



ENERGÍA **SOLAR**

APLICACIONES E INGENIERÍA

Ing. Pedro Sarmiento M.

Profesor de la Facultad de Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor de la Escuela de Ingeniería Naval
Armada de Chile



EDICIONES UNIVERSITARIAS DE VALPARAÍSO
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

ISBN 956-17-0280-0

© Pedro Sarmiento Martínez, 1985
Inscripción N° 61.887
Derechos Reservados

Cuarta Edición, 2008
Tirada: 300 ejemplares

Ediciones Universitarias de Valparaíso
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Casilla 1415
Teléfono: 2273087 – Fax: 2273439
Valparaíso – Chile
Diseño Gráfico: Guido Olivares S.
Asistente de Diseño: Mauricio Guerra P.
Asistente de Diagramación: Alejandra Larraín R.
Corrección de Pruebas: Osvaldo Oliva P.
Impreso en Libra

HECHO EN CHILE

INTRODUCCIÓN

En el presente texto deseamos entregar al lector los fundamentos de las aplicaciones de la energía solar para calentamiento de agua y aire por medio de colectores planos.

La preparación de estas líneas ha sido motivada por la petición de los participantes en Seminarios de Extensión dados a Ingenieros interesados en este campo y patrocinados por la Universidad Técnica Federico Santa María, como también por sugerencias de los alumnos que han asistido a clases regulares sobre Energía Solar impartidas por el autor.

Aproximadamente treinta horas de exposición y otras cincuenta de trabajo personal, mediante estudio de la materia y resolución de los problemas propuestos permitirían al participante en el Seminario o curso, conocer las posibilidades de la Energía Solar en su actual desarrollo y posteriormente diseñar aplicaciones para calentamiento de agua, calefacción o usos industriales.

Estas líneas podrán por lo tanto servir de texto guía para un curso básico de un semestre regular universitario de dos horas semanales de exposición.

Es opinión del autor que tanto las Universidades de nuestro país como extranjeras irán gradualmente incluyendo una asignatura de Energía Solar Aplicada, primero como ramo electivo y posteriormente como ramo obligatorio en el Curriculum formativo del Ingeniero Mecánico, considerando que este último debe conocer las posibilidades de la Energía Solar, como otra alternativa de energía en su desempeño profesional.

Estando este campo en etapa intensiva de investigación, es importante captar la dinámica del mismo y que estas líneas sólo son un modesto aporte al interesante y acelerado desarrollo de las aplicaciones de la Energía Solar.

PRÓLOGO A LA CUARTA EDICIÓN

El desarrollo sostenido de las aplicaciones de la energía solar en el lapso transcurrido entre la primera y esta edición, nos indujo a agregar algunos nuevos capítulos.

Uno de ellos, dedicados a los sistemas solares pasivos, a su vez ha tenido tal desarrollo, que hemos debido dedicarle un texto aparte, cuyos detalles se incluyen en las referencias del aludido capítulo.

En el Capítulo VIII entregamos una visión de los nuevos diseños y patentes, lo que puede ayudar a obtener una visión del estado del arte y las posibles tendencias de desarrollo. En este capítulo, como en el anterior, incluimos aspectos de ingeniería relativos a sistemas de protección contra heladas y ensayos normalizados de colectores y sistemas. También hemos ampliado los temas de diseño de las instalaciones para piscinas.

Hemos agregados nuevos problemas-ejemplos en los tópicos relacionados con los fundamentos de astronomía (Capítulo II) y el análisis económico de diseño de sistemas (Capítulo X).

A fin de no engrosar indebidamente el texto, el Capítulo XIII, dedicado a dar una visión global de algunos proyectos, tanto del país como del extranjero, y el Capítulo XIV, dedicado a la generación eléctrica solar, los presentamos de manera resumida y más que nada ilustrativa.

Hemos mantenido el sistema métrico de unidades por ser aún el más utilizado en el país. Sin embargo, estando en vigencia el Sistema Internacional de Unidades, SI, los últimos ejemplos y las tablas del Apéndice las hemos desarrollado en este sistema de unidades. Siendo sólo cosa de tiempo para que el sistema SI reemplace al métrico y para facilitar esta transición, hemos incluido además en el apéndice una tabla de equivalencias de unidades.

Agradecemos a la Asociación Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, ASHRAE, por autorizarnos utilizar alguna información relacionada. También al Prof. Elmar Bollin, de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Offenburg, Alemania, por permitirnos ilustrar lo relativo a sistemas evaluados bajo su responsabilidad en el Suroeste de Alemania. Ambas referencias se citan en cada caso.

CONTENIDO

I GENERALIDADES

1.1	Antecedentes históricos	11
1.2	Posibilidades de desarrollo	11
1.3	Aplicaciones	13

II FUNDAMENTOS DE ASTRONOMÍA

2.1	Movimiento de tierra y sus efectos	17
2.2	Definiciones geométricas	18
2.3	Definiciones para observador terrestre	20
2.4	Correcciones para hora solar	21
2.5	Gráficos de desplazamiento solar	22

III RADIACIÓN SOLAR

3.1	Espectro de emisión	33
3.2	Absorbencia, reflexividad y transmisividad	35
3.3	Radiación directa y difusa	35
3.4	El sol	36
	Problemas	37
	Bibliografía	37

IV INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y TABLAS DE RADIACIÓN SOLAR

4.1	Instrumentos de medición de radiación solar	39
4.2	Tabla de datos acumulados de radiación solar	39
	Bibliografía	48

V RELACIONES GEOMÉTRICAS ENTRE PLANO Y RAYO SOLAR

5.1	Relaciones geométricas	49
5.2	Hora de salida del sol	49
	Problemas	50
	Bibliografía	50

VI CÁLCULOS DE LA RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE

6.1	Consideraciones generales	51
6.2	Cálculo de la insolación total mensual y diaria en plano horizontal	51
6.3	Cálculo de la radiación total para hora determinada en plano horizontal	52
6.4	Cálculo de la radiación difusa mensual diaria y a hora determinada en plano horizontal	54
6.5	Cálculo de la radiación directa para superficie inclinada	56
6.6	Cálculo de insolación total para superficie inclinada, para hora determinada o período mensual	57
6.7	Influencia de orientación de la superficie en la insolación para períodos largos	58
	Problemas	59
	Bibliografía	59

VII SISTEMAS Y COLECTORES PLANOS PARA CALENTAMIENTO DE AGUA

7.1	Descripción de sistemas típicos	67
7.2	Controles en sistemas de calentamiento de agua	67
7.3	Diseño de colectores	72
7.4	Distribución de presión y temperatura en colectores y estanques	73
7.5	Criterio de diseño de sistemas	73
7.6	Sistemas anticongelamiento	74
7.7	Intercambiador de calor	75
7.8	Cañerías y accesorios	76
	Bibliografía	76

VIII COMPORTAMIENTO DE COLECTORES

8.1	Resumen de principios de transferencia de calor	77
8.2	Análisis de comportamiento de colectores	79
8.3	Comportamiento de colectores	81
8.4	Determinación experimental del rendimiento del colector	82
8.4a	Ensayos normalizados de colectores	83
8.4b	Curva característica de entrada-salida de energía de instalaciones solares	84

8.5	Determinación teórica del rendimiento del colector	85
8.6	Comportamiento de sistemas de calentamiento solar de agua potable	87
8.7	Colectores para piscinas	89
8.8	Nuevos sistemas de calentamiento solar de agua potable	90
	Problemas	95
	Bibliografía	96
IX	SISTEMAS Y COLECTORES PLANOS PARA CALENTAMIENTO DE AIRE	
9.1	Descripción general	99
9.2	Diseño de colectores	99
9.3	Criterio de diseño de sistemas	100
9.4	Control automático de sistemas	105
	Bibliografía	105
X	PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO PARA DISEÑO DE SISTEMAS	
10.1	Criterios para determinar demanda de energía	107
10.2	Análisis económico de sistemas de energía solar	109
10.3	Determinación de área de colectores	110
10.4	Análisis gráfico de alternativas de un proyecto	120
	Problemas	120
	Bibliografía	121
XI	SISTEMAS PASIVOS	
11.1	Generalidades	123
11.2	Elementos componentes	123
11.3	Clasificación de posibilidades	123
11.4	Evaluación de sistemas pasivos	125
	Bibliografía	130
XII	CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SISTEMAS PASIVOS	
12.1	Consideraciones generales	131
12.2	Aislación	132
12.3	Ventanas	132
12.4	Muro Trombe	133
12.5	Invernadero	136
	Problemas	136
	Bibliografía	137

XIII	ILUSTRACIÓN DE ALGUNAS INSTALACIONES SOLARES EN FUNCIONAMIENTO	
13.1	Algunas instalaciones en el país	139
13.2	Algunas instalaciones en el extranjero	139
XIV	GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	
14.1	Introducción a las celdas fotovoltaicas	155
14.2	Campos de aplicación de las celdas fotovoltaicas	156
14.3	Plantas de fuerza solar-térmica	159
14.4	Consideraciones económicas y perspectivas de generación solar térmica	161
	Bibliografía	162
APÉNDICE		
Tabla 7.	Factor de inclinación mensual para paredes o ventanas	165
Tabla 8.	Grados-día para la República de Chile	167
Tabla 9.	Coefficiente totales de transferencia de calor, U, para diferentes elementos	168
Tabla 10.	Pérdida por el piso de una construcción	169
Tabla 11.	Cálculo aproximado de aire infiltrado, para usar en fórmula 47	169
Tabla 12.	Temperaturas medias mensuales para diversas ciudades del país	170
Tabla 13.	Insolación total mensual horizontal terrestre para algunas localidades del país	172
Tabla 14.	Insolación mensual total para diferentes planos y localidades del país	174
Tabla 15.	Radiación horaria para diferentes planos y localidades del país	215
Tabla 16.	Equivalencias de unidades SI, métrico e inglés, de uso frecuente	250
HOJAS DE TRABAJO		251
ÍNDICE ALFABÉTICO		263