constante durante el resto de la prueba, que debe ser de 60 minutos para una dirección de

7,5 ° ó 80 minutos para la dirección de 10°. Durante este periodo, la radiación normal directa, excederá los 800 W/m<sup>2</sup> (254 Btu/h pies<sup>2</sup>) y permanecerá tan constante como sea posible. El colector puede ser posicionado con el ángulo de la latitud, a una inclinación de 90° menos la elevación máxima del sol para el día y lugar, o puede ponerse horizontalmente, según la recomendación del fabricante. La elevación de la temperatura de fluido, se tomará y registrará con intervalos de un minuto, o con más frecuencia si es necesario, durante el tiempo en que el sol este a cinco minutos del plano de enfoque del colector.

**Método 2 (Eje Este - Oeste):** Cuando el ensayo se realiza al aire libre y es montado para el seguimiento en un eje este - oeste, entonces debe realizarse la prueba en forma continua desde las 10:00 a.m. hasta las 2:00 p.m.,(hora solar aparente para la localidad). La temperatura de ingreso del fluido se ajustará a un nivel tal que  $(t_{f,i} - t_a)$  pueda ser mantenido constante a lo largo del ensayo. El colector será ajustado para un ángulo igual a la elevación del sol a las 11:00 de la mañana, para la localidad y día determinado del año - ver Tablas desde E.7 hasta E.12 para los ángulos de elevación respectivos. El colector debe permanecer en esta posición a lo largo del periodo de ensayo. Durante todo el periodo, la radiación normal directa debe exceder los 800 W/m<sup>2</sup> (254 Btu/h pies<sup>2</sup>) y se mantendrá tan constante como sea posible. La elevación de la temperatura de fluido deberá ser tomada y registrada en intervalos de un minuto o con más frecuencia, si es necesario, desde las 10:00 a.m. hasta las 2:00 p.m.

**Método 3 (Simulador de radiación Solar):** Cuando se está realizando el ensayo en el interior con un simulador solar, el colector de seguimiento es montado en la posición axial para la cual ha sido diseñado. El ángulo de seguimiento debe ser ajustado entre 7.5° y 10° entre la normal y el rayo incidente del simulador. La temperatura de ingreso del fluido se ajustará a un nivel tal que  $(t_{f,i} - t_a)$  pueda mantenerse constante durante el ensayo. El nivel de radiación del simulador, será ajustado a un valor mínimo de 800 W/m<sup>2</sup> (254 Btu/h · pies<sup>2</sup>) y mantenida constante durante todo el periodo del ensayo. El colector se moverá luego a una velocidad de seguimiento de 15° por hora, hasta que alcance un ángulo normal al rayo incidente del simulador, igual al ángulo al cual se inicio el ensayo. La elevación de la temperatura del fluido, debe tomarse y registrarse en intervalos de un minuto o si es necesario con más frecuencia, a lo largo del ensayo.

#### 9.4 Cálculo de la constante de tiempo del colector

Según la definición de constante de tiempo dada en la sección 9.2.2, ésta se refiere al tiempo requerido para que el lado izquierdo de la Ecuación 9.13, sea igual a 0,368. Independiente de cuál sea el método experimental utilizado en la sección 9.2.2, la radiación

solar incidente es igual a cero y la temperatura del fluido al ingreso es mantenida suficientemente próxima a la temperatura del aire ambiente para que  $(t_{f,i} - t_a) \approx 0$ . Entonces, monitoreando la temperatura de ingreso y salida del fluido como una función de tiempo, esta constante es el tiempo requerido para que:

$$\frac{t_{f,s,T} - t_{f,i}}{t_{f,s, inicial} - t_{f,i}} = 0,368 \quad (9.22)$$

Si la temperatura de entrada del fluido no puede controlarse para igualar a la temperatura del aire ambiente dentro del rango de  $\pm 1$  °C ( $\pm 1,8$  °F), debería realizarse una estimación del producto de:  $(A_a/A_g)F_R U_L$ , para que las condiciones del ensayo del colector y la constante de tiempo calculada, como el tiempo requerido para:

$$\frac{(A_a / A_g) F_R U_L (t_{f,i} - t_a) + \frac{m \dot{c}_p}{A_g} (t_{f,s,T} - t_{f,i})}{(A_a / A_g) F_R U_L (t_{f,i} - t_a) + \frac{m \dot{c}_p}{A_p} (t_{f,s, inicial} - t_{f,i})} = 0,368 \quad (9.23)$$

## 9.5 Cálculo de la eficiencia térmica del colector

Para cada dato de eficiencia en el intervalo del ensayo, el valor de la eficiencia es calculado utilizando la ecuación :

$$\eta_g = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \dot{m} c_p (t_{f,s} - t_{f,i}) dT}{A_g \int_{T_1}^{T_2} G dT} \quad (9.24)$$

Nótese que el área utilizada para el calculo no es el área de la superficie absorbente sino el área bruta del colector. Para aquellos colectores que no aceptan radiación difusa, G en el denominador de la ecuación 9.24 es sólo el componente directo en el plano de apertura, es decir  $G_{da}$ . Para colectores sin concentración, se usará  $G_t$ .

Por lo menos se obtendrán 16 puntos para el establecimiento de la curva de eficiencia, y una ecuación para la curva debe ser obtenida usando la técnica estándar del ajuste de los mínimos cuadrados. La curva no se extrapolará más allá de los límites de los datos.

## 9.6 Cálculo del modificador del ángulo de incidencia del colector

Independiente del método de ensayo de la sección 9.3.4 utilizado se deben determinar valores de la eficiencia térmica del colector correspondientes a cada valor del ángulo incidente. Para colectores convencionales sin concentración como para aquellos con concentración en un solo eje lineal, se necesitan sólo cuatro ángulos de incidencia, es decir, 0, 30, 45, y 60 grados. (Cabe mencionar que se puede requerir que  $K_{\alpha\tau}$  sea medido usando una clasificación estándar con este método de ensayo, para un conjunto diferente de ángulos de incidencia). Ya que la temperatura de ingreso del fluido es mantenida suficientemente cerca a la temperatura ambiental,  $(t_{i,i} - t_a) \approx 0$ , y la relación entre  $K_{\alpha\tau}$  y la eficiencia, de acuerdo con las ecuaciones 9.14 y 9.15, será :

para colectores sin concentración

$$K_{\alpha\tau} = \frac{\eta_g}{(A_a / A_g) F_R (\tau\alpha)_{s,n}} \quad (9.25)$$

y para colectores con concentración

$$K_{\alpha\tau} = \frac{\eta_g}{(A_a / A_g) F_R [(\tau\alpha)_s \rho\gamma]_n} \quad (9.26)$$

En vista que  $(A_a / A_g) F_R (\tau\alpha)_{e,n}$  ya se ha obtenido como la intersección de la curva de eficiencia con el eje y, determinada de acuerdo a las secciones 9.3.3 y 9.5, pueden calcularse valores de  $K_{\alpha\tau}$  para diferentes ángulos de incidencia (véase sección 9.3.4) usando las ecuaciones 9.25 y 9.26. Cuando se utilice la ecuación 9.18 para correlacionar los datos del ángulo de incidencia modificados, el valor de  $b_o$  puede ser determinado usando el procedimiento descrito en el Anexo H. Pueden usarse otros métodos de correlación para describir la ecuación del ángulo de incidencia modificado, p.ej.  $K_{\alpha\tau} (v)$ .

Si la temperatura de entrada del fluido no puede controlarse con el fin de mantener la temperatura ambiente dentro del rango de  $\pm 1$  °C ( $\pm 1,8$  °F), debe hacerse una estimación del producto  $UL(A_a / A_g) F_R$  para las condiciones de ensayo del colector y cada valor de  $K_{\alpha\tau}$  calculado como:

para los colectores sin concentración

$$K_{\alpha\tau} = \frac{\eta_g + (A_a / A_g) F_R U_L (t_{f,i} - t_a) / G_t}{(A_a / A_g) F_R (\tau\alpha)_{s,n}} \quad (9.27)$$

para colectores con concentración

$$K_{\alpha\tau} = \frac{\eta_g + (A_a / A_g) F_R U_L (t_{f,i} - t_a) / G_{da}}{(A_a / A_g) F_R [(\tau\alpha)_s \rho\gamma]_n} \quad (9.28)$$

Alternativamente, cada dato puede ser ubicado en la misma gráfica de la curva de eficiencia, determinada de acuerdo con las secciones 9.3.3 y 9.5 y una curva, trazada a través de cada punto, paralela a la curva de eficiencia e interceptada con el eje Y. Los valores interceptados son los valores de eficiencia que habrían obtenido a la temperatura de entrada del fluido controlado para igualar la temperatura del aire ambiente. Por consiguiente, estos valores pueden usarse junto con las ecuaciones 9.27 y 9.28 para calcular los diferentes valores de  $K_{\alpha\tau}$ .

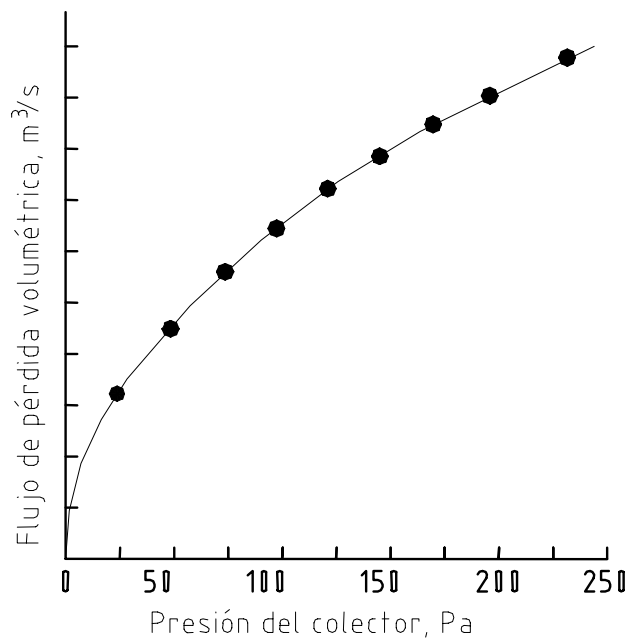
**9.7 Determinación del valor de las fugas de un colector de aire:** El ensayo para determinar el rango de fugas de un colector solar de este tipo, puede ser dirigido para generar una curva de pérdidas que pueda ser usada para comparar las pérdidas relativas en diferentes colectores.

El ensayo para medir las pérdidas de un colector, requerirá de equipos que determinen el valor de las pérdidas volumétricas con una precisión de lectura de  $\pm 3\%$ , como se describió en la sección 8.2.8. La medición de la presión en un colector se hará con un manómetro que cumpla con las provisiones de precisión indicadas en la sección 7.5.

Se permite al colector llegar a un equilibrio térmico, con la temperatura del ambiente. Se determina una curva de pérdida, utilizando este aire, ya sea evacuando o presurizando al colector mediante un dispositivo calibrado de medición de flujos y también, midiendo la diferencia de presión entre el colector solar y el ambiente. El ensayo de fugas se realizará con una presión manométrica negativa para colectores que tengan un comportamiento térmico probado a presión negativa y un ensayo a presión positiva para colectores que serán ensayados a presión manométrica positiva.

Deberían tomarse suficientes puntos de presión en el colector y de las fugas, para permitir la interpolación precisa de las pérdidas del colector operando a presiones entre 0 y la máxima presión de operación recomendada por el fabricante, cualquiera sea la más alta. Para los casos donde no existe la recomendación de la presión máxima, el colector se probará con una presión de operación entre 0-250 Pa (0-1 iwg). Se tomarán por lo menos cuatro datos de la presión del colector, entre estos niveles.

Se trazará y publicará una curva de pérdida en base a los puntos obtenidos a lo largo del ensayo. Un ejemplo de una curva representativa de pérdidas se muestra en la Figura 13.



**FIGURA 13 – Ejemplo de una curva representativa de pérdidas para un colector de aire de placa plana para presión interna positiva**

## **10. INFORME DEL ENSAYO Y DATOS REGISTRADOS**

### **10.1 Datos del ensayo**

Para determinar la eficiencia, la Tabla 10.1 nos muestra una lista con mediciones que serán realizadas al inicio y durante el ensayo correspondiente para obtener los datos de la eficiencia.

### **10.2 Informe del ensayo**

La Tabla 10.2 especifica los datos e información que serán reportados en el ensayo de un colector solar.

Prohibido su reproducción total o parcial

**Tabla 10.1 - Registro de mediciones, datos e información**

<b>Detalle</b>	<b>Ensayos de colectores para calentamiento de aire</b>	<b>Ensayo de colectores para calentamiento de líquidos</b>
Fecha	X	X
Observador(es)	X	X
Nombre del equipo y datos de placa	X	X
Ángulo de inclinación del colector	X	X
Ángulo azimut del colector (como función de tiempo si es movable) grados desde el sur	X	X
Área de apertura del colector o área frontal transparente, m <sup>2</sup> (ft <sup>2</sup> )	X	X
Área bruta del colector, m <sup>2</sup> (ft <sup>2</sup> )	X	X
Tiempo local estándar (sobre una base de 24 horas) al inicio del calentamiento del colector y al inicio y final de cada ensayo.	X	X
Tiempo solar local aparente según lo requerido anteriormente	X	X
Presión barométrica, Pa(pulg.Hg.)	X	X
Temperatura del aire ambiental (al inicio y final de cada ensayo, °C(°F))	X	X
$\Delta_t = t_{f,s} - t_{f,i}$ a lo largo del colector solar (ya sea como una función continua de tiempo o como una cantidad integrada al período de ensayo)	X	X
Temperatura de entrada, $t_{f,i}$ , °C (°F)	X	X
Temperatura de salida $t_{f,e}$ , °C (°F)	X	X
Valor del flujo del líquido kg/s (lbm/h)		X

Presión manométrica al ingreso del colector, Pa (lbf/pulg. <sup>2</sup> )		<b>X</b>
Valor del flujo de aire corriente abajo, kg/s(lbm/h)	<b>X</b>	
Valor del flujo de aire corriente arriba, kg/s (lbm/h)	<b>X</b>	
Humedad relativa	<b>X</b>	
Diferencia de presión en el medidor de presión diferencial, si se usa Pa (lbf/pulg. <sup>2</sup> )	<b>X</b>	
Presión absoluta en los agujeros de presión corriente arriba de un medidor de presión diferencial, si se usa, Pa (lbf/pulg. <sup>2</sup> )	<b>X</b>	
Caída de presión a lo largo del colector solar, Pa (lbf/pulg. <sup>2</sup> )	<b>X</b>	<b>X</b>
Altura de la salida del colector sobre la entrada del colector, m(pie)	<b>X</b>	<b>X</b>
Velocidad del viento cerca de la superficie del colector o de la apertura (promedio en el período de ensayo), m/s (mph) y dirección del viento proveniente del norte	<b>X</b>	<b>X</b>
G <sub>1</sub> , Incidencia de radiación solar global sobre el colector (como una función continua de tiempo y como un período de ensayo integrando la cantidad si se desea), W/m <sup>2</sup> (Btu/(h . pie <sup>2</sup> )) o J/m <sup>2</sup> (btu/pie <sup>2</sup> )	<b>X</b>	<b>X</b>
G <sub>DN</sub> , radiación solar normal directa (como una función continua de tiempo y como un período de ensayo, integrando la cantidad si se desea) W/m <sup>2</sup> (Btu/(h . pie <sup>2</sup> )) o J/ m <sup>2</sup> (btu/pie <sup>2</sup> )	<b>X</b>	<b>X</b>
G <sub>d</sub> , Componente difuso de la radiación solar sobre el colector (al inicio del período de		

ensayo y después de completar el ensayo), $W/m^2$ (Btu/(h . pie <sup>2</sup> ))	X	X
$G_g$ la radiación a longitud de onda larga entre 3,5 $\mu m$ y 50 $\mu m$ , al menos una vez durante el período de ensayo cuando se está utilizando el simulador de radiación solar, $W/m^2$ (Btu/(h . pie <sup>2</sup> ))	X	X
$\theta$ , ángulo de incidencia (promedio sobre cada período de ensayo), deg	X	X

**TABLA 10.2 - Registros de datos e información**

<b>Información General</b>
Nombre del proyecto o del fabricante
Colector Modelo N°
<p>Detalles de construcción del colector:</p> <p>Dimensión de la apertura y del área, m y m<sup>2</sup> (pies y pies<sup>2</sup>)</p> <p>Dimensión del área bruta, m y m<sup>2</sup> (pies y pies<sup>2</sup>)</p> <p>Dimensiones y superficie del área de absorción, m y m<sup>2</sup> (pies y pies<sup>2</sup>), (si son conocidos)</p> <p>Dimensiones de la cubierta**, materiales, propiedades ópticas (si son conocidas)</p> <p>Refractor de reflexión**, dimensiones, material, propiedades ópticas (si son conocidas)</p> <p>Placa absorbente, dimensiones obtenidas y configuración de la trayectoria del flujo, absorptividad para radiación de onda corta (si es conocida) emisión de radiación de onda larga (si es conocida), descripción del revestimiento (incluyendo la temperatura máxima permitida °C °F), si es conocida)</p>
Espacio(s) aéreo(s) **espesor, m(pies) y descripción del gas contenido o construcción (si es conocido)
Aislante, materiales, espesor, m(pies), propiedades térmicas (si es conocida)
Espectro.... producida con una radiación normal:
Espectro estándar AM 1.5 _____ Espectro solar simulado _____
Transferencia de calor del fluido utilizado y propiedades térmicas y físicas
Peso del colector, kg (lbm) (si es conocido) _____
Capacidad volumétrica del colector si está diseñado para operar con líquido como transferencia de fluido, m <sup>3</sup> (pies <sup>3</sup> ) (si es conocida)
Valor normal de la temperatura, °C °F

Valor mínimo del flujo de transferencia de fluido, kg/s (lmb/h)
Valor máximo del flujo de transferencia de fluido, kg/s (lmb/h)
Presión máxima de operación, Pa (lbf/pies <sup>2</sup> )
Descripción del aparato, incluyendo la configuración de flujo y los instrumentos utilizados en el ensayo (incluir fotografías)
Descripción del montaje del colector para el ensayo
Ubicación del ensayo (longitud, deg; y elevación sobre el nivel del mar m(pies)) _____
<b>Eficiencia térmica del colector***</b>
Un gráfico de la eficiencia versus $\frac{t_{f,i} - t_a}{G}$
Una ecuación para la curva de eficiencia
Para los datos de cada punto: Un gráfico de G como una función continua de tiempo _____
m (para colectores de calentamiento líquidos) <span style="float: right;">kg/s (lmb/h)</span>
m valor de la masa de fluido de la corriente baja para colectores de calentamiento de aire <span style="float: right;">kg/s (lmb/h)</span>
m valor de la masa de fluido de la corriente alta para colectores de calentamiento de aire <span style="float: right;">kg/s (lmb/h)</span>
$c_p$ <span style="float: right;">J/kg . °C (Btu/(lmb . °F)</span>

Un gráfico de la radiación infrarroja con pirogeómetro para el ensayo

de la radiación solar simulada	W/m <sup>2</sup> vs tiempo (Btu/h . pies <sup>2</sup> ) vs tiempo
T <sub>1</sub> tiempo de inicio del ensayo	LST(AS)
T <sub>2</sub> tiempo de término del ensayo	LST(AS)
$\frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} (t_{f,s} - t_{f,i}) dT$	°C • s ( °F • h)
$\frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} G dT$	J/m <sup>2</sup> ( Btu/ft <sup>2</sup> )
Inclinación del ángulo del colector (como una función de tiempo si es móvil)	grados
Ángulo acimut del colector (como una función de tiempo si es móvil)	grados
Ángulo de incidencia (como una función de tiempo si es móvil)	grados
Temperatura del fluido a la entrada, t <sub>f,i</sub>	°C (°F)
Temperatura de fluido a la salida, t <sub>f,s</sub>	°C (°F)
Porcentaje de la radiación incidente que es difusa	%
Velocidad del viento cerca de la superficie del colector o apertura	m/s (mph)
Dirección del viento cerca de la superficie del colector o apertura	Grados del norte
<b>Tiempo constante del colector</b>	
Tiempo constante del colector	min.
Un gráfico de t <sub>f,i</sub> vs tiempo	
Un gráfico de t <sub>f,s</sub> vs tiempo	
Un gráfico de t <sub>a</sub> vs tiempo	
M	kg/s (lbm/h)

T <sub>1</sub> , tiempo de inicio del ensayo	LST (AST)
T <sub>2</sub> , tiempo de término del Ensayo	LST (AST)
Descripción de la cubierta utilizada para interrumpir abruptamente la radiación	
Si la temperatura de ingreso no se puede controlar para igualar a la temperatura ambiente, proporcionar la siguiente información adicional utilizada para calcular la constante de tiempo	
$(A_a/A_g)F_R U_L$	W/(m <sup>2</sup> •°C)(Btu/h • ft <sup>2</sup> • °F)
c <sub>p</sub>	J/(kg• °C) (Btu/(lbm• °F))
A <sub>g</sub>	m <sup>2</sup> (ft <sup>2</sup> )
<b>Modificador del ángulo incidente del colector</b>	
Método (1) y Método (2)	
Un gráfico de K <sub>ατ</sub> vs θ ó [(1/cos θ) -1]	
$(A_a/A_g) F_R (\tau \alpha)_{e,n}$	
Para cada dato	
M	kg/s (lbm/h)
c <sub>p</sub>	J/(kg• °C) (Btu/(lbm• °F) )
Temperatura de fluido a la entrada, t <sub>f,i</sub>	°C (°F)
Temperatura de fluido a la salida, t <sub>f,s</sub>	°C (°F)
Temperatura ambiente, t <sub>a</sub>	°C (°F)

T <sub>1</sub> , hora de inicio del ensayo	LST(AST)
T <sub>2</sub> , hora de termino del ensayo	LST(AST)
$\frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} (t_{f,s} - t_{f,i}) dT$	_____ °C (°F)
$\frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} G dT$	_____ J/m <sup>2</sup> ( Btu/ft <sup>2</sup> )
Ángulo de inclinación del colector	grados
Ángulo acimut del colector	grados
Ángulo de incidencia	grados
Porcentaje de la radiación solar difusa	%
Velocidad del viento cerca de la superficie del colector o apertura	m/s (mph)
Dirección del viento cerca de la superficie del colector o apertura	Grados del norte
Gráfica de G como función continua del tiempo	
<b>Ensayo de pérdida de aire para colectores de aire</b>	
Fecha:	
Hora:	
Presión barométrica	, Pa (Lb <sub>f</sub> /pulg. <sup>2</sup> )
Temperatura ambiente	, °C (°F)
Humedad relativa	, %
Temperatura del fluido de ensayo	, °C (°F)
Tamaño del orificio o tobera	, mm (pulg.)
Coeficiente descarga del orificio o tobera	

<b>Datos a ser registrados para cada punto de pérdida</b>										
$\Delta P_{\text{orificio}}$ , Pa	$(P_{\text{atm}} - P_{\text{colector}})$ , Pa	Flujo de masa de la pérdida, $\text{m}^3/\text{s}$								
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										
6.										
7.										
8.										
9.										
10.										
<b>(Descripción del simulador de radiación solar, incluido espectro, colimado y uniforme) (Incluir dibujos y/o fotografías)</b>										
<p><b>Mediciones de presión</b></p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Presión absoluta (especificar corriente arriba y corriente abajo.)</td> <td>Pa (lbf/pulg<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Diferencial de presión a través del colector</td> <td>Pa (lbf/pulg<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>Temperatura media del fluido transportador de calor.</td> <td>°C(°F)</td> </tr> <tr> <td>Flujo de masa del fluido</td> <td>kg/s (lbm/h)</td> </tr> </tbody> </table>			Presión absoluta (especificar corriente arriba y corriente abajo.)	Pa (lbf/pulg <sup>2</sup> )	Diferencial de presión a través del colector	Pa (lbf/pulg <sup>2</sup> )	Temperatura media del fluido transportador de calor.	°C(°F)	Flujo de masa del fluido	kg/s (lbm/h)
Presión absoluta (especificar corriente arriba y corriente abajo.)	Pa (lbf/pulg <sup>2</sup> )									
Diferencial de presión a través del colector	Pa (lbf/pulg <sup>2</sup> )									
Temperatura media del fluido transportador de calor.	°C(°F)									
Flujo de masa del fluido	kg/s (lbm/h)									

**11. ANTECEDENTE**

ANSI / ASHRAE 93-1986 (RA)      Methods of testing to determine the  
thermal performance of solar collector

---oooOooo---

Prohibido su reproducción total o parcial

## ANEXO A

### BIBLIOGRAFÍA

#### A.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información de bibliografía adicional.

#### A.2 Bibliografía

1. ASHRAE Handbook – 1978 Applications, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329, 1978.
2. Benedict, R.P., Fundamentals of temperature, Pressure and Flow Measurements, Wiley Publishing Co., 1969.
3. Bernier, M.A., “Correcting for Header Heat Losses when Testing Solar Collectors,” Proceedings INTERSOL 85, ISES Congress, June 1985.
4. Bliss, R.W., “The Derivation of Several ‘Plate-Efficiency Factors’ Useful in the Design of Flate-Plate Solar Heat Collectors,” Solar Energy, Vol. 3, No. 4, p.55, 1959.
5. Chinnery, D.N.W., “Solar Water Heating in South Africa,” Bulletin No. 44 (Report No. 248), National Building Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, South Africa, 1971.
6. Coulson, K.L., Solar and Terrestrial Radiation, Methods and Measurements, Academic Press, New York, 1975.
7. Duffie, J.A., and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, New York, 1980.

8. Harrison, S.J., "The Effects of Irradiance Level on Thermal Performance Tests of Solar Collectors," Proceedings INTERSOL 85, June 1985.
9. Hill, J.E., J.P. Jenkins, and D.E. Jones, "Testing of Solar Collectors According to ASHRAE Standard 93-77," ASHRAE Transactions, Vol. 84, Part II, 1978.
10. Hill, H.E., and E.R. Streed, "Testing and Rating of Solar Collectors," Chapter X in Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, ASHRAE GRP 170. New York: ASHRAE, 1977.
11. Hill, J.E., E.R. Streed, G.E. Kelly, J.C. Geist, and T. Kusuda, "Development of Proposed Standards for Testing Solar Collectors and Thermal Storage Devices," NBS Technical Note 899, National Bureau of Standards, Washington, DC 20234, February 1976.
12. Hill, J.E., B.P. Wood, and K.A. Reed, "Testing Solar Collectors," Advances in Solar Energy, 1985.
13. Hottel, H.C., and B.B. Woertz, "The Performance of Flate-Plate Solar Heat Collectors," ASME Transactions, Vol. 64, p. 91, 1942.
14. Instruments for Climatological Observations, Circular B, U.S. Weather Bureau, 11th Edition, January, 1962.
15. "Instruments and Apparatus, Part 2, Pressure Measurement," Supplement to the ASME Power Test Codes, American Society of Mechanical Engineers, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, July 1964.
16. Mather, G.R., Jr., and D.C. Beekley, "Performance of an Evacuated Tubular Collector Using Non-Imaging Reflectors," Proceedings of Storing the Sun Conference, Vol. 2, 1976.
17. Mather, G.R., Jr. "ASHRAE 93-77 Instantaneous and All-Day Testing of the Sunpak Evacuated Tube Collector," ASME JSEE, Vol. 102, 1980.

18. "Measurement of Fluid Flow by Means of Uniform Plate, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full," ISO Standard 5167-1980(E), ISO Standards Handbook 15, 1983.
19. Newton, A.B., and S.H. Gilman, Solar Collector Performance Manual. Atlanta: ASHRAE.
20. Putman, W.J., D.L. Evans, and B.D. Wood, "The Effect of Different Sky Conditions on the Optical Performance of Flat-Plate and Stationary Concentrating Collectors," DSET Report 82-1201S, SERI Subcontract XX-1-1178-1, December 1982. Also in Proceedings of the ASME Solar Energy Division Sixth Annual Conference, April 1984, pp. 209-219.
21. Souka, A.F., and H.H. Safwat, "Optimum Orientations for the Double-Exposure, Flat-Plate Collector and its Reflectors," Solar Energy, Vol. 10, 1966.
22. ASHRAE Standard 41, Standard Measurements Guide. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., March 1974.
23. Whillier, A., "Prediction of Performance of Solar Collectors," Chapter VIII of applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings. Atlanta: ASHRAE.
24. Wood, B.D., P.J. Fiore, and C.R. Christopherson, "Application of ASHRAE Standard 93-77 for Testing Concentrating Collectors for the Purpose of Predicting All-Day Performance," Proceedings 1979 ISES Conference, May.
25. GUÍA DE INSTRUMENTACIÓN METEOROLÓGICA Y METODOS DE OBSERVACIÓN, WMO No. 8, de la Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 5 Edición, 1983.
26. Escala Mundial de Referencia Radiométrica, conocida como el WRR Escala, se refiere a la escala Internacional Piroheliométrica 11956 (IPS 1956) bajo la identificación de WRR = 1.022 (IPS 1956). La WRR es realizada por el Grupo Mundial de Normas (WRG) y contiene al menos cuatro cavidades absolutas de pirheliómetros de diferentes diseños que se comparan anualmente en el Centro de Radiación Mundial, Davos, Suiza.

27. Faison, T.K., J.C. Davis, y P.R. Achenbach, "Rendimiento de Dispositivos Louvered como Mezcladores de Aire", NBS Building la Ciencia Serie 27, 1970 de marzo. (Disponible de la Superintendencia de Documentos, EE.UU. Oficina de Impresión del Gobierno, Washington, DC. Pida por SD Catálogo No. C13.29/2:27)
28. Aranovich, A., y B. Gillet, "Taller de Procedimientos de Simuladores Solares". Centro de Investigación de las Comunidades Europeas ISPRA, SA. A.1.05.00.83.05, 9-11 febrero 1982.
29. Superintendente, D. "Un Método Generalizado para probar toda clase de Colectores Solares – I, Exactitud Asequible - II, Evaluación del Colectores térmicos Constantes - III. Ecuaciones lineales de Eficiencia" Energía Solar, pag. 377-399 No. 3, Vol. 32, 1984.
30. Simón, F.F., "Evaluación del comportamiento de un colector solar de placa plana, con un Simulador Solar como Base para la predicción del comportamiento y selección de colectores". NASA TM X-71793, 1975, y Energía Solar, Vol.18, 1976.

Prohibido su reproducción total o parcial

## ANEXO B

### TIEMPO SOLAR APARENTE Y TIEMPO LOCAL EN EL LUGAR DE ENSAYO

#### B.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

#### B.2 Definición

El tiempo solar aparente es el tiempo basado en el movimiento angular aparente del sol a través del cielo, con el medio día solar el sol cruza el meridiano del observador.

#### B.3 Correcciones para convertir el tiempo local estándar al tiempo solar aparente

Se necesitan dos correcciones para convertir el tiempo local estándar al tiempo solar aparente.

Primero, existe una corrección constante para la diferencia en longitud entre el meridiano del observador y el meridiano en el cual se basa el tiempo estándar local. El meridiano estándar para las zonas de tiempo de los estados Unidos son:

Este	-	75° W
Central	-	90° W
Montaña	-	105° W
Pacífico	-	120° W

$$\text{Tiempo Solar Aparente} = \text{Tiempo Estándar} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

El sol toma cuatro minutos para atravesar 1° de longitud. La segunda corrección tiene en cuenta las perturbaciones en la velocidad de rotación de la tierra, que afecta el tiempo en que el sol cruza el meridiano del observador. La relación entre el tiempo solar aparente y el tiempo estándar local es:

$$E = [9,87 \text{ sen } (2 B) - 7,53 \text{ cos } (B) - 1,5 \text{ sen } (B)]$$

$$B = 360 (n - 81)/364$$

$$n = \text{Día del año, empezando del 1° de enero.}$$

$$L_{\text{loc}} = \text{Longitud de la localidad en cuestión en grados Oeste.}$$

$$L_{\text{st}} = \text{Meridiano estándar para la zona del tiempo local. El meridiano estándar para las zonas de tiempo de los Estados Unidos continental son Este, 75° W, Centro, 90° W, Montaña, 105° W y Pacífico 120° W.}$$

Por ejemplo, cuál es el tiempo solar aparente de Phoenix ( $L_{\text{loc}} = 112^\circ \text{ W}$ ) el 21 de Mayo, cuando el tiempo estándar de la montaña es 11:30 a.m.?

$$n = \text{Día 141}$$

$$E = [9,87 \text{ sen } (118,68) - 7,53 \text{ cos } (59,34) - 1,5 \text{ sen } (59,34)]$$

$$= 3,53 \text{ minutos}$$

$$\text{AST} = 11:30 \text{ a.m.} + 4 (105 - 112) + 3,53$$

$$= 11:30 \text{ a.m.} - 24,47 \text{ minutos}$$

$$= 11:05:53 \text{ a.m.}$$

Habrà una corrección adicional de una hora para los días en que se ahorre tiempo. Si el tiempo local fuera 11:30 a.m. los tiempos de ahorro de luz en la montaña serían entonces

$$\text{AST} = 11:05:53 - 1$$

$$= 10:05:53 \text{ a.m.}$$

## ANEXO C

### PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR Y CORREGIR LAS PERDIDAS EN LOS CABEZALES

#### C.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

#### C.2 Procedimiento

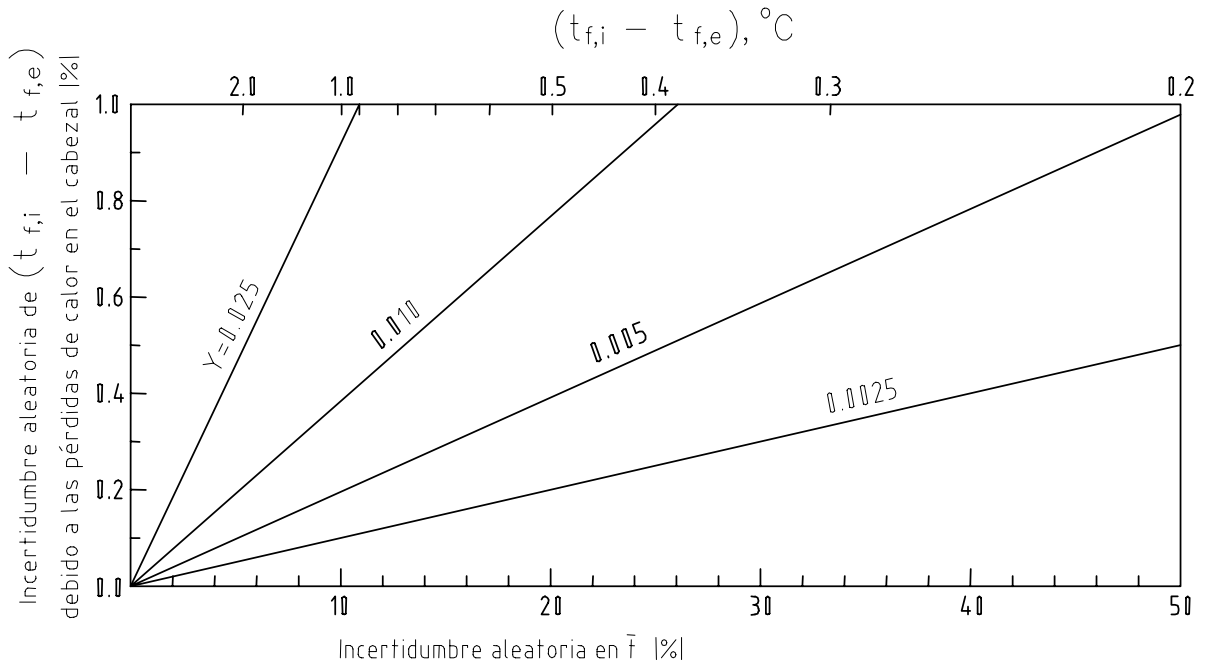
Durante el ensayo del colector, debido a mezclas y/o requerimientos de transición de tuberías, las mediciones de temperatura al ingreso y la salida son tomadas a cierta distancia del ingreso y salida reales del colector. Si no se aplican correcciones, las pérdidas de calor en los cabezales pueden introducir un error sistemático significativo en la diferencia de temperaturas y consecuentemente en la eficiencia, por lo cual se sugiere evaluar la pérdida de calor en los cabezales y corregirlos utilizando el siguiente procedimiento:

C.2.1 Comience con cabezales de idéntica construcción, bien aislados.

C.2.2 Ponga los dos cabezales frente a frente. Luego, utilizando la misma instrumentación como si fuera un ensayo de comportamiento regular de un colector solar térmico, evaluar  $t$  tomando medidas de la temperatura a la entrada del fluido ( $T_{f,i}$ ), a la salida ( $T_{f,s}$ ) y la temperatura ambiente ( $t_a$ )

$$\bar{t} = 2 \frac{t_{f,i} + t_{f,s} - 2t_d}{t_{f,i} - t_{f,s}} \quad (C-1)$$

Ya que  $t$  es directamente proporcional al flujo de masa, una  $t$  obtenida a partir del ensayo para determinar la pérdida de calor de un cabezal particular  $t_{HHL}$  es aplicable solamente a ese flujo de masa. A otro flujo, digamos  $m$ , el  $t$  correspondiente puede ser evaluado a partir de la siguiente ecuación:



**FIGURA C.1 - Valor mínimo de  $(t_{f,i} - t_{f,e})$  necesario para mantener la incertidumbre aleatoria de la de temperaturas de bajo de  $\pm 0,5 \%$**

$$\bar{t} = \frac{\dot{m}}{(\dot{m})_{HHL}} \times \bar{t}_{HHL} \quad (C-2)$$

Esta corrección es válida y proporciona el aumento resultante (o disminución) en la resistencia del coeficiente de transferencia de calor de la película interior y es insignificante comparado con la resistencia del aislamiento que cubre los cabezales).

Si la evaluación de  $t$  es realizada bajo techo, debe utilizarse un ventilador para proporcionar un flujo de aire uniforme (aproximadamente 3 a 4 m/s) a través de los cabezales. El valor mínimo de  $(t_{f,i} - t_{f,s})$  necesario para mantener la incertidumbre aleatoria en la diferencia de temperaturas (debido a las pérdida de calor en el cabezal) debajo de 0,5 % pueden ser evaluados utilizando la Figura C.1. esas curvas están basadas

en una aproximación de la medida  $(t_{f,i} - t_{f,s})$  de  $0,1^\circ$  (Véase sección 7.2.2). En la Figura C.1,  $Y = X/t$  donde

$$x = \frac{(t_{f,i} + t_{f,s})/2 - t_a}{t_{f,s} - t_{f,i}}$$

C.2.3 Utilizando la siguiente ecuación corregir la diferencia de temperatura medida  $(t_{f,s} - t_{f,i})_{promedio}$  para obtener la diferencia de temperatura real  $(t_{f,s} - t_{f,i})_{act}$ :

$$(t_{f,s} - t_{f,i})_{act} = (t_{f,s} - t_{f,i})_{promedio} + \frac{2}{\bar{t}}(t_{f,s} + t_{f,i} - 2t_a) \quad (C-3)$$

C.2.4 Ejemplo de cálculo: dos cabezales fueron colocados frente a frente y se registraron los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,025 \text{ Kg/s} & t_a &= 24,4^\circ \text{ C} \\ t_{f,i} &= 100,0^\circ \text{ C} & t_{f,i} - t_{f,s} &= 0,95^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

Entonces  $\bar{t} = 320,3$

Las condiciones de ensayo para comportamiento térmico fueron

$$t_{f,i} = 60^\circ \text{ C} \quad t_{f,s} = 70^\circ \text{ C} \quad t_a = 20^\circ \text{ C}$$

Entonces  $x = 4,5$  e  $Y = 0,014$

Utilizando la ecuación C-3, la diferencia de temperatura real es

$$(t_{f,s} - t_{f,i})_{act} = 10,56$$

A partir de la Figura C.1, la incertidumbre aleatoria estimada para esta diferencia de temperaturas real (o en  $\eta$ ), para una incertidumbre en  $(t_{f,s} - t_{f,i})$  de  $\pm 0,1^\circ \text{ C}$ , es aproximadamente 0,5 %. Posteriores detalles son proporcionados en un artículo de M. Bernier que aparece en la bibliografía.

## ANEXO D

### MÉTODO PARA CALCULAR LOS VALORES ESPECTRALES DEL PRODUCTO TRANSMISIVIDAD ABSORTIVIDAD

#### D.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

#### D.2 Método

Los valores espectrales de una propiedad óptica P pueden ser calculados como

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P(\lambda_i) E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i}{\sum_{i=1}^n E_{\lambda_i} \Delta \lambda_i}$$

Donde  $E_{\lambda_i}$  es la radiación espectral a una longitud de onda  $\lambda_i$ ,  $\Delta \lambda_i$  es el intervalo de longitud de onda,  $P(\lambda_i)$  es el valor promedio de la propiedad óptica en el intervalo de longitud de onda y n es el número de longitudes de onda para los cuales cada  $E_{\lambda}$  es conocido. Los intervalos de longitud de onda están dados por

$$\Delta \lambda_i = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}{2}$$

Excepto para el primer y último intervalo, los cuales están dados por

$$\Delta \lambda_i = \lambda_2 - \lambda_1$$

y:

$$\Delta\lambda_n = \lambda_n - \lambda_{n-1}$$

Donde  $\lambda_i$  y  $E_{\lambda_i}$  para el espectro solar de una masa estándar de aire de 1,5 están dados en la norma ASTM E82-87. Valores de E para el simulador deben ser medidos de acuerdo con la sección 8.3.1. Este procedimiento espectral debe ser aplicado a productos relevantes de propiedades espectrales ópticas (p.ej.,  $\tau\alpha$ ,  $\rho\tau\alpha$ ).

Prohibido su reproducción total o parcial

## ANEXO E

### CÁLCULO DE LA SALIDA DE LA ENERGÍA TOTAL DIARIA DEL COLECTOR

#### E.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

#### E.2 Cálculo

Los siguientes dos ejemplos considerarán dos técnicas comúnmente utilizadas para pronosticar el comportamiento de un colector durante todo el día. Cada método difiere en la forma en que la radiación difusa es utilizada para calcular la energía ganada. Considera un colector solar plano con los siguientes resultados de ensayo

$$\eta_g = 0,76 - 0,81[(t_{f,i} - t_a) / G_t] \text{ Btu } / (h.^{\circ} F \cdot ft^2)$$

$$K_{\alpha r} = 1 - 0,12[1 / \cos \theta - 1]$$

$$\dot{m} = 4,2 \text{ lbm } / \text{ min } (\text{agua})$$

La energía horaria colectada es

$$Q_u / A_g = G_t [0,76 K_{\alpha r} - 0,81(t_{f,i} - t_a) / G_t].$$

La salida diaria de energía es determinada entonces como se ilustra en las siguientes etapas y en la tabla E.1:

E.2.1 Escoger el día, localidad, y ángulo de inclinación del colector a ser analizado, p.ej. 32° Lat. N, 42° S de inclinación, julio 21.

E.2.2 La temperatura ambiente y la temperatura de fluido al ingreso del colector deben estar especificadas para cada hora. La temperatura de ingreso de fluido es dependiente del sistema o localidad y la temperatura ambiente es dependiente de la localidad, para este ejemplo  $t_{f,i} = 148$  °F y  $t_a$  está dada en la columna 2 de la tabla E.1.

E.2.3 La radiación solar horaria puede ser determinada de varias maneras. Para cálculos en días claros, es muy conveniente usar las tablas E.3 hasta E.8. La radiación solar requerida para cálculos en todo el día es la radiación global  $G_t$  es medida en el plano de apertura. Para este ejemplo, los valores  $G_t$  son tomada de la tabla E.4 para julio 21 y mostradas en la columna 3 de la tabla E.1.

E.2.4 Calcular el valor  $\Delta t / G_t$  conforme se muestra en la columna 4.

E.2.5 Determinar  $\theta$  para cada hora. Es conveniente usar las tablas desde E.9 hasta E.14. para este ejemplo

E.2.6 Utilice la tabla E.1 para determinar  $\theta$  conforme se muestra en la columna 5.

E.2.7 Para cada hora  $\theta$ , calcular el  $K_{\alpha\tau}$  apropiado y escribirlo en la columna 6.

E.2.8 Calcular la energía útil conectada cada hora. Para este ejemplo es

$$\begin{aligned}\eta_g(\theta = 0) &= 0,76 - 0,81(\Delta t / G) \\ \eta_g(\theta = 0) &= 0,76 K_{\alpha\tau} - 0,81(\Delta t / G) \\ (q_u / A_g) &= G_t [0,76 K_{\alpha\tau} - 0,81(\Delta t / G_t)]\end{aligned}$$

Esos valores están dados en la columna 7.

E.2.9 El comportamiento para todo el día es entonces la suma de los valores horarios.

La ecuación 9.4 puede ser modificada de modo que el rayo incidente, y la radiación difusa son estimadas por separado, esto es:

$$\begin{aligned}\eta_g &= a - b(t_{f,i} - t_a) / G_t \\ q_u / A &= a[K_{\alpha\tau} G_{da} + K_d G_d] - b(t_{f,i} - t_a) \\ G_t &= G_{da} + G_d \\ G_{da} &= G_{DN} \cos \theta.\end{aligned}$$

Si  $K_{\alpha\tau} = 1 - b_0[(1 / \cos \theta) - 1]$ ,

entonces

$$\begin{aligned}K_d &= (1 - b_0) \\ &= K_{\alpha\tau}(60^\circ).\end{aligned}$$

El procedimiento para calcular los valores horarios de la salida de energía es esencialmente el mismo que el primer método, salvo que la radiación difusa y la radiación directa sean tratadas separadamente como se ilustra en la tabla E.1. Note que la diferencia en la salida diaria de energía para esos dos métodos es menor que el 2 %, lo cual es correcto dentro de la aproximación experimental de los datos.

Prohibido su reproducción total o parcial

**Tabla E.1 - Energía útil horaria y diaria captada por un colector solar en base a los datos del ensayo de un colector solar plano ubicado a una latitud de 32 °N y con un ángulo de inclinación de 42 °S**

Tiempo hr	T <sub>a</sub> °F	G Btu/(h•ft <sup>2</sup> )	G <sub>da</sub> Btu/(h•ft <sup>2</sup> )	G <sub>d</sub> Btu/(h • ft <sup>2</sup> )	Δt/G (°F•h•ft <sup>2</sup> )/Btu	θ Grados	K <sub>ατ</sub>	(q <sub>u</sub> /A <sub>g</sub> ) * Btu/(h • ft <sup>2</sup> )	(q <sub>u</sub> /A <sub>g</sub> ) ** Btu/(h • ft <sup>2</sup> )
6	78	16	0	13	5,380	93,4	0	0	0
7	79	60	37	23	1,150	79,6	0,58	0	0
8	80	125	97	28	0,544	66,2	0,84	25	26
9	85	185	155	30	0,341	53,5	0,93	80	79
10	88	232	201	31	0,258	42,5	0,96	121	119
11	91	262	231	31	0,217	33,4	0,98	149	147
12	92	273	242	31	0,205	30,0	0,98	158	156
1	94	262	231	31	0,206	33,4	0,98	151	149
2	96	232	201	31	0,244	42,1	0,96	127	125
3	97	185	155	30	0,276	53,5	0,93	89	88
4	97	125	97	28	0,406	66,2	0,84	38	39
5	96	60	37	23	0,870	79,6	0,58	0	0
6	95	13	0	13	4,080	93,4	0	0	0

Energía total diaria recolectada

$$t_{f,i} = 148 \text{ °F}$$

$$(q_u/A_g)^* = G_t [ 0,76 K_{\alpha\tau} - 0,81 \Delta t / G_t ]$$

$$K_d = 0,88$$

$$(q_u/A_g)^{**} = 0,76 [ G_{da} K_{\alpha\tau} + G_d K_d ] - 0,81 ( t_{f,i} - t_a )$$

## ANEXO F

### MODIFICADORES DE ÁNGULO INCIDENTE BIAxIAL

#### F.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

#### F.2 Modificadores

Se reconoce que hay muchos colectores solares para los cuales  $(\alpha\tau)_e$  no es simétrico con respecto a  $\theta$ . Un tratamiento riguroso de la respuesta óptica podría resultar en un modificador del ángulo incidente que dependa de una manera complicada de ambos, del ángulo incidente usual y un ángulo acimutal en el plano de apertura. La determinación de este modificador del ángulo incidente biaxial para cada diseño de colector sería una tarea tediosa tanto analítica como experimentalmente. Para el caso de colectores de concentración parabólica y para colectores de tubo evacuado existen dos direcciones de simetría perpendiculares – una paralela al eje longitudinal del absorbente y otra perpendicular al eje longitudinal del eje absorbente  $K_{\alpha\tau}$ , pueden ser expresados como el producto simple de los dos modificadores de ángulos incidentes separados, cada uno tomado en dirección a la simetría perpendicular mutua ( para  $\Gamma$  y  $\Omega$ , véase Figura F.1). Entonces.

$$K_{\alpha\tau}(\theta) = K_1(\Omega)K_2(T) \quad (F-1)$$

Otra relación posible para tubos evacuados es (ver la referencia de Mather en Anexo A bibliografía).

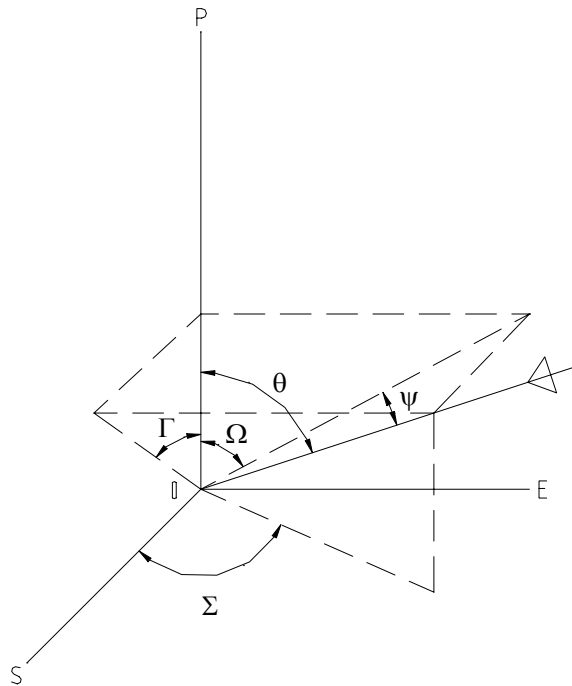
$$K_{\alpha\tau}(\theta) = K_1(\Omega)K_2(\Psi) \quad (F-2)$$

$K_2(X)$  es una medida mejor de los efectos de reflexión Fresnel que ocurren cuando los rayos no son perpendiculares al eje del tubo. Para el modificador del ángulo incidente, la radiación difusa incidente puede demostrarse que para una radiación difusa isotropica

$$K_d = \frac{4}{\pi} \int_0^{x/2} K_1(\Omega) \cos \Omega d\Omega \int_0^{x/2} K_2(\Psi) \cos^2 \Psi d\Psi \quad (F-3)$$

La ecuación F-3 puede ser evaluada ya sea numéricamente o analíticamente, si están disponibles correlaciones analíticas de K1 y K2. La salida de energía instantánea útil del colector puede ser determinada (por ejemplo, utilizando una forma de unión de la ecuación de la eficiencia, esto es:

$$q_u(\theta) / A_g = a [K_{\alpha r}(\theta) G_{da} + K_d G_d] - b(t_{f,i} - t_a) \quad (F-4)$$



**FIGURA F1 – Ángulos utilizados para definir las direcciones de las modificaciones al ángulo incidente en un plano viaxal. El plano E-O-S es un coincidente con el plano de apertura del colector**

## ANEXO G

# DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE ACEPTACIÓN PARA COLECTORES DE CONCENTRACIÓN LINEALES

### G.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

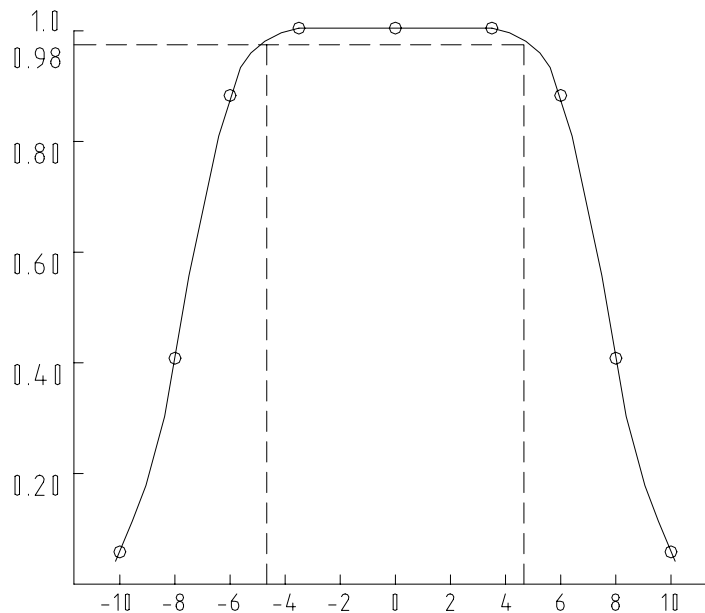
### G.2 Determinación del ángulo de aceptación

Los errores de alineamiento, punto de seguimiento, y los efectos distorsionantes del viento y de la gravedad sobre el reflector o refractor degradarán el comportamiento térmico del colector por la disminución de la fracción de la energía solar incidente sobre la apertura del colector que golpea el absorbedor. Un error de alineamiento es generalmente fijo en la fabricación de un colector y es una constante. Los otros, sin embargo, dependen de los límites de los mecanismos de seguimiento, posición del colector y orientación relativa a la velocidad del viento, velocidad de viento, integridad estructural del colector, y su sistema de soporte. Se han observado alabeos y combaduras de la superficie óptica debido a los esfuerzos mecánicos y térmicos.

Con la finalidad de diseñar un mecanismo de seguimiento para el concentrador, es necesario conocer el ángulo de aceptación para el seguidor. Este es el ángulo a través del cual una fuente puntual puede ser movida y permanecer focalizada sobre el receptor. La relación de concentración de un colector determinado está limitada por el requerimiento de que la aceptación real sea suficientemente ancha para admitir el disco entero del sol. Generalmente, el ángulo de aceptación real es definido como el doble del ángulo medio de aceptación, el cual es la mitad del zoom angular dentro del cual es aceptada la radiación (esto es "vista") por el receptor. Se dice que la radiación es aceptada sobre el ángulo de aceptación  $2\theta_{\max}$ , debido a que la radiación incidente dentro de éste ángulo alcanza el absorbedor después de pasar a través de la abertura. Los ángulos prácticos de aceptación van desde un mínimo de  $0,5^\circ$  (susteniendo el disco solar) a  $180^\circ$  (aceptación de radiación de un colector solar plano desde un hemisferio completo).

El Ensayo del modificador del ángulo de incidencia, tal como se definió en la sección 9.3.4.2.2 puede ser utilizado para definir el ángulo de aceptación del concentrador. Una definición para la aceptación puede ser el rango de los ángulos de incidencia medidos desde una normal al eje de seguimiento en el cual el modificador del ángulo de incidencia varía en no más del  $\pm 2\%$  del valor de la incidencia normal.

Considere el siguiente ejemplo para un colector de concentración de canal parabólico, utilizando el método (2) de la sección 9.3.4.3.2. Los resultados son dados en la Figura G.1. Para éste ejemplo, el ángulo medio de aceptación es  $4,5^\circ$ .



**FIGURA G1 – Ángulo de modificación incidente en función del ángulo de incidencia medido en un plano perpendicular al eje de seguimiento**

## ANEXO H

### MODIFICADORES DEL ÁNGULO INCIDENTE

#### H.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

#### H.2 Determinación de los modificadores del ángulo incidente

Se recomienda el procedimiento siguiente para determinar  $b_0$  en la ecuación 9.18

Para colectores solares de placa plana cuyas propiedades de radiación son simétricas con respecto a  $\theta$ ,  $(\tau\alpha)_s$  puede ser correlacionado con  $\theta$  por

$$(\tau\alpha)_s = a - b / \cos\theta \quad (\text{H-1})$$

Combinando la ecuación H-1 con la ecuación 9.16, el modificador de ángulo incidente

$$K_{\alpha\tau} = \frac{a - b / \cos\theta}{a - b} \quad (\text{H-2})$$

o

$$K_{\alpha\tau} = 1 - \frac{b}{a - b} \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (\text{H-3})$$

Llamemos

$$b_0 = b / (a - b) \quad (\text{H-4})$$

Entonces,  $K$  varía con el ángulo de incidencia de acuerdo con la expresión general dada por la ecuación 9.18, que es:

$$K_{\alpha\tau} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (H-5)$$

Donde,  $K_{\alpha\tau}$  es una función lineal del parámetro  $[(1/\cos\theta)-1]$ . La constante de correlación  $b_0$  puede ser determinada utilizando las ecuaciones 9.4 y H-4. Primero hagamos

$$a' = (A_a / A_g) F_R a \quad (H-6)$$

$$b' = (A_a / A_g) F_R b \quad (H-7)$$

Entonces la ecuación 9.4 puede ser escrita como:

$$\eta_g = A_a / A_g F_R (\alpha\tau)_s = a' - b' / \cos\theta \quad (H-8)$$

Donde  $\eta_g$  es la eficiencia del colector para  $(t_{f,i} = t_a)$  al ángulo de incidencia  $\theta$ . Ya que

$$\frac{b}{a-b} = \frac{b'}{a'-b'} \quad (H-9)$$

Entonces

$$b_0 = b' / (a' - b') \quad (H-10)$$

Las constantes  $a'$  y  $b'$  pueden ser determinadas fácilmente, por al menos correlaciones de polinomios de segundo orden y de primer orden descritos por la ecuación H-8 y por los datos obtenidos de acuerdo con la sección 9.3.4. El  $b$  es determinado a partir de la ecuación H-10.

#### Ejemplo de cálculo para determina $b_0$

Fecha:	$\theta$	$(A_a/A_g)F_R(\tau\alpha)_e$
	0	0,770
	30	0,716
	30	0,720
	45	0,702
	45	0,710
	60	0,647
	60	0,652

Del ajuste de los mínimos cuadrados utilizando la ecuación H-8

$$a' = 0,846 \quad b' = 0,0992$$

o

$$\eta_g = 0,846 - 0,0992 / \cos \theta \quad (\text{H-11})$$

Entonces de la ecuación H-10

$$b_0 = 0,133$$

Finalmente

$$K_{ar} = 1 - 0,133[(1 / \cos \theta) - 1]$$

Prohibido su reproducción total o parcial

## ANEXO I

# PROCEDIMIENTO PARA ENSAYAR COLECTORES SOLARES EN LOS CUALES EL FLUÍDO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PUEDE CAMBIAR DE FASE EN EL ABSORBEDOR Y LA ENERGÍA COLECTADA ES REMOVIDA VIA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CONDENSACIÓN INTEGRAL

### I.1 Objetivo

Este Anexo es incluido sólo para propósitos de información.

### I.2 Procedimiento

Esta NTP no es directamente aplicable para el ensayo de colectores solares en los cuales el fluido de transferencia de calor cambia de fase conforme pasa por el colector y alguna proporción deja el colector como vapor. Esos colectores deben ser evaluados usando la técnica de la Norma estándar ASHRAE 109-1986 (RA 90).

Secciones de esta NTP son aplicables a colectores que tienen un fluido intermedio en la placa absorbente que hierve (cambio de fase) e incorpora un intercambiador de calor de condensación integral enfriado por un fluido que ingresa al colector a través de un ingreso simple y deja este a través de una salida simple.

Para esta clase genérica de colectores solares el comportamiento medido puede ser dependiente del nivel de radiación, no permitiendo entonces que el colector sea adecuadamente descrito por la ecuación de comportamiento bien conocido de Hottel-Whillier.

Para evaluar el comportamiento de esos tipos de colectores los ensayos deben ser realizados por lo menos con dos niveles de radiación, así,

**Paso 1:** Un ensayo de eficiencia de comportamiento térmico completo debe ser realizado de acuerdo a lo indicado en la sección 9 de esta NTP pero a un nivel de radiación de por lo menos  $800 \text{ W/m}^2$  ( $254 \text{ Btu/(h} \cdot \text{ft}^2)$ ).

**Paso 2:** En adición al ensayo arriba indicado, una segunda secuencia de ensayos debe ser realizada a una radiación por debajo de  $500 \text{ W/m}^2$  ( $159 \text{ Btu/(h} \cdot \text{ft}^2)$ ) y a una temperatura del fluido de ingreso igual a la temperatura del aire ambiente. Un segundo punto de ensayo a este bajo nivel de radiación pero a una temperatura  $t_{f,i}$  mayor que  $t_a$  es deseable pero no requerida.

Se ha demostrado que un comportamiento de esta clase de colector puede ser descrita con una ecuación de la forma

$$q_u / A_g = e + c(G_t) + d(\Delta t) + f(\Delta t)^2$$

Donde  $\Delta t = (t_{f,i} - t_a)$  y los términos  $c$ ,  $d$ ,  $e$ , y  $f$  son coeficientes derivados de los ensayos del comportamiento térmico al menor de los dos niveles de radiación. El coeficiente  $e$  viene del mínimo del nivel de energía o nivel de radiación para el cual ocurre la ebullición.

La eficiencia térmica,  $\eta$ , está dada por

$$\eta = q_u / A_g G_t$$

La prueba del modificador del ángulo de incidencia sólo se necesita ser realizada al nivel de radiación más alto de acuerdo con la sección 9.3.4. Ejemplo:

$G_t$ $W/m^2$	$\Delta T$ $^{\circ}C$	$(q_u/A_g)$ medido $W/m^2$	$(q_u/A_g)$ calculado $W/m^2$	Residual
897,1	2,5	275,0	572,4	-2,6
894,8	21,2	513,0	511,6	-1,4
900,8	74,7	249,9	248,0	-1,9
899,9	49,4	386,4	392,0	5,9
400,5	1,6	218,5	223,2	4,8
392,0	25,0	145,9	141,2	-4,7

El coeficiente determinado por el método de los mínimos cuadrados con un coeficiente de correlación

$$q_u / A_g = -56,26 + 0,708 G_t - 2,56 \Delta t - 0,025 \Delta t^2$$