



Universidad de la República
Facultad de Ingeniería



Ensayos de desempeño térmico de colectores solares de placa plana

Juan Manuel Rodríguez Muñoz

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de la Energía, realizada bajo la orientación del Dr. Italo Bove y el Dr. Ing. Rodrigo Alonso Suárez.

Montevideo
Abril, 2021

Integrantes del tribunal de defensa de tesis:

Dr. Gonzalo Abal
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay

Dr. Ing. Pedro Galione
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay

Dr. Octavio García Valladares
Universidad Nacional Autónoma de México
Morelos, México

Montevideo
Abril, 2021

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a los integrantes del proyecto BECS: Ignacio Texeira, Rodrigo Alonso Suárez, Roberto Iurato, Javier Capeche y Andrés Monetta. El profesionalismo y esfuerzo de estas personas permitió el desarrollo de una infraestructura de alta calidad, la cual posibilitó la creación de una nueva área de I+D en el LES, dentro de la cual se enmarca esta tesis. También agradezco a Gonzalo Abal por haber impulsado y apoyado institucionalmente la realización de este proyecto, y por haber sentado algunas de las bases conceptuales del proyecto, como la redundancia Este-Oeste.

En segundo lugar, agradezco a la DNE y a la CND por haber financiado el proyecto y por haber apoyado el lineamiento estratégico de construir el BECS con recursos locales. Esto último permitió tener un conocimiento detallado de las instalaciones del BECS, lo que facilitó la implementación de las metodologías de ensayo SST y QDT. Agradezco también al PTB de Alemania por haber organizado la intercomparación de laboratorios de ensayos de colectores solares en Latinoamérica, actividad que permitió validar la implementación de dichas metodologías de ensayo.

Agradezco a mis directores de tesis, por la confianza y la acertada orientación. También les agradezco los innumerables consejos laborales y personales que me han dado a lo largo de estos años, los cuales me han permitido crecer como persona y profesional.

Agradezco a Pedro Curto, colaborador de la FING en las etapas iniciales del proyecto junto a Ivo Caggiani. A Antonio Saez, responsable del taller mecánico del IFFI-FING, quien ayudó a resolver diversos problemas técnicos durante la puesta en marcha del BECS. A los integrantes del LES y del Departamento de Física del CENUR LN, por el apoyo constante y el excelente clima de trabajo.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mi familia y a mis seres queridos. A mis abuelos, por el cariño brindado y por el gran ejemplo de superación que me han dado. A mis padres, por el apoyo incondicional y por haberme alentado siempre a hacer lo que más me gusta. Y a mi novia, por la confianza y por acompañarme siempre, tanto en los buenos como en los malos momentos.

Resumen

En 2013 se firma un convenio entre el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), la Universidad de la República (UdelaR) y la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND) para la construcción de un Banco de Ensayos de Calentadores Solares (BECS). El objetivo del BECS es el ensayo de desempeño térmico bajo normativa ISO vigente de colectores solares y sistemas solares prefabricados para el calentamiento de agua sanitaria. Para los ensayos de colectores solares se utiliza la norma ISO 9806. La versión actual de esta norma posee dos metodologías de ensayos, una en estado estacionario y la otra en condiciones cuasi-dinámicas. La primera metodología de ensayo es la de uso más extendido y requiere mantener con gran estabilidad diversas variables de ensayo, incluida la irradiancia solar. Esto implica que los ensayos al exterior deben hacerse en condiciones estrictas de cielo claro, lo cual limita notoriamente la capacidad de ensayos de los laboratorio que se encuentran en climas con nubosidad variable, como es el caso del BECS, ubicado en la región de la Pampa Húmeda al sureste de Sudamérica. La metodología cuasi-dinámica, de uso mucho menos extendido, requiere que el colector funcione bajo distintas condiciones de cielo: despejado, parcialmente nublado y completamente nublado. Esta característica hace que la metodología cuasi-dinámica se adapte mejor a climas con nubosidad variable redundando en menores tiempos totales de ensayo.

En esta tesis se implementan localmente las metodologías de ensayo en estado estacionario y cuasi-dinámico, evidenciando las ventajas que presenta la utilización de esta segunda metodología en Uruguay y la región. La implementación de la metodología cuasi-dinámica es novedosa en la región, siendo ésta una de las primeras implementaciones bajo norma a nivel de Latinoamérica. Los resultados de esta metodología se comparan con los del ensayo en estado estacionario. Los ensayos que se presentan en esta tesis fueron realizados en el marco de una intercomparación de laboratorios de ensayos organizada por el Instituto Metrológico Alemán, por lo tanto, los resultados son también comparados con los de otros laboratorios. A partir de esta comparación se concluye que ambas metodologías han sido implementadas correctamente y que son equivalentes entre sí. La presente tesis representa un paso significativo en el desarrollo de capacidades de ensayo de colectores solares en la región.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	III
Índice general	VI
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	IX
Lista de acrónimos	XI
Lista de símbolos	XIII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Sobre esta tesis	5
2 Desempeño térmico de colectores solares de placa plana	7
2.1 Colectores solares de placa plana	7
2.2 Caracterización del desempeño térmico	8
2.2.1 Estado estacionario	8
2.2.2 Estado transitorio	12
2.3 Ensayo de desempeño térmico en estado estacionario	14
2.3.1 Ensayo de eficiencia	16
2.3.2 Ensayo de modificador por ángulo de incidencia	16
2.3.3 Ensayo de capacidad térmica	17
2.4 Ensayo de desempeño térmico en estado transitorio	18
2.4.1 Resolución en el dominio temporal	19
2.4.2 Resolución en el dominio frecuencial	23
2.5 Norma ISO 9806:2017	24
2.5.1 Generalidades	24
2.5.2 Ensayo en estado estacionario SST	25
2.5.3 Ensayo en condiciones cuasi-dinámicas QDT	27

2.5.4	Conversión de parámetros SST a QDT	28
3	Banco de Ensayos de Calentadores Solares	31
3.1	Desarrollo del BECS	31
3.2	Puesto Este de colectores	33
3.2.1	Seguidor solar	33
3.2.2	Instrumentos de medida	35
3.2.3	Instalación termo-hidráulica	38
3.2.4	Instalación eléctrica y sistema de control	40
3.2.5	Instalación de aire comprimido	41
3.3	Evaluación externa del BECS	42
3.4	Estimativo de la cantidad de ensayos anuales	42
4	Resultados y discusión	49
4.1	Ensayo en estado estacionario SST	49
4.1.1	Ensayo de eficiencia	50
4.1.2	Ensayo de modificador por ángulo de incidencia	52
4.1.3	Ensayo de capacidad térmica	55
4.1.4	Conversión de parámetros SST a QDT	56
4.2	Ensayo en condiciones cuasi-dinámicas QDT	57
4.2.1	Descripción de las secuencias de medidas	57
4.2.2	Procedimiento de identificación de parámetros	60
4.2.3	Resultados	64
4.3	Validación de resultados	73
5	Conclusiones y perspectivas	79
5.1	Conclusiones	79
5.2	Perspectivas a futuro	80
A	Métodos de ensayos basados en la transformada de Laplace	83
B	Cálculos complementarios	87
B.1	Magnitudes solares	87
B.1.1	Irradiancia solar en el tope de la atmósfera	87
B.1.2	Movimiento aparente del Sol	88
B.1.3	Ángulo de incidencia para inclinaciones arbitrarias	89
B.2	Densidad y calor específico del agua	90
	Referencias	96
	Glosario	97

Índice de tablas

2.1	Variabilidad permitida para metodología SST.	26
3.1	Incertidumbre de algunas variables de ensayo y requisitos de la norma.	38
3.2	Cantidad de ensayos mensuales según metodología SST.	45
3.3	Cantidad de ensayos mensuales según metodología QDT.	46
4.1	Medidas de ensayo de eficiencia (SST).	51
4.2	Resultados ensayo de eficiencia (SST).	51
4.3	Medidas de ensayo de modificador por ángulo de incidencia (SST).	54
4.4	Resultados de ensayo de modificador por ángulo de incidencia (SST).	54
4.5	Descripción de las secuencias de medida del ensayo QDT.	58
4.6	Resultados ensayo del QDT utilizando el método 1.	65
4.7	Resultados del ensayo QDT utilizando el método 2.	69
4.8	Efecto del tiempo de promediado en $E_c(\hat{p})$	73
4.9	Resultados de la intercomparación de laboratorios, parámetros.	75
4.10	Resultados de la intercomparación de laboratorios, potencia útil.	76

Índice de figuras

2.1	Componentes de un colector solar de placa plana.	8
2.2	Procedimiento de regresión no lineal.	21
3.1	Foto frontal del Banco de Ensayos de Calentadores Solares.	33
3.2	Montaje del colector en el seguidor solar.	34
3.3	Equipo de medición de irradiancia difusa en plano horizontal.	36
3.4	Esquema de la instalación termo-hidráulica.	39
3.5	Ubicación de algunos elementos de las instalación.	40
3.6	Ubicación del LES dentro de la región climática afín de la pampa húmeda.	43
3.7	Cantidad de ensayos mensuales según metodologías SST y QDT.	46
4.1	Datos experimentales de eficiencia y curva ajustada.	52
4.2	Datos experimentales del IAM y curva ajustada.	55
4.3	Temperaturas del fluido durante el ensayo de capacidad térmica.	56
4.4	Variabilidad de las secuencias de medida del ensayo QDT.	59
4.5	Resultados del ensayo QDT utilizando el método 1.	66
4.6	Resultados del ensayo QDT utilizando el método 2.	70
4.7	Efecto del tiempo de promediado en la medidas de temperatura media.	71
4.8	Efecto del tiempo de promediado en la salida del modelo numérico.	72
B.1	Ángulos para describir el movimiento aparente del Sol.	89

Lista de acrónimos

ACS	Agua Caliente Sanitaria
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BECS	Banco de Ensayos de Calentadores Solares
CENER	Centro Nacional de Energías Renovables
CND	Corporación Nacional para el Desarrollo
DNE	Dirección Nacional de Energía
EN	Norma Europea
ETC	Evacuated Tube Collector
EST	Energía Solar Térmica
FPC	Flat Plate Collector
ICE	Instituto Constarrence de Energía
IAM	Incident Angle Modifier
INTI	Instituto Nacional de Energía Industrial
ISFH	Institute for Solar Energy Research in Hamelin
ISO	International Organization for Standarization
LATU	Laboratorio Tecnológico del Uruguay
LES	Laboratorio de Energía Solar
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PID	Proportional, Integral and Derivative
QDT	Quasi-Dynamic Testing
SRC	Standard Reporting Condition
SST	Steady State Testing
UdelaR	Universidad de la República
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

Lista de símbolos

A_C	Área del absorbedor, m ²
A_G	Área bruta del colector, m ²
a_1	Factor de pérdidas térmicas de primer orden, W/m ² K
a_2	Factor de pérdidas térmicas de segundo orden, W/m ² K ²
a_{50}	Factor de pérdidas térmicas global a $(T_m - T_a) = 50$ K, W/m ² K
b_0	Factor de ajuste del modelo de Souka and Safwat (1966)
c_p	Calor específico del fluido que circula por el colector, J/(kgK)
C	Capacidad térmica efectiva del colector, J/K
C_f	Capacidad térmica del fluido en el interior del colector, J/K
C_p	Capacidad térmica de la placa absorbedora, J/K
F'	Factor de eficiencia
F_R	Factor de remoción de calor
f_{cor}	Factor de corrección para la medida G_{dh} con banda de sombra
f_d	Fracción difusa en plano horizontal = G_d/G_h
f_d^*	Fracción difusa en plano inclinado = G_{dt}/G_t
G_s	Constante solar, W/m ²
G_0	Irradiancia solar extraterrestre en incidencia normal, W/m ²
G_{0h}	Irradiancia solar extraterrestre en plano horizontal, W/m ²
G_h	Irradiancia solar global en plano horizontal, W/m ²
G_b	Irradiancia solar directa en incidencia normal, W/m ²
G_{dh}	Irradiancia solar difusa en plano horizontal, W/m ²
G_t	Irradiancia solar global en plano inclinado, W/m ²
G_{bt}	Irradiancia solar directa en plano inclinado, W/m ²
G_{dt}	Irradiancia solar difusa en plano inclinado, W/m ²
k_t	Índice de claridad = G_h/G_{oh}
k'_t	Índice de claridad de Perez et al. (1990)
K_{av}	Modificador por ángulo de incidencia = $(\tau\alpha)_{av}/(\tau\alpha)_n$
K_{hem}	Modificador por ángulo de incidencia = $\eta_{0,hem}(\theta)/\eta_{0,hem}$
K_b	Modificador por ángulo de incidencia = $\eta_{0,b}(\theta)/\eta_{0,b}$
K_d	Modificador por ángulo de incidencia para G_{dt}
L	Largo del colector, m

m	Masa de aire = $1/\cos \theta_z$
\dot{m}	Caudal másico de fluido que circula por el colector, kg/s
q	Caudal volumétrico de fluido que circula por el colector, m ³ /s
\dot{Q}_u	Potencia útil producida por el colector, W
S	Irradiancia solar absorbida por la placa absorbedora, W/m ²
T_a	Temperatura ambiente, °C
T_i	Temperatura del fluido a la entrada del colector, °C
T_o	Temperatura del fluido a la salida del colector, °C
T_f	Temperatura del fluido en el interior del colector, °C
T_m	Temperatura media del fluido en el interior del colector, °C
T_p	Temperatura de la placa absorbedora, °C
T_{mp}	Temperatura media de la placa absorbedora, °C
U_L	Coef. global de pérdidas térmicas referido a $(T_{mp} - T_a)$, W/m ² K
U_0	Coef. global de pérdidas térmicas referido a $(T_m - T_a)$, W/m ² K
U_{fp}	Coef. de transferencia de calor entre fluido y placa abs., W/m ² K
v	Velocidad del viento paralelo al plano del colector, m/s
α_s	Altura solar, rad
β	Inclinación horizontal del colector, rad
γ	Azimut del colector, rad
γ_s	Azimut del Sol, rad
δ	Declinación solar, rad
Δt	Paso temporal de simulación dinámica, s
Δt_{av}	Tiempo de promediado de datos experimentales, s
η	Eficiencia del colector referida a G_t y A_c
η_{op}	Eficiencia óptica del colector referida a G_t y A_c
η_{ter}	Eficiencia térmica del colector referida a G_t y A_c
η_{hem}	Eficiencia del colector referido a G_t y A_G
η_b	Eficiencia del colector referido a G_{bt} y A_G
$\eta_{0,hem}$	Eficiencia pico del colector (η_{hem} a $(T_m - T_a) = 0$ K)
$\eta_{0,b}$	Eficiencia pico del colector (η_b a $(T_m - T_a) = 0$ K)
θ	Ángulo de incidencia, rad
θ_z	Ángulo cenital, rad
ρ	Densidad del fluido que circula por el colector, kg/m ³
ρ_s	Reflectividad del suelo
$(\tau\alpha)_{av}$	Producto $(\tau\alpha)$ promedio = S/G_t
$(\tau\alpha)_n$	Producto $(\tau\alpha)_{av}$ en incidencia normal
ϕ	Latitud del observador, rad
ψ	Longitud del observador, rad
ω	Ángulo horario, rad
ω_s	Ángulo horario de salida/puesta del sol, rad

Capítulo 1

Introducción

El aumento sostenido del consumo final de energía sumado al hecho de que el 85 % proviene de combustibles fósiles (IEA, 2016a) genera gran preocupación respecto a las emisiones de CO₂ y su efecto en el cambio climático. Las dos acciones más importantes para reducir estas emisiones son la incorporación de fuentes de energía renovable a la matriz energética mundial y la reducción de la demanda a través de medidas de eficiencia energética. En 2016 el sector edilicio fue responsable del 30 % del consumo final de energía mundial (IEA, 2016b) mientras que en Uruguay este sector representó el 25 % en el año 2019 (BEN, 2019). Una parte importante de este consumo se destina a la preparación de agua caliente sanitaria (ACS) y a los sistemas de calefacción y refrigeración. La energía solar térmica (EST) de baja temperatura es una candidata para sustituir una parte importante del uso tradicional de energía para ACS y para los sistemas de acondicionamiento térmico en el sector edilicio. Producto del esfuerzo de algunos países, entre 2007 y 2018 la capacidad instalada de colectores solares a nivel mundial se triplicó, pasando de 145 GW en 2007 a 481 GW en 2017 (REN21, 2019; IEA, 2020). No obstante, si bien la energía solar térmica ha crecido de forma notoria, la participación de esta tecnología en la matriz energética mundial sigue siendo pequeña y se ha desacelerado en los últimos años.

Los colectores solares térmicos son dispositivos que permiten captar la energía solar y utilizarla para calentar un fluido ya sea aire, agua u otro. Este trabajo se enfoca en los colectores solares que permiten alcanzar temperaturas cercanas a los 100 °C, rango conocido como baja temperatura. Existen distintas tecnologías de este tipo de colectores solares. Por un lado se tienen los colectores sin cubierta, normalmente utilizados en el calentamiento de agua para piscina, y por otro lado se tienen los colectores con cubierta. Estos últimos, a su vez se pueden dividir en dos grandes familias: (i) colectores de placa plana (*Flat Plate Collector*, FPC), y (ii) colectores de tubos evacuados (*Evacuated Tube Collector*, ETC). En 2018, aproximadamente un 71 % de la capacidad instalada de colectores en el mundo correspondían a ETC, un 23 % a FPC

y el 6 % restante a colectores sin cubierta. Sin duda alguna los colectores ETC dominan el mercado, pero cabe destacar que un 90 % de estos colectores fueron instalados en el mercado Chino, el principal mercado de colectores a nivel mundial. El segundo mercado más importante lo constituyen los países de Europa, y en este mercado los colectores FPC representan un 81 % de la capacidad instalada. En nuestro país para finales del 2018 se tenían 53.2 MW de capacidad instalada en funcionamiento, siendo colectores FPC en su mayoría. La decisión de un potencial usuario sobre instalar o no un colector solar depende de varios factores, destacándose la calidad y el costo del equipo. Una mayor calidad de los equipos afectan su costo y viceversa, por lo que el objetivo es disponer de equipamiento eficaz y durable al menor costo posible.

Un colector solar a lo largo de su vida útil (del orden de los 15-20 años) se ve sometido a diferentes solicitaciones mecánicas y térmicas producto de las variaciones de las condiciones de funcionamiento y meteorológicas. Dichas solicitaciones pueden ser demasiado exigentes para el colector, pudiendo ocasionar una falla, por ejemplo: que se rompa o resquebraje la cobertura de vidrio, que se rompa o se deforme la placa absorbadora, que se dañe el aislamiento térmico, etc. Si esto sucede, el desempeño térmico del colector se verá disminuido y hasta puede ser necesario sustituirlo. Naturalmente, esto deriva en una pérdida económica y puede desmotivar el uso de la tecnología. Esto hace necesario la realización de ensayos de calificación, es decir, de ensayos en los que se determine si los materiales y los procesos de fabricación de los colectores son los adecuados. Estos ensayos se deben realizar en el menor tiempo posible con el fin de reducir los costos de los laboratorios. Como dichas solicitaciones dependen en gran medida de las condiciones meteorológicas a las que estará expuesto el colector, los ensayos deben estar adaptados al clima local. Por otro lado, para el dimensionamiento de las instalaciones solares, y la comparación entre distintos equipamientos, es necesario conocer la energía útil que producirá un colector en determinadas condiciones de funcionamiento. Conocer el comportamiento termodinámico de los equipos permite estudiar la adecuación de distintas tecnologías (FPC, ETC o colectores sin cubierta) a diferentes aplicaciones y/o zonas climáticas. Esta información se obtiene a partir de ensayos de desempeño térmico de los equipos, que se suman a los ensayos de calificación (calidad). La suma de ambos ensayos constituyen un elemento esencial para continuar el desarrollo de la tecnología de colectores, mejorando su eficiencia, durabilidad y costo. Esto permite aumentar la participación de la energía solar térmica en la matriz energética global. Cabe aclarar que el hecho que un país cuente con estas capacidades de ensayo no garantiza que la capacidad instalada de colectores solares aumente, dado que esto dependerá en definitiva de las políticas energéticas que adopte cada país. No obstante, si dicha capacidad no está disponible, las políticas públicas a aplicar se verán limitadas y difícilmente tendrán éxito debido a que no será posible asegurar la calidad de los colectores comercializados en plaza. La capacidad de ensayo

local permite además mejorar la calidad de los productos nacionales y aumentar su competitividad.

Tradicionalmente los ensayos de desempeño térmico de colectores solares al aire libre se han realizado en estado estacionario (*Steady State Testing*, SST). Para asegurar el estado estacionario se requiere mantener con gran estabilidad diversas variables durante el ensayo. Algunas de ellas son controlables, como la temperatura del fluido a la entrada del colector y el caudal, y otras son no controlables, como la irradiancia solar o las condiciones de viento sobre el colector. Es posible mitigar la acción del viento en los alrededores forzando viento de forma artificial a una velocidad determinada sobre el colector, elemento que es considerado por todos los laboratorios al exterior. El control del ángulo de incidencia es también una limitante, dado que el movimiento aparente del Sol varía para cada momento del año. Por ende, dada todas las restricciones geométricas, no es sencillo conseguir los ángulos de incidencia necesarios para un ensayo en estado estacionario bajo norma, incluso utilizando sistemas de seguimiento solar. Estas condicionantes, en especial las relacionadas con la irradiancia solar y el ángulo de incidencia, limitan la cantidad de ensayos que un laboratorio puede realizar en un año.

Buscando solucionar esta situación, en la década de los 80'y 90' se realizaron los primeros ensayos de desempeño térmico en estado transitorio para colectores solares (Emery and Rogers, 1984; Prapas et al., 1989; Wang et al., 1987; Spirkel and Muschaweck, 1992; Bosanac et al., 1994; Muschaweck and Spirkel, 1993; Perers, 1993, 1997; Amer et al., 1998a,b) y se comenzaron a evidenciar las ventajas de este método en sitios con nubosidad variable, donde las condiciones meteorológicas para el ensayo SST son difíciles de conseguir. La norma europea EN-12975-2 (2001) fue la primera norma en incorporar una metodología estandarizada en estado transitorio, la cual está basada en los trabajos de Perers (1993, 1997) y es la que se conoce como metodología cuasi-dinámica (*Quasi Dynamic Testing*, QDT). Varios laboratorios europeos implementaron dicha metodología y la validaron contra la tradicional en estado estacionario (Fischer et al., 2004; Osorio and Carvalho, 2014; García de Jalón et al., 2011; Zambolin and de Col, 2010), pero en Latinoamérica, por distintos motivos, esta metodología no ha sido adoptada por la mayoría de los laboratorios, existiendo muy pocos antecedentes a la fecha (Kratzenberg et al., 2006). En el año 2006 se publica una nueva versión de la norma, la EN-12975-2 (2006), la cual consolida el método QDT como metodología válida de ensayo. Dado que el método SST requiere condiciones exigentes de cielo despejado para su correcta implementación, el método QDT se presenta como una alternativa más factible de realizarse en climas con mayor presencia de nubosidad, donde los días de cielo despejados son escasos. Debido a sus características, la metodología QDT no sólo permite, sino que además es un requisito de la misma, que durante el ensayo hayan ocurrido diferentes condiciones de cielo

(cielo despejado, parcialmente nublado y completamente nublado), siendo difícil de implementar en sitios con predominancias de cielos despejados (en climas áridos o desérticos, por ejemplo). Los laboratorios de ensayo pueden optar por utilizar una u otra metodología según sean las condiciones meteorológicas locales (utilizando la misma infraestructura de ensayo), siendo ésta una adaptación local necesaria para optimizar la cantidad de ensayos anuales que un laboratorio puede realizar, reduciendo así los costos de ensayo.

1.1. Antecedentes

En el año 2008 en Uruguay se aprueba una política energética con proyección en el largo plazo ([MIEM-DNE, 2008](#)). Uno de los ejes de dicha política era la diversificación de la matriz energética a través del fomento de las fuentes de energía autóctonas, en particular las renovables. En lo que respecta a EST, en 2009 se aprueba la Ley Nro. 18.585, mejor conocida como “Ley Solar”, a través de la cual se declara de interés nacional la investigación, el desarrollo y la formación en el uso de la energía solar térmica. Esta ley busca ampliar la capacidad instalada de calentadores solares para ACS en el sector residencial y de servicios (hoteles, centros de asistencia de salud y clubes deportivos). Esto requirió el desarrollo de una infraestructura local que permitiera certificar la calidad y el desempeño térmico de los equipos comercializados en plaza. El primer antecedente en la construcción de un banco de ensayos que permitiera evaluar el desempeño térmico de colectores solares inició en el año 2008 a través del convenio “Evaluación del potencial térmico en Uruguay y análisis de la factibilidad de su utilización” entre la Dirección Nacional de Energía (DNE) del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) y la Facultad de Ingeniería (FING) de la Universidad de la República (Udelar). En dicho marco, el equipo del Dr. Ing. José Cataldo desarrolló un primer prototipo de banco de ensayo a muy bajo costo, que permitió probar distintas alternativas de diseño y evidenciar los puntos críticos para lograr implementar la metodología SST, en especial, en lo que refiere a la alta estabilidad requerida de las variables de ensayo como temperatura y caudal. Dicho equipo estaba integrado por el Ing. Ignacio Texeira, en aquel entonces estudiante de Ingeniería Industrial Mecánica, quien dedicó gran esfuerzo a su construcción, diseño y puesta en funcionamiento.

Posteriormente, con la experiencia adquirida en el primer banco de ensayos construido en FING, en 2013 se firma un convenio entre el MIEM/DNE, y el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Udelar y la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND) para la construcción de un Banco de Ensayos de Calentadores Solares (BECS), a ubicar en el predio del LES en Salto. El objetivo del BECS es el ensayo bajo normativa ISO vigente de colectores solares y sistemas solares prefabricados pa-

ra el calentamiento de ACS. Este proyecto fue dirigido durante el periodo 2012-2018 por el Ing. Rodrigo Alonso-Suárez y contó con la dirección técnica del Ing. Teixeira en las etapas de diseño y construcción de la infraestructura de ensayo. Me incorporo al grupo de trabajo en 2015 como ayudante de ingeniero y colaboro en las etapas de diseño y compra de materiales. A mediados de 2016 asumo la responsabilidad técnica del BECS, teniendo a mi cargo la puesta en marcha de la instalación, la cual se extiende hasta octubre de 2018. La puesta en marcha implicó la resolución de algunos detalles de diseño, la puesta a punto del sistema de control junto al Ing. Roberto Iurato y la realización de los primeros ensayos bajo norma. Con la realización de estos primeros ensayos culmina el proyecto BECS y paso a ser el responsable principal de esta infraestructura para las etapas posteriores de funcionamiento operativo, interlaboratorios y consolidación de la infraestructura de calidad, en continuidad con las etapas anteriores. El BECS es el resultado de al menos una década de construcción incremental en el área de EST, que involucró el trabajo creativo o in-situ de no menos de 10 personas vinculadas al LES o a la FING además de la interacción con variadas empresas locales, cuyos logros actuales no podrían haber sido alcanzados sin este proceso previo.

Para los ensayos de colectores solares se tomó como referencia inicial la norma [ISO-9806-1 \(1994\)](#), versión vigente al momento de la firma del convenio, la cual contiene únicamente la metodología SST. En ese mismo año la ISO publica una nueva versión de la norma, la [ISO-9806 \(2013\)](#), la cual incluye una metodología QDT, muy similar a la de la norma europea [EN-12975-2 \(2006\)](#). Ante este cambio, el BECS decidió como lineamiento estratégico el de adoptar siempre la normativa internacional vigente, para lo cual debía prever que la instalación de ensayo y sus rutinas fuesen adecuadas a la nueva norma, adaptando los elementos que fuesen necesarios e incluyendo a la metodología QDT en sus objetivos. Esto permitió además que el BECS se adaptara muy rápidamente a la norma ISO actual, actualizada nuevamente en 2017. Por otro lado, las primeras implementaciones de ensayos SST evidenciaron tiempos de ensayo largos debido a la variabilidad de las condiciones de cielo local, lo que motivó especialmente el desarrollo de los ensayos QDT.

1.2. Sobre esta tesis

El objetivo principal de esta tesis es alcanzar el estado del arte en lo que respecta a ensayos de desempeño térmico de colectores solares. En este sentido, se implementan localmente las metodologías de ensayo en estado estacionario y cuasi-dinámico de la norma [ISO-9806 \(2017\)](#) en el BECS, evidenciando las ventajas que presenta la utilización de esta segunda metodología en Uruguay y la región. Los ensayos que se presentan en esta tesis fueron realizados en el marco de una intercomparación de

laboratorios de ensayos organizada por el Instituto Metrológico Alemán (PTB), por lo tanto, los resultados son también comparados con los de otros laboratorios. A partir de esta comparación se concluye que ambas metodologías han sido implementadas correctamente y que son equivalentes entre sí. Se hace notar que la implementación de la metodología cuasi-dinámica es novedosa en la región, siendo ésta una de las primeras implementaciones bajo norma a nivel de Latinoamérica. Esta tesis representa una contribución al desarrollo de las capacidades en EST en la región y se enmarca en el desarrollo a mediano y largo plazo del BECS. Parte de los resultados obtenidos en este trabajo fueron documentados en [Rodríguez-Muñoz et al. \(2020\)](#).

Esta tesis se organiza de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se realiza una descripción de los colectores de placa plana y se introducen los modelos térmicos en estado estacionario y transitorio que describen su funcionamiento. Posteriormente, en este mismo capítulo, se describen las distintas metodologías de ensayo existentes en la literatura, en particular se describen las metodologías propuestas por la norma [ISO-9806 \(2017\)](#). El objetivo de esta revisión es evidenciar las ventajas y desventajas de cada metodología, en particular la QDT de la ISO 9806:2017, e indagar en que aspectos esta última puede ser mejorada a futuro. En el Capítulo 3 se describe el puesto de ensayos de colectores solares del BECS en el cual se realizaron las pruebas de esta tesis, y se presenta un estimativo de la cantidad de ensayos anuales que se podrían llegar a realizar de acuerdo a las metodologías SST y QDT. En el Capítulo 4 se muestra la implementación local de estas metodologías para un colector de placa plana, se analizan los resultados y la equivalencia entre ambas. Para los ensayos se usó el colector solar de referencia utilizado en la inter-comparación de laboratorios a nivel de Latinoamérica en la que el BECS participó en 2019, que fue organizada y dirigida por el PTB. Aprovechando los resultados de esta actividad, en el Capítulo 4 los resultados de este trabajo son comparados con los de los otros laboratorios (resto de los participantes). Finalmente, en el Capítulo 5 se resumen las principales conclusiones y los estudios a futuro que quedan abiertos de la realización de la presente tesis.

Capítulo 2

Desempeño térmico de colectores solares de placa plana

Este capítulo inicia con una breve descripción de los colectores FPC (Sección 2.1). Este es el tipo de colector más instalado en Uruguay y el objeto de este trabajo. Posteriormente, en la Sección 2.2, se introducen los modelos térmicos que gobiernan el funcionamiento de este tipo de colectores. En las secciones siguientes se presenta un resumen de las distintas metodologías de ensayo de desempeño térmico. Las Secciones 2.3 y 2.4 presentan en forma general los ensayos en estado estacionario y transitorio existentes en la literatura, discutiendo ventajas y desventajas de cada uno. Finalmente, en la Sección 2.5 se describen las metodologías SST y QDT aceptadas en la norma ISO 9806:2017 y la conversión de parámetros SST-QDT.

2.1. Colectores solares de placa plana

Los [colectores solares](#) térmicos son dispositivos que captan la energía solar en una determinada área y la transfieren a un fluido de trabajo. La magnitud que aprovechan es la [irradiancia solar global](#), que es la potencia solar total (directa y difusa) por unidad de área que incide sobre la superficie colectora. En la Figura 2.1 se muestran los componentes de un colector solar de placa plana. La irradiancia solar transmitida por la cubierta de vidrio es absorbida por la [placa absorbidora](#) y transferida al fluido de trabajo, el cual circula a través de los tubos que se encuentran adosados a dicha placa. Esta captación ocurre en el espectro solar (λ entre 0.3 y 4.0 μm). La cobertura de vidrio cumple la función de disminuir las pérdidas térmicas de la placa absorbidora hacia el ambiente, por su parte superior. Por este motivo, usualmente se utilizan vidrios con bajo contenido de hierro lo cual maximiza la transmisión de la radiación en el espectro solar y minimiza la transmisión en el infrarrojo lejano (λ entre 25 y 1000 μm). Existen además colectores con múltiples coberturas de vidrio,

2 o 3, lo cual reduce aún más las pérdidas térmicas y los hace propicios para ser utilizados en climas muy fríos y/o en aplicaciones de mayor temperatura (más de 100 °C). La placa absorbidora normalmente se cubre con una superficie selectiva para maximizar la energía absorbida y minimizar las pérdidas por radiación. Este tipo de superficie se caracteriza por presentar una alta absorptancia en el espectro solar y una baja emisividad en el infrarrojo lejano. La parte posterior y los costados de la placa absorbidora se aíslan con el fin de reducir las pérdidas térmicas hacia el ambiente. La disposición de los tubos de cobre que se muestran Figura 2.1 corresponden a un colector de tipo parrilla compuesto por *raisers* y *headers*, siendo esta configuración una de las más típicas, si bien existen otras.

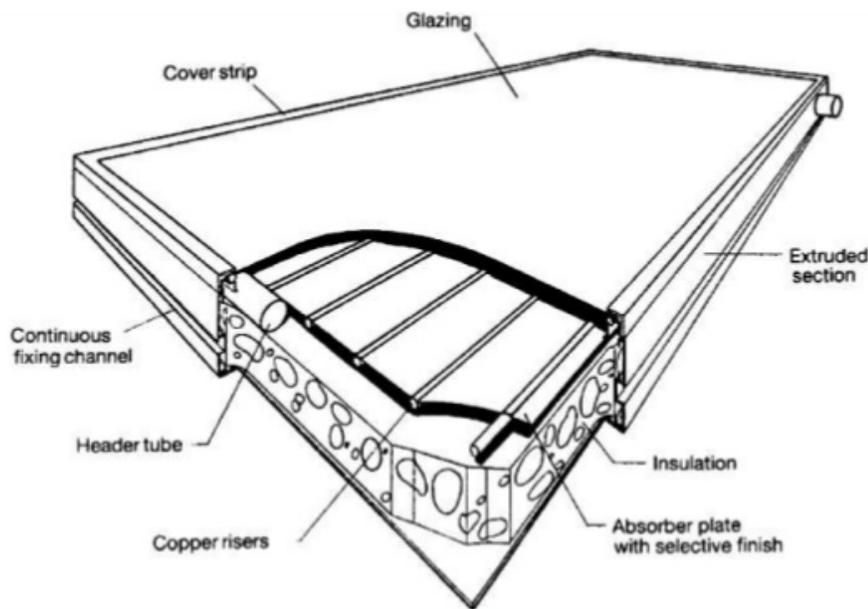


Figura 2.1: Componentes de un colector solar de placa plana. Figura extraída de [Kalogirou \(2013\)](#).

2.2. Caracterización del desempeño térmico

En esta sección y las siguientes (Secciones 2.3 y 2.4) se utiliza la nomenclatura típica que se encuentra en los libros que abordan esta temática. En la Sección 2.5 se introduce la nomenclatura específica que utiliza la norma ISO 9806:2017 y su equivalencia con la de las Secciones 2.2, 2.3 y 2.4.

2.2.1. Estado estacionario

El análisis que se presenta a continuación se basa en [Duffie and Beckman \(1991\)](#), el cual se basa a su vez en los trabajos de [Hottel and Woertz \(1942\)](#); [Whillier \(1953\)](#);

Hottel and Whillier (1958). La potencia útil que produce un colector en estado estacionario se puede calcular según,

$$\dot{Q}_u = A_C [S - U_L (T_{mp} - T_a)], \quad (2.1)$$

donde A_C es el área de la placa absorbadora en m^2 , S es la potencia absorbida por la placa colectora en W/m^2 , U_L es el coeficiente global de pérdidas térmicas en W/m^2K , T_{mp} es la temperatura media de la placa absorbadora y T_a la temperatura del aire ambiente circundante, expresadas normalmente en $^{\circ}C$. La potencia útil \dot{Q}_u se expresa en W . El uso de la Ec. (2.1) es limitado debido a que la temperatura media de la placa T_{mp} depende de las características constructivas colector, de la irradiancia solar sobre su superficie de captación y de las condiciones del fluido a la entrada. Por este motivo, resulta más práctico expresar dicha ecuación en términos de la temperatura media del fluido T_m . Se define el **factor de eficiencia** F' como el cociente entre la potencia útil y la potencia útil que se obtendría si la temperatura de la placa absorbadora fuera igual a la del fluido, es decir, $T_{mp} = T_m$. De esta manera, la Ec. (2.1) se puede reescribir como sigue:

$$\dot{Q}_u = A_C F' [S - U_L (T_m - T_a)]. \quad (2.2)$$

Si se supone que el perfil de temperatura a lo largo del colector (dirección del flujo) es lineal entonces la temperatura promedio del fluido T_m se puede aproximar como el promedio entre la temperatura de entrada y de salida.

La potencia absorbida por la placa absorbadora se puede calcular de la siguiente manera:

$$S = G_{bt} (\tau\alpha)_b + G_{dt} (\tau\alpha)_d + G_{gt} (\tau\alpha)_g, \quad (2.3)$$

donde G_{bt} es la **irradiancia solar directa** en el plano del colector, G_{dt} es la **irradiancia solar difusa** proveniente de la bóveda celeste y G_{gt} es la irradiancia difusa reflejada por el suelo, ambas sobre el plano del colector y todas expresadas en W/m^2 . El producto $(\tau\alpha)$ de cada componente representan en forma efectiva la transmisión por la cobertura de vidrio y la posterior absorción en la placa absorbadora de la irradiancia solar. En general, son funciones del **ángulo de incidencia** (θ) y las condiciones de cielo. En la práctica es usual definir un producto $(\tau\alpha)$ promedio, $(\tau\alpha)_{av}$, de la siguiente manera:

$$(\tau\alpha)_{av} = \frac{S}{G_t}. \quad (2.4)$$

donde G_t es la irradiancia solar global en el plano del colector, la cual satisface $G_t = G_{bt} + G_{dt} + G_{gt}$. Al término $(\tau\alpha)_{av}$ también se lo conoce como **eficiencia óptica**. En condiciones de cielo claro la irradiancia solar directa es mucho mayor que la difusa y la reflejada por el suelo ($G_{bt} \gg G_{dt}, G_{gt}$). Por lo que en estas condiciones $(\tau\alpha)_{av}$ puede escribirse como una función dependiente únicamente del ángulo de incidencia

(θ). Esto da lugar al [modificador por ángulo de incidencia](#) promedio, el cual se define como:

$$K_{av}(\theta) = \frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n}, \quad (2.5)$$

donde $(\tau\alpha)_n$ representa el producto $(\tau\alpha)_{av}$ en incidencia normal, es decir, cuando $\theta = 0^\circ$. Una expresión empírica muy usada para el modificador por ángulo de incidencia es la propuesta por [Souka and Safwat \(1966\)](#):

$$K_{av}(\theta) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right), \quad (2.6)$$

donde b_0 es una constante de ajuste adimensionada, típicamente $b_0 \approx 0.1$ para colectores de una cubierta. Esta expresión no se considera válida para ángulos mayores a $\sim 70^\circ$. Combinando las Ecs. (2.2), (2.4) y (2.5) se tiene:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_C} = F' [(\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) G_t - U_L (T_m - T_a)]. \quad (2.7)$$

La potencia útil también puede expresarse en función de la temperatura de entrada del fluido T_i , la temperatura de salida T_o , el caudal másico de fluido que atraviesa el colector \dot{m} y el calor específico del mismo c_p , de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i). \quad (2.8)$$

donde el caudal másico se expresa en kg/s y el calor específico en J/kgK. En definitiva, si los parámetros característicos del colector son conocidos (A_C , $F'(\tau\alpha)_n$, b_0 , y U_L), mediante las Ecs. (2.7) y (2.8) se puede determinar la potencia útil y la temperatura a la salida que este produce bajo distintas condiciones de funcionamiento (T_i , T_a , G_t y \dot{m}). Estos parámetros se pueden estimar mediante modelos físicos o mediante ensayo. Los parámetros $F'(\tau\alpha)_n$ y U_L también dependen de las condiciones de funcionamiento, pero en la práctica suele trabajarse con valores constantes, es decir, promedios sobre el rango de funcionamiento, siempre y cuando el caudal másico de fluido sea aproximadamente constante.

Una expresión más precisa de la Ec. (2.7) se puede obtener si se incorpora la dependencia del coeficiente de pérdidas U_L con la diferencia de temperatura. Esta dependencia es aproximadamente lineal, es decir:

$$F'U_L = a_1 + a_2 (T_m - T_a), \quad (2.9)$$

donde a_1 y a_2 son constantes, de nuevo, bajo la hipótesis de caudal másico constante.

Combinando las Ecs. (2.7) y (2.9) se tiene,

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_C} = F' (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) G_t - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2, \quad (2.10)$$

donde se tiene una dependencia cuadrática con la diferencia de temperaturas, expresión comúnmente utilizada por las normas de ensayo.

Factor de remoción de calor

Resulta conveniente definir una cantidad que relacione la potencia útil con la potencia útil que se obtendría si la temperatura de toda la placa absorbadora fuera igual a la temperatura del fluido a la entrada. Para esto es necesario analizar la evolución de la temperatura del fluido en la dirección del flujo. Se usará la letra x para denotar esta dirección. Planteando un balance de energía en estado estacionario a un elemento diferencial de colector, de largo dx , se puede derivar la siguiente ecuación diferencial (Duffie and Beckman, 1991):

$$\frac{L\dot{m}c_p}{A_C} \frac{dT(x,t)}{dx} = F' (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) G_t - F' U_L (T(x,t) - T_a), \quad (2.11)$$

donde L es el largo del colector en la dirección del flujo. Integrando esta ecuación entre $x = 0$ y $x = L$ se llega a la siguiente expresión para la temperatura del fluido a la salida:

$$T_o = T_i + \frac{(\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) G_t}{U_L} \left[1 - e^{-\frac{A_C F' U_L}{\dot{m} C_p}} \right]. \quad (2.12)$$

El **factor de remoción de calor** se define como el cociente entre la potencia transferida al fluido (potencia útil) y la potencia que se le transferiría al fluido si la temperatura media de la placa fuera igual a la temperatura de entrada, esto es:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_C F' [K_{av}(\theta) G_t - U_L (T_i - T_a)]} = \frac{\dot{m} C_p}{A_C F' U_L} \left[1 - e^{-\frac{A_C F' U_L}{\dot{m} C_p}} \right]. \quad (2.13)$$

Finalmente, sustituyendo la Ec. (2.13) en la Ec. (2.7) se tiene:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_C} = F_R (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) G_t - F_R U_L (T_i - T_a). \quad (2.14)$$

Las primeras normas de ensayos en estado estacionario utilizaban la Ec. (2.14), la cual utiliza la temperatura a la entrada T_i y el factor de remoción de calor F_R . Hoy en día su utilización está en desuso, siendo más utilizadas las Ecs. (2.7) y (2.10).

Curva de eficiencia

Por último, se introduce el concepto de eficiencia instantánea de un colector. La **eficiencia** se define como el cociente entre la potencia útil por unidad de área y la potencia solar que incide en el plano del colector, esto es:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_C G_t}. \quad (2.15)$$

La eficiencia η también puede expresarse como el producto de dos eficiencias: la **eficiencia óptica** η_{op} y la **eficiencia térmica** η_{ter} ($\eta = \eta_{op} \times \eta_{ter}$). La primera expresa la fracción de la irradiancia solar incidente en el plano del colector que es absorbida por la placa absorbedora ($\eta_{op} = S/G_t$), y la segunda expresa la fracción de la potencia absorbida por dicha placa que se transforma en potencia útil ($\eta_{ter} = \dot{Q}_u/(A_c S)$).

Sustituyendo la Ec. (2.14) en la Ec. (2.15) se tienen lo que se conoce como **curva de eficiencia** del colector:

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_t}. \quad (2.16)$$

donde el término $(T_i - T_a)/G_t$ se conoce como temperatura reducida. A esta curva se la conoce como ecuación de *Hotel-Whillier-Bliss* y proporciona una forma de representar el desempeño del colector bajo distintas condiciones de funcionamiento y meteorológicas. Esto permite comparar rápidamente el desempeño de diferentes colectores, aunque de forma incompleta dado que suele asumirse condiciones de incidencia normal ($K_{av} = 1$), por lo que el modificador por ángulo incidencia no es tenido en cuenta. La curva de eficiencia también puede expresarse en función de la temperatura media del fluido en lugar de la temperatura de entrada sustituyendo el factor de remoción de calor por el factor de eficiencia. Además, también se le puede agregar la dependencia del coeficiente global de pérdidas con la temperatura, obteniendo una curva cuadrática y no lineal.

2.2.2. Estado transitorio

Modelo de un nodo de capacidad térmica

Los componentes del colector presentan distinta capacidad térmica y variaciones temporales de temperatura diferente (vidrio, absorbedor, carcasa, etc). Una forma simple de incorporar los efectos dinámicos es tratando al colector como una sola unidad, es decir, agrupando la capacidad térmica en un único parámetro C , en unidades de J/K. En base a esta hipótesis, [Klein et al. \(1974\)](#) generaliza la Ec. (2.11) de la

siguiente forma:

$$\frac{C}{A_C} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = F' (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) G_t - F' U_L [T(x, t) - T_a] - \frac{L\dot{m}c_p}{A_C} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x}. \quad (2.17)$$

Si se conocen los parámetros característicos del colector, incluida la capacidad térmica C , la Ec. (2.17) podría discretizarse y resolverse mediante diferencias finitas en las variables x y t con la condición de borde $T(0, t) = T_i(t)$. De esa manera se tendría una descripción del comportamiento del colector en régimen transitorio y se podría determinar la potencia que éste produce a partir de la temperatura de salida T_o . En un esfuerzo por incluir los efectos dinámicos de una forma aún más simple, [Close \(1967\)](#) propone el siguiente modelo:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_C} = F' (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta) G_t - F' U_L (T_m - T_a) - \frac{C}{A_C} \frac{dT_m}{dt}. \quad (2.18)$$

Esta ecuación no es otra cosa que la integral de la Ec. (2.17) a lo largo del colector asumiendo un perfil de temperatura lineal. Las primeras metodologías de ensayo de colectores solares en estado transitorio se basaron en el uso de este modelo ([Rogers, 1981](#); [Prapas et al., 1989](#); [Amer et al., 1998a](#)).

[Perers \(1993\)](#) mejora este modelo mediante la incorporación de la dependencia del coeficiente global de pérdidas con la temperatura y la discriminación del modificador por ángulo de incidencia según irradiancia directa y difusa:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_C} = F' (\tau\alpha)_{bn} [K_b(\theta) G_{bt} + K_d G_{dt}] - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - \frac{C}{A_C} \frac{dT_m}{dt}, \quad (2.19)$$

donde $(\tau\alpha)_{bn}$ es el producto $(\tau\alpha)$ para la componente directa en incidencia normal, K_b y K_d son los modificadores por ángulo de incidencia para la componente directa y difusa, respectivamente. El parámetro K_b es una función del ángulo de incidencia, pudiéndose utilizar la expresión empírica dada por la Ec. (2.6). La irradiancia difusa en este caso agrupa la difusa proveniente de la bóveda celeste y la reflejada por el suelo, por lo que el parámetro K_d depende del ángulo de inclinación del colector, la reflectividad del suelo y la distribución espacial de la radiancia difusa en la bóveda celeste. Para simplificar, [Perers \(1993\)](#) asume un valor constante para K_d . Además, el autor incorpora dos términos adicionales en la Ec. (2.18), uno asociado al efecto que tiene la velocidad del viento sobre el coeficiente de pérdidas, y el otro asociado a la diferencia de temperatura $(T_a - T_{sky})$ donde T_{sky} es la temperatura efectiva de cielo. Dichos términos son omitidos en la ecuación Ec. (2.19) por simplicidad, dado que son poco relevantes en el caso de colectores solares FPC.

Modelos de dos nodos de capacidad térmica

Las variaciones en la capacidad térmica de los distintos componentes de un colector motivó a que algunos autores desarrollasen modelos basados en dos o tres nodos de capacidad térmica. Klein et al. (1974) propuso un modelo de dos nodos para colectores planos con una sola cubierta. Estos nodos corresponden a (i) fluido y absorbedor (agrupados), y (ii) cobertura de vidrio. Wijeysondera (1978) extiende el modelo de Klein et al. (1974) a colectores planos con dos y tres cubiertas y compara los modelos contra medidas experimentales. Concluye que el modelo de un nodo y el multi-nodos arrojan prácticamente los mismos resultados para colectores de una sola cubierta, pero, para colectores de dos y tres cubiertas la diferencia se hace notoria, siendo más preciso el modelo multi-nodo.

Frid (1990) propone un modelo de dos nodos con un enfoque un poco distinto: introduce un nodo de temperatura para el fluido y otro para la placa absorbadora, donde la capacidad térmica del vidrio y la carcasa se desprecian. La ecuaciones que gobiernan el comportamiento del colector en este caso son:

$$\begin{cases} \frac{C_f}{A_C} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = U_{fp} [T_p(x,t) - T(x,t)] - \frac{L\dot{m}c_p}{A_C} \frac{\partial T_f(x,t)}{\partial x}, \\ \frac{C_p}{A_C} \frac{\partial T_p(x,t)}{\partial t} = (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta)G_t - U_L [T_p(x,t) - T_a] + U_{fp} [T(x,t) - T_p(x,t)], \end{cases} \quad (2.20)$$

donde C_f es la capacidad térmica del fluido en el interior del colector, C_p la capacidad térmica de la placa absorbadora y U_{fp} el coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la placa. El subíndice p se utiliza para denotar la temperatura de la placa. Estas ecuaciones pueden integrarse a lo largo del colector (asumiendo perfiles lineales de temperatura) lo que da lugar al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{C_f}{A_C} \frac{\partial T_m(t)}{\partial t} = U_{fp} [T_{mp}(t) - T_m(t)] - \frac{\dot{m}c_p}{A_C} (T_o(t) - T_i), \\ \frac{C_p}{A_C} \frac{\partial T_{mp}(t)}{\partial t} = (\tau\alpha)_n K_{av}(\theta)G_t - U_L [T_{mp}(t) - T_a] + U_{fp} [T_m(t) - T_{mp}(t)]. \end{cases} \quad (2.21)$$

Algunas metodologías de ensayo en estado transitorio se basan en estas ecuaciones (Fischer and Müller-Steinhagen, 2009; Kong et al., 2012). En estos trabajos se incorpora además el coeficiente de pérdidas de segundo orden y la discriminación del modificador por ángulo de incidencia según irradiancia directa y difusa.

2.3. Ensayo de desempeño térmico en estado estacionario

El objetivo de ensayar un colector es determinar los parámetros característicos definidos en la sección anterior. Los primeros métodos de ensayos que se desarrollaron

fueron los ensayos en estado estacionario, los cuales no han cambiado mucho desde su surgimiento. La realización de este tipos de ensayos en el exterior involucra la ejecución de tres ensayos independientes: (1) ensayo de eficiencia, (2) ensayos de modificador por ángulo de incidencia, y (3) ensayo de capacidad térmica. Los dos primeros ensayos (1 y 2) se deben realizar en estado estacionario y ello implica mantener con gran estabilidad las distintas variables involucradas. Algunas de ellas son controlables, si bien no es sencillo, como la temperatura y el caudal del fluido a la entrada del colector. En cambio, la temperatura ambiente, la irradiancia solar, el ángulo de incidencia y las condiciones de viento sobre el colector son muy difíciles de controlar dado que dependen de las condiciones meteorológicas y geométricas del momento.

Los tres ensayos tienen en común que deben realizarse en condiciones estrictas de cielo claro, la velocidad del viento paralela al colector se debe mantener en un rango determinado y el caudal másico de fluido que atraviesa el colector y su temperatura de ingreso se deben mantener aproximadamente constantes durante cada período de medición. Las siguientes magnitudes se deben medir o calcular durante la realización de los ensayos de colectores solares con cubierta:

- Irradiancia solar global en el plano del colector G_t (W/m^2).
- Irradiancia solar difusa en el plano del colector G_{dt} (W/m^2).
- Velocidad del viento paralela al plano del colector v (m/s).
- Temperatura del aire ambiente T_a ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del fluido a la entrada del colector T_i ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del fluido a la salida del colector T_o ($^{\circ}\text{C}$).
- Caudal másico de fluido que atraviesa el colector \dot{m} (kg/s).

La medida de irradiancia difusa se realiza para verificar el requerimiento de cielo claro y la medida de velocidad del viento se realiza para verificar que se encuentre dentro del rango predeterminado. El área de la placa absorbadora A_C se supone conocida, dada por el fabricante o medida en el laboratorio. Además, es necesario conocer la potencia útil producida por el colector \dot{Q}_u y el ángulo de incidencia θ . La medida de potencia útil se realiza a través de la Ec. (2.8) utilizando el caudal másico y las temperaturas del fluido a la entrada y salida del colector. El ángulo de incidencia se puede calcular analíticamente para cada momento a partir de la posición del colector y la fecha y hora de las medidas de ensayo.

En las siguientes subsecciones, se describen los procedimientos establecidos por la norma [ISO-9806 \(2017\)](#) para cada uno de los ensayos (1, 2 y 3) de forma general. Los

detalles más específicos de cada ensayo serán introducidos en la Sección 2.5 (como las condiciones meteorológicas requeridas, por ejemplo). Se hace notar que estos procedimientos difieren muy poco respecto a los procedimientos establecidos por otras normativas.

2.3.1. Ensayo de eficiencia

El objetivo de este ensayo es la determinación de $F'(\tau\alpha)_n$, a_1 y a_2 de la Ec. (2.10). Para esto se debe medir la potencia útil para cuatro temperaturas de entrada diferentes. Para colectores FPC normalmente es suficiente medir desde T_a hasta $T_a + 60^\circ\text{C}$ (para la correcta determinación de a_2). A su vez, por cada temperatura de entrada, se deben medir cuatro puntos independientes, dando así un total de 16 puntos. Cada punto consiste en un promedio sobre un período de medición determinado, por ejemplo 10 minutos, en los que se cumplen todas las condiciones de estabilidad requeridas. Las mediciones se deben realizar en presencia de ángulos de incidencia pequeños y para colectores FPC es suficiente con que sean menores a 20° . Para verificar el estado estacionario, para cada punto, se deben tomar promedios en períodos sucesivos de 30 segundos y se debe verificar que las variaciones de dichos promedios respecto al promedio 10 minutal se encuentren dentro de ciertos límites definidos por norma. La determinación de los parámetros se realiza por regresión lineal usando la Ec. (2.10) y asumiendo incidencia normal ($K_{av} = 1$). Para esto se define la potencia útil por unidad de área \dot{Q}_u/A_C como variable dependiente y como variables independientes a la irradiancia solar global en el plano del colector G_t , la diferencia de temperaturas $(T_m - T_a)$ y la diferencia de temperaturas al cuadrado $(T_m - T_a)^2$.

2.3.2. Ensayo de modificador por ángulo de incidencia

El objetivo de este ensayo es la determinación de la función $K_{av}(\theta)$. En este caso se deben tomar distintas medidas de potencia útil para diferentes ángulos de incidencia entre 40° y 70° . Se debe imponer para cada periodo de medición una temperatura de entrada tal que la temperatura media del fluido sea lo más próxima posible a la temperatura ambiente, es decir, $T_m \approx T_a$ (para disminuir las pérdidas térmicas). El procesamiento de datos y la verificación del estado estacionario se realiza de igual forma que en el ensayo de eficiencia. El modificador por ángulo de incidencia para cada ángulo se determina despejando $K_{av}(\theta)$ de la Ec. (2.10):

$$K_{av}(\theta) = \frac{\dot{Q}_u/A_C + a_1(T_m - T_a) + a_2(T_m - T_a)^2}{F'(\tau\alpha)_n G_t}. \quad (2.22)$$

La [ISO-9806 \(2017\)](#) admite que se realicen dos mediciones entre 40° y 70° y luego

que se interpole linealmente entre las mediciones en el rango de 0° a 90° asumiendo $K_{av}(0^\circ) = 1$ y $K_{av}(90^\circ) = 0$. Otra opción consiste en ajustar el parámetro b_0 de la Ec. (2.6) mediante regresión lineal definiendo $(K_{av} - 1)$ como variable dependiente y $(1/\cos\theta - 1)$ como variable independiente. Si se adopta esta última opción, en el rango de 70° a 90° lo conveniente es interpolar linealmente a partir del valor a 70° y asumiendo $K_{av}(90^\circ) = 0$, debido que la Ec. (2.6) no se considera válida para ángulos mayores a $\simeq 70^\circ$. Si el ensayo se realiza con un soporte fijo orientado al ecuador, cada punto de medida correspondiente a un ángulo de incidencia debe ser a su vez un promedio de dos mediciones: una antes y otra después del mediodía solar con aproximadamente el mismo ángulo de incidencia y la misma irradiancia solar directa en el plano del colector.

2.3.3. Ensayo de capacidad térmica

El ensayo de capacidad térmica se realiza en estado transitorio y consiste en cubrir el colector con una manta y dejar que este alcance el estado estacionario, luego se quita dicha manta y se deja que el colector alcance un nuevo estado estacionario, distinto al primero por la acción de la irradiancia solar. La capacidad térmica se determina integrado la Ec. (2.18) sobre el periodo de tiempo entre los dos puntos de funcionamiento estacionarios pero teniendo en cuenta la dependencia con la temperatura del coeficiente de pérdidas:

$$\frac{C}{A_C} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left[F'(\tau\alpha)_n G_t - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2 - \dot{Q}_u/A_C \right] dt}{T_{m2} - T_{m1}}. \quad (2.23)$$

En la derivación de esta ecuación se asume incidencia normal ($K_{av} = 1$) por lo cual este ensayo debe realizarse en presencia de ángulos de incidencia pequeños. Además, al inicio del ensayo la temperatura de entrada del fluido se debe fijar igual a la temperatura ambiente ($T_i \approx T_a$).

Wijesundera (1978) analiza la influencia de la capacidad térmica en el desempeño térmico de largo plazo de colectores FPC. Utiliza datos meteorológicos horarios y 10-minutales. Concluye que la capacidad térmica no es significativa en el cálculo de los totales diarios de energía útil, independientemente de la escala de datos que se utilice. Por este motivo, y dado que las series meteorológicas típicas normalmente están dadas a escala horaria, históricamente al ensayo de capacidad térmica se le ha restado importancia y se lo ha tratado como un ensayo opcional. De hecho, a nivel de normativa se admite el cálculo de la capacidad térmica como la suma ponderada de las capacidades térmicas de los componentes que constituyen el colector. Como se verá más adelante, la determinación de este parámetro en el caso de los ensayos transitorios (cuasi-dinámicos y dinámicos) es esencial dado que influye en la deter-

minación de los otros parámetros ($F'(\tau\alpha)_n$, a_1 , a_2 y $K_{av}(\theta)$), los cuales sí tienen un impacto significativo en el cálculo de energía útil a escala diaria. La determinación de la capacidad térmica de acuerdo al procedimiento que se describe en esta sección proporciona un valor de referencia con el cual comparar más adelante.

Otra característica del colector que se desprende este ensayo es la constante de tiempo, t_c . Este tiempo se define como el tiempo que tarda la temperatura media del fluido en alcanzar el 63 % de su valor final, es decir, $T_m(t_c) = T_{m1} + 0.63 \times (T_{m2} - T_{m1})$.

2.4. Ensayo de desempeño térmico en estado transitorio

Los requerimientos exigentes de estabilidad de los ensayos en estado estacionario, en particular los relacionadas con la irradiancia solar y el ángulo de incidencia, hacen que su implementación resulte difícil en climas con nubosidad variable, siendo muy limitada la cantidad de ensayos al aire libre que un laboratorio en este tipo clima puede realizar en un año. Buscando flexibilizar las condiciones de ensayos para así aumentar la capacidad de los laboratorios, en la década de los 80' se realizaron los primeros ensayos en estado transitorio. Desde ese entonces, diversas metodologías fueron propuestas las cuales se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios. Un primer criterio de clasificación es según el grado de estabilidad requerido en las condiciones del fluido a la entrada del colector (caudal y temperatura). De acuerdo a [Hofer et al. \(2015\)](#) se pueden distinguir dos categorías: (i) ensayos cuasi-dinámicos y (ii) ensayos dinámicos. Los primeros imponen restricciones al fluido a la entrada del colector, típicamente una variabilidad máxima de ± 1 °C en temperatura y de ± 1 % en caudal. En cambio, los ensayos dinámicos no imponen restricciones. Un segundo criterio de clasificación es según si los ensayos se basan en modelos físicos o no. Existe una buena cantidad de antecedentes de metodologías de ensayo transitorias basadas en diferentes modelos físicos, con resultados directamente comparables a los del método tradicional en estado estacionario. Los ensayos transitorios que hoy se utilizan en la normativa se basan en los métodos de este grupo. La aplicación de redes neuronales artificiales al ensayo de colectores es un ejemplo de ensayos que no se basan en modelos físicos ([Fischer et al., 2012](#)). El uso de estas técnicas en este campo del conocimiento es reciente y existen pocos antecedentes documentados a la fecha. Esta tesis se centra en los métodos basados en modelos físicos.

Los ensayos basados en modelos físicos se puede clasificar a su vez de acuerdo como se resuelven las ecuaciones diferenciales que gobiernan el funcionamiento del colector. En este caso se tienen dos categorías: (1) resolución en el dominio temporal y (2) resolución en el dominio de frecuencia. En las siguientes dos subsecciones se describen

los distintos métodos de ensayo en cada una de estas categorías. Cabe destacar que, dentro de las metodologías que se basan en modelos físicos, las metodologías dinámicas en general están basadas en modelos que tienen en cuenta el perfil de temperatura en el interior del colector, es decir, modelos de varios nodos de temperatura. Por otro lado, las metodologías cuasi-dinámicas en general se basan en modelos más sencillos, de un nodo de temperatura como los de las Ecs. (2.19) y (2.21).

2.4.1. Resolución en el dominio temporal

Los métodos de ensayo dentro de este grupo se caracterizan por la resolución de las ecuaciones diferenciales en el dominio temporal. A su vez, dichos métodos se pueden dividir de acuerdo a como se trata las derivadas temporales: (1) aproximación por diferencias finitas de la derivada temporal y (2) simulación dinámica y regresión no lineal.

Aproximación por diferencias finitas de las derivadas temporales

La esencia de los métodos dentro de esta categoría consisten en aproximar por diferencias finitas las derivadas temporales de temperatura y tratar dichas derivadas como variables independientes dentro de un modelo de regresión lineal. Si el tiempo de toma de datos es Δt y el tiempo en el que se promedian es $\Delta t_{av} = N\Delta t$ (con N número entero), entonces una forma de aproximar la derivada temporal de la temperatura media del fluido en el intervalo de tiempo $(t - \Delta t_{av}/2, t + \Delta t_{av}/2)$ es:

$$\frac{dT_m(t)}{dt} \approx \frac{T_m(t + \Delta t_{av}/2) - T_m(t - \Delta t_{av}/2)}{\Delta t_{av}}. \quad (2.24)$$

[Amer et al. \(1998a\)](#) desarrolló un método de ensayo que se basa en este concepto: utiliza la Ec. (2.18) y aproxima la derivada temporal de la temperatura media del fluido por diferencias finitas utilizando la medida experimental de T_m . La determinación de los parámetros se realiza por regresión lineal para lo cual define como variable dependiente la potencia útil por unidad de área \dot{Q}_u/A_C y como variables independientes a: G_t , $(T_m - T_a)$, $(T_m - T_a)^2$ y dT_m/dt , esta última aproximada con la ecuación anterior. Los parámetros a determinar son $F'(\tau\alpha)_n$, a_1 , a_2 y C/A_C . El método no tienen en cuenta el modificador por ángulo de incidencia, es decir, asume $K_{av} = 1$. La instalación de ensayo utilizada por [Amer et al.](#) cumplía los requisitos de la norma ASHRAE 93. El procedimiento de ensayo consistía en fijar la temperatura del fluido a la entrada de colector, dentro del rango de 30 a 80 °C, exponerlo a la irradiancia solar y cubrirlo y descubrirlo con una manta en forma sucesiva dentro de un periodo de tiempo de ± 30 minutos entorno al mediodía solar. Además, el caudal másico de fluido se debía mantener constante a lo largo de todo el ensayo en 0.02 kg/m²s. Los

parámetros hallados por este método difieren en menos de un 2.5 % respecto a los hallados con la metodología en estado estacionario de la ASHRAE 93 para un colector FPC. En el trabajo de [Amer et al.](#) no se propone un método alternativo al tradicional para determinar el modificador por ángulo de incidencia.

[Perers \(1993\)](#) propuso un método de ensayo similar al anterior pero más completo. Este autor caracteriza un campo de colectores FPC de 11 m² de área total utilizando el modelo dado por la Ec. (2.19) y asumiendo la Ec. (2.6) para el modificador por ángulo de incidencia. El procedimiento de ensayo consiste medir la potencia útil para diferentes temperaturas de entrada y diferentes condiciones de cielo (cielo claro, cielo parcialmente nublado y completamente nublado), no siendo necesario cubrir y descubrir el colector con una manta. La variabilidad en las condiciones de cielo es una condición necesaria para determinar correctamente la capacidad térmica del colector y el modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia difusa. Durante cada periodo de ensayo el caudal y la temperatura del fluido a la entrada del colector se deben mantener fijos. Una vez que se tiene suficiente variabilidad en las condiciones de funcionamiento se procede a determinar los parámetros característicos por regresión lineal. Para ello define como variable dependiente a \dot{Q}_u/A_C , y como variables independientes: G_{bt} , $G_{bt}(1/\cos(\theta) - 1)$, G_{dt} , $(T_m - T_a)$, $(T_m - T_a)^2$ y dT_m/dt ; los parámetros a determinar son $F'(\tau\alpha)_{bn}$, $F'(\tau\alpha)_{bn} b_0$, $F'(\tau\alpha)_{bn} K_d$, a_1 , a_2 y C/A_C . La caracterización en este caso es más completa dado que el modelo tienen en cuenta el modificador por ángulo incidencia para ambas componentes de la irradiancia solar. En un trabajo posterior, [Perers \(1997\)](#) muestra que la metodología es aplicable a colectores ETC y a colectores sin cubierta, aunque en este último caso se debe utilizar el modelo completo con los términos adicionales asociados a la velocidad del viento y a la diferencia de temperatura $(T_a - T_{sky})$.

Más recientemente, [Kong et al. \(2012\)](#) implementa un método de ensayo basado en el modelo de dos nodos de capacidad térmica dado por la Ec. (2.21). Los autores eliminan la variable T_p combinando dichas ecuaciones y llegan a una expresión para la potencia útil, similar a la Ec. (2.19), pero en donde además aparece la derivada temporal segunda de la temperatura media del fluido. Dicha derivada también es estimada por diferencias finitas, en forma similar a la derivada primera, y es tratada como una variable independiente más dentro de un modelo de regresión lineal. El procedimiento de ensayos utilizado por [Kong et al.](#) es el mismo que se utiliza para la metodología QDT de la norma [ISO-9806 \(2017\)](#). Los autores caracterizan un conjunto de colector FPC de 13.53 m² de área total con este método y muestran que este sofisticado procedimiento es capaz de predecir la potencia útil producida por el colector con mayor precisión que el método QDT de la [ISO-9806 \(2017\)](#).

La sencillez dada por el procedimiento de regresión lineal constituye la principal fortaleza de los métodos de este grupo. La principal debilidad de estos métodos es la

necesidad de que el modelo físico utilizado sea lineal en términos de sus parámetros. Esto hace que el enfoque de regresión lineal no pueda ser utilizado con modelos más elaborados como los de las Ecs. (2.20) y (2.21), que tienen en cuenta el perfil de temperatura dentro del colector. Los modelos simplificados y lineales de las Ecs. (2.18) y (2.19) han mostrado ser incapaces de describir el comportamiento del colector a escalas temporales menores al tiempo que tarda el fluido en recorrer el colector (Amer et al., 1998a). Además, dichos modelos también han mostrado ser sensibles a las variaciones de temperatura del fluido a la entrada del colector, por tanto requieren de cierta estabilidad en esta temperatura para su correcta implementación (Perers, 1993). Debido a lo anterior, las metodologías dentro de este grupo pueden ser consideradas cuasi-dinámicas.

Simulación dinámica y regresión no lineal

El ajuste de los métodos de esta categoría se realiza con la lógica iterativa que se ilustra en la Figura 2.2, propia de una regresión no lineal, en la que a partir de una semilla para los parámetros (parámetros iniciales), se utilizan los datos medidos, el modelo a ajustar y una función de costo a minimizar (E_c) para obtener los parámetros óptimos dentro de un nivel de tolerancia. La aplicación específica de este procedimiento a modelos térmicos de colectores se explica a continuación.

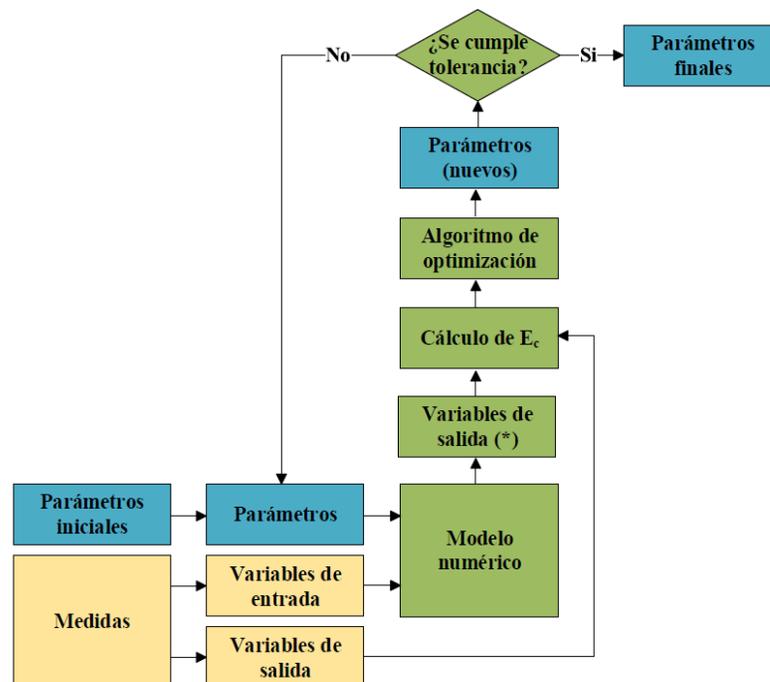


Figura 2.2: Procedimiento de regresión no lineal. El símbolo * indica que las variables corresponden a estimativos del modelo numérico.

El primer paso de la aplicación es definir un método para discretizar en el dominio temporal las ecuaciones diferenciales físicas que rigen el comportamiento térmico del colector, por ejemplo: método de Euler hacia adelante, método de Euler hacia atrás, método de Crank-Nicholson, entre otros. De esta discretización del modelo (identificada como “modelo numérico” en el diagrama) se obtienen variables de salida en función de las variables de entrada y un conjunto de parámetros característicos. Las variables de entrada corresponden a mediciones de variables relevantes en el modelado del colector, como $T_i(t)$, $T_a(t)$, $\dot{m}(t)$ y $G_t(t)$, y son funciones del tiempo estáticas en cada iteración. Los parámetros característicos del colector varían en cada iteración del optimizador y dependen del modelo térmico que se elija. Por ejemplo, si se considera el modelo dado por la Ec. (2.18), los parámetros característicos del colector son $F'(\tau\alpha)_n$, a_1 , a_2 y C . Para el modificador por ángulo de incidencia $K_{av}(\theta)$ se puede asumir el modelo de la Ec. (2.6), donde $\theta(t)$ sería una variable de entrada y b_0 un parámetro característico. Las variables de salida en este esquema son $T_m^*(t)$, $T_o^*(t)$ y $\dot{Q}_u^*(t)$ donde el superíndice $*$ indica que las variables corresponden a estimativos del modelo numérico. Posteriormente, se debe utilizar un algoritmo de optimización que minimice una función de costo asociada a la diferencia entre las variables de salida medidas y estimadas. En el caso de colectores solares una función de costo adecuada es el error cuadrático medio de la potencia útil:

$$E_c(p) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[\dot{Q}_u(t_i) - \dot{Q}_u^*(t_i, p) \right]^2, \quad (2.25)$$

donde $\dot{Q}_u(t_i)$ es la potencia útil producida por el colector en el instante t_i (medida experimentalmente), $\dot{Q}_u^*(t_i, p)$ es el estimativo de potencia útil del modelo numérico en ese mismo instante utilizando el conjunto de parámetros p y M la cantidad de medidas. El algoritmo de optimización lo que hará es encontrar el conjunto de parámetros que minimice la función costo. Existen diversos algoritmos de optimización disponibles en la literatura, algunos de ellos se describen en [Quarteroni et al. \(2000\)](#); [Bates and Watts \(1988\)](#); [Björck \(1996\)](#); [Russel-Rhinehart \(2016\)](#).

[Muschaweck and Spirkel \(1993\)](#) fueron los primeros autores en proponer un modelo dentro de esta categoría. Estos autores propusieron extender la Ec. (2.18) a N nodos de temperaturas conectados en serie (discretización espacial) en donde la ecuación de balance para un nodo genérico j está dada por:

$$\frac{C}{NA_C} \frac{dT_j}{dt} = F'(\tau\alpha)_{av} G_t - F'U_L(T_j - T_a) - \frac{\dot{m}c_p}{N}(T_j - T_{j-1}), \quad (2.26)$$

donde la temperatura en $j = 0$ corresponde a T_i (condición de borde) y la temperatura en el nodo $j = N$ a T_o . El modelo dado por esta ecuación asume un valor constante de $(\tau\alpha)_{av}$ e independiente del ángulo de incidencia. Para la regresión no lineal los autores implementan un algoritmo de optimización Levenberg-Marquardt

(Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). En el trabajo de Muschaweck and Spirkl no se propone un procedimiento de ensayo concreto si no que utiliza el método para caracterizar tres colectores solares FPC *in situ*, es decir, en condiciones reales de funcionamiento. El sistema bajo análisis consistía en un sistema solar partido indirecto con circulación forzada, compuesto por tres colectores FPC de 2.0 m² cada uno y un tanque de 300 litros. Los autores logran determinar los parámetros característicos de los colectores pero no comparan sus resultados con los del método tradicional. El error del modelo en la predicción de temperatura a la salida del colector es menor al 8% en comparación con las medidas experimentales (el porcentaje se calculó en base a la diferencia promedio entre la entrada y salida del colector). Posteriormente, Bosanac et al. (1994) mejora el modelo incorporando el modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia directa y difusa y agregando la dependencia con la temperatura y la velocidad del viento del coeficiente de pérdidas U_L . Con estas mejoras logra mejorar el desempeño del modelo y reducir el error al 3%. Esta metodología puede ser considerada dinámica dado que admite variaciones de temperatura a la entrada del colector. Hofer et al. (2015) utiliza este mismo concepto para determinar los parámetros característicos de dos concentradores solares lineales de tipo Fresnel. Recientemente, Fhar et al. (2018) adapta el trabajo de Hofer et al. (2015) para colectores FPC y muestra que este método es equivalente al método QDT de la ISO-9806 (2017) (si se sigue el mismo procedimiento).

La principal ventaja de los métodos dentro de este grupo es que permiten acceder a modelos térmicos más detallados, como por ejemplo los modelos de las Ecs. (2.17) y (2.20). El uso de estos modelos permite una mayor flexibilidad en las condiciones de ensayos, en particular en lo que respecta a las variaciones de temperatura a la entrada del colector, lo cual los hace propicio para ser usados *in situ*. El potencial de estos métodos de ensayo todavía no ha sido explotado completamente a nivel de laboratorio. La principal desventaja de estos métodos es que requieren la implementación de un algoritmo de regresión no lineal, lo cual agrega complejidad y hace que sean más difíciles de implementar.

2.4.2. Resolución en el dominio frecuencial

Los métodos dentro de este grupo se basan en la aplicación de la transformada de Laplace a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el funcionamiento del colector, pasando de esta manera del dominio temporal al de frecuencia. Luego de la transformación, se resuelven las ecuaciones polinómicas resultantes en el dominio frecuencial, para luego volver al dominio temporal a través de la anti-transformada de Laplace.

Los mayor parte de los antecedentes dentro de esta categoría se centran en las décadas de los 80'y 90'(Rogers, 1981; Prapas et al., 1988, 1989; Wang et al., 1987;

[Amer et al., 1998b](#)), siendo el trabajo de [Rogers \(1981\)](#) el más relevante. La metodología propuesta por este autor fue utilizada por la norma británica DD77:1981. En 2004, Gran Bretaña adopta la norma europea [EN-12975-2 \(2001\)](#) y como consecuencia la norma DD77:1981 entra en desuso. Los métodos de ensayo dentro de esta categoría permiten llegar a los mismos resultados que los métodos de la sección anterior pero con la desventaja de requerir cierto conocimiento de la transformada de Laplace para su correcta implementación. Debido a la poca relación existente entre los métodos de esta categoría y los métodos de ensayo actuales aceptados por norma, la descripción detallada de los antecedentes se presenta en el Apéndice A.

2.5. Norma ISO 9806:2017

En las secciones anteriores se describieron las distintas metodologías de ensayo de desempeño térmico de colectores solares como forma de presentar el área de trabajo y se destacaron las ventajas y desventajas de cada una. La metodología en estado estacionario no ha cambiado mucho desde su surgimiento, en cambio, a lo largo del tiempo se han propuesto diversas metodologías en estado transitorio, muchas de las cuales nunca alcanzaron el nivel de normativa. Las tres normas más usadas para la realización de estos ensayos son: (i) ASHRAE 93, (ii) ISO 9806, y (iii) EN 12975. [Rojas et al. \(2008\)](#) muestra la equivalencia entre las tres normas, incluida la equivalencia entre las metodologías SST y QDT. Esta última metodología (QDT), introducida primero por la EN 12975 y luego adoptada por la ASHRAE 93 y la ISO 9806 sin mayores modificaciones, se basa en los trabajos de [Perers \(1993, 1997\)](#). Esta metodología presenta dos características muy importantes. La primera es que la determinación de parámetros se puede realizar mediante regresión lineal, lo que le confiere simplicidad y la hace fácil de reproducir. La segunda es que dicha metodología fue validada experimentalmente para distintos tipos de colectores solares (FPC, ETC y colectores sin cubierta) lo cual le confiere cierta universalidad. La principal desventaja de esta metodología es no eliminar por completo la necesidad de cierta estabilidad en las condiciones del fluido a la entrada del colector. En esta sección se describen las metodologías de ensayo SST y QDT propuestas por la norma [ISO-9806 \(2017\)](#). Esta tesis implementó localmente ambas metodologías de ensayo, comparándolas entre sí, resultados que se presentan en el Capítulo 4.

2.5.1. Generalidades

Previo a la realización de los ensayos de desempeño térmico la norma exige realizar un pre-acondicionamiento del colector. Este proceso consiste en someter al colector a condiciones de estancamiento por al menos 5 horas. Las condiciones de estancamiento

se logran exponiendo el colector a una irradiancia solar mayor a 700 W/m^2 y una temperatura ambiente mayor a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Además, durante esta exposición el colector no debe contener fluido de trabajo (agua) y todas la conexiones deben estar selladas excepto una, para prevenir el enfriamiento del colector por convección natural. La cobertura de vidrio del colector debe estar limpia antes de cualquier ensayo y si se advierte la presencia de humedad en el interior del colector se le debe hacer circular fluido a alta temperatura hasta que dicha humedad desaparezca.

La magnitudes que se deben medir durante la realización de los ensayos son las mismas que se presentaron en el listado de la Sección 2.3. La frecuencia de toma de datos debe ser de al menos 10 s. El caudal másico de fluido en ambas metodologías se debe fijar en 0.02 kg/s por unidad de **área bruta** del colector. Previo a cualquier periodo de medición se debe tener un período de acondicionamiento de 15 minutos donde se circule fluido por el colector con el caudal y la temperatura correspondiente al realizar el ensayo y estos 15 minutos no deben ser incluidos en la identificación de parámetros. La determinación de los parámetros puede realizarse por regresión lineal o no lineal. En las siguientes dos subsecciones se describe el modelo térmico utilizado, el procedimiento de ensayo y las condiciones que debe satisfacer las medidas para cada metodología (esta tesis se limita al caso de colectores de baja temperatura con cubierta).

2.5.2. Ensayo en estado estacionario SST

El modelo térmico que se utiliza en esta metodología es el siguiente:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_G} = \eta_{0,hem} K_{hem}(\theta) G_t - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - \frac{C}{A_G} \frac{dT_m}{dt}. \quad (2.27)$$

Esta ecuación es muy similar a la Ec. (2.18) pero presenta los siguientes agregados y/o modificaciones:

- Se basa en el área bruta del colector A_G en lugar del área de la placa absorbadora A_C , dado que la primera es más fácil de medir en los laboratorios de ensayo.
- Reemplaza el término $F'(\tau\alpha)_n$ por $\eta_{0,hem}$. La relación entre ambos términos está dada por el cociente de áreas A_G/A_C , es decir: $F'(\tau\alpha)_n = (A_G/A_C)\eta_{0,hem}$.
- Reemplaza el término $K_{av}(\theta)$ por $K_{hem}(\theta)$. El significado de ambos términos es el mismo (es simplemente un cambio de notación).
- Agrega la dependencia lineal con la temperatura del coeficiente de pérdidas, es decir, reemplaza $F'U_L$ por $a_1 + a_2(T_m - T_a)$. En este caso las constantes a_1 y a_2

están referidas al área bruta A_G y no al área de la placa absorbadora A_C como en la Ec. (2.9).

La determinación de los parámetros característicos se realiza por separado a través de la realización de tres ensayos independientes: (i) ensayo de eficiencia, (ii) ensayo de modificador por ángulo de incidencia, y (iii) ensayo de capacidad térmica. El procedimiento de estos ensayos fue descrito en la Sección 2.3. En los tres ensayos la **fracción difusa** en el plano del colector debe ser menor al 30 % y la velocidad del viento promedio paralela al plano del colector debe encontrarse en el rango 3 ± 1 m/s (promedio espacial y temporal). Además, en los ensayos de eficiencia y de capacidad térmica la irradiancia solar global en el plano del colector debe ser mayor a 700 W/m^2 y el ángulo de incidencia se debe encontrar en un rango tal que el modificador por ángulo de incidencia no varíe en más de $\pm 2\%$ de su valor en incidencia normal. Esta última condición normalmente se satisface para colectores FPC cuando el ángulo de incidencia es menor a 20° . Para el ensayo de modificador por ángulo de incidencia no se impone un mínimo de irradiancia solar. En el caso del ensayo de eficiencia y el de modificador por ángulo de incidencia, cada punto utilizado en la determinación de los parámetros debe consistir en un promedio sobre un período de medición de al menos cuatro veces la constante de tiempo del colector, si se la conoce, o 15 minutos en caso contrario. El colector FPC estudiando en esta tesis presenta una constante de tiempo de 1 minuto aproximadamente, por lo tanto, se utilizó un tiempo de promediado de 10 minutos. Para verificar el estado estacionario, para cada punto, se deben tomar promedios en períodos sucesivos de 30 segundos y se debe verificar que las variaciones de dichos promedios respecto al promedio 10 minutil se encuentren dentro de los límites dados por la Tabla 2.1. Esta verificación permite desprestigiar el término dT_m/dt en la Ec. (2.27) en los ensayos de eficiencia y modificador por ángulo de incidencia. En el caso del ensayo de capacidad térmica, luego que la manta es removida, se considera que el colector ha alcanzado el estado estacionario cuando la temperatura del fluido a la salida varía en menos de 0.5°C por minuto.

Medida	Variabilidad permitida
Irradiancia solar global (W/m^2)	± 50
Temperatura a la entrada ($^\circ\text{C}$)	± 0.1
Temperatura a la salida ($^\circ\text{C}$)	± 0.4
Temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$)	± 1.5
Velocidad del viento (m/s)	± 1.0
Intensidad de turbulencia (vel. del viento) (%)	15-40
Caudal másico (kg/s)	$\pm 1\%$

Tabla 2.1: Variabilidad permitida para metodología SST.

2.5.3. Ensayo en condiciones cuasi-dinámicas QDT

El modelo térmico que se utiliza en esta metodología surge de separar la irradiancia global en sus sub-componentes directa y difusa, y reemplaza en la Ec. (2.27) el modificador por ángulo de incidencia considerando su efecto distinto sobre ambas componentes, de la siguiente manera:

$$\eta_{0,hem} K_{hem}(\theta) G_t = \eta_{0,b} [K_b(\theta) G_{bt} + K_d G_{dt}]. \quad (2.28)$$

Lo que da lugar a:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_G} = \eta_{0,b} [K_b(\theta) G_{bt} + K_d G_{dt}] - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - \frac{C}{A_G} \frac{dT_m}{dt}. \quad (2.29)$$

El conjunto de medidas deberá estar constituido por al menos una secuencia por cada *day type*. El número total de secuencias dependerá de las condiciones climáticas del lugar y del momento en el que se lleve a cabo el ensayo. Cada secuencia (*day type*) deberá tener una duración de al menos 3 horas, pudiendo estar constituida a su vez por varias sub-secuencias no consecutivas con una duración de al menos 30 minutos cada una. El conjunto total de datos (todas las secuencias) deberá contener la suficiente variabilidad en las condiciones de funcionamiento para lograr una correcta determinación de los parámetros. Esta variabilidad se logra usando diversas temperaturas a la entrada del colector y haciendo que el colector funcione bajo distintas condiciones de cielo (cielo claro, cielo parcialmente nublado y nublado). A continuación se describen las condiciones que deben verificar los *day type*:

- **Day type 1:** esta secuencia se debe realizar con la temperatura del fluido lo más próxima posible a la temperatura ambiente (se recomienda que T_m esté en el rango $T_a \pm 3^\circ\text{C}$), y mayormente en condiciones de cielo claro. Además, el ángulo de incidencia debe variar entre un valor tal que el modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia directa no varíe en más de $\pm 2\%$ de su valor en incidencia normal hasta valores mayores a 60° . Esta secuencia contribuye a la determinación de los parámetros relacionados a la eficiencia óptica del colector ($\eta_{0,b}$, $K_b(\theta)$ y K_d).
- **Day type 2:** en esta secuencia el colector deberá trabajar en condiciones de nubosidad variable, pudiéndose realizar a cualquier temperatura de funcionamiento. Para que la capacidad térmica del colector pueda ser determinada correctamente la derivada temporal de la temperatura media del fluido debe exceder el valor $\pm 0.005^\circ\text{C/s}$. Esta secuencia contribuye a la determinación de la capacidad térmica efectiva (C) y al modificador por ángulo incidencia para la irradiancia difusa (K_d).

- **Day type 3:** en esta secuencia el colector debe operar con una temperatura de entrada intermedia (por ejemplo, T_i tal que $(T_m - T_a) = 20^\circ\text{C}$ y 40°C) y las medidas deben incluir condiciones de cielo claro. Se necesitan al menos dos temperaturas intermedias.
- **Day type 4:** en esta secuencia el colector debe operar con una temperatura de entrada alta (T_i tal que $(T_m - T_a) = 60^\circ\text{C}$) y las medidas deben incluir condiciones de cielo claro. Las secuencias *day type 3* y *4* contribuyen a la determinación de los factores de pérdidas térmicas (a_1 y a_2).

Las medidas se deben promediar cada cierto tiempo, y en cada secuencia o subsecuencia la temperatura del fluido a la entrada del colector y el caudal de fluido no pueden variar en más de $\pm 1^\circ\text{C}$ y 2%, respectivamente. Además, la velocidad del viento paralela al colector debe ser menor a 4 m/s. Estas restricciones son mucho más flexibles que las de la metodología SST. Para evaluar si los datos reúnen la suficiente variabilidad para proceder a la identificación de parámetros la norma sugiere la realización de las siguientes gráficas: (1) G_t en función de G_{dt} , (2) G_t en función de $(T_m - T_a)$, y (3) G_{bt} en función de θ . La norma además proporciona gráficos típicos contra los cuales comparar. Un requerimiento importante que se desprende del gráfico (3) es la necesidad de contar con medidas antes y después del mediodía solar.

2.5.4. Conversión de parámetros SST a QDT

Debido a que los laboratorios pueden utilizar una metodología o la otra, por ejemplo, en distintos momentos del año según sean conveniente para minimizar los tiempos de ensayo, resulta de interés poder convertir los parámetros de la Ec. (2.27) al los parámetros de la Ec. (2.29). En el anexo B de la norma [ISO-9806 \(2017\)](#) se describe cómo realizar esta conversión, es decir, cómo estimar los parámetros $\eta_{0,b}$, $K_b(\theta)$ y K_d a partir de los parámetros $\eta_{0,hem}$ y $K_{hem}(\theta)$.

Para calcular K_d primero se toma que:

$$K_b(\theta) \cong K_{hem}(\theta), \quad (2.30)$$

dado que $K_{hem}(\theta)$ se determina en condiciones de cielo claro con una fracción difusa baja. Luego, asumiendo que la distribución de la irradiancia difusa es [isotrópica](#), $K_b(\theta)$ es promediado y normalizado sobre el ángulo sólido visto por el colector, esto es:

$$K_d = \frac{\int_0^{\pi/2} K_b(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}. \quad (2.31)$$

La norma establece que esta integral debe realizarse en forma discreta en pasos de 10° , es decir:

$$K_d = \frac{\sum_{\theta=0^\circ}^{\theta=90^\circ} K_b(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta)}{\sum_{\theta=0^\circ}^{\theta=90^\circ} \cos(\theta) \sin(\theta)}. \quad (2.32)$$

Una vez estimado K_d , el parámetro $\eta_{0,b}$ puede estimarse a partir de la Ec. (2.28) asumiendo incidencia normal:

$$\eta_{0,b} = \frac{\eta_{0,hem}}{(1 - f_d^*) + K_d f_d^*}, \quad (2.33)$$

donde f_d^* es una fracción difusa en plano inclinado de 0.15 ($f_d^* = G_{dt}/G_t$), según se establece en la norma. [Kovács et al. \(2011\)](#), buscando mejorar esta conversión, propone utilizar el valor promedio de f_d^* durante el ensayo de eficiencia de la metodología SST en lugar del valor de 0.15, lo cual resulta en un valor adecuado al ensayo realizado.

Capítulo 3

Banco de Ensayos de Calentadores Solares

Este capítulo comienza con una descripción del proceso de desarrollo del Banco de Ensayos de Calentadores Solares (Sección 3.1). Luego, en la Sección 3.2 se describe el puesto de ensayo de colectores solares ubicado en la zona Este del banco, puesto que es donde se ensayó el colector FPC, cuyos resultados se presentan en el Capítulo 4 de esta tesis. En la Sección 3.3 se presentan los resultados de la evaluación externa del BECS realizada en marzo de 2018 por un experto del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) de España. Finalmente, en la Sección 3.4 se realiza un estimativo de la cantidad de ensayos anuales que se podrían realizar en el BECS de acuerdo a cada metodología (SST y QDT). Este análisis muestra que la metodología QDT es factible de implementarse en el clima de Uruguay y la región y que además permite aumentar la capacidad de ensayos de los laboratorios locales respecto a la metodología SST.

3.1. Desarrollo del BECS

En el año 2013 se firma un convenio entre el MIEM, la UdelaR y la CND para la construcción del BECS. El objetivo de este banco es el ensayo bajo normativa ISO vigente de colectores solares y sistemas solares prefabricados para el calentamiento de ACS. El BECS se instaló en la sede Salto del Laboratorio de Energía Solar (LES, <http://les.edu.uy/>) de la UdelaR y su desarrollo tuvo una duración aproximada de 6 años (incluyendo diseño, construcción y puesta en marcha). Este banco fue diseñado por investigadores del propio laboratorio en base a las instalaciones preexistentes del CENER de España. Se escogió la alternativa de desarrollo local por sobre la compra de un dispositivo llave-en-mano, como lineamiento estratégico para desarrollar el área de energía solar térmica en el país. La alternativa de construcción local demostró además

ser de un costo sensiblemente menor, del orden del 20-25 % del costo de un sistema adquirido comercialmente, con la ventaja de tener independencia en la operación y mantenimiento de la infraestructura y en la modificación/programación de las rutinas de ensayo. El equipo técnico principal estuvo constituido por el Ing. Ignacio Texeira (responsable técnico en las etapas iniciales del proyecto), el Ing. Roberto Iurato (desarrollo del sistema de control), el Tec. Javier Capeche (instalación de adquisición de datos) y el Bach. Andrés Monetta (ayudante técnico), y quien escribe, quien tuvo distintos roles a lo largo de desarrollo del proyecto. Me incorporo al grupo de trabajo en 2015, como ayudante de ingeniero, y colaboro en la etapa de diseño y compra de materiales. A mediados de 2016 asumí la responsabilidad técnica del BECS, momento en el cual todas las compras de materiales y equipos se habían adjudicado y la obra termo-hidráulica se encontraba en un $\simeq 50\%$ de avance. A partir de allí me encargué de supervisar la obra hasta su finalización en febrero de 2017. Luego, fui responsable de la etapa de puesta en marcha de la instalación, la cual se extiende hasta octubre 2018. La puesta en marcha implicó la resolución de algunos detalles de diseño, la puesta a punto del sistema de control (incluida la sintonización *in situ* de los controladores PID) y la realización de los primeros ensayos bajo norma: uno de colector y uno de sistema prefabricado. La construcción del BECS es un hito de desarrollo local en energía solar térmica en la que tuve una importante participación. Este desarrollo no sólo permitió la realización de esta tesis, sino habilita la realización de mayores investigaciones en el área. Actualmente el BECS se encuentra en funcionamiento y se trabaja junto al MIEM y el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) para que se comience a ensayar los calentadores solares que se encuentran en plaza. El BECS busca ser una infraestructura mixta, donde se puedan realizar ensayos comerciales (como laboratorio de ensayos designado por el LATU, por ejemplo) y actividades de investigación en el marco de proyectos de I+D y/o tesis de posgrado, siendo esta tesis un ejemplo de ello.

En la Figura 3.1 se muestra una foto frontal del BECS. En esta figura se pueden ver los cuatro puestos de ensayos que éste posee: dos para colectores ubicados en los extremos (seguidores móviles), y dos para sistemas ubicados en el centro. Para los ensayos de colectores solares se tomó como referencia la norma [ISO-9806 \(2017\)](#) y para los ensayos de sistemas prefabricados la norma [ISO-9459-2 \(1995\)](#) y la [ISO-9459-5 \(2007\)](#). En esta figura también se pueden ver dos contenedores verdes, uno de 20 pies (6.10 m) y el otro de 10 pies (3.05 m). El primero es donde se aloja todo el equipamiento termo-hidráulico y el segundo es donde se alojan los tableros eléctricos y el sistema de control. La fachada principal de esta instalación se orienta al Norte, y su desarrollo es Este-Oeste (de izquierda a derecha). El nombre de cada puesto de ensayo fue establecido según su ubicación respecto a la línea Norte-Sur y según si se trata de un puesto para ensayar colectores o sistemas prefabricados. Los puestos de ensayos



Figura 3.1: Foto frontal del Banco de Ensayos de Calentadores Solares

que se ubican a la izquierda de la Figura 3.1 se denominan puestos Este: puesto Este de colectores y puesto Este de sistemas prefabricados, y los que se encuentran a la derecha se denominan puestos Oeste: puesto Oeste de colectores y puesto Oeste de sistemas prefabricados. Los puestos de ensayo de colectores permiten la realización de los ensayos de desempeño térmico de acuerdo a las metodologías SST y QDT.

3.2. Puesto Este de colectores

En esta sección se describe el puesto ensayo que se utilizó en esta tesis: el puesto Este de colectores. Este puesto de ensayo está compuesto por cinco elementos: (1) seguidor solar, (2) instrumentos de medida, (3) instalación termo-hidráulica, (4) instalación eléctrica y sistema de control, y (5) instalación de aire comprimido. A continuación se describe cada uno de estos elementos.

3.2.1. Seguidor solar

El colector se monta sobre un seguidor solar como se muestra en la Figura 3.2. La inclinación horizontal de este seguidor se puede ajustar manualmente entre 5° y 85° y el azimut se puede ajustar de forma manual o automática entre -90° y 90° ; el ajuste automático se realiza una vez cada 2 minutos. La estructura original de este seguidor, que se puede ver en la Figura 3.1, tuvo que sustituirse por una estructura más robusta fabricada en perfiles rectangulares de hierro debido a que la original se deformaba excesivamente por el peso de los ventiladores. Estos ventiladores están montados en línea sobre una tobera convergente de acero galvanizado y se utilizan para generar un flujo de aire a una velocidad determinada sobre el colector a ensayar. Los ventiladores pueden regularse en altura lo que permite que la corriente de aire artificial fluya por

toda las caras del colector (frontal, trasera y costados). La regulación de la velocidad de los ventiladores se realiza mediante reguladores de voltaje. El montaje del colector cumple con los requisitos establecidos por la [ISO-9806 \(2017\)](#), a saber:

- No existen elementos significativos que obstruyan el campo de vista del colector o que generen sombra sobre éste.
- No existen superficies cercanas que puedan reflejar radiación solar sobre el colector.
- No existen superficies a alta temperatura que intercambien calor por radiación con el colector.
- El aire puede circular libremente por todas las caras del colector.
- El borde inferior del colector se encuentra a más de 50 cm del suelo.

Los dos primeros puntos también aplican para los piranómetros y para el cumplimiento de estos puntos se evita operar el seguidor solar con ángulos azimutales cercanos a 90° , de lo contrario, la propia instalación podría generar obstrucciones en el campo de vista del colector. Sobre este mismo soporte se ubican algunos de los sensores de medida que se utilizan durante los ensayos. Estos instrumentos se describen en la subsección siguiente.



Figura 3.2: Montaje del colector en el seguidor solar.

3.2.2. Instrumentos de medida

A continuación se listan las medidas realizadas en este puesto de ensayos vinculadas a los ensayos de desempeño térmico:

- Irradiancia solar global en el plano del colector G_t (W/m²).
- Irradiancia solar global en plano horizontal G_h (W/m²).
- Irradiancia solar difusa en plano horizontal G_{dh} (W/m²).
- Temperatura del fluido a la entrada del colector T_i (°C).
- Temperatura del fluido a la salida del colector T_o (°C).
- Temperatura de aire ambiente T_a (°C).
- Caudal volumétrico de fluido q (m³/s).
- Velocidad del viento paralela al plano del colector v (m/s).

La irradiancia solar global en el plano del colector G_t se mide con un piranómetro Kipp & Zonen CMP 10. Este sensor se encuentra instalado a la izquierda del colector (ver Figura 3.2) y su ángulo de inclinación difiere en menos de $\pm 1^\circ$ respecto al ángulo de inclinación del colector. La irradiancia global en plano horizontal G_h se mide con un piranómetro Kipp & Zonen CMP11 y la irradiancia difusa en plano horizontal G_{dh} con piranómetro Kipp & Zonen CMP6 (estos instrumentos no se muestran en la figura). Los dos primeros piranómetros son Clase A (CMP10 y CMP11) y el tercero es Clase B (CMP6), según la [ISO-9060 \(2018\)](#), y son calibrados anualmente en el LES de acuerdo a la norma [ISO-9847 \(1992\)](#) contra un estándar secundario Kipp & Zonen CMP22 que es enviado cada cinco años a calibrar contra la referencia radiométrica mundial en World Radiation Center en Davos, Suiza. La medida de irradiancia difusa en plano horizontal se realiza junto con una banda de sombra del mismo fabricante, y en la Figura 3.3 se muestra un foto provista por el fabricante a modo de ejemplo. Esta banda de sombra bloquea la irradiancia directa que incide sobre el piranómetro y también parte de la irradiancia difusa. Por este motivo es necesario aplicarle un factor de corrección a la medida del equipo. El factor de corrección utilizado en este trabajo corresponde al propuesto por [Drummond \(1956\)](#):

$$f_{cor} = \left[1 - \left(\frac{2\theta_0 \cos \delta}{\pi} \right) \times (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \right]^{-1}, \quad (3.1)$$

donde δ es la declinación solar, ω_s el ángulo horario de salida del sol, ϕ es la latitud del lugar y θ_0 es el ángulo transversal que bloquea la banda, que en este caso es

0.185 rad. Este factor de corrección asume que la distribución de la radiancia difusa es [isotrópica](#).



Figura 3.3: Equipo de medición de irradiancia difusa en plano horizontal con banda de sombra. Fuente: Kipp & Zonen.

Para la determinación de los parámetros característicos del colector es necesario separar de la irradiancia global en el plano de colector G_t en sus sub-componentes directa G_{bt} y difusa G_{dt} . Esta separación se realiza de la siguiente manera. Primero se estima la [irradiancia solar directa en incidencia normal](#) G_b a través de las medidas de irradiancia solar en plano horizontal G_h y G_{dh} , utilizando la ecuación de clausura:

$$G_b = \frac{G_h - G_{dh}}{\cos \theta_z}, \quad (3.2)$$

donde θ_z es ángulo cenital solar. Luego, se calcula la sub-componente directa G_{bt} multiplicando G_b por el coseno del ángulo de incidencia:

$$G_{bt} = G_b \cos \theta. \quad (3.3)$$

Finalmente la sub-componente difusa G_{dt} se calcula por diferencia entre la global y la directa en el plano del colector:

$$G_{dt} = G_t - G_{bt}. \quad (3.4)$$

Durante los primeros ensayos en el BECS la medida de difusa en plano inclinado se realizaba con un piranómetro y una banda de sombra solidarios al seguidor solar (ver Figura 3.2, izquierda del colector). El problema con esta estrategia es que es de utilidad únicamente cuando se realiza seguimiento azimutal, porque si no se hace (azimuth fijo) la banda no bloquea la irradiancia directa sobre el piranómetro. Esta medida de difusa (con seguimiento) permite aún el ensayo SST porque sólo se

utiliza como variable de control, pero inhabilita el ensayo QDT, debido a que la difusa es una variable a considerar como entrada en el modelado y porque este método además requiere secuencias de medida con el seguidor en una posición fija. La incorporación las medidas G_h y G_{dh} fueron las únicas modificaciones introducidas para la implementación de la metodología QDT.

Para medir la temperatura a la entrada y a la salida del colector, T_i y T_o , se utilizan sensores PT100 de 3 hilos envainados y con transmisores de 4-20 mA de la marca Herten. Cada uno de estos sensores está montado en una Tee a 90° en forma tal que la vainas apuntan en la dirección contraria al caudal de fluido. Además, los tramos de cañerías entre el colector y estos sensores están aislados con 30 cm de espuma elastomérica recubierta con membrana asfáltica reflectiva. La temperatura ambiente T_a se registra con un sensor PT1000 de 2 hilos Honeywell montado dentro de una caseta de plástico blanco para protegerla de la irradiancia solar pero que permite el pasaje del viento a través de ella. Se tiene una segunda medida de temperatura ambiente a la salida de los ventiladores (apenas dentro de la tobera por lo que no le da el Sol) para verificar que esta temperatura se encuentre dentro del rango $T_a \pm 2^\circ\text{C}$, donde T_a es la media del primer sensor. Todos los sensores de temperatura fueron calibrados en el LES siguiendo el procedimiento estándar validado por el LATU, reportándose una incertidumbre estándar de 0.02°C .

La medida de caudal q se realiza con un caudalímetro electromagnético de Endress & Hauser con una incertidumbre estándar de 0.5% de la medida. El caudal másico \dot{m} se calcula como el producto del caudal volumétrico q por la densidad del fluido ρ ($\dot{m} = \rho \times q$). En el anexo C de la norma [ISO-9806 \(2017\)](#) se dan expresiones analíticas para la densidad y el calor específico del agua en función de la temperatura (para presiones menores a 12 bar y temperaturas entre 0°C y 185°C), las cuales se muestran en el Apéndice B.2 y se asume poseen incertidumbres menores al 0.5% . La potencia útil, magnitud requerida para la determinación de los parámetros característicos del colector, se determina mediante la Ec. (2.8).

La velocidad del viento paralelo al plano del colector, v , se mide con un anemómetro de copa marca NGR modelo 4C con incertidumbre estándar de 0.25 m/s . Esta medida se ubica a 50 mm del plano del colector y a un poco menos de $1/3$ del largo del colector respecto al borde inferior de éste. Además, el anemómetro se encuentra sobre una base de acrílico de 20 cm de ancho por 40 cm de largo paralela al plano del colector (ver Figura 3.2 a la derecha del colector). Además, se cuenta con un anemómetro portátil marca Kimo Instruments modelo VT100S que se utiliza para medir la distribución espacial de la velocidad del viento y ajustar la velocidad de los ventiladores. La ubicación del primer anemómetro (NGR) se definió de manera tal que su medición fuera igual al promedio espacial de la media del anemómetro portátil. La intensidad turbulenta del viento I_u (adimensional) sobre cierto período

de medición se calcula de acuerdo a:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{v}}, \quad (3.5)$$

donde \bar{v} y σ_u son la velocidad promedio y la desviación estándar de la velocidad sobre el período de medición.

En la Tabla 3.1 se muestra una comparación entre las características de los instrumentos de medida y los requisitos establecidos por la norma. La incertidumbre de la diferencia de temperatura ($T_o - T_i$) y la del caudal másico se determinaron por propagación de incertidumbre. En dicha tabla se puede constatar que todas las medidas satisfacen los requerimientos de la norma excepto por el piranómetro que se utiliza para medir G_{dh} , que es Clase B cuando debería ser Clase A. Una mayor incertidumbre en esta medida no tiene mayores implicancias para el ensayo SST dado que la medida de difusa se utiliza solo como verificación. Para el ensayo QDT esta medida se utiliza como entrada para la identificación de parámetros, por lo que esta mayor incertidumbre podría trasladarse a la determinación de alguno de ellos. Se destaca además que, aparte de los requisitos de precisión, todos los sensores se encuentran montados como lo especifica la norma.

Medida	Característica	Requisito
Irradiancia solar	Clase A, Clase B	Clase A
Diferencia de temperatura ($T_o - T_i$)	± 0.04 °C	± 0.05 °C
Temperatura ambiente	± 0.02 °C	± 0.5 °C
Velocidad del viento	± 0.25 m/s	± 0.5 m/s
Caudal másico	± 1.0 %	± 1.0 %

Tabla 3.1: Comparación de las características de los instrumentos de medidas y los requisitos de la norma ISO 9806.

Todas las medidas anteriores, a excepción del anemómetro portátil, se registraron cada 10 segundos usando un adquisidor de datos Fischer Scientific DT85. El ángulo de incidencia se monitorea con un puntero solidario al seguidor móvil, el cual se puede ver en la Figura 3.2 (a la derecha del colector). Este instrumento se utiliza solo como control visual. El ángulo de incidencia que se utiliza en la determinación de los parámetros característicos del colector se calcula instante a instante a partir la posición aparente del Sol y de la inclinación del colector. El calculo de todas las magnitudes solares, incluido el ángulo de incidencia, se muestra en el Apéndice B.1.

3.2.3. Instalación termo-hidráulica

En la Figura 3.4 se muestra un esquema simplificado de la instalación termo-hidráulica. La misma cuenta con tres circuitos independientes: (1) circuito primario

(en verde), (2) circuito de calentamiento (en rojo) y (3) circuito de enfriamiento (en azul). Los tramos de cañería en negro en el circuito primario corresponden a las cañerías flexibles que se pueden observar en la Figura 3.2. El control de temperatura a la entrada del colector (circuito primario) se realiza en dos etapas. Primero el fluido caliente a la salida del colector es enfriado, proceso que se realiza en el intercambiador de calor IC1. Luego, el fluido es calentado en forma precisa a la temperatura de entrada T_i establecida para el ensayo a través del intercambiador de calor IC2. El circuito de enfriamiento utiliza agua a 10°C que proviene de un tanque de inercia de 600 litros enfriado por un *chiller*. El circuito de calentamiento utiliza agua caliente que proviene de un termotanque eléctrico de 40 litros. Cada circuito posee una bomba circuladora: B1, B2 y B3, y una válvula reguladora manual: VR1, VR2 y VR3. Estas válvulas se utilizan para regular en forma aproximada el caudal en cada circuito. La válvula reguladora manual VR4 se utiliza para regular la temperatura del fluido a la entrada del intercambiador de calor IC1, mezcla el retorno caliente y el agua fría a 10°C . Los caudales en los tres circuitos se regulan de forma precisa mediante válvulas reguladores electroneumáticas V51, V52 y V53.

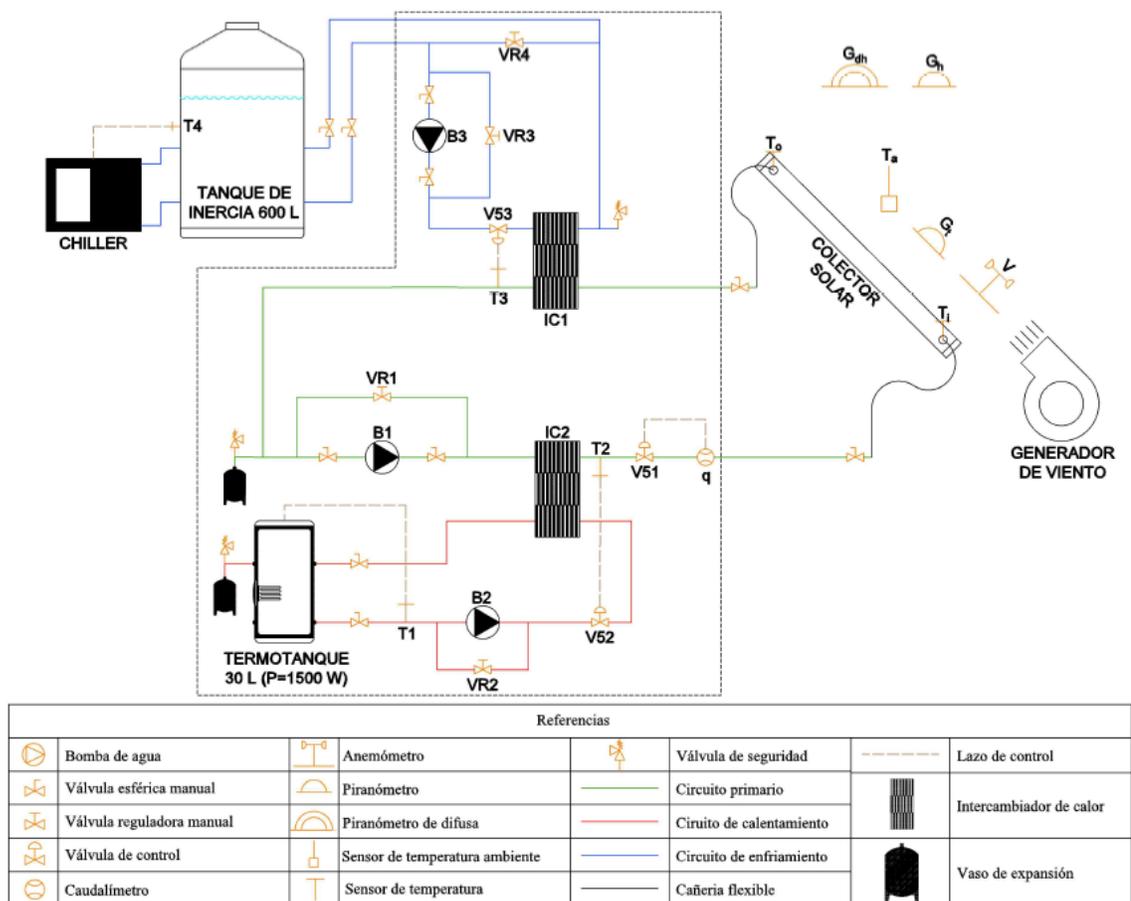


Figura 3.4: Esquema de la instalación termo-hidráulica.

En la Figura 3.5a se muestra una foto del *chiller* y el tanque de inercia de 600 litros. Estos elementos son compartidos por lo cuatro puestos de ensayos y se ubican al exterior, debajo de un alero de chapa en la parte trasera del contenedor de 20 pies. Los elementos restantes, ubicados dentro de la línea punteada negra que se muestra en la Figura 3.4, están montados sobre un cuadro de hierro blanco en el interior del contenedor de 20 pies, como se muestran en el Figura 3.5b. Las cañerías son de acero inoxidable de 1/2 pulgada, en su mayoría, y están aisladas con espuma elastomérica de 20 cm en color negro. Las aislaciones de los tramos de cañerías que se encuentran al exterior están recubiertos con papel de aluminio para protegerlas de la irradiancia solar. El circuito primario y el de calentamiento son presurizados y cada uno cuenta con elementos de protección por sobre-presión: vaso de expansión y válvula de seguridad (elementos mostrados en el esquema). El circuito de enfriamiento está abierto a la atmósfera.



(a) Chiller y tanque de inercia de 600 litros.



(b) Cuadro de hierro con algunos de los componentes del circuito hidráulico.

Figura 3.5: Ubicación de algunos elementos de las instalación.

3.2.4. Instalación eléctrica y sistema de control

El suministro de energía eléctrica del BECS es trifásico de 400 V con neutro aterrado (3 fases y neutro, 230 V entre fase y neutro). Se tiene un tablero eléctrico principal

dentro del contenedor de 20 pies, el cual alimenta al chiller y dos sub-tableros: Este y Oeste. El sub-tablero Este alimenta los dos puestos de ensayos ubicados en la zona Este del BECS y el sub-tablero Oeste los puestos de ensayos ubicados en la zona Oeste. Cada sub-tablero alimenta un puesto de ensayo de colectores y uno de sistemas prefabricados, y posee un PLC marca Siemens modelo S7-1200 independiente, elemento encargado de controlar el funcionamiento de la instalación. El sistema de control permite la operación manual o automática de la instalación. Se encarga de encender o apagar las bombas circuladores mediante relés de control y de la ejecución de cuatro lazos de control tipo PID: (1) control primario de temperatura, (2) control secundario de temperatura, (3) control de temperatura del termotanque, y (4) control de caudal. Estos lazos se indican en línea punteada naranja en la Figura 3.4 y utilizan los sensores de temperatura T_1 , T_2 y T_3 , cuyas ubicaciones se muestran en la misma figura. El funcionamiento de cada lazo de control se describe a continuación. El lazo (1) está formado por el sensor de temperatura T_3 y la válvula electrónica V53 y se encarga de controlar la apertura de la válvula electroneumática de manera que la lectura del sensor T_3 sea igual a $T_i - 2^\circ\text{C}$. El lazo (2) está formado por el sensor de temperatura T_2 y la válvula electrónica V52 y se encarga de controlar la apertura de la válvula electroneumática de manera que la lectura del sensor T_2 sea igual a T_i . El lazo (3), trabaja conjuntamente con el lazo de control de temperatura secundario, está formado por el sensor de temperatura T_1 y la resistencia del termotanque y se encarga de encender o apagar dicha resistencia de manera tal que la lectura del sensor T_1 sea igual a $T_i + 5^\circ\text{C}$. El lazo (4) está formado por el sensor de caudal q y la válvula electrónica V51 y se encarga de controlar la apertura de la válvula electroneumática de manera que la lectura del sensor q sea igual al caudal establecido para el ensayo. La medida de caudal q es la única que se registra en el datalogger y el PLC a la misma vez. El *chiller* posee su propio controlador, aparte del PLC, el cual se encarga de mantener la temperatura del agua dentro del tanque de inercia de 600 litros en 10°C . Este controlador es del tipo *on-off*.

3.2.5. Instalación de aire comprimido

Por último, se tiene una instalación de aire comprimido, la cual se encarga de suministrar aire seco a 4 bar a las válvulas electroneumáticas (V51, V52 y V53). Esta instalación está constituida por un compresor recíprocante de 2 HP y 10 bar, un tanque de 40 litros, un regulador de presión (que reduce la presión de 10 bar a 4 bar) y dos filtros de aire dispuestos en serie; uno de $100\ \mu\text{m}$ y otro de $5\ \mu\text{m}$.

3.3. Evaluación externa del BECS

Como se mencionó en la Sección 3.1, el BECS fue desarrollado por investigadores propios del LES en base a las instalaciones pre-existentes del CENER de España. En el 2012 la UdelaR, financiado por el MIEM/DNE, contrata los servicios del CENER para elaborar un informe de especificaciones técnicas para su laboratorio de ensayos de colectores solares y sistemas prefabricados para producción de ACS según las normas ISO 9806 e ISO 9459-2, respectivamente. Las instalaciones del BECS fueron construidos en base a estos informes. La UdelaR además contrata al CENER cierta cantidad de horas de consultoría, las cuales no fueron utilizadas en su totalidad. En 2017 la UdelaR le solicita al CENER el remplazo de las horas de consultoría no utilizadas por la visita de un experto a las instalaciones del BECS. El CENER accede a esta petición y en marzo de 2018 el Jefe de Servicios de Medida y Caracterización del CENER, el Ing. Albero García de Jalón, visita el BECS y realiza una evaluación técnica de las instalaciones.

El resultado de esta evaluación es que la infraestructura del BECS cumple con los requisitos de las normas de ensayo vigente y están listas para acometer ensayos de colectores solares y sistemas prefabricados para producción de ACS. Además, en el informe final de la actividad se destaca el alto grado de autonomía que poseen los técnicos del BECS por haber sido ellos mismos los que llevaron a cabo el montaje de la instalación. Es de destacar también que el informe de colectores provisto por el CENER cubría únicamente la realización de los ensayos SST y que este alto grado de autonomía fue el que permitió la implementación de los ensayos QDT. El informe incluye también algunas observaciones menores, el espesor de aislante térmico en la conexiones de entrada y salida del colector y el montaje del piranómetro de irradiancia solar global (G_t), las cuáles fueron corregidas posteriormente a la visita.

3.4. Estimativo de la cantidad de ensayos anuales

El objetivo de esta sección es mostrar la aplicabilidad de la metodología QDT en nuestro país y la región. Para esto se estima una cota superior de la cantidad de ensayos anuales que se podrían realizar en el BECS con las metodologías SST y QDT. Esta cota superior depende fuertemente de las condiciones climáticas, en particular, de la variabilidad de las condiciones de cielo. En la Figura 3.6 se muestra la ubicación del LES dentro de la región climática afín de la pampa húmeda (verde claro). Dicha región se ubica al sureste de Sudamérica y está clasificada como Cfa (clima templado-cálido, húmedo, con veranos calurosos) según la clasificación actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007). Las zonas identificadas en verde oscuro corresponden a la clasificación Cfb, muy similar a Cfa, con la excepción de que los veranos

son más frescos por la influencia de la costa. El análisis se realiza utilizando el año meteorológico típico de la localidad de Salto (latitud = 31.28° S, longitud = 57.92° O, altitud = 56 m sobre el nivel del mar), Uruguay, a escala horaria (Alonso-Suárez et al., 2019)

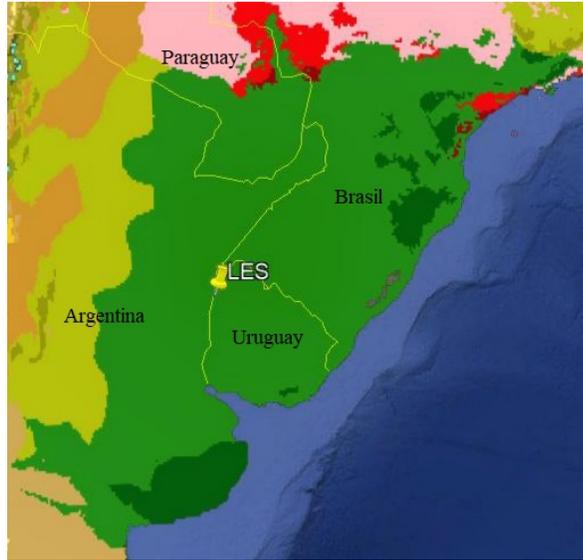


Figura 3.6: Ubicación del LES dentro de la región climática afín de la pampa húmeda.

Primero se analiza el caso de la metodología SST y se determina la cantidad de horas de ensayo válidas a nivel mensual, es decir, la cantidad de horas en cada mes en las cuales se cumplen todos los requisitos de la norma. Esta cantidad depende de la forma en la que se utilice el seguidor solar. En este caso se supone que el seguidor solar realiza seguimiento azimutal pero con una inclinación horizontal fija de $\beta = 45^\circ$. Para la definición la inclinación horizontal se tuvo en cuenta que los factores de pérdidas térmicas (a_1 y a_2) dependen de este ángulo. Se optó por $\beta = 45^\circ$ por ser la inclinación que normalmente se utiliza en las instalaciones solares para ACS en Uruguay (Martínez-Escribano et al., 2013). Una hora se considera válida para los ensayos de eficiencia y capacidad térmica si se cumplen las siguientes condiciones:

- 1) Irradiancia solar en el plano del colector G_t mayor 700 W/m^2 . Para la estimación de G_t se utilizó el modelo isotrópico (Duffie and Beckman, 1991):

$$G_t = G_b \cos \theta + G_{dh} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_s G_h \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right), \quad (3.6)$$

donde ρ_s es la reflectividad del suelo supuesta en 0.25 y β es el ángulo horizontal de inclinación, 45° en este caso.

- 2) Fracción difusa en el plano del colector f_d^* menor al 30 %. Para la fracción difusa

también se utilizó el modelo isotrópico:

$$f_d^* = \frac{G_{dh} \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + \rho_s G_h \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right)}{G_t}. \quad (3.7)$$

- 3) Velocidad del viento a 2 m de altura menor a 4 m/s.
- 4) Ángulo de incidencia θ menor a 20° .
- 5) Índice de cielo claro k'_t mayor a 0.7. Para el calculo de este índice se utilizo la expresión dada por [Perez et al. \(1990\)](#):

$$k'_t = \frac{k_t}{0.1 + 1.031e^{\left(\frac{-1.4m}{9.4+0.9m}\right)}}, \quad (3.8)$$

donde k_t es el índice de claridad horario usual (cociente entre la irradiación horaria global en plano horizontal G_h y la correspondiente irradiación en un plano horizontal en el tope de la atmósfera G_{0h}) y m es la masa de aire ($m = 1/\cos\theta_z$).

- 6) Irradiancia en incidencia normal G_b mayor que 200 W/m^2 .
- 7) Valor absoluto del ángulo azimutal del sol (γ_s) menor a 80° .
- 8) Altura solar (α_s) mayor a 10° .

Las condiciones 1, 2 y 3 son requerimientos explícitos establecidos por la norma (ver Tabla 2.1). La condición 4 es para el cumplimiento del requisito de incidencia normal. El requerimiento de variabilidad acotada de la irradiancia solar global en el plano del colector ($\pm 50 \text{ W/m}^2$) en la práctica implica realizar el ensayo en condiciones de cielo claro. La verificación de cielo claro se realiza mediante las condiciones 5 y 6. Las condiciones 7 y 8 son del tipo operativas, se evita ensayar con azimut solar cerca de 90° y a bajas alturas para evitar obstrucciones en el campo de vista del colector.

Si una hora se considera válida para el ensayo de eficiencia y capacidad térmica, también se considera válida para el ensayo de modificador por ángulo de incidencia, bajo el supuesto de que este ensayo se podría realizar en el mismo período de tiempo pero fijando el azimut del seguidor de forma tal que se logren los ángulos de incidencias necesarios para este ensayo (orientación fija al norte, por ejemplo).

Para determinar la cantidad de ensayos mensuales para la metodología SST es necesario definir la duración de un ensayo, es decir, el tiempo total requerido para la realización de los tres sub-ensayos: eficiencia, modificador por ángulo de incidencia y capacidad térmica. El tiempo de medición necesario para estos tres sub-ensayos es de aproximadamente 7 horas, considerando la medición de tres ángulos de incidencia

diferentes para el modificador por ángulo de incidencia. Además de este tiempo, se requiere de 7 horas adicionales para que la instalación llegue a las temperaturas de consigna y se estabilice. Lo óptimo es que no se utilicen horas de ensayo válidas para este periodo de estabilización pero en la práctica esto no siempre se puede lograr. Por este motivo, se supuso que la mitad del periodo de estabilización corresponden a horas de ensayo válidas. En definitiva, la realización de un ensayo según la metodología SST requiere de 10.5 horas de ensayo válidas ($10.5 = 7 + 7/2$). La cantidad de ensayos mensuales según esta metodología surge de dividir la cantidad de horas mensuales válidas por 10.5 horas. Los resultados se muestran en la Tabla 3.2. En esta tabla se puede ver que la cantidad de ensayos mensuales varía a lo largo del año y el máximo se da en otoño y el mínimo en verano. La cantidad de ensayos anuales según esta metodología es de 23. La baja cantidad de ensayos que se obtienen con la metodología SST en verano se debe a las condiciones 4 y 7, al recorrido aparente del Sol en esa época del año y a la forma en la que se utiliza el seguidor solar ($\beta = 45^\circ$).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Horas válidas	8	17	39	38	35	18	29	18	18	16	11	0	247
Ensayos SST	0.8	1.6	3.7	3.6	3.3	1.7	2.7	1.7	1.7	1.6	1.1	0	23

Tabla 3.2: Cantidad de horas válidas y cantidad de ensayos a nivel mensual para la metodología SST.

Para la metodología QDT también se considera una inclinación horizontal fija de 45° pero el azimut del colector en este caso no supone una limitante para la cantidad de ensayos. La duración mínima de un ensayo completo establecida por la norma es 13 horas; 3 horas y 15 minutos por cada *day type*. El requisito de contar con medidas antes y después del mediodía solar a ángulos de incidencias altos en la práctica implica más horas de ensayo. Para cumplir con este requisito lo que se hace es fijar la orientación del seguidor al norte y dejar que el colector trabaje durante todo el día con una temperatura media próxima a la temperatura ambiente ($T_m \approx T_a$) para la secuencia *day type 1*. Por lo tanto, en la práctica esta secuencia tiene una duración mayor a 3 horas y en este análisis se supuso una duración de 6.5 horas. De la misma manera que en el caso SST, se requiere además de cierto tiempo para alcanzar las temperaturas de consigna y estabilizar la instalación. En el caso de la metodología QDT este tiempo se estimó en 4 horas de las cuales se supone que la mitad corresponden a horas de ensayo válidas. Por lo tanto, la realización de un ensayo QDT requiere de 18.25 horas válidas ($18.25 = 6.5 + (3 \times 3.25) + 4/2$). Además, se impuso que al menos un 50% de las horas totales fueran en condiciones de cielo claro y un 20% fueran en condiciones de cielo nublado, debido a que es importante

para este ensayo capturar cierta dispersión en las condiciones meteorológicas. Luego de analizar la distribución de horas claras y nubosas del año meteorológico típico de la localidad de Salto se determina que la limitante para la metodología QDT son las horas claras. La cantidad de ensayos mensuales se estimó de la siguiente manera. Primero se aplican las condiciones 3, 7 y 8 de listado anterior a las series típicas, para descartar las horas con alta velocidad de viento (condición 3) y las horas en las que puede haber obstrucciones en el campo de vista del colector (condiciones 7 y 8). Luego, se imponen las condiciones 5 y 6 para identificar las horas claras, y finalmente se divide la cantidad de horas resultante por 9.125 horas ($9.125 = 0.5 \times 18.25$). Los resultados se muestra en la Tabla 3.3. La cantidad de ensayos anuales según la metodología QDT es de 45, lo que es aproximadamente el doble que la cantidad de ensayos SST.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Horas claras	26	30	46	55	51	28	40	23	25	26	32	26	411
Ensayos QDT	2.9	3.3	5.1	6.1	5.6	3.1	4.4	2.6	2.8	2.9	3.6	2.9	45

Tabla 3.3: Cantidad de horas claras y cantidad de ensayos a nivel mensual para la metodología QDT.

En la Figura 3.7 se muestra en forma gráfica la cantidad de ensayos mensuales para cada metodología. En esta figura se puede ver que la cantidad mensual de ensayos QDT es mayor que la cantidad mensual de ensayos SST a lo largo de todo el año. En términos anuales la cantidad de ensayos en el caso QDT duplica a la cantidad de ensayos en el caso SST. Esta relación coincide con lo encontrado en otras publicaciones en climas con características similares (Osorio and Carvalho, 2014).

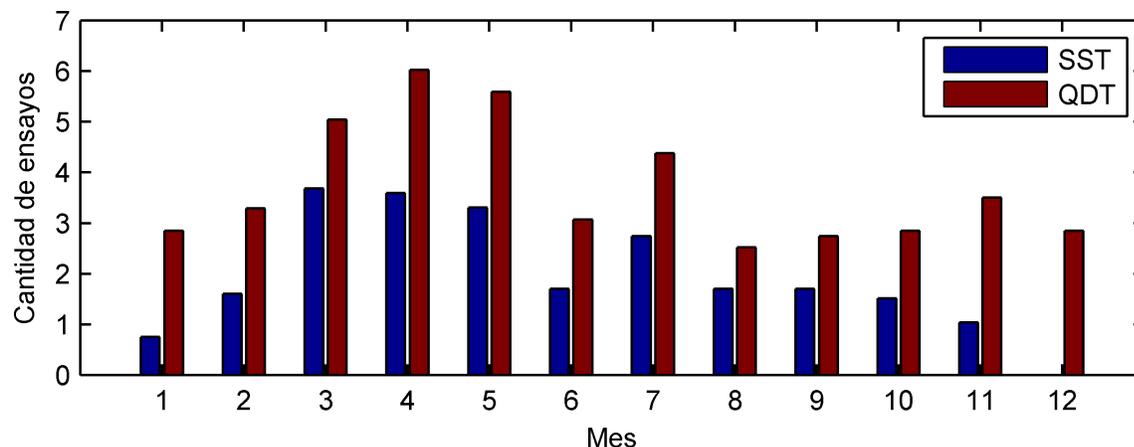


Figura 3.7: Cantidad de ensayos mensuales según metodologías SST y QDT.

Podría obtenerse una mayor cantidad de ensayos en el caso SST si la inclinación horizontal se ajustara de forma manual cada mes o si se realizara un seguimiento en altura solar. En el mejor de los casos (seguimiento en altura) se llegaría a 35 ensayos anuales SST, cifra que sigue siendo inferior a los 45 de la QDT. Igualmente, se recuerda que los factores de pérdidas de los colectores solares dependen del ángulo de inclinación y por lo tanto variar dicho ángulo durante los ensayos puede conducir a resultados erróneos.

Capítulo 4

Resultados y discusión

En el marco de esta tesis se ensayó un colector de placa plana de 2.02 m^2 de área bruta (medida en el laboratorio) de acuerdo a las metodologías SST y QDT entre el 17 de noviembre y el 19 de diciembre de 2019. En este capítulo se muestran los resultados de dichos ensayos, los de la metodología SST en la Sección 4.1 y los de la metodología QDT en la Sección 4.2. Los resultados de la metodología SST se utilizan como punto de referencia para evaluar la implementación de la metodología QDT. Además, para la metodología QDT se evaluaron dos procedimientos de identificación de parámetros y se estudió la influencia del tiempo de promediado en los resultados, es decir, el valor de los parámetros característicos. En esta misma sección se comparan las metodologías de ensayo SST y QDT. Finalmente, aprovechando los resultados de la intercomparación de laboratorios de América Latina organizada por el PTB en 2019, en la Sección 4.3 se comparan los resultados de esta tesis con los resultados de esta actividad, siendo esto posible ya que se utilizó el mismo colector en los diferentes laboratorios (misma marca y modelo).

4.1. Ensayo en estado estacionario SST

La realización de este ensayo involucró la realización de tres sub-ensayos independientes: ensayo de eficiencia, ensayo de modificador por ángulo de incidencia y ensayo de capacidad térmica. Los procedimientos de estos sub-ensayos fueron descritos en la Sección 2.5. A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron en cada caso. Durante estos tres sub-ensayos la inclinación horizontal del colector se fijó en 45° y el caudal de ensayo se fijó por norma en 2.40 kg/min ($2.40\text{ kg/min} \simeq 2.02\text{ m}^2 \times 0.02\text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$).

4.1.1. Ensayo de eficiencia

Para este sub-ensayo se midieron 16 valores de potencia útil diferentes, 4 valores por cada temperatura de entrada. La temperatura entrada más alta fue de 85 °C. Además, este sub-ensayo se realizó con el seguidor solar configurado para que siga la posición del sol en azimut, de forma tal que el ángulo de incidencia en el plano del colector sea lo más pequeño posible (menor a 20°). En la Tabla 4.1 se muestran las 16 medidas realizadas para este sub-ensayo. Para cada variable se indica el valor promedio en el período de 10 minutos y entre paréntesis se indica la variabilidad máxima. En esta tabla se puede ver que las medidas de irradiancia solar, temperatura ambiente, temperatura a la salida del colector y caudal satisfacen los requerimientos de la norma (ver Tabla 2.1). La condición de incidencia normal también se cumple para todos los puntos. La condición de variabilidad de la temperatura a la entrada del colector es satisfecha por todos los puntos excepto por los puntos 8 y 15, aunque el apartamiento respecto al requisito (± 0.1 °C) es muy pequeña. La medida de viento en una ubicación puntual en el plano del colector no puede cumplir la tolerancia establecida en la norma. No obstante, esta tolerancia aplica al promedio espacial, y éste se releva en forma manual sobre varios puntos del colector con el anemómetro portátil al inicio de cada ensayo y se ajustan los generadores de viento para cumplir lo exigido por la norma con un promedio espacial de 3.0 m/s aproximadamente. El problema con la medida puntual es que la interferencia entre la corriente artificial de viento y el viento atmosférico hace que en determinados momentos el anemómetro se frene. Este tipo de anemómetros (copela) no parece ser la mejor opción para esta aplicación. Además, el tiempo de muestreo de 10 s no es lo suficientemente pequeño para capturar la variabilidad de la medida de velocidad de viento (turbulencia) y por este motivo en la Tabla 4.1 se omite el cálculo de la intensidad turbulenta.

Una vez verificados los otros requerimientos de estabilidad, se procedió a realizar la identificación de parámetros utilizando el modelo de la Ec. (2.27), asumiendo estado estacionario ($dT_m/dt = 0$) e incidencia normal ($K_{hem} = 1$), es decir:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A_G} = \eta_{0,hem} G_t - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2. \quad (4.1)$$

Para cada punto se calculó la potencia útil por unidad de área \dot{Q}_u/A_G , la diferencia de temperatura ($T_m - T_a$) y la diferencia de temperaturas al cuadrado $(T_m - T_a)^2$. Cada temperatura de entrada se eligió de forma tal que la diferencia ($T_m - T_a$) sea aproximadamente igual a: 0 °C, 20 °C, 40 °C y 60 °C. En la Tabla 4.2 se muestran los resultados, el valor de los parámetros $\eta_{0,hem}$, a_1 , y a_2 y sus incertidumbres correspondientes (P67). La norma entiende que un parámetro ha sido determinado correctamente si el cociente entre el valor de dicho parámetro y su incertidumbre (*t-ratio*) es mayor a 3. Esta condición se verifica en los tres casos, siendo a_2 el menos significativo.

Punto	Fecha	Hora	G_t (W/m ²)	f_d^*	T_i (°C)	T_o (°C)	T_a (°C)	q (l/min)	v (m/s)	θ (°)	$T_m - T_a$ (°C)
1	24/11	09:25-09:35	1096(4)	0.124	18.20(0.06)	27.70(0.05)	22.33(0.73)	2.39(0.7 %)	2.3(2.3)	1.8	0.62
2	24/11	09:35-09:45	1010(4)	0.125	18.20(0.06)	27.73(0.07)	22.45(0.95)	2.39(0.6 %)	2.5(2.5)	3.9	0.52
3	24/11	09:45-09:55	1102(2)	0.124	18.21(0.09)	27.82(0.08)	22.87(0.50)	2.39(0.6 %)	2.2(3.2)	6.0	0.14
4	24/11	09:55-10:05	1099(6)	0.126	18.23(0.07)	27.82(0.08)	22.88(0.76)	2.39(0.7 %)	1.9(2.2)	8.2	0.14
5	17/11	16:00-16:10	1030(10)	0.112	49.72(0.06)	57.69(0.12)	33.57(0.43)	2.39(0.5 %)	0.1(0.8)	2.9	20.13
6	17/11	16:10-16:20	1014(9)	0.113	49.72(0.05)	57.58(0.08)	33.89(0.66)	2.39(0.3 %)	0.4(2.4)	5.1	19.76
7	17/11	16:20-16:30	999(10)	0.114	49.73(0.06)	57.45(0.10)	34.20(0.48)	2.39(0.4 %)	0.1(1.1)	7.2	19.39
8	17/11	16:30-16:40	977(12)	0.119	49.73(0.11)	57.28(0.15)	33.78(0.48)	2.39(0.7 %)	0.1(1.1)	9.3	19.73
9	28/11	09:50-10:00	1090(2)	0.104	65.29(0.05)	72.60(0.06)	26.84(0.28)	2.39(0.3 %)	0.4(2.2)	7.1	41.11
10	28/11	10:00-10:10	1090(2)	0.103	65.30(0.09)	72.66(0.10)	27.30(0.44)	2.39(0.4 %)	0.5(2.3)	8.2	41.68
11	28/11	10:10-10:20	1088(3)	0.103	65.31(0.08)	72.69(0.12)	27.38(0.33)	2.39(0.5 %)	0.0(0.0)	11.4	41.62
12	28/11	10:20-10:30	1083(7)	0.101	65.28(0.07)	72.61(0.05)	27.18(0.44)	2.39(0.2 %)	0.0(0.0)	13.5	41.76
13	18/12	09:10-09:20	1059(6)	0.106	85.47(0.07)	91.32(0.08)	27.03(0.48)	2.39(0.3 %)	0.4(1.5)	2.5	61.36
14	18/12	09:20-09:30	1069(4)	0.106	85.50(0.08)	91.44(0.08)	27.24(0.54)	2.39(0.3 %)	0.2(1.4)	0.4	61.23
15	18/12	09:30-09:40	1078(5)	0.104	85.61(0.11)	91.62(0.18)	27.64(0.34)	2.39(0.8 %)	0.2(1.6)	1.8	60.98
16	18/12	09:40-09:50	1084(3)	0.102	85.68(0.05)	91.80(0.06)	27.87(0.33)	2.39(0.3 %)	0.3(1.8)	3.9	60.86

Tabla 4.1: Medidas de ensayo de eficiencia, metodología SST.

Parámetro	Valor (incert.)	t -ratio
$\eta_{0,hem}$	0.716(0.001)	540
a_1 (W/m ² K)	4.051(0.113)	35.8
a_2 (W/m ² K ²)	0.011(0.002)	5.96

Tabla 4.2: Resultados ensayo de eficiencia, metodología SST.

Si bien el ajuste de los parámetros se realiza en términos de la potencia útil, tradicionalmente los datos experimentales suelen representarse gráficamente en términos de eficiencia. La curva de eficiencia se obtiene simplemente dividiendo la Ec. (4.1) por la irradiancia solar G_t , esto es:

$$\eta_{hem} = \eta_{0,hem} - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{G_t} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G_t}. \quad (4.2)$$

En la Figura 4.1 se muestran los datos de eficiencia en función de la temperatura reducida, $T_m^* = (T_m - T_a)/G_t$, junto a la curva de eficiencia con los parámetros ajustados. Se aclara que la Ec. (4.2) en realidad es una función de dos variables; T_m^* y G_t . Para graficar la curva se utilizó el valor promedio de G_t de la Tabla 4.1 ($\bar{G}_t = 1061 \text{ W/m}^2$). En esta gráfica se puede ver que el ajuste es muy bueno debido a que la distancia entre los puntos experimentales y la curva ajustada es muy pequeña. Vale la pena aclarar que esta distancia no solo se debe al error experimental si no que también se debe a la diferencia entre la irradiancia solar de cada punto y el valor promedio \bar{G}_t (que varía en menos de 12%).

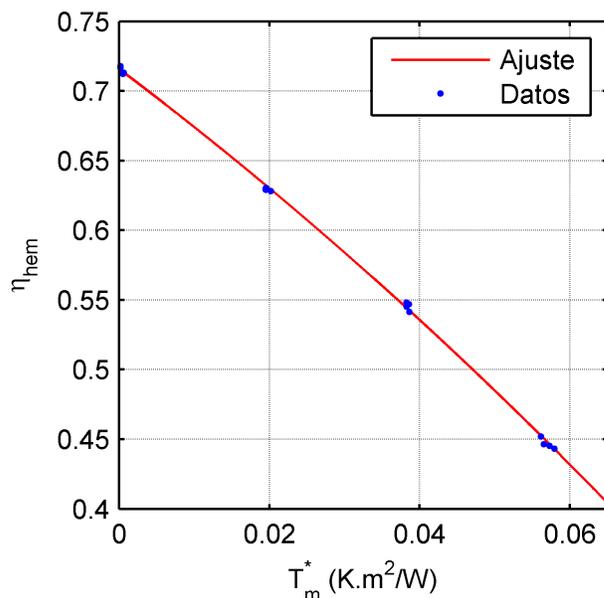


Figura 4.1: Datos experimentales de eficiencia y curva con parámetros ajustados.

4.1.2. Ensayo de modificador por ángulo de incidencia

Este sub-ensayo se llevó a cabo con el seguidor solar orientado al norte (fijo) y consistió en la medición de la potencia útil producida por el colector para 5 ángulos de incidencia diferente entre 40° y 65° , igualmente espaciados entre sí. Además, para

cada ángulo se realizó una medida antes y otra después del mediodía solar, dando así un total de 10 medidas, las cuales se muestran en la Tabla 4.3. En esta tabla se puede ver que todas las medidas, a excepción de la velocidad del viento, cumplen con los requisitos de la Tabla 2.1. El modificador por ángulo de incidencia correspondiente a cada medida se puede despejar de la Ec. (2.27) asumiendo estado estacionario ($dT_m/dt = 0$), de la siguiente manera:

$$K_{hem}(\theta) = \frac{\dot{Q}_u/A_G + a_1(T_m - T_a) + a_2(T_m - T_a)^2}{\eta_{0,hem}G_t}. \quad (4.3)$$

Este ensayo no es totalmente independiente respecto del ensayo de eficiencia debido a que utiliza los parámetros $\eta_{0,hem}$, a_1 , y a_2 . Para disminuir el efecto de los factores de pérdida para cada medida se ajustó la temperatura de entrada de forma tal que la temperatura media del fluido sea próxima a la temperatura ambiente, $T_m \approx T_a$. En la Tabla 4.4 se muestran los resultados, los superíndices $-$ y $+$ corresponde a las medidas antes y después del mediodía solar, respectivamente. El valor de $K_{hem}(\theta)$ corresponde al promedio de $K_{hem}^-(\theta)$ y $K_{hem}^+(\theta)$ para cada ángulo. Se puede ver que los modificadores por ángulos de incidencias medidos después del mediodía solar son mayores que los medidos antes del mediodía solar, es decir, K_{hem}^+ es mayor que K_{hem}^- para un mismo ángulo. Esto se debe a que si bien las medidas verifican las condiciones de la Tabla 2.1, el ensayo no es exactamente en estado estacionario y los efectos dinámicos en este caso no son despreciables. Por ejemplo, durante la mañana la irradiancia solar es creciente y el ángulo de incidencia decreciente, esto hace que la temperatura media del fluido sea creciente, es decir, $dT_m/dt \geq 0$. Si los efectos dinámicos no son despreciados entonces en el numerador de la Ec. (4.3) debería aparecer el término $(C/A_g) \times dT_m/dt \geq 0$ sumando, por lo tanto la Ec. (4.3) sin este término subestima el modificador por ángulo de incidencia. Lo mismo sucede en la tarde pero en sentido inverso. Por este motivo es que se promedian las medidas antes y después del mediodía solar: si las medidas son simétricas entonces los efectos dinámicos se cancelan.

Si bien el modificador por ángulo de incidencia está dado a través de los valores discretos de $K_{hem}(\theta)$ dados en la Tabla 4.4 y en la norma se acepta una interpolación lineal entre estos valores, se determinó el parámetro b_0 de la Ec. (2.6), para luego tener un valor con el cual comparar cuando se presenten los resultados del ensayo QDT. Este parámetro se determinó por regresión lineal y se obtuvo un valor de $b_0 = 0.108 \pm 0.008$. En la Figura 4.2 se muestran los datos experimentales y la curva de la Ec. (2.6). En esta figura se puede ver que este modelo subestima al modificador por ángulo de incidencia en el rango de ángulos que van desde 40° hasta 60° y sobrestima a partir de 60° (aproximadamente). Esto implica que este modelo simplificado y con un único grado de libertad en el ajuste tiene sus limitaciones para reproducir adecuadamente el comportamiento del modificador por ángulo de incidencia.

Punto	Fecha	Hora	G_t (W/m ²)	f_d^*	T_i (°C)	T_o (°C)	T_a (°C)	q (l/min)	v (m/s)	θ (°)	$T_m - T_a$ (°C)
1	22/11	10:09-11:19	1008(6)	0.259	25.26(0.09)	33.87(0.21)	28.77(0.68)	2.39(0.9 %)	3.9(1.6)	40.1	0.79
2	19/12	10:51-11:01	790(10)	0.120	26.39(0.07)	33.00(0.17)	28.37(0.86)	2.39(0.6 %)	0.6(1.2)	46.2	1.33
3	19/12	10:12-09:55	690(13)	0.131	26.35(0.08)	31.93(0.19)	28.07(0.41)	2.39(0.7 %)	0.6(2.6)	52.5	1.07
4	19/12	09:37-10:47	585(15)	0.146	26.35(0.05)	30.82(0.20)	27.38(0.59)	2.39(0.7 %)	1.2(2.0)	58.8	1.20
5	19/12	09:05-09:15	478(18)	0.169	26.31(0.06)	29.60(0.25)	26.23(0.60)	2.39(1.0 %)	2.1(2.1)	65.1	0.53
6	24/11	13:55-14:05	880(8)	0.130	26.27(0.11)	33.87(0.11)	28.57(0.96)	2.39(0.4 %)	3.0(1.7)	40.1	1.50
7	24/11	14:39-14:49	792(12)	0.142	26.19(0.08)	32.93(0.16)	28.99(1.11)	2.39(0.7 %)	3.3(1.5)	46.2	0.57
8	24/11	15:15-16:25	687(14)	0.153	26.77(0.07)	32.47(0.26)	29.39(0.61)	2.39(0.6 %)	2.9(1.7)	52.7	0.23
9	24/11	16:47-16:57	585(18)	0.171	26.73(0.09)	31.40(0.23)	29.27(0.65)	2.39(0.9 %)	3.1(1.6)	58.8	-0.20
10	24/11	16:18-16:28	473(18)	0.195	26.69(0.09)	30.24(0.21)	29.47(0.48)	2.39(0.9 %)	3.1(1.4)	65.1	-1.00

Tabla 4.3: Medidas de ensayo de modificador por ángulo de incidencia, metodología SST.

θ (°)	40.1	46.2	52.6	58.8	65.1
$K_{hem}^+(\theta)$	0.999	0.980	0.953	0.913	0.850
$K_{hem}^-(\theta)$	0.985	0.969	0.937	0.890	0.811
$K_{hem}(\theta)$	0.992	0.974	0.945	0.901	0.830

Tabla 4.4: Resultados de ensayo de modificador por ángulo de incidencia, metodología SST.

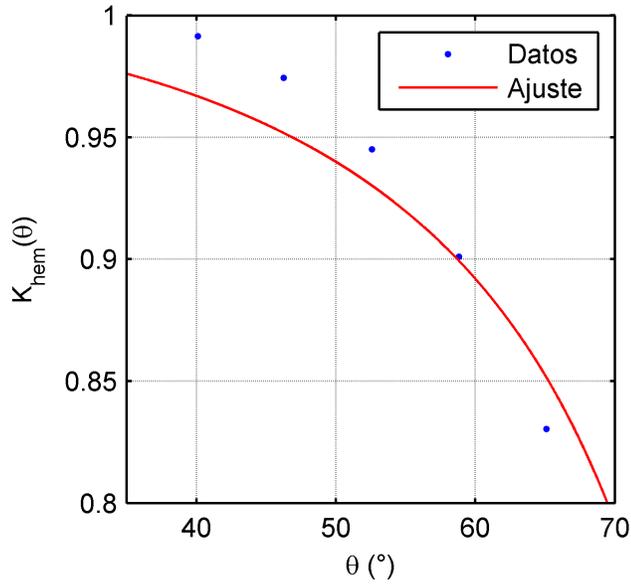


Figura 4.2: Datos experimentales de modificador por ángulo de incidencia (IAM) y curva con parámetro ajustado.

4.1.3. Ensayo de capacidad térmica

Este sub-ensayo se realizó con el seguidor solar configurado para que siga el azimut del Sol, de forma tal que el ángulo de incidencia en el plano del colector sea lo más pequeño posible. Primero el colector fue cubierto con una manta; luego se le hizo circular agua a una temperatura próxima a la temperatura ambiente dejando que alcance el estado estacionario por un periodo de al menos 10 minutos. Al finalizar este período de 10 minutos, se removió la manta (instante t_1) y se dejó que el colector alcance un nuevo estado estacionario (instante t_2). La norma considera que se ha alcanzado el estado estacionario cuando la temperatura a la salida varía menos de 0.5 °C/min . Para determinar el instante t_2 se estimó la derivada de T_o por diferencias finitas y se impuso $dT_o/dt = 0.0083\text{ °C/s}$ ($0.5/60 \simeq 0.0083$). La capacidad térmica se determina integrado la Ec. (2.27) sobre el periodo de tiempo de t_1 a t_2 :

$$\frac{C}{A_G} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left[\eta_{0,hem} G_t - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - \dot{Q}_u / A_G \right] dt}{T_{m2} - T_{m1}}. \quad (4.4)$$

En esta ecuación se asume incidencia normal, es decir, $K_{hem} = 1$. En la Figura 4.3 se muestra la temperatura del fluido a la entrada del colector, la temperatura a la salida y la temperatura media durante la realización de este sub-ensayo. Durante el periodo de integración se registraron los siguientes valores medios y variabilidades máximas:

$T_i = 28.68 \pm 0.11$ °C, $T_a = 28.86 \pm 0.63$ °C, $G_t = 1042 \pm 5$ W/m², $q = 2.39 \pm 0.02$ l/min y $\theta = 18.7 \pm 0.30$ °.

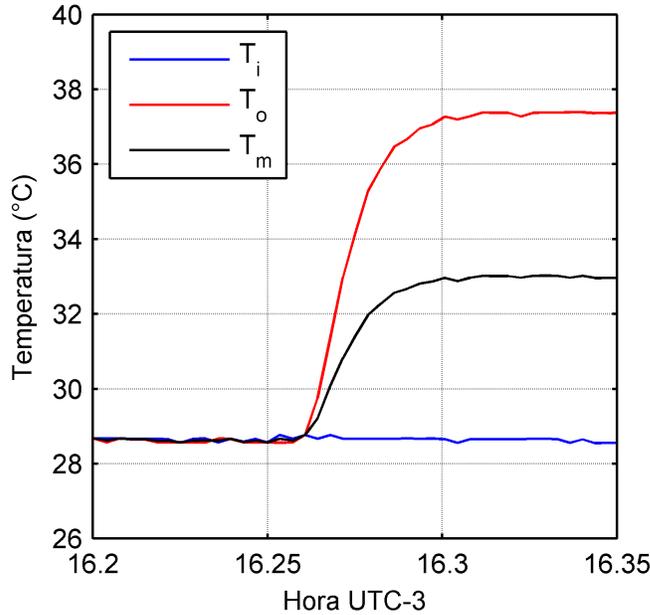


Figura 4.3: Temperatura del fluido a la entrada del colector, a la salida y temperatura media durante el ensayo de ensayo de capacidad térmica.

La integral se calculó mediante integración trapezoidal en base a las medidas instantáneas cada 10 segundos. Para incorporar la incertidumbre de las medidas y la de los parámetros ($\eta_{0,hem}$, a_1 , y a_2) lo que se hizo fue generar series de medidas y de parámetros aleatorias y para cada serie se determinó la capacidad térmica de acuerdo a la Ec. (4.4). Para la generación de las series aleatorias se consideró que el error de las medidas y los parámetros sigue una distribución normal con media cero y desviación estándar igual a la incertidumbre típica. Este proceso se repitió 3000 veces generando así un vector de C . Por último, se tomó el promedio y la desviación estándar de este vector: $C/A_G = 10744 \pm 404$ J/m²K.

A partir de ensayo también se estimó la contaste de tiempo del colector. Interpolando los datos se obtuvo $t_c = 63$ s ($\simeq 1$ minuto). Se recuerda que este tiempo corresponde al tiempo que tarda la temperatura media del fluido en alcanzar el 63% de su valor final.

4.1.4. Conversión de parámetros SST a QDT

En la Subsección 2.5.4 se describió como convertir los parámetros $\eta_{0,hem}$ y K_{hem} del modelo SST a los parámetros $\eta_{0,b}$, K_b y K_d del modelo QDT. Primero, se asume $K_{hem} \simeq K_b$, debido a que el ensayo de modificador por ángulo de incidencia se realiza

en condiciones de cielo claro. Luego, el modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia difusa K_d se aproxima integrando K_b sobre el ángulo sólido visto por el colector y normalizando por el mismo. Según la norma, esta integral debe realizarse en pasos de 10° como se muestra en la Ec. (2.32). Si para K_b se utilizan los valores discretos de la Tabla 4.4 se obtiene un valor de $K_d = 0.897$. Si se utiliza el modelo de la Ec. (2.6) se obtiene un valor de $K_d = 0.900$, siendo la diferencia entre ambos estimativos menor al 0.3%. Si se realiza la integral con un paso de 0.1° los resultados difieren en menos de 0.7%. Se adopta el valor de $K_d = 0.900$ por consistencia, debido a que para la metodología QDT se utiliza el modelo de la Ec. (2.6) para K_b . Utilizando este valor de K_d y una fracción difusa del 15% por norma se obtiene, a partir de la Ec. (2.33), un valor de $\eta_{0,hem} = 0.727$. Si en lugar de utilizar una fracción difusa del 15% se utiliza el valor medio de la Tabla 4.1, 11.2%, se obtiene un valor de $\eta_{0,hem} = 0.724$ y la diferencia entre ambos estimativos es menor al 0.5%. Se toma el valor $\eta_{0,hem} = 0.724$, nuevamente por consistencia, como referencia para las partes siguientes.

4.2. Ensayo en condiciones cuasi-dinámicas QDT

Al igual que en el ensayo SST, la inclinación horizontal del colector se fijó en 45° y el caudal de ensayo se fijó en 2.40 l/min. La realización del ensayo QDT consiste en someter al colector a distintas condiciones de funcionamiento (*day type*, descritas en la Subsección 2.5.3). Esto da lugar a distintas sub-secuencias de medida que se describen en la Subsección 4.2.1. En esta misma subsección, se evalúa la variabilidad del conjunto total de medidas, es decir, si satisface los requerimientos de la norma. Luego, se procede a realizar la identificación de parámetros en donde todos los parámetros del colector son determinados a la misma vez. La norma admite dos procedimientos de identificación de parámetros. En esta tesis se implementaron los dos métodos, cuya implementación se describe en la Subsección 4.2.2. Finalmente, en la Subsección 4.2.3 se muestran y comparan los resultados obtenidos en cada caso con los resultados SST.

4.2.1. Descripción de las secuencias de medidas

A partir de las pruebas realizadas se obtuvieron 11 sub-secuencias de medidas diferentes, cuyas características principales se muestran en la Tabla 4.5. En esta tabla se muestra la fecha en la que se realizó cada prueba, la temperatura de entrada T_i (promedio y variabilidad máxima), el caudal q (promedio y variabilidad máxima), el promedio de la diferencia $T_m - T_a$, la fracción difusa f_d^* en el plano del colector (rango de variación) y el ángulo de incidencia θ (rango de variación). Todas las secuencias cumplen con los requisitos de estabilidad de temperatura y caudal a la entrada del

colector (variabilidad menor al $\pm 1^\circ\text{C}$ y 2 %, respectivamente). Se omitió en esta tabla la medida de velocidad del viento por las mismas razones que en los casos anteriores. Sin embargo, el requerimiento asociado a esta variable es satisfecho en todas las secuencias de medida dado que al inicio de cada prueba se ajustaron los ventiladores en base a la medida del anemómetro portátil.

<i>Day type</i>	Sub-sec	Fecha	Hora	T_i ($^\circ\text{C}$)	q (l/min)	$T_m - T_a$ ($^\circ\text{C}$)	f_d^*	θ ($^\circ$)
1	1	24/11	09:05-10:15	18.21(0.14)	2.39(0.7 %)	0.60	≤ 0.13	≤ 11.3
	2	22/11	10:50-11:40	28.23(0.10)	2.39(0.7 %)	1.09	≤ 0.28	37.3-43.4
	3	24/11	13:50-14:55	26.23(0.30)	2.39(0.7 %)	0.87	≤ 0.14	37.4-48.2
	4	24/11	15:20-16:30	26.72(0.10)	2.39(0.9 %)	-0.32	≤ 0.20	52.2-65.0
	5	19/12	08:50-11:10	26.35(0.13)	2.39(0.9 %)	1.38	≤ 0.17	44.3-69.0
2	6	19/11	11:15-13:50	47.88(0.18)	2.39(0.7 %)	17.90	0.50-1.03	≤ 33.8
	7	18/11	14:50-16:55	64.37(0.18)	2.39(1.0 %)	31.40	0.29-1.02	≤ 11.9
3	8	17/11	15:05-16:40	49.74(0.19)	2.39(0.9 %)	20.10	≤ 0.12	≤ 10.4
	9	28/11	09:35-11:35	65.29(0.12)	2.39(0.8 %)	41.74	≤ 0.11	≤ 27.5
4	10	20/11	14:10-16:50	81.01(0.12)	2.39(1.0 %)	48.40	≤ 0.15	≤ 18.0
	11	18/12	08:40-10:00	85.55(0.23)	2.39(0.9 %)	61.30	≤ 0.11	≤ 9.9

Tabla 4.5: Descripción de las secuencias de medida del ensayo QDT.

Las sub-secuencias 1, 2, 3, 4 y 5 integran el *day type 1*. Estas series se realizaron en condiciones de cielo claro y durante la realización de las pruebas se impuso una temperatura de entrada tal que la temperatura media del fluido fuera próxima a la ambiente, es decir, $T_m \simeq T_a$. Durante la sub-secuencia 1 se configuró el seguidor solar para que siga la posición del Sol en azimut para obtener ángulos de incidencia pequeños ($\theta \leq 11.3^\circ$). Para las sub-secuencias 2, 3, 4 y 5 se orientó el seguidor al norte (posición fija) para obtener ángulos de incidencia mayores; las series 2 y 5 se tomaron antes del mediodía solar y las series 3 y 4 después del mediodía solar. El resto de las sub-secuencias (de la 6 a la 11) se realizaron con seguimiento azimutal para trabajar en condiciones próximas a las de incidencia normal ($K_b \simeq 1$). Las sub-secuencias 6 y 7 corresponden al *day type 2* y se realizaron a una temperatura intermedia y en condiciones de cielo variable. La alta variabilidad que presenta la fracción difusa f_d^* en estas sub-secuencias da cuenta de ello. En estas secuencia la derivada temporal de la temperatura media del fluido calculada por diferencias finitas hacia atrás excede el valor de $\pm 0.005^\circ\text{C/s}$, siendo esto un requisito de la norma. Las sub-secuencias 8 y 9 se realizaron a una temperatura intermedia y en condiciones de cielo claro y corresponden al *day type 3*. Las sub-secuencias 10 y 11 se realizaron a alta temperatura y en condiciones de cielo claro y conforman el *day type 4*.

En la Figura 4.4 se muestran los gráficos sugeridos por la norma para valuar la variabilidad de las condiciones de funcionamiento del conjunto de medida, donde cada dato (punto azul) corresponde a un promedio 5-minutal. En la Figura 4.4a se pueden

distinguir las condiciones de cielo claro y nubosas, siendo los valores que siguen una regularidad los asociados a cielo despejado. La línea roja con pendiente 1 ($G_{dt} = G_t$) en esta figura sirve para realizar un control de calidad básico; las medidas G_{dt} y G_t deben ubicarse debajo de la línea roja debido a que $G_{dt} \leq G_t$. En la Figura 4.4b se muestran las diferentes temperatura de entrada, y en la Figura 4.4c se puede apreciar la variabilidad en el ángulo de incidencia. En este último gráfico, los valores con θ negativo y positivo corresponden a medidas realizadas antes y después del mediodía solar, respectivamente.

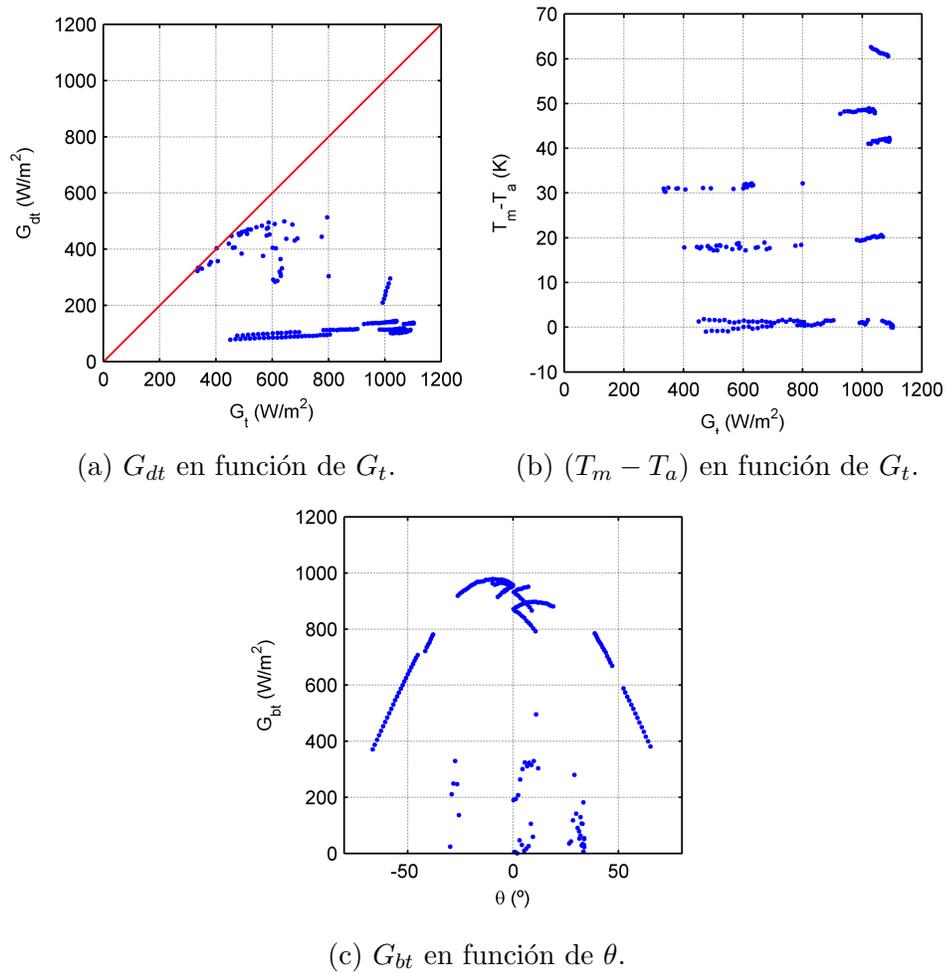


Figura 4.4: Variabilidad de las secuencias de medida del ensayo QDT.

El aspecto de estos gráficos se asemeja a los de la norma, que da ejemplos de este estilo para evaluar la variabilidad de los datos. Se concluye que el conjunto de medidas reúne la suficiente variabilidad para proceder a la identificación de parámetros.

La realización del seguimiento azimutal durante alguna de las secuencias de medida no es un requerimiento de la norma, de hecho, todas las secuencias pueden realizarse con el seguidor en una posición fija. En este ensayo las secuencias 1 y las secuencias de

la 6 a la 11 se realizaron con seguimiento azimutal porque se cuenta con esta capacidad y permite un mayor desacople de las variables independientes en la regresión lo cual mejora el proceso de identificación de parámetros. Además, esto también permitió la realización de los ensayos SST y QDT de forma simultánea, los datos de las Tablas 4.1 y 4.3 están incluidos en conjunto de datos de la Tabla 4.5 (esto no siempre es así, es decir, no siempre un ensayo SST está incluido dentro de un ensayo QDT).

4.2.2. Procedimiento de identificación de parámetros

La norma admite dos procedimientos de identificación de parámetros: (1) aproximación por diferencias finitas de la derivada temporal y (2) simulación dinámica y regresión no lineal. En ambos casos se debe utilizar el modelo físico dado por la Ec. (2.29) y el error cuadrático medio de potencia útil como función a minimizar:

$$E_c(p) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[\dot{Q}_u(t_i) - \dot{Q}_u^*(t_i, p) \right]^2, \quad (4.5)$$

donde $\dot{Q}_u(t_i)$ es la potencia útil producida por el colector en el instante t_i (medida experimental), $\dot{Q}_u^*(t_i, p)$ es el estimativo del modelo de la potencia útil en ese mismo instante, y M la cantidad de medidas. Se hace notar que el error cuadrático medio es una función de los parámetros, es decir, $E_c = E_c(p)$. El objetivo de la regresión es encontrar el conjunto de parámetros \hat{p} que minimiza la función $E_c(p)$. En esta tesis se implementaron los dos procedimientos, los cuales se describen en las subsecciones siguientes.

Método 1: aproximación por diferencias finitas de la derivada temporal

En este caso se busca escribir la función $\dot{Q}_u^*(t_i, p)$ en forma lineal respecto a los parámetros, es decir, se busca escribir $\dot{Q}_u^*(t_i, p)$ de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_u^*(t_i, p) = \sum_{j=1}^N p_j x_j(t_i) = p_1 x_1(t_i) + p_2 x_2(t_i) + \dots + p_N x_N(t_i), \quad (4.6)$$

donde $x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_N(t_i)$ son las variables independientes evaluadas en el instante t_i . Cada una de estas variables tiene asociada un parámetro p_j , con $j = 1, 2, 3, \dots, N$. Si se considera la Ec. (4.6) para cada una de las medidas se tendrá un sistema de M ecuaciones lineales (M es la cantidad de medidas). Dicho sistema se representa en forma matricial de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_u^*(p) = Xp, \quad (4.7)$$

donde

$$\dot{Q}_u^*(p) = \begin{pmatrix} \dot{Q}_u^*(t_1, p) \\ \dot{Q}_u^*(t_2, p) \\ \vdots \\ \dot{Q}_u^*(t_M, p) \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} x_1(t_1) & x_2(t_1) & \dots & x_N(t_1) \\ x_1(t_2) & x_2(t_2) & \dots & x_N(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(t_M) & x_2(t_M) & \dots & x_N(t_M) \end{pmatrix}, p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_N \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Una forma de hallar \hat{p} es a través del gradiente de $E_c(p)$ e igualándolo al vector nulo, es decir:

$$\nabla E_c(\hat{p}) = \vec{0} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial E_c(p)}{\partial p_1} = 0 \\ \frac{\partial E_c(p)}{\partial p_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial E_c(p)}{\partial p_N} = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Esto da como resultado un nuevo sistema de ecuaciones lineales ([Bates and Watts, 1988](#); [Björck, 1996](#); [Quarteroni et al., 2000](#)) cuya representación matricial es la siguiente:

$$X^\top X \hat{p} = X^\top \dot{Q}_u, \quad (4.10)$$

donde el vector \dot{Q}_u es análogo al vector $\dot{Q}_u^*(p)$ pero con las medidas experimentales $\dot{Q}_u(t_i)$ en lugar de los estimativos teóricos $\dot{Q}_u^*(t_i, p)$ (ver Ec. (4.8)). Este sistema de ecuaciones se conoce como sistema de ecuaciones normales. La solución de este sistema, \hat{p} , se puede hallar por inversión de matrices:

$$\hat{p} = (X^\top X)^{-1} X^\top \dot{Q}_u. \quad (4.11)$$

A partir de la Ec. (2.29) se definen, para el caso del ensayo QDT, las siguientes variables independientes:

$$\begin{aligned} x_1 &= G_{bt} \\ x_2 &= -G_{bt} (1/\cos \theta - 1) \\ x_3 &= G_{dt} \\ x_4 &= -(T_m - T_a) \\ x_5 &= -(T_m - T_a)^2 \\ x_6 &= -dT_m/dt \end{aligned} \quad (4.12)$$

Para el modificador por ángulo de incidencia $K_b(\theta)$ se utilizó el modelo de [Souka and Safwat \(1966\)](#). Las variables independientes en el tiempo t_i corresponden a un promedio temporal en el intervalo $(t_i - \Delta t_{av}/2, t_i + \Delta t_{av}/2)$, donde Δt_{av} es el tiempo de promediado. La variable x_6 se estima en cada instante (tiempo de muestreo) utilizando diferencia finitas hacia atrás, luego, al promediar, los datos intermedios se

cancelan quedando solo los valores de los extremos (valor inicial y final), es decir:

$$x_6(t_i) = \frac{T_m(t_i + \Delta t_{av}/2) - T_m(t_i - \Delta t_{av}/2)}{\Delta t_{av}}. \quad (4.13)$$

Para la determinación de esta variable se utilizan las medidas experimentales de T_m . Además, los parámetros a determinar son:

$$p_1 = \eta_{0,b}, p_2 = \eta_{0,b}b_0, p_3 = \eta_{0,b}K_d, p_4 = a_1, p_5 = a_2, p_6 = C/A_G. \quad (4.14)$$

Los parámetro b_0 y K_d se calculan de forma indirecta: $b_0 = p_2/p_1$ y $K_d = p_3/p_1$. La incertidumbre de los parámetros queda dada a través de la matriz de covarianza V , la cual se calcula de la siguiente manera:

$$V(\hat{p}) = s^2 (X^T X)^{-1}, \quad (4.15)$$

donde s^2 es una estimación de la varianza del residuo basada en $M - N$ grados de libertad y se calcula como sigue:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^M [\dot{Q}_u(t_i) - \dot{Q}_u^*(t_i, \hat{p})]^2}{M - N}. \quad (4.16)$$

La raíz cuadrada de los elementos de la diagonal de la matriz V corresponden a las desviaciones típicas de los parámetros p_1, p_2, \dots, p_N , en este caso $N = 6$. Los elementos que no se encuentran en la diagonal corresponden a las covarianzas entre los parámetros, es decir, $V_{i,j} = Cov(p_i, p_j)$. Las covarianzas $V_{1,2}$ y $V_{1,3}$ sirven para calcular las incertidumbres de b_0 y K_d por propagación de incertidumbre.

Método 2: simulación dinámica y regresión no lineal

En este caso la función $\dot{Q}_u^*(p)$ es no lineal respecto a los parámetros. Concretamente, $\dot{Q}_u^*(p)$ se construye a partir de la solución numérica de la ecuación diferencial dada por la Ec. (2.29), es decir, $\dot{Q}_u^*(p)$ se construye a partir del estimativo T_m^* . Para resolver esta ecuación diferencial se utiliza el método del trapecio, el cual se explica a continuación. Por conveniencia, primero se reescribe le Ec. (2.29) de la siguiente forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_m^*}{dt} = F(t, T_m^*) \quad \text{con} \\ F(t, T_m^*) = \frac{A_G}{C} \left\{ \eta_{0,b}G_{bt} - \eta_{0,b}b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) G_{bt} + \eta_{0,b}K_d G_{dt} - a_1 (T_m^* - T_a) \right. \\ \left. - a_2 (T_m^* - T_a)^2 - \frac{\dot{m}c_p (T_m^* - T_i)}{A_G} \right\}. \end{array} \right. \quad (4.17)$$

Al igual que en el caso anterior, para el modificador por ángulo de incidencia $K_b(\theta)$ se utilizó el modelo de [Souka and Safwat \(1966\)](#).

Suponiendo conocido el valor de T_m^* en el instante inicial t_0 , el valor de T_m^* en un instante de tiempo genérico t_i , es decir $T_m^*(t_i)$, se determina integrando la Ec. (4.17) entre los instantes de tiempo t_{i-1} y t_i . Esta integral se realiza mediante el método del trapecio, es decir, se aproxima el área bajo la curva por el área de un trapecio. Esto da como resultado:

$$T_m^*(t_i) = T_m^*(t_{i-1}) + \frac{\Delta t}{2} [F(t_i, T_m^*(t_i)) + F(t_{i-1}, T_m^*(t_{i-1}))]. \quad (4.18)$$

Esta ecuación es no lineal respecto a $T_m^*(t_i)$ y se resuelve, para cada instante, mediante una iteración de punto fijo. Como valor inicial para comenzar esta iteración se utiliza el método de Euler hacia adelante (se aproxima la integral por el área de un rectángulo):

$$T_m^*(t_i) = T_m^*(t_{i-1}) + \Delta t F(t_{i-1}, T_m^*(t_{i-1})). \quad (4.19)$$

Una vez calculada la serie temporal teórica T_m^* , se construye la serie temporal \dot{Q}_u^* de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_u^* = 2\dot{m}c_p (T_m^* - T_i). \quad (4.20)$$

En esta ecuación se asume una variación lineal de temperatura a lo largo del colector.

Como la función $\dot{Q}_u^*(p)$ es no lineal respecto a los parámetros, el problema de encontrar \hat{p} se vuelve más complejo. Existen diversas formas de abordar el problema, una de ellas (de las más simples), la cual se usará en esta tesis, consiste en linealizar $\dot{Q}_u^*(t_i, p)$ entorno a un valor p_0 :

$$\dot{Q}_u^*(p) \approx \dot{Q}_u^*(p_0) + J(p_0) (p - p_0), \quad (4.21)$$

donde $J(p_0)$ es la matriz jacobiana de la función $\dot{Q}_u^*(p)$ evaluada en p_0 . Las entradas de esta matriz se puede estimar numéricamente utilizando diferencias finitas centradas:

$$J(p_0)_{i,j} = \frac{\partial \dot{Q}_u^*(t_i, p_0)}{\partial p_j} = \frac{\dot{Q}_u^*(t_i, p_0 + \delta p_j) - \dot{Q}_u^*(t_i, p_0 - \delta p_j)}{2\delta p_j}. \quad (4.22)$$

Para δp_j se utilizó el valor sugerido por [Bates and Watts \(1988\)](#): $\delta p_j = \sqrt{\epsilon_M} \times p_{0,j}$, donde ϵ_M es el **épsilon de la máquina**. La solución del problema linealizado se puede hallar de la misma forma que en el caso lineal, resolviendo el sistema de ecuaciones normales. En este sentido, el conjunto de parámetros \hat{p} que minimiza la función $E_c(p)$ está dado por:

$$\hat{p} = p_0 + [J(p_0)^\top J(p_0)]^{-1} J(p_0)^\top [\dot{Q}_u - \dot{Q}_u^*(p_0)]. \quad (4.23)$$

Este procedimiento es iterativo, se comienza con una semilla inicial p_0 y se calcula $\dot{Q}_u^*(p_0)$ y $J(p_0)$; luego, se determina \hat{p} con la Ec. (4.23) y se reinicia el proceso con $p_0 = \hat{p}$. El proceso continua hasta que la diferencia entre p_0 y \hat{p} es menor a cierta tolerancia. Este método se conoce como el método de Gauss-Newton (Bates and Watts, 1988; Björck, 1996; Quarteroni et al., 2000). Un inconveniente que presenta este método es que la solución puede converger a un mínimo local y no al mínimo global, por este motivo, el proceso se repite utilizando 10 diferentes semillas iniciales generadas aleatoriamente. Si el algoritmo converge a soluciones diferentes, entonces se elige la solución con el menor error cuadrático medio (mínimo global). La estimación de la incertidumbre de los parámetros en este caso se puede hacer de la misma forma que en el caso lineal reemplazando en la Ec. (4.15) la matriz X por la matriz $J(\hat{p})$.

Se hace notar que al igual que en caso anterior (método 1), las medidas G_{bt} , G_{dt} , θ , T_i , T_a , \dot{m} y \dot{Q}_u en el instante t_i corresponden a promedios sobre el intervalo $(t_i - \Delta t_{av}/2, t_i + \Delta t_{av}/2)$.

4.2.3. Resultados

Método 1: aproximación por diferencias finitas de la derivada temporal

En la edición anterior de la norma ISO 9806 (2013) se especificaba un tiempo de promediado de entre 5 y 10 minutos, pero en la edición actual de la norma (2017) este requerimiento se quitó. Por lo tanto, el tiempo de promediado es una variable que se puede elegir arbitrariamente a experiencia del ensayista. Para evaluar la influencia de esta variable en los resultados finales, se determinaron los parámetros característicos del colector para diferentes tiempos de promediado. En la Tabla 4.6 se presentan los resultados para los datos sin promediar, es decir, cada 10 s, y para los siguientes tiempos de promediado: 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, ..., hasta 10 min. En todos los casos se utilizó el método 1 para la identificación de parámetros. Debido que las variables x_4 y x_5 en realidad no son independientes (la segunda es el cuadrado de la primera), los parámetros asociados a estas variables, a_1 y a_2 , tampoco lo son. Distintos ensayos sobre un mismo colector darán lugar a diferentes valores de a_1 y a_2 , pero en general esta diferencia tiende a compensarse, es decir, en tanto mayor sea el valor a_1 menor será es el valor de a_2 y viceversa. Este comportamiento se puede ver en Fischer et al. (2004); García de Jalón et al. (2011); Osorio and Carvalho (2014). Por este motivo, no es conveniente comparar directamente el valor de estos parámetros. Lo mejor es comparar el efecto combinado a través de un factor de pérdidas global $a(\Delta T)$, que se puede calcular de la siguiente manera:

$$a(\Delta T) = a_1 + a_2 \Delta T, \quad (4.24)$$

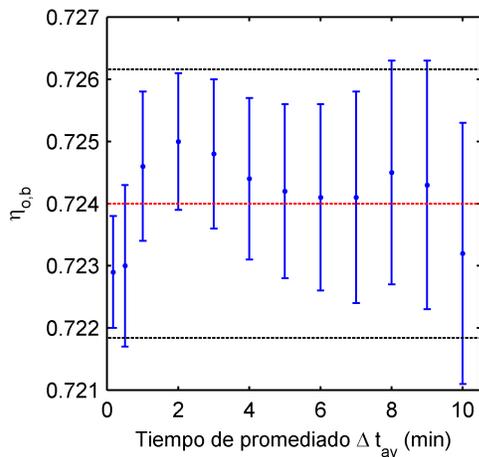
donde la diferencia de temperatura ΔT es igual a la diferencia $T_m - T_a$. Es usual utilizar el factor de pérdida combinado a una diferencia de temperatura de 50°C , por ejemplo, este valor se utiliza en el calculo de prestaciones energéticas de instalaciones solares a medida para ACS mediante el método del *f-chart* (Martínez-Escribano et al., 2013). El valor de este este parámetro, $a(\Delta T = 50^\circ\text{C}) = a_{50}$, también se muestra en la Tabla 4.6. Para facilitar el entendimiento de esta tabla, en la Figura 4.5 se muestra en forma gráfica el valor y la incertidumbre de cada parámetro en función del tiempo de promediado (en azul valor \pm incertidumbre del ensayo QDT). Además, en esta misma figura se muestran los resultados del ensayos SST; en rojo punteado el valor de cada parámetro y en negro punteado el intervalo de confianza al 95%. Para el parámetro K_d no se muestra el intervalo de confianza al 95% debido que proviene de una conversión teórica y no de una medición y la incertidumbre asociada a esa conversión es de compleja evaluación. Además, se aclara que al parámetro $\eta_{0,b}$ se le asignó la misma incertidumbre que $\eta_{0,hem}$.

Parámetro	Tiempo de promediado			
	10s	30s	1 min	2 min
$\eta_{0,b}$	0.723(0.001)	0.723(0.001)	0.725(0.001)	0.725(0.001)
K_d	0.979(0.004)	0.968(0.005)	0.968(0.005)	0.967(0.005)
b_0	0.122(0.003)	0.118(0.004)	0.121(0.004)	0.120(0.004)
a_1 (W/m ² K)	4.275(0.073)	4.159(0.102)	4.251(0.097)	4.248(0.090)
a_2 (W/m ² K ²)	0.0078(0.0013)	0.0098(0.0018)	0.0083(0.0017)	0.0093(0.0017)
a_{50} (W/m ² K)	4.665(0.098)	4.649(0.136)	4.666(0.129)	4.678(0.120)
C/A_G (J/m ² K)	1617(84)	2371(133)	7255(230)	9622(296)

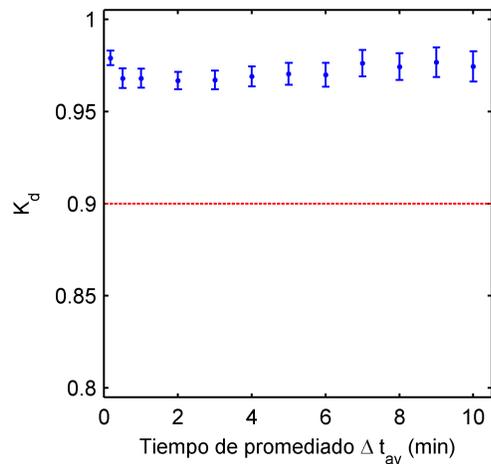
Parámetro	Tiempo de promediado			
	3 min	4 min	5 min	6 min
$\eta_{0,b}$	0.725(0.001)	0.724(0.001)	0.724(0.001)	0.724(0.002)
K_d	0.967(0.005)	0.969(0.005)	0.970(0.006)	0.970(0.006)
b_0	0.121(0.004)	0.122(0.004)	0.120(0.005)	0.123(0.005)
a_1 (W/m ² K)	4.207(0.097)	4.219(0.103)	4.244(0.114)	4.236(0.124)
a_2 (W/m ² K ²)	0.0093(0.0017)	0.0091(0.0018)	0.0085(0.0020)	0.0087(0.0021)
a_{50} (W/m ² K)	4.672(0.129)	4.674(0.137)	4.669(0.152)	4.671(0.162)
C/A_G (J/m ² K)	9864(400)	10292(473)	11020(565)	11596(827)

Parámetro	Tiempo de promediado			
	7 min	8 min	9 min	10 min
$\eta_{0,b}$	0.724(0.002)	0.725(0.002)	0.724(0.002)	0.723(0.002)
K_d	0.976(0.007)	0.974(0.007)	0.977(0.008)	0.974(0.008)
b_0	0.125(0.005)	0.124(0.006)	0.127(0.006)	0.120(0.006)
a_1 (W/m ² K)	4.329(0.141)	4.316(0.141)	4.320(0.158)	4.253(0.160)
a_2 (W/m ² K ²)	0.0072(0.0024)	0.0075(0.0024)	0.0074(0.0027)	0.0082(0.0027)
a_{50} (W/m ² K)	4.689(0.185)	4.185(0.185)	4.690(0.207)	4.663(0.209)
C/A_G (J/m ² K)	11727(973)	11360(11360)	12541(1496)	12817(1470)

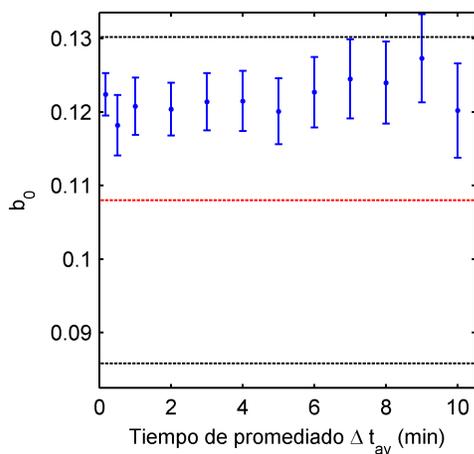
Tabla 4.6: Resultados ensayo del QDT utilizando el método 1. La incertidumbre de cada parámetro se indica entre paréntesis.



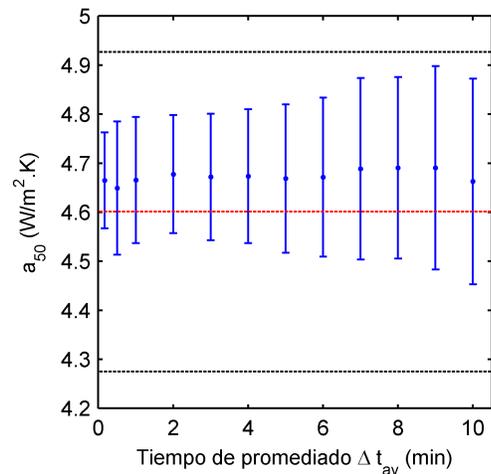
(a) $\eta_{0,b}$ en función de Δt_{av} .



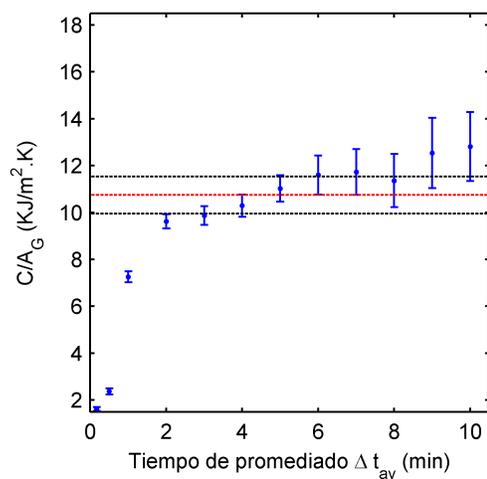
(b) K_d en función de Δt_{av} .



(c) b_0 en función de Δt_{av} .



(d) a_{50} (W/m²K) en función de Δt_{av} .



(e) C/A_G (kJ/m²K) en función de Δt_{av} .

Figura 4.5: Resultados del ensayo QDT utilizando el método 1 en función del tiempo de promediado. Resultados QDT en azul, resultados SST en rojo punteado e intervalo de confianza al 95 % de resultados SST en negro punteado.

En la Figura 4.5 se puede observar que el valor de los parámetros $\eta_{0,b}$, K_d , y a_{50} permanece aproximadamente constante e independiente del tiempo de promediado. La diferencia entre el valor máximo y el mínimo es menor al 2 %, donde dicho porcentaje se calculó respecto al valor medio de cada parámetro. En el caso del parámetro b_0 la variabilidad es del 8 %, un poco mayor que los anteriores, y en el caso de la capacidad térmica por unidad de área, C/A_G , la variabilidad es del 120 %, mucho mayor que los anteriores. Además, en este último caso se observa una tendencia clara al alza, es decir, cuanto mayor es el tiempo de promediado mayor es el valor de C/A_G , aunque a partir de 2 minutos el valor tiende a estabilizarse y la variabilidad se reduce al 29 %.

Al comparar los resultados de este ensayo con los resultados del ensayo SST (rojo punteado) se observa que en el caso de los parámetros $\eta_{0,b}$ y a_{50} la concordancia es muy buena, siendo la diferencia máxima entre los resultados QDT y SST menor al 2 % (en este caso el porcentaje se calculó respecto al valor SST). En el caso de los parámetros b_0 y K_d se observa que los resultados del ensayo QDT tienden a sobrestimar un poco los del ensayo SST y la diferencia máxima en este caso asciende a 17.8 % y 7.4 %, respectivamente. Más allá de estas diferencias, en el caso de los parámetros $\eta_{0,b}$, b_0 y a_{50} , los valores del ensayo QDT se encuentran siempre dentro del intervalo de confianza al 95 % del ensayo SST. En el caso de la capacidad térmica, C/A_G , la diferencia entre los resultados QDT y SST es mínima en el intervalo de 3 a 8 minutos (tiempos de promediado), la diferencia máxima en este intervalo corresponde a un 9.2 %. En el caso de este parámetro, la menor diferencia respecto al valor SST se da para el tiempo de promediado de 5 minutos y corresponde a un 3 %), tiempo que coincide con el utilizado en otras publicaciones para colectores solares FPC (Fischer et al., 2004; Kratzenberg et al., 2006; Osorio and Carvalho, 2014). Además, es importante observar en la Figura 4.5 que la incertidumbre de algunos parámetros, en particular la de la capacidad térmica, aumenta conforme aumenta el tiempo de promediado. Por lo tanto, el tiempo de promediado de 5 minutos parece ser un buen compromiso entre estabilidad, compatibilidad con los parámetros del ensayo SST e incertidumbre. En los párrafos siguientes se analiza con mayor detalle las diferencias halladas en los valores de los parámetros b_0 , K_d y C/A_G .

La diferencia en el parámetro b_0 puede deberse a que en realidad el modelo dado por la Ec. (2.6) no describe del todo bien el comportamiento del modificador por ángulo de incidencia K_b (ver Figura 4.2). Esto motiva a futuro la evaluación de otras alternativas para el modificador por ángulo de incidencia.

La diferencia en el parámetro K_d se puede deber a dos motivos. Por un lado, se puede estar subestimando la medida de irradiancia difusa debido al factor de corrección f_{corr} , factor que corrige el efecto de la banda de sombra. Si la medida G_{dt} es subestimada entonces la regresión lineal podría estar sobrestimando el parámetro K_d para compensar la diferencia. El factor de corrección f_{corr} asume que la irradiancia

difusa se distribuye de forma isotrópica en la bóveda celeste. En múltiples trabajos, se ha dado evidencia de que el factor de corrección real es mayor al isotrópico debido al efecto de la anisotropía de la irradiancia difusa, por citar algunos trabajos (Drummond, 1956; LeBaron et al., 1990; Batlles et al., 1995). Por otro lado, la conversión de parámetros SST-QDT también asume en el cálculo de K_d que la irradiancia difusa se comporta de forma isotrópica (ver Ec. (2.31)). Hess and Hanby (2014) calcula el parámetro K_d utilizando la Ec. (2.31) pero utilizando la distribución de Brunger and Hooper (1993), más realista dado que tiene en cuenta la anisotropía de la irradiancia difusa, y muestran que en determinadas condiciones el parámetro K_d anisotrópico es superior al K_d isotrópico. Por lo tanto, no está claro que el parámetro K_d proveniente de la conversión de parámetros SST-QDT sea equivalente al parámetro K_d del ensayo QDT. En definitiva, el efecto de la anisotropía de la irradiancia difusa en la medida de G_{dh} con banda de sombra y en la conversión de parámetros SST-QDT representa un trabajo a futuro.

Los valores de capacidad térmica que se dan a bajos tiempos de promediados, alejados de la referencia SST, pueden deberse a la alta incertidumbre relativa de la medida x_6 . Para ejemplificar la incertidumbre relativa de esta variable, considerando la Ec. (4.13), se puede calcular por propagación de incertidumbre de la siguiente manera:

$$\frac{\sigma(x_6)}{|x_6|} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(\Delta T_m)}{\Delta T_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\Delta t_{av})}{\Delta t_{av}}\right)^2}, \quad (4.25)$$

donde la diferencia ΔT_m en el instante t_i se calcula como $\Delta T_m(t_i) = T_m(t_i + \Delta t_{av}/2) - T_m(t_i - \Delta t_{av}/2)$. Si se desprecia la incertidumbre relativa del tiempo de promediado $\sigma(\Delta t_{av})$, se obtiene la siguiente expresión simplificada:

$$\frac{\sigma(x_6)}{|x_6|} \simeq \frac{\sigma(\Delta T_m)}{|\Delta T_m|}. \quad (4.26)$$

Si se asume un valor constante para $\sigma(\Delta T_m)$, a partir de la Ec. (4.26) se concluye que la incertidumbre relativa de x_6 será mayor en tanto menor sean los saltos de temporales, y por ende ΔT_m . A bajos tiempos de promediados la propia dinámica del sistema hace que estos saltos de temperatura sean pequeños y por lo tanto hace que la incertidumbre relativa de x_6 sea alta. Por ejemplo, a la escala de 10 s la variabilidad máxima es de $\pm 0.0372^\circ\text{C/s}$, es decir que los saltos máximos de temperatura corresponden a $\pm 0.372^\circ\text{C}$. Si consideramos una incertidumbre de $\sigma(\Delta T_m) = \pm 0.04^\circ\text{C}$ el error relativo mínimo de la variable x_6 asciende a un $\simeq 11\%$.

Método 2: simulación dinámica y regresión no lineal

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados del ensayo QDT utilizando el método 2 para los datos sin promediar, cada 10 s, y para los siguientes tiempos de promediado: 30 s, 1 min y 2 min. Se exploraron promediados temporales hasta 2 min, debido a que

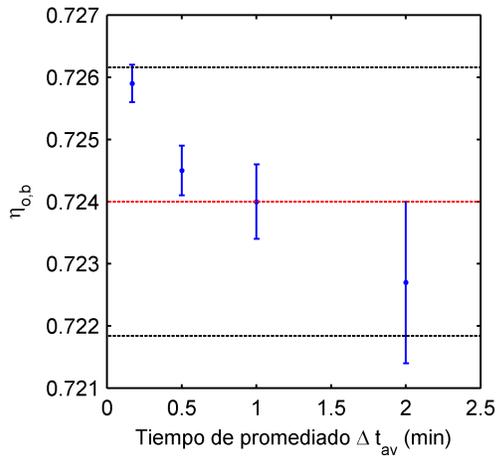
a partir de este valor, el algoritmo de regresión no lineal empieza a tener problemas de convergencia, como se explica en el próximo párrafo. En esta tabla también se muestra el factor de pérdidas global a_{50} . Para facilitar el entendimiento de esta información en la Figura 4.6 se muestran los resultados en forma gráfica.

Parámetro	Tiempo de promediado			
	10 s	30 s	1 min	2 min
$\eta_{0,b}$	0.726(0.001)	0.725(0.001)	0.724(0.001)	0.723(0.001)
K_d	0.978(0.001)	0.967(0.002)	0.967(0.002)	0.970(0.005)
b_0	0.127(0.001)	0.121(0.001)	0.120(0.002)	0.118(0.004)
a_1 (W/m ² K)	4.390(0.021)	4.172(0.029)	4.159(0.046)	4.167(0.103)
a_2 (W/m ² K ²)	0.0065(0.0004)	0.0099(0.0005)	0.0100(0.0008)	0.0095(0.0018)
a_{50} (W/m ² K)	4.715(0.029)	4.667(0.039)	4.659(0.061)	4.642(0.137)
C/A_G (J/m ² K)	11575(82)	11126(100)	12396(134)	19276(352)

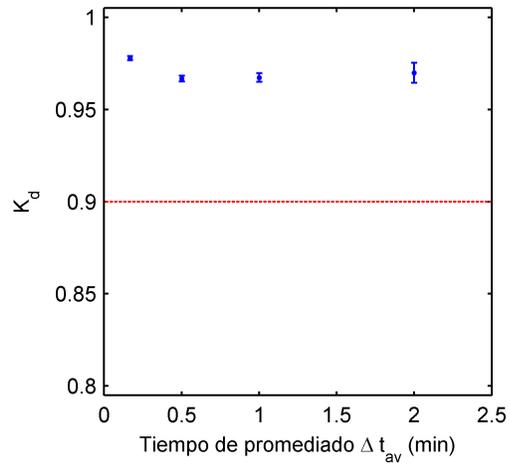
Tabla 4.7: Resultados del ensayo QDT utilizando el método 2. La incertidumbre de cada parámetro se indica entre paréntesis.

En la Figura 4.6 se puede ver que el valor de los parámetros $\eta_{0,b}$, K_d , b_0 y a_{50} presentan una tendencia a la baja, es decir, en tanto mayor es el tiempo de promediado menor es el valor de cada parámetro. En cambio, el valor del parámetro C/A_G permanece aproximadamente constante para $\Delta t_{av} \leq 1$ min pero a partir de $\Delta t_{av} = 2$ min el valor se dispara. Además, para $\Delta t_{av} \leq 1$ min las diez semillas iniciales con la que inicializa el algoritmo de regresión no lineal convergen al mismo conjunto de parámetros \hat{p} . A partir de $\Delta t_{av} = 2$ min el algoritmo comienza a presentar problemas de convergencia, es decir, las semillas iniciales no convergen al mismo valor de \hat{p} e incluso a veces el algoritmo directamente no converge. A partir de $\Delta t_{av} = 5$ min ninguna de las semillas iniciales converge.

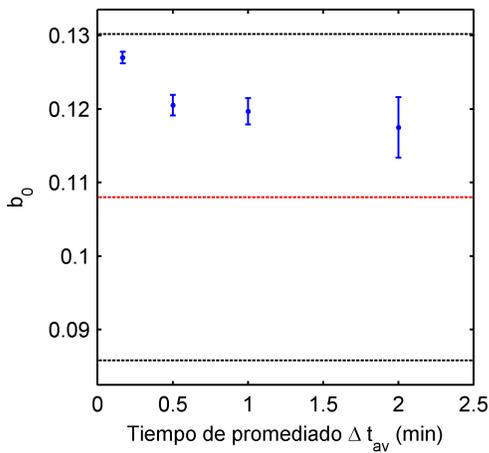
Para $\Delta t_{av} \leq 1$ min el valor de los parámetros $\eta_{0,b}$, b_0 y a_{50} permanece dentro del intervalo de confianza al 95 % del ensayo SST. En este rango de Δt_{av} la diferencia máxima entre los resultados SST y QDT es del 2.6 %, 17.6 % y 2.5 %, respectivamente, para estos parámetros. En la Figura 4.6b se puede observar que el valor de K_d sobrestima al valor SST: la máxima diferencia respecto al valor SST para este parámetro es del 8.6 %. Las posibles causas de las diferencias en b_0 y K_d fueron analizadas en la sección anterior. En el caso de la capacidad térmica, C/A_G , los dos primeros valores ($\Delta t_{av} = 10$ s y $\Delta t_{av} = 30$ s) caen dentro del intervalo de confianza al 95 % del ensayo SST y la diferencia máxima respecto al valor SST es del 7.7 %. A partir de $\Delta t_{av} = 1$ min los valores de C/A_G caen fuera de este intervalo. En el caso de $\Delta t_{av} = 1$ min la diferencia es del 15 % y en el caso de $\Delta t_{av} = 2$ min la diferencia es del 80 %. Para entender el comportamiento de los resultados que se dan a partir de $\Delta t_{av} = 2$ min es necesario analizar el efecto que tiene este tiempo de promediado en las medidas y en el error numérico del modelo. Estos dos puntos se tratan con detenimiento en los párrafos siguientes.



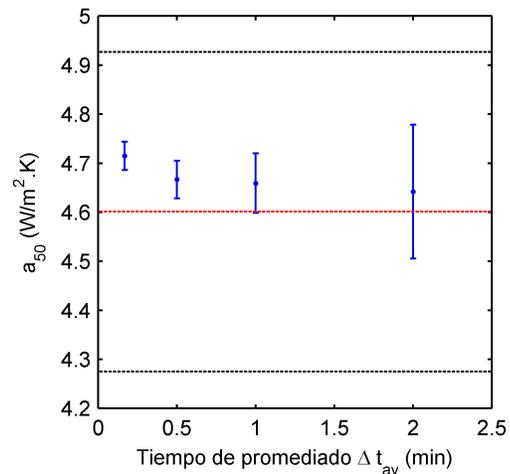
(a) $\eta_{0,b}$ en función de Δt_{av} .



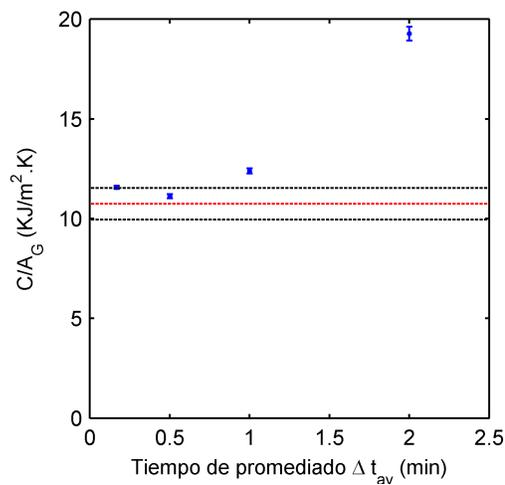
(b) K_d en función de Δt_{av} .



(c) b_0 en función de Δt_{av} .



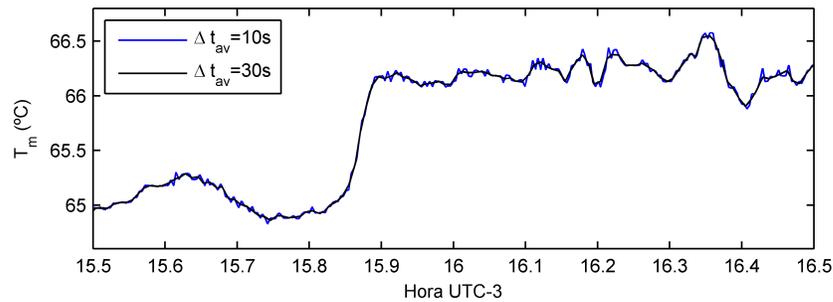
(d) a_{50} (W/m²K) en función de Δt_{av} .



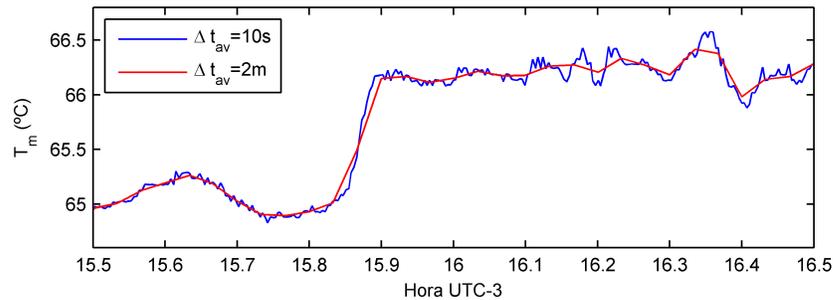
(e) C/A_G (kJ/m²K) en función de Δt_{av} .

Figura 4.6: Resultados del ensayo QDT utilizando el método 2 en función del tiempo de promediado. Resultados QDT en azul, resultados SST en rojo punteado e intervalo de confianza al 95 % de resultados SST en negro punteado.

En la Figura 4.7 se muestra la medida de la temperatura media del fluido en función del tiempo para la sub-secuencia 7 (ver Tabla 4.5). Se aclara que solo se muestra el periodo de tiempo entre las 15:30 y las 16:30 y no la sub-secuencia completa. En azul se muestran los datos sin promediar (cada 10s), en negro los datos promediados cada 30s (ver Figura 4.7a) y en rojo los datos promediados cada 2min (ver Figura 4.7b). Las fluctuaciones de temperatura que se observan en estas figuras se deben a dos fenómenos. Por un lado se tienen las variaciones debido al ruido de las medidas, y por el otro se tiene las variaciones debido a la propia dinámica del colector. El ruido se presenta en forma de pequeñas fluctuaciones de temperatura en intervalos de tiempo pequeño (alta frecuencia), mientras que las variaciones de temperatura debido a la dinámica del colector son de ordenes mayores y se dan en mayores escalas de tiempo. El tiempo de promediado ideal es aquel que permite filtrar el ruido de las medidas pero a la misma vez retiene las fluctuaciones debido a la dinámica del colector. En la Figura 4.7a se puede ver que el tiempo de promediado de 30 s cumple con este propósito: filtra el ruido de las medidas instantáneas cada 10 s y a la misma vez retiene la dinámica del colector. En el caso del tiempo de promediado de 2 min (Figura 4.7b), se filtra el ruido y también parte de la dinámica del colector (la serie temporal T_m se suaviza). Por lo tanto, en este último caso, no es de extrañar que el algoritmo de regresión no lineal converja a un valor de capacidad térmica diferente del valor SST, dado que el algoritmo está resolviendo un problema diferente, con las series temporales suavizadas.



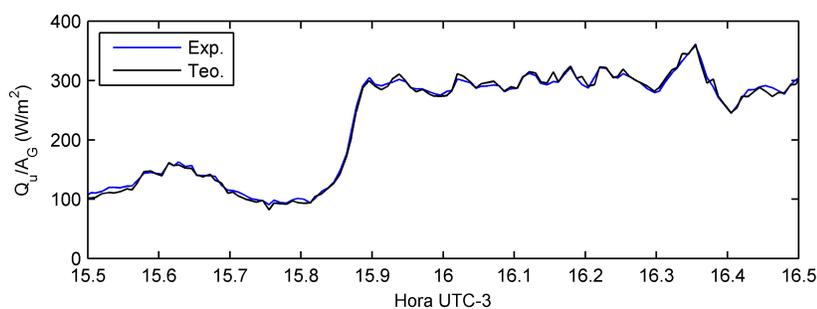
(a) Temperatura media en función del tiempo.



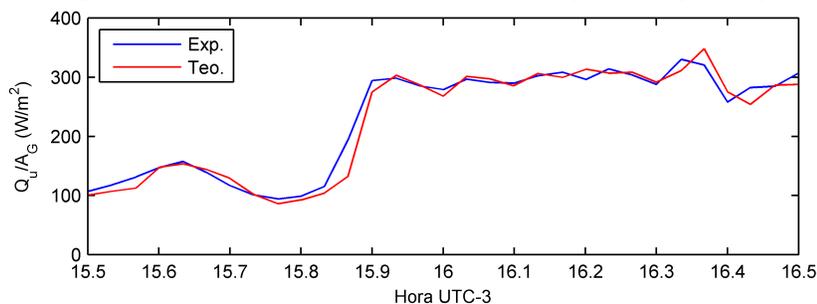
(b) Temperatura media en función del tiempo.

Figura 4.7: Efecto del tiempo de promediado en la medidas de temperatura media.

Por otro lado, el error numérico del modelo, es decir, el error entre la solución exacta y la solución aproximada dada por el método del trapecio, depende también del tiempo de promediado. Este error será mayor en tanto mayor sea el valor de Δt_{av} . En la Figura 4.8 se comparan los datos experimentales de potencia útil por unidad de área, \dot{Q}_u/A_G , y la salida del modelo numérico. En la (Figura 4.8a) se muestran los valores correspondientes al tiempo de promediado de 30 s y en la (Figura 4.8b) los correspondientes al tiempo de promediado de 2 min. En estas figuras se muestra la misma ventana temporal que en la anterior. En la Figura 4.8a se puede observar que la diferencia entre la salida del modelo numérico y las medidas experimentales es muy pequeña, pero en la Figura 4.8b la diferencia entre la salida del modelo numérico y las medidas es mayor, debido a que empieza a observarse desfases temporales entre ambas señales. En general, a mayor tiempo de promediado mayor es la diferencia entre la salida del modelo numérico y los datos experimentales. Esto se ve claramente en el valor final del error cuadrático medio $E_c(\hat{p})$ (función a minimizar por el algoritmo de regresión no lineal). En la Tabla 4.8 se muestra el valor de $E_c(\hat{p})$ para los distintos tiempos de promediado, donde se observa que los mayores valores son para el Δt_{av} de 2 minutos. El alto valor relativo de $E_c(\hat{p})$ que se da para $\Delta t_{av} = 10$ s puede ser debido al ruido de las medidas dado que se tratan de valores instantáneos. El valor mínimo obtenido de la función $E_c(\hat{p})$ es cuando delta $\Delta t_{av} = 30$ s, lo que confirma este promediado temporal es el más adecuado para esta metodología.



(a) Potencia útil por unidad de área en función del tiempo, tiempo de promediado 30 s.



(b) Potencia útil por unidad de área en función del tiempo, tiempo de promediado 2 min.

Figura 4.8: Efecto del tiempo de promediado en la salida del modelo numérico.

Tiempo de promediado	10 s	30 s	1 min	2 min
$E_c(\hat{p})$ (W^2/m^4)	95.8	66.6	81.2	197.8

Tabla 4.8: Efecto del tiempo de promediado en el valor final del error cuadrático medio.

En definitiva, el tiempo de promediado de 30 s parece ser el más adecuado en este caso dado que filtra el ruido de las medidas pero al mismo tiempo conserva la dinámica del colector. Además, mantienen el error numérico en un nivel aceptable. La comparación entre ambos procedimientos de identificación de parámetros (método 1 y 2) se realizará en la sección siguiente junto con la intercomparación de laboratorios.

4.3. Validación de resultados

Los ensayos que presentaron en las secciones anteriores se realizaron en el marco de una inter-comparación de laboratorios de ensayos a nivel de Latinoamérica, organizada por el Instituto Metrológico Alemán (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt* - PTB). Esto permite validar las metodologías de ensayo implementadas, además de proveer una plataforma más robusta para comparar y discutir los resultados obtenidos, especialmente entre la metodología SST y QDT. En la intercomparación participaron los siguientes 6 laboratorios:

- Instituto Costarricense de Energía (ICE), Costa Rica.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Argentina.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Brasil.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
- Laboratorio de Energía Solar (LES), Uruguay.
- *Institute for Solar Energy Research in Hamelin* (ISFH), Alemania.

El sexto laboratorio, el ISFH, actuó como laboratorio de referencia. La actividad se llevó a cabo de la siguiente manera. Primero, el PTB adquirió 7 colectores idénticos a la empresa Austriaca *GREENoneTEC* (<https://www.greenonetec.com/es/>). Luego, los 7 colectores fueron enviados al ISFH el cual comprobó la homogeneidad de los colectores y los ensayó de acuerdo al método SST de la norma ISO 9806:2017. Luego, 5 de los 7 colectores fueron enviados al resto de los laboratorios participantes (ICE, INTI, IPT, UNAM y LES). Se aclara que al inicio de la actividad eran 8 los laboratorios participantes, pero por diversos motivos laboratorios privados de México

se bajaron de la actividad. Cada laboratorio ensayó su colector de acuerdo al método SST: el INTI y el LES lo realizaron al exterior, el IPT y el ICE lo realizaron al interior y UNAM de ambas formas. Únicamente el LES presentó los resultados del ensayo QDT, aparte del tradicional SST. La estadística se realizó en base a los resultados de 8 ensayos (1×ICE, 1×INTI, 1×IPT, 2×UNAM, 2×LES y 1×ISFH). La comparativa se realizó de acuerdo a la norma [ISO/IEC-17043 \(2010\)](#). En este sentido, para cada parámetro a comparar se definió un valor de referencia X y una desviación estándar σ . Para el valor de X se utilizó la mediana y para σ se utilizó el rango intercuartil normalizado el cual se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = 0.7413 \times (Q_3 - Q_1), \quad (4.27)$$

donde Q_3 es el valor del parámetro que deja el 75 % de los datos por debajo de él, y Q_1 el valor que deja el 25 % por debajo de él. Los valores de los parámetros presentados por los distintos laboratorios, X_{LAB} , se pueden clasificar de tres formas diferentes según el valor que adopte el parámetro Z -score el cual se calcula como sigue:

$$Z = \frac{X_{LAB} - X}{\sigma}. \quad (4.28)$$

De acuerdo a la [ISO/IEC-17043 \(2010\)](#) si el valor absoluto de Z es menor a 2, entonces el resultado se considera satisfactorio, si Z se ubica entre 2 y 3 se considera cuestionable, y si es mayor a 3 se considera insatisfactorio. Esto coincide con las probabilidades de 95 % y 99 % que se obtendrían si la distribución de Z fuese Gaussiana, por lo que valores en las colas de 5 % de probabilidad se toman como cuestionables o erróneos. Se compararon 22 magnitudes en total las cuales se pueden clasificar en: (1) parámetros característicos y (2) potencia útil calculada para distintas condiciones de funcionamiento (irradiancia solar y diferencia de temperatura). El reporte final completo de la intercomparación se encuentra disponible en [Fischer \(2020\)](#).

Los parámetros característicos que se compararon fueron: A_G , $\eta_{0,b}$, K_d , $K_b(20^\circ)$, $K_b(30^\circ)$, $K_b(40^\circ)$, $K_b(50^\circ)$, $K_b(60^\circ)$ y a_{50} . El valor de referencia X y la desviación estándar σ de estos parámetros se muestra en la Tabla 4.9. Además, en esta misma tabla se muestra los resultados de esta tesis: los del ensayo SST, los del ensayo QDT utilizando el método 1 y un tiempo de promediado de 5 minutos (QDT-1), y los del ensayo QDT utilizando el método 2 y un tiempo de promediado de 30 segundos (QDT-2). Los resultados de esta tesis difieren ligeramente de los resultados que se presentaron originalmente en la intercomparación, debido a que en este trabajo se incluyeron series de medidas adicionales las cuales se tomaron luego de finalizada la intercomparación. La comparativa que aquí se realiza se considera válida debido que las diferencias con los resultados originales es pequeña. Además, se supone que los

resultados de un laboratorio en particular no afecta significativamente la estadística global (X y σ se basan en los resultados de 8 ensayos).

Parámetro	Referencia		SST		QDT-1		QDT-2	
	X	σ	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z
A_G (m ²)	2.02	0.01	2.02	0	2.02	0	2.02	0
$\eta_{0,b}$	0.729	0.009	0.714	-1.44	0.724	-0.89	0.726	-0.90
K_d	0.91	0.02	0.90	0.50	<u>0.970</u>	<u>2.95</u>	<u>0.967</u>	<u>2.85</u>
$K_b(20^\circ)$	1.00	0.01	0.99	-0.69	0.99	-0.78	0.99	-0.77
$K_b(30^\circ)$	0.99	0.01	0.98	-0.67	0.98	-0.89	0.98	-0.86
$K_b(40^\circ)$	0.97	0.01	0.97	-0.30	0.96	-0.73	0.96	-0.66
$K_b(50^\circ)$	0.95	0.02	0.94	-0.50	0.93	-0.89	0.93	-0.83
$K_b(60^\circ)$	0.91	0.02	0.89	-0.90	0.88	-1.60	0.88	-1.50
a_{50} (W/m ² K)	4.360	0.251	4.581	0.88	4.669	1.23	4.667	1.22

Tabla 4.9: Comparación de los resultados con los de la intercomparación de laboratorios, parámetros característicos.

En la Tabla 4.9 se puede ver que todos los resultados del ensayo SST verifican $|Z| \leq 2$, por lo que se concluye que esta metodología ha sido implementada correctamente. En el caso de la metodología QDT se observa que todos los parámetros excepto K_d verifican $|Z| \leq 2$ (que aparece subrayado en la tabla), por lo tanto el resultado de estos parámetros se pueden considerar satisfactorio. El resultado de K_d se puede considerar cuestionable dado que el valor de Z en este caso se encuentra entre 2 y 3. Se hace notar que la estadística de K_d se realizó en base a 12 resultados de los cuales 11 correspondían a ensayos SST. En el caso de la metodología SST, este parámetro no se mide directamente sino que se deriva a partir del modificador por ángulo de incidencia (Ec. (2.32)). Esta conversión asume que la irradiancia difusa es isotrópica y la incertidumbre asociada a esta hipótesis es desconocida. Por otro lado, en el caso de la metodología QDT, el parámetro K_d se mide directamente por lo que incluye la naturaleza anisotrópica de la irradiancia difusa durante los ensayos. Por lo tanto, no está claro que el parámetro K_d calculado según la Ec. (2.32) sea equivalente al medido de acuerdo a la metodología QDT y hasta ahora los antecedentes muestran que no lo son. En este sentido, [Kovács et al. \(2011\)](#) muestra que el valor K_d de la Ec. (2.32) subestima el valor de K_d del ensayo QDT para un colector ETC.

En la Tabla 4.10 se muestran los resultados de potencia útil para distintas condiciones de cielo y diferencias de temperatura ($T_m - T_a$). Las condiciones de cielo se establecen a través de distintos valores característicos para G_t , G_{bt} y G_{dt} . El cálculo de potencia útil se realizó de acuerdo a la Ec. (2.29) pero asumiendo incidencia normal y estado estacionario. Se consideraron tres condiciones de cielo diferente: cielo claro, cielo parcialmente nublados y cielo completamente nublado, y cuatro niveles de tem-

peratura $T_m - T_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$, $40\text{ }^\circ\text{C}$ y $60\text{ }^\circ\text{C}$. Las condiciones de cielo corresponden a las condiciones de reporte estándar (*Standard Reporting Conditions* - SRC) de la norma ISO-9806 (2017) y se especifican en la Tabla 4.10. En esta tabla se puede ver que en todos los casos el valor absoluto de Z es menor a 2 y por lo tanto los resultados pueden ser considerados satisfactorios. Se destaca que los menores valores de $|Z|$ se obtuvieron para la metodología QDT-2, seguida de la metodología QDT-1 y por último la SST. En definitiva, si bien la comparación de resultados de K_d es dudoso para la metodología QDT, en la Tabla 4.10 se ve que esto no repercute significativamente en los cálculos de potencia útil. Por lo tanto, se concluye que la metodología QDT ha sido correctamente implementada y que es equivalente a la metodología tradicional SST.

Cielo claro								
$(G_t = 1000\text{ W/m}^2, G_{bt} = 850\text{ W/m}^2 \text{ y } G_{dt} = 150\text{ W/m}^2)$								
$T_m - T_a$	Referencia		SST		QDT-1		QDT-2	
$^\circ\text{C}$	X	σ	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z
0	1462	55	1441	-0.90	1456	-0.11	1459	-0.05
20	1297	55	1268	-0.53	1277	-0.36	1283	-0.26
40	1111	60	1078	-0.51	1085	-0.39	1090	-0.32
60	903	78	870	-0.43	879	-0.30	881	-0.28

Cielo parcialmente nublado								
$(G_t = 700\text{ W/m}^2, G_{bt} = 440\text{ W/m}^2 \text{ y } G_{dt} = 260\text{ W/m}^2)$								
$T_m - T_a$	Referencia		SST		QDT-1		QDT-2	
$^\circ\text{C}$	X	σ	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z
0	1013	53	986	-0.51	1012	-0.02	1014	-0.02
20	848	50	813	-0.70	834	-0.29	837	-0.21
40	662	59	623	-0.66	642	-0.35	645	-0.29
60	454	82	415	-0.48	436	-0.22	436	-0.22

Cielo completamente nublado								
$(G_t = 400\text{ W/m}^2, G_{bt} = 0\text{ W/m}^2 \text{ y } G_{dt} = 400\text{ W/m}^2)$								
$T_m - T_a$	Referencia		SST		QDT-1		QDT-2	
$^\circ\text{C}$	X	σ	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z	X_{LAB}	Z
0	572	46	526	-0.99	567	-0.11	567	-0.10
20	404	45	354	-1.11	389	-0.34	391	-0.30
40	214	55	164	-0.92	196	-0.32	198	-0.29
60	8	70	0	-0.11	0	-0.11	0	-0.11

Tabla 4.10: Comparación de los resultados con los de la intercomparación de laboratorios, valores de potencia útil para distintas condiciones de funcionamiento.

La implementación de la metodología QDT abre la posibilidad de realizar un

modelado más detallado y real del colector, que trascienda las condiciones de régimen permanente. Como se observó aquí, el modelado de los efectos dinámicos del colector y la estimación con baja incertidumbre de los principales parámetros asociados a este comportamiento, continúa siendo un desafío. El objetivo final es encontrar formas de ensayos y modelos que permitan una mejor caracterización del comportamiento térmico de los equipos, tanto dinámico como en régimen, buscando los procedimientos más simples que cumplan el objetivo y puedan ser realizables y reproducibles por laboratorios de ensayo. En este sentido, los objetivos alcanzados en esta tesis son un primer hito en esta dirección, y algunas de las líneas de trabajo actuales y futuras que toman base en esta tesis se describen en el próximo capítulo.

Capítulo 5

Conclusiones y perspectivas

En el desarrollo de esta tesis se lograron realizar diversos hitos. Se hizo una profunda revisión del estado del arte y se lograron implementar las metodologías SST y QDT de la norma [ISO-9806 \(2017\)](#) en el BECS, ambas validadas a partir de la inter-comparaciones de laboratorios impulsada por el PTB alemán. En la Subsección 5.1 se resumen las principales conclusiones de esta tesis y en la Subsección 5.2 se presentan los estudios a futuros que surgen de la realización de la misma.

5.1. Conclusiones

En el Capítulo 2 se realizó un resumen de las distintas metodologías en estado estacionario y transitorio que han sido propuestas en la literatura y se destacaron las ventajas y desventajas de cada una. A nivel de normativa, la norma Europea EN 12975:2000 fue la primer norma en adoptar una metodología transitoria, además de la tradicional en estado estacionario, y luego le siguieron las normas ASHRAE 93:2010 e ISO 9806:201. Estas tres normas son las más utilizadas a nivel mundial. La metodología transitoria que se presenta en estas normas es conocida como metodología QDT y ha sido adoptada por varios laboratorios europeos. Sin embargo, a nivel de Latinoamérica existen muy pocos antecedentes del uso o implementación de esta metodología a la fecha.

En el Capítulo 3 se presentó el diseño y construcción local del BECS. La construcción del BECS es un hito para el desarrollo local de la energía solar térmica, proceso en el que participé desde distintos roles en los últimos 6 de los 8 años de desarrollo. La opción de construcción local de esta capacidad nos ha permitido tener un conocimiento cabal de la instalación y su funcionamiento, permitiendo realizar su mantenimiento y programación con independencia. Esto ha permitido además incubar una nueva área de I+D dentro del LES, en la que se enmarca esta tesis. En lo que refiere a aspectos operativos del BECS, en este capítulo también se estimó la

cantidad de ensayos anuales que podrían realizarse mediante la metodología SST y QDT. Se obtuvo que en nuestro clima la cantidad de ensayos QDT es casi el doble de la cantidad de ensayos que podrían obtenerse con la metodología tradicional SST, lo cual muestra la ventaja de la metodología QDT en Uruguay y en la región.

En el Capítulo 4 se mostró la implementación local de la metodología SST y QDT para un colector FPC. Los resultados del ensayo SST se utilizaron como referencia para evaluar la implementación de la metodología QDT. En el caso de esta última metodología se implementaron dos procedimientos de identificación de parámetros, método 1 y 2, y en cada caso se analizó la influencia del tiempo de promediado en los resultados. En el caso del método 1 el tiempo de promediado óptimo se encuentra en el entorno de los 5 minutos, dado que con este intervalo se consigue filtrar el ruido de las medidas y se obtienen valores de parámetros muy cercanos a los de la metodología SST. En el caso del método 2, los mejores resultados fueron obtenidos con un tiempo de promediado de 30 segundos. Este tiempo de promediado surge de un compromiso entre el filtrado del ruido, la conservación de los fenómenos dinámicos del colector en las series temporales y la estabilidad/convergencia del algoritmo numérico. Los resultados con este tiempo de promediado se aproximaban muy bien a los del ensayo SST. A partir de los resultados de la intercomparación de laboratorios de ensayos organizada por el PTB Alemán y los resultados de otras publicaciones se concluye que ambas metodologías han sido correctamente implementadas y que son equivalentes entre sí.

La elaboración de esta tesis representa un punto de partida para la realización de diferentes investigaciones novedosas en relación al ensayo de colectores, en particular, en lo referido a la metodología QDT. Algunas de estas líneas de trabajo se presentan en la siguiente sección.

5.2. Perspectivas a futuro

Si bien la metodología QDT ha sido correctamente implementada, a lo largo de esta tesis se identificaron algunos puntos en los cuales puede ser mejorada. Estos puntos se pueden clasificar en dos categorías: (i) aspectos a mejorar vinculados al modificador por ángulo de incidencia, y (ii) aspectos a mejorar vinculados a la capacidad térmica y la distribución de temperatura a lo largo del colector.

Respecto a la primera categoría, la Figura 4.2 dejó en evidencia que el modelo de [Souka and Safwat \(1966\)](#) no logra capturar correctamente las variaciones del modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia directa, $K_b(\theta)$. En este sentido, sería conveniente analizar el desempeño de otros modelos y/o proponer nuevas alternativas que logren capturar correctamente estas variaciones. En otro punto dentro de esta misma categoría, en la Sección 4.2.3 se mostró que el K_d^{iso} proveniente de la con-

versión SST-QDT (ver Sección 2.5.4) subestima al K_d hallado por el método QDT. Esta diferencia le fue atribuida al efecto que tiene la anisotropía de la irradiancia difusa en dos cosas: (1) en la medida de la irradiancia difusa con banda de sombra y el factor de corrección asociado (ver Ec. (3.1)), y (2) en la conversión SST-QDT. En este sentido, sería de interés evaluar el desempeño de otros métodos de corrección para la medida de difusa con banda de sombra. También sería interesante indagar de qué formas podría mejorarse la conversión de parámetros SST-QDT. Por último, es posible integrar al ensayo QDT de colectores solares el cálculo dinámico de K_d a partir de una distribución de irradiancia difusa anisotrópica, como propone [Hess and Hanby \(2014\)](#), y contrastar el desempeño de este método con el tradicional, el cual asume un K_d constante.

En relación a la segunda categoría, en la Sección 2.2 se resumieron los modelos térmicos disponibles en la literatura que caracterizan el comportamiento termodinámico de colectores solares. Estos modelos se puede agrupar de dos formas: (A) modelos que tienen en cuenta el perfil de temperatura a lo largo del colector (basados en varios nodos de temperatura), y (B) modelo que no tienen en cuenta el perfil de temperatura (basados en un nodo de temperatura, siendo el QDT uno modelo de esta clase). La evaluación local de los modelos del grupo (A) está aún pendiente, en particular en condiciones donde la temperatura del fluido al ingreso del colector varíe significativamente, y compararlos con el desempeño de los modelos del grupo (B). El propósito de esta comparativa sería la búsqueda de un método de ensayo que admita variaciones de temperatura en el entrada del colector (ensayo dinámico y no cuasi-dinámico). Esto permitiría flexibilizar aún más las condiciones de ensayo lo cual podría permitir la reducción del tiempo de ensayo y/o la utilización de esta metodología *in situ*.

Finalmente, otra línea de trabajo a futuro consiste en extender el uso de la metodología QDT a otros tipos de colectores (ETC y colectores sin cubierta, por ejemplo). En especial, los colectores ETC son más complejos de modelar que los FPC, debido al efecto del vacío y su geometría tubular. Por mencionar un ejemplo, su modificador por ángulo de incidencia es bi-axial, por lo que las funciones para K_b deben considerar ambas proyecciones axiales del ángulo de incidencia sobre el plano del colector. El ensayo comercial de esta tecnología aún presenta dificultades para los laboratorios de ensayo.

Apéndice A

Métodos de ensayos basados en la transformada de Laplace

Aquí se describen con mayor detalle los métodos de ensayo en estado transitorio basado en la transformada de Laplace. Esta sección se han colocado aquí para no desviar el foco de atención en el texto principal.

Rogers (1981) fue uno de los primeros en proponer un método de ensayo dentro de este grupo y este método fue adoptado por la norma británica DD77:1981, hoy en día en desuso. El autor, aplicándole la transformada de Laplace a la Ec. (2.18), logra expresar la potencia útil producida en cierto instante de tiempo t^j como la suma ponderada de la potencia útil que se produciría en estado estacionario en los N instantes anteriores:

$$\frac{\dot{Q}_u(t^j)}{A_C} = \sum_{m=j-N}^j k_{j-m} [F_R(\tau\alpha)_{av} G_t^*(t^m) - F_R U_L (T_i(t^m) - T_a(t^m))], \quad (\text{A.1})$$

donde los factores de ponderación k_1, k_2, \dots, k_N se denominan factores de impulso, los cuales son menores a la unidad y verifican $\sum_{i=1}^N k_i = 1$. Los factores de impulso se suponen constante para un colector y se determinan en conjunto con los parámetros $F_R(\tau\alpha)_{av}$ y $F_R U_L$. La cantidad N debe verificar $N\Delta t_{av} \leq M_c/\dot{m}$, donde Δt_{av} es el tiempo de promediado de los datos y M_c es la masa de fluido en el interior del colector. La cantidad M_c/\dot{m} es el tiempo de tránsito. Además, el tiempo de promediado Δt_{av} debe ser el menor múltiplo de 30 s que verifique $\Delta t_{av} \leq M/5\dot{m}$. Si las variaciones de temperatura ambiente y las variaciones de temperatura a la entrada del colector se

suponen pequeñas, entonces la Ec. (A.1) se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_u(t^j)}{A_C} &= \left[\sum_{m=j-N}^j k_{j-m} F_R(\tau\alpha)_{av} G_t^*(t^m) \right] - F_R U_L \overline{(T_i - T_a)}, \\ \overline{(T_i - T_a)} &= \sum_{m=j-N}^j \frac{1}{N} [T_i(t^m) - T_a(t^m)]. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

La Ec. (A.2) expresa la potencia útil de forma lineal y por lo tanto los parámetros $k_1 F_R(\tau\alpha)_{av}$, $k_2 F_R(\tau\alpha)_{av}, \dots, k_N F_R(\tau\alpha)_{av}$ y $F_R U_L$ se pueden determinar por regresión lineal. Para esto se debe definir como variable dependiente a la potencia útil por unidad de área \dot{Q}_u/A_C y como variables independientes a: $G_t^*(t^j)$, $G_t^*(t^{j-1}), \dots, G_t^*(t^N)$ y $\overline{(T_i - T_a)}$. Luego, el parámetro $F_R(\tau\alpha)_{av}$ se determina según:

$$F_R(\tau\alpha)_{av} = \sum_{i=1}^N k_i F_R(\tau\alpha)_{av}. \quad (\text{A.3})$$

Cabe aclarar que las subcomponentes directa y difusa de la irradiancia solar se deben medir por separado y luego utilizando el modificador por ángulo de incidencia se debe generar una estimación de la irradiancia solar global G_t^* modificada, que es la que se utiliza en la Ec. (A.2). Esta irradiancia no es otra cosa que el producto del modificador por ángulo de incidencia por la irradiancia solar global en el plano del colector. El problema de este procedimiento para generar G_t^* es que el modificador por ángulo de incidencia en general no es algo conocido de antemano. El ensayo comienza midiendo el área del colector y determinando el caudal de fluido de acuerdo a la relación $c_p \dot{m}/A_C = 70 \text{ W/K}$, este caudal se mantendrá fijo durante todo el ensayo. Luego, se debe medir la potencia útil producida por el colector \dot{Q}_u para cuatro temperaturas de entrada diferentes desde la ambiente hasta 85°C . Para cada temperatura de entrada se debe medir por un periodo consecutivo de al menos $60 \times N$ y en cada período de medición dicha temperatura no puede variar en más de $\pm 0.2^\circ\text{C}$. Si admiten variaciones de la irradiancia solar y del ángulo de incidencia (hasta 60°). La determinación de los parámetros se realiza para diferentes valores de N , luego se elige el valor de N que tenga asociado el menor error cuadrático medio de potencia útil. [Emery and Rogers \(1984\)](#) ensayan tres colectores FPC de acuerdo a este método y compara sus resultados con los del método tradicional en estado estacionario de la norma ASHRAE 93, encontrando que los resultados difieren en menos de un 5%.

Posteriormente, [Prapas et al. \(1988, 1989\)](#) mejora el método de [Rogers \(1981\)](#) e introduce un ensayo de constante de tiempo. Este ensayo, similar al ensayo de capacidad térmica descrito en la Sección 2.3 y consiste en cubrir el colector con una manta y dejar que éste alcance el estado estacionario, luego se quita dicha manta y

se deja que el colector alcance un nuevo estado estacionario. Durante este transitorio se debe medir y registrar la temperatura a la salida del colector obteniendo de esta manera una curva de calentamiento. Luego, el proceso se repite en sentido inverso dando lugar a una curva de enfriamiento. Las curvas de calentamiento y enfriamiento se promedian y a través de la curva resultante se determinan los factores de impulso k_1, k_2, \dots, k_N . Finalmente, se debe realizar el ensayo de desempeño térmico de la DD77:1981 en donde se determina los parámetros $F_R(\tau\alpha)_{av}$ y $F_R U_L$ por regresión lineal. Para esto los autores definen una irradiancia solar efectiva:

$$G_{ef} = \sum_{m=j-N}^j k_{j-k} G_t^*(t^m), \quad (\text{A.4})$$

y expresan la curva de eficiencia del colector en estado transitorio en función de dicha irradiancia:

$$\eta = F'(\tau\alpha)_{av} - F_R U_L \frac{\overline{(T_i - T_a)}}{G_{ef}}. \quad (\text{A.5})$$

Wang et al. (1987) propone un método muy similar al de Prapas et al. (1988, 1989) basado en la realización de un ensayo de constante de tiempo previo al ensayo de desempeño térmico y a través del primero caracteriza el comportamiento dinámico del colector. La principal diferencia es que Wang et al. (1987) propone construir la irradiancia solar efectiva G_{ef} en forma recursiva mediante la utilización de filtro digitales.

Amer et al. (1998b) perfecciona el método de Rogers (1981) y Prapas et al. (1988, 1989). Los autores parten de la ecuación Ec. (2.17) en lugar de la Ec. (2.18), la cual es más completa dado que tiene en cuenta el perfil de temperatura a lo largo del colector. El ensayo requiere que el colector haya atravesado distintas condiciones de cielo, de forma natural, por la propia variabilidad de la nubosidad, o de forma artificial, mediante el uso de una manta opaca o semi-transparente. La principal contribución de los autores es que su metodología admite variaciones de temperatura del fluido a la entrada del colector. La principal desventaja del método es que requiere de un algoritmo de regresión no lineal para la determinación de los parámetros. Otra desventaja es que el método no tiene en consideración el modificador por ángulo de incidencia. Amer et al. (1998b) muestra que los resultados de este método difieren en menos de un 3% con los del método tradicional SST para un colector FPC.

Recientemente Kong et al. (2015) propuso una metodología de ensayo basada en la aplicación de la transformada de Laplace al modelo de Perers (1997) dado por la Ec. (2.19). El procedimiento de ensayo es el mismo que el de la metodología QDT de la ISO-9806 (2017). La mayor contribución de los autores respecto a los métodos anteriores es que agrega de forma explícita el modificador por ángulo de incidencia

para cada componentes de la irradiancia solar. Además, agrega la dependencia del coeficiente de pérdidas con la temperatura y la velocidad del viento. Una de las desventajas del método es que parte de un modelo simplificado que no tiene en cuenta el perfil de temperatura a lo largo del colector, por lo tanto, es sensible a variaciones de temperatura a la entrada del colector. Otra desventaja es que requiere de un algoritmo de regresión no lineal para la determinación de los parámetros. En dicho trabajo se muestra que los resultados de esta metodología son equivalentes a los de la metodología tradicional para un colector FPC.

Los métodos de este grupo tienen diverso grado de complejidad. Por un lado se tienen los métodos de [Rogers \(1981\)](#); [Prapas et al. \(1988, 1989\)](#); [Wang et al. \(1987\)](#) que poseen cierta sencillez en el sentido que requieren de una regresión lineal para la identificación de parámetros, pero poseen la desventaja de que son susceptibles a las variaciones de la temperatura del fluido a la entrada del colector, requiriéndose de cierta estabilidad en esta variable durante la realización de los ensayos (metodologías cuasi-dinámicas). Por otro lado, está el método de [Amer et al. \(1998b\)](#) que se basa en un modelo más preciso, siendo menos sensible a dichas variaciones de temperatura (metodología dinámica) pero con la desventaja de requerir un procedimiento de regresión no lineal. El método de [Kong et al. \(2015\)](#) es el más completo dado que tiene en cuenta el modificador por ángulo de incidencia y el coeficiente de pérdidas de segundo orden pero posee las desventajas de los métodos anteriores: es sensible a las variaciones de temperatura a la entrada del colector (metodología cuasi-dinámica) y requiere de una regresión no lineal. Además, todos los métodos de este grupo presentan la desventaja de requerir cierto conocimiento de la transformada de Laplace y de filtros digitales para su correcta implementación.

Apéndice B

Cálculos complementarios

Aquí se describen los cálculos complementarios que han sido referidos a lo largo de esta tesis.

B.1. Magnitudes solares

B.1.1. Irradiancia solar en el tope de la atmósfera

La irradiancia media que incide sobre una superficie normal a la línea Tierra-Sol en el tope de la atmósfera cuando la distancia entre ambos es igual a una unidad astronómica es aproximadamente constante y se conoce como constante solar G_s . Este valor se monitorea a través de misiones satelitales y ha sido objeto de actualizaciones sucesivas, siendo su actualización más reciente a $G_s = 1361 \pm 1 \text{ W/m}^2$ al 95 % de confianza. No obstante, es común utilizar como convención su valor previo de $G_s = 1367 \text{ W/m}^2$, que es el que se recomienda en libros de texto del área (Duffie and Beckman, 1991). Cuando la distancia tierra-sol es distinta de la unidad astronómica es necesario agregar un factor de corrección que tenga en cuenta la órbita excéntrica de la traslación terrestre, $F(n)$, conocido como factor orbital. De esta manera, la irradiancia en incidencia normal en el tope de la atmósfera G_0 para cualquier momento del año se calcula como:

$$G_0 = G_s \times F(n). \quad (\text{B.1})$$

Spencer (1971) da una expresión en series de Fourier para el factor orbital:

$$F(n) \approx 1.000110 + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma) + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma), \quad (\text{B.2})$$

donde la fase es $\Gamma = 2\pi(n - 1)/365$, con n igual al día del año. Si el año es bisiesto se reemplaza 365 por 366. La variación orbital de G_0 a lo largo del año es de $\pm 3.3\%$.

La irradiancia extraterrestre en un plano horizontal al tope de la atmósfera, G_{0h} , es la proyección de la irradiancia G_0 sobre ese plano y se calcula como:

$$G_{0h} = G_0 \cos \theta_z, \quad (\text{B.3})$$

donde θ_z es el ángulo cenital del Sol. Este ángulo depende de la posición del observador, dada por la latitud ϕ y la longitud ψ , y de la posición del Sol respecto a la tierra, dada por la declinación solar δ y el ángulo horario ω , magnitudes que varían instante a instante. El ángulo cenital se puede calcular de acuerdo a:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega. \quad (\text{B.4})$$

El cálculo de los ángulos δ y ω se describe en la sección siguiente.

B.1.2. Movimiento aparente del Sol

Es bien sabido que la Tierra orbita alrededor del Sol, pero para un observador situado en la Tierra, parece ser el Sol quien se mueve alrededor de la Tierra. A este movimiento se le denomina movimiento aparente del Sol y para describirlo se utilizan dos ángulos: declinación solar δ y ángulo horario ω . La declinación solar se define como el ángulo que forma la línea Tierra-Sol con el plano ecuatorial terrestre. [Spencer \(1971\)](#) también da una expresión en series de Fourier para calcular esta variable:

$$\begin{aligned} \delta \approx & 0.006918 + 0.070257 \sin(\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) + 0.001480 \sin(3\Gamma) \\ & - 0.399912 \cos(\Gamma) - 0.006758 \cos(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma), \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

donde δ está expresado en radianes. El ángulo horario se define sobre el plano del ecuador como el ángulo entre el meridiano del Sol (meridiano solar) y el meridiano del observador (meridiano local). Este ángulo varía a una tasa de 15° por hora debido a la rotación de la tierra. Por definición es cero al mediodía solar y, por convención, negativo a la mañana y positivo a la tarde. Este ángulo define el tiempo solar T_s , cuyo vínculo queda dado por:

$$T_s = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) \quad (\text{B.6})$$

donde T_s está expresado en hora y fracción. El tiempo solar se relaciona a su vez con el tiempo local T_{utc} , referido al meridiano ψ^{utc} , de la siguiente manera:

$$T_{utc} = T_s + \frac{(\psi - \psi^{utc})}{15} - \frac{E}{60}, \quad (\text{B.7})$$

donde ψ es la longitud del observador y E es la ecuación del tiempo. Tanto ψ^{utc} como

ψ se expresan en grados, mientras que E se expresa en minutos. De acuerdo a [Spencer \(1971\)](#) la ecuación del tiempo E se puede estimar según:

$$E \approx 229.18 \times [0.000075 - 0.032077 \sin(\Gamma) - 0.040890 \sin(2\Gamma) + 0.001868 \cos(\Gamma) - 0.014615 \cos(2\Gamma)]. \quad (\text{B.8})$$

Existen dos ángulos adicionales que son de interés para describir el movimiento aparente del Sol: la altura solar α_s y el azimut solar γ_s , los cuales se indican en la Figura B.1.

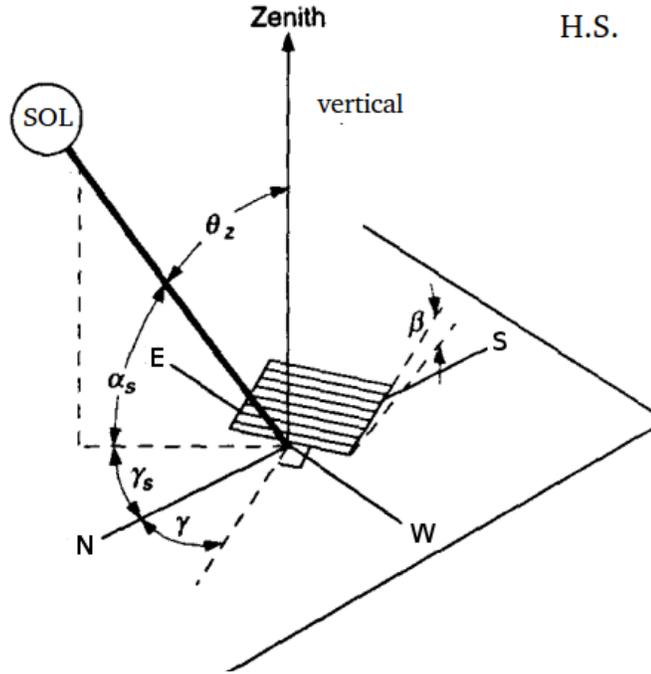


Figura B.1: Ángulos para describir el movimiento aparente del Sol. Los ángulos γ y β describen la orientación de una superficie arbitraria y son utilizados más adelante. Figura extraída de [Abal et al. \(2020\)](#).

Estos dos ángulos se expresan en radianes y se pueden calcular como sigue:

$$\alpha_s = \arcsin(\cos \theta_z), \quad (\text{B.9})$$

$$\gamma_s = \text{signo}(\omega) \left| \arccos \left(\frac{\sin \delta - \cos \theta_z \sin \phi}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|. \quad (\text{B.10})$$

B.1.3. Ángulo de incidencia para inclinaciones arbitrarias

Dada una superficie orientada arbitrariamente, el ángulo entre la línea Tierra-Sol y la normal a dicha superficie se denomina ángulo de incidencia, θ . La orientación

de esta superficie queda dada por los ángulos β y γ , indicados en la Figura B.1. El coseno de este ángulo, $\cos \theta$, se puede calcular se la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & [(\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega) \cos \gamma + \cos \delta \sin \omega \sin \gamma] \sin \beta \\ & + [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega] \cos \beta. \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

B.2. Densidad y calor específico del agua

De acuerdo a la norma [ISO-9806 \(2017\)](#), la densidad del agua en su fase líquida en el rango de temperaturas de 0 a 185 °C y presiones menores a 12 bar se pueden estimar como:

$$\rho(T) \approx a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 \quad (\text{B.12})$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= 999.85 \text{ kg/m}^3 \\ a_1 &= 5.332 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3\text{°C} \\ a_2 &= -7.564 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3\text{°C}^2 \\ a_3 &= 4.323 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3\text{°C}^3 \\ a_4 &= -1.673 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3\text{°C}^4 \\ a_5 &= 2.447 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^3\text{°C}^5 \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Además, el calor específico en el mismo rango de presiones y temperaturas se puede estimar como:

$$c_p(T) \approx b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3 + b_4T^4 + b_5T^5 + b_6T^6 \quad (\text{B.14})$$

donde

$$\begin{aligned} b_0 &= 4.2184 \text{ kJ/(kg°C)} \\ b_1 &= -2.8218 \times 10^{-3} \text{ kJ/(kg°C}^2\text{)} \\ b_2 &= 7.3478 \times 10^{-5} \text{ kJ/(kg°C}^3\text{)} \\ b_3 &= -9.4712 \times 10^{-7} \text{ kJ/(kg°C}^4\text{)} \\ b_4 &= 7.2869 \times 10^{-9} \text{ kJ/(kg°C}^5\text{)} \\ b_5 &= -2.8098 \times 10^{-11} \text{ kJ/(kg°C}^6\text{)} \\ b_6 &= 4.4008 \times 10^{-14} \text{ kJ/(kg°C}^7\text{)} \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

Referencias

- Abal, G., Alonso-Suárez, R., and Laguarda, A. (2020). Notas del curso recurso solar. http://les.edu.uy/FRS/notas/FRS_notas_v4-0_R2_2020.pdf.
- Alonso-Suárez, R., Bidegain, M., Abal, G., and Modernell, P. (2019). Año meteorológico típico para aplicaciones de energía solar. Report, UdelaR-CSIC.
- Amer, E., Nayak, J., and Sharma, G. (1998a). Comparison of two dynamic test methods for solar flat-plate collectors. *Energy Conversion and Management*, 39(3–4):285–293.
- Amer, E., Nayak, J., and Sharma, G. (1998b). Transient method for testing flat-plate solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 39(7):549–558.
- Bates, D. M. and Watts, D. G. (1988). *Nonlinear regression analysis and its applications*. John Wiley & Sons.
- Batlles, F., Olmo, F., and Alados-Arboledas, L. (1995). On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, 54(2):105 – 114.
- BEN (2019). Balance energético nacional. <https://ben.miem.gub.uy/descargas/1balance/1-1-Libro-BEN2019.pdf>.
- Björck, Å. (1996). *Numerical methods for least squares problems*. Siam.
- Bosanac, M., Brunotte, A., Spirkl, W., and Sizmann, R. (1994). The use of parameter identification for flat-plate collector testing under non-stationary conditions. *Renewable Energy*, 4(2):217–222.
- Brunger, A. P. and Hooper, F. C. (1993). Anisotropic sky radiance model based on narrow field of view measurements of shortwave radiance. *Solar Energy*, 51(1):53 – 64.
- Close, D. J. (1967). A design approach for solar processes. *Solar Energy*, 11(2):112–122.

- Drummond, A. J. (1956). On the measurement of sky radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 7:413 – 436.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1991). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Emery, M. and Rogers, B. (1984). On a solar collector thermal performance test method for use in variable conditions. *Solar Energy*, 33(2):117–123.
- EN-12975-2 (2001). Thermal solar systems and components - solar collectors - part 2: Test methods. Standard, European Committee for Standardisation, Belgium.
- EN-12975-2 (2006). Thermal solar systems and components - solar collectors - part 2: Test methods. Standard, European Committee for Standardisation, Belgium.
- Fhar, S., Gumbel, U., Zirkel-Hofer, and Kramer, K. (2018). In situ characterization of thermal collectors in field installations. In *EuroSun 2018 Conference Proceedings*.
- Fischer, S. (2020). Quality infrastructure for energy efficiency and renewable energy in latin america and the caribbean 95309. Report, Intituto Metrológico Aleman - PTB.
- Fischer, S., Frey, P., and Drück, H. (2012). A comparison between state-of-the-art and neural network modelling of solar collectors. *Solar Energy*, 86(11):3268 – 3277.
- Fischer, S., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Perers, B., Bergquist, P., and Hellström, B. (2004). Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the european standard EN 12975-2. *Solar Energy*, 76:117–123.
- Fischer, S. and Müller-Steinhagen, H. (2009). Collector efficiency testing — reduction of test duration by using a 2-node collector model. pages 731–734.
- Frid, S. (1990). Multinode models and dynamic testing methods of solar collectors. *Solar & Wind Technology*, 7(6):655 – 661.
- García de Jalón, A., Sallaberry, F., Olano, X., , Mateu, E., Astiz, R., Ezcurra, M., and Ramíres, L. (2011). Comparison of thermal efficiency curves of solar collectors tested in outdoor conditions. In *Proceedings of ISES World Congress 2011*.
- Hess, S. and Hanby, V. I. (2014). Collector simulation model with dynamic incidence angle modifier for anisotropic diffuse irradiance. *Energy Procedia*, 48:87 – 96. Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013).

- Hofer, A., Büchner, D., Kramer, K., Fahr, S., Heimsath, A., Platzer, W., and Scholl, S. (2015). Comparison of two different (quasi-) dynamic testing methods for performance evaluation of a linear fresnel process heat collector. *Energy Procedia*, 69:84–95.
- Hottel, H. and Whillier, A. (1958). Evaluation of flat-plate solar collector performance transactions of the conference on the use of solar energy, vol. 2.
- Hottel, H. and Woertz, B. (1942). Performance of flat-plate solar-heat collectors. *Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.); (United States)*, 64.
- IEA (2016a). Final energy consumption in the world. <https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption>.
- IEA (2016b). Final energy consumption in uruguay. <https://www.iea.org/Sankey/#?c=Uruguay&s=Final20consumption>.
- IEA (2020). Solar heat worldwide 2020. <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf>.
- ISO-9060 (2018). Solar energy — specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.
- ISO-9459-2 (1995). Solar heating — domestic water heating systems — part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.
- ISO-9459-5 (2007). Solar heating — domestic water heating systems — part 5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.
- ISO-9806 (2013). Solar energy – solar thermal collectors – test methods. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.
- ISO-9806 (2017). Solar energy – solar thermal collectors – test methods. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.
- ISO-9806-1 (1994). Test methods for solar collectors — part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.

- ISO-9847 (1992). Solar energy – calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.
- ISO/IEC-17043 (2010). Conformity assessment - general requirements for proficiency testing. Standard, International Organization of Standardization, Switzerland.
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press.
- Klein, S. A., Duffie, J. A., and Beckman, W. A. (1974). Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors. *Journal of Engineering for Power*, 96(2):109–113.
- Kong, W., Perers, B., Fan, J., Furbo, S., and Bava, F. (2015). A new laplace transformation method for dynamic testing of solar collectors. *Renewable Energy*, 75:448 – 458.
- Kong, W., Wang, Z., Fan, J., Bacher, P., Perers, B., Chen, Z., and Furbo, S. (2012). An improved dynamic test method for solar collectors. *Solar Energy*, 86(6):1838 – 1848.
- Kovács, P., Pettersson, U., Persson, M., Perers, B., and Fischer, S. (2011). Improving the accuracy in performance prediction for new collector designs. In *Proceedings of Solar World Congress*.
- Kratzenberg, M., Beyer, H., and Colle, S. (2006). Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test. *Solar Energy*, 80:1453–1462.
- LeBaron, B., Michalsky, J., and Perez, R. (1990). A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, 44(5):249 – 256.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2(2):164–168.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2):431–441.
- Martínez-Escribano, J., Noceto, P., and Alonso-Suárez, R. (2013). *Manual técnico de energía solar térmica. Volumen II : Aspectos técnicos y normativos*.
- MIEM-DNE (2008). Política energética 2005-2030. <http://www.energiasolar.gub.uy/images/Poltica%20energica%202005-2030.pdf>.

- Muschaweck, J. and Spirkel, W. (1993). Dynamic solar collector performance testing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 30:95–105.
- Osorio, T. and Carvalho, M. (2014). Testing of solar thermal collectors under transient conditions. *Solar Energy*, 104:71–81.
- Peel, M., Finlayson, B., and McMahon, T. (2007). Updated world map of the koppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4.
- Perers, B. (1993). Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation programs. *Solar Energy*, 50(6):517–526.
- Perers, B. (1997). An improved dynamic solar collector test method for determination of non-linear optical and thermal characteristics with multiple regression. *Solar Energy*, 59(4–6):163–178.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., and Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, 45(2):111 – 114.
- Prapas, D., Norton, B., Milonidis, E., and Probert, S. (1988). Response function for solar-energy collectors. *Solar Energy*, 40(4):371 – 383.
- Prapas, D., Norton, B., and Probert, S. (1989). Transient performance testing of a parabolic trough concentrating solar-energy collector. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science*, 203(1):21–29.
- Quarteroni, A., Sacco, R., and Saleri, F. (2000). *Numerical Mathematics*. Springer.
- REN21 (2019). Renewables 2019 global status report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf.
- Rodríguez-Muñoz, J. M., Monetta, A., Bove, I., and Alonso-Suárez, R. (2020). Ensayo cuasi-dinámico de colectores solares de placa plana en uruguay de acuerdo a la norma iso 9806:2017. *ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe*, 4(2):10–26.
- Rogers, B. (1981). A method of collector testing under transient conditions. In *Solar World Forum. Proc. ISES Congress. Brighton, England*, volume 1, pages 898–902.
- Rojas, D., Beermann, S., and Reindl, D. (2008). Thermal performance testing of flat-plate collectors. *Solar Energy*, 82:746–757.
- Russel-Rhinehart, R. (2016). *Nonlinear Regression Modeling for Engineering Applications*. John Wiley & Sons.

- Souka, A. and Safwat, H. (1966). Determination of the optimum orientations for the double-exposure, flat-plate collector and its reflectors. *Solar Energy*, 10(4):170–174.
- Spencer, J. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5):172.
- Spirkl, W. and Muschaweck, J. (1992). General model for testing solar domestic hot water systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 28:93–102.
- Wang, X., Xu, Y., and Meng, X. (1987). A filter method for transient testing of collector performance. *Solar Energy*, 38(2):125 – 134.
- Whillier, A. (1953). *Solar energy collection and its utilization for house heating*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Wijeysundera, N. E. (1978). Comparison of transient heat transfer models for flat plate collectors. *Sol. Energy; (United States)*.
- Zambolin, E. and de Col, D. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84:1382–1396.

Glosario

colectores solares

Un colector solar es un dispositivo que observe parte de la irradiancia solar que incide sobre él y la transforme en potencia útil. En el contexto de esta tesis, la potencia útil se manifiesta en forma de un aumento de temperatura de un flujo de fluido (colector solar térmico).

curva de eficiencia

Función matemática que expresa la eficiencia del colector en términos de los parámetros característicos y las condiciones de funcionamiento.

eficiencia

Cociente entre la potencia útil por unidad de área producida por el colector (\dot{Q}_u/A_c) y la potencia radiante total incidente desde el Sol (G_t).

eficiencia térmica

Cociente entre la potencia útil producida por el colector por unidad de área (\dot{Q}_u/A_c) y la irradiancia solar absorbida por la placa absorbidora (S).

eficiencia óptica

Cociente entre la irradiancia solar absorbida por la placa absorbidora por unidad de área (S) y la irradiancia solar global que incide sobre el colector (G_t).

factor de eficiencia

Cociente entre el factor de pérdidas térmicas U_L y el factor de pérdidas U_0 . Permite expresar la potencia útil producida por el colector en términos de la temperatura media del fluido.

factor de remoción de calor

Cociente entre la potencia útil real y la potencia útil que produciría el colector si toda la placa absorbidora se encontrara a la temperatura del fluido a la entrada, T_i .

fracción difusa

Corresponde al cociente entre la irradiancia solar difusa y la irradiancia solar global.

irradiancia solar difusa

Potencia radiante por unidad de área que incide sobre una superficie y llega desde el sol luego de ser dispersada en la atmósfera.

irradiancia solar directa

Potencia radiante por unidad de área que incide sobre una superficie y llega de forma directa desde el Sol sin ser dispersada en la atmósfera.

irradiancia solar directa en incidencia normal

Irradiancia solar directa que llega a una superficie perpendicular a la dirección del Sol. Se identifica con el símbolo G_b .

irradiancia solar global

Irradiancia solar directa y difusa que llega a un plano en la superficie terrestre.

isotrópica

Que tiene propiedades que son idénticas en todas las direcciones.

modificador por ángulo de incidencia

Función matemática que expresa la dependencia de la eficiencia óptica del colector con el ángulo de incidencia.

placa absorbedora

Componente de un colector solar que absorbe parte de la irradiancia solar incidente y la convierte en potencia útil.

ángulo de incidencia

Ángulo entre la dirección Tierra-Sol y la normal a una superficie.

área bruta

Área máxima proyectada del colector, definida a partir de las medidas exteriores, excluyendo cualquier medio integral de montaje y conexión de tuberías de fluido.

épsilon de la máquina

Corresponde al número decimal más pequeño que, sumado a 1, la computadora nos arroja un valor diferente de 1, es decir, que no es redondeado.