

ÍNDICE

Prefacio.....	1
Capítulo 1. Energía solar.....	3
1.1 Fenomenología.....	3
1.1.1 El Sol.....	3
1.1.2 Tipos de energías que emite el Sol.....	7
1.1.3 Radiación solar y atenuación atmosférica.....	10
1.1.3.1 Dispersión.....	11
1.1.3.2 Reflexión (Albedo).....	11
1.1.3.3 Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión.....	12
1.1.3.4 Radiación directa.....	14
1.1.3.5 Radiación difusa.....	15
1.1.3.6 Radiación global.....	15
1.1.3.7 Balance radiativo.....	16
1.1.4 Constante solar.....	19
1.2 Variabilidad diurna y estacional.....	22
1.2.1 Distribución global de la radiación solar.....	22
1.2.2 Distancia Tierra-Sol.....	23
1.2.3 Declinación del Sol.....	24
1.2.4 La Esfera Celeste.....	26
1.2.5 Sistemas de coordenadas.....	27
1.2.6 Triángulo astronómico para la obtención de la posición del Sol.....	29
1.2.7 Altura del Sol.....	30
1.2.8 Duración astronómica del día (N).....	31
1.2.9 Dirección del haz de radiación.....	32
1.2.10 Medida del tiempo.....	33
1.2.11.1 Tiempo solar verdadero (TSV).....	33
1.2.11.2 Tiempo solar medio (TSM).....	33

1.2.11.3 Ecuación de tiempo (E_t).....	34
1.2.11 Radiación solar extraterrestre.....	34
1.2.12 Unidades de medida de la radiación solar.....	36
Capítulo 2. Aprovechamiento de la energía solar.	37
2.1 Esquemas termosolares.....	37
2.1.1 Colectores de concentración.	37
2.1.2 Calentamiento de agua, calefacción y refrigeración por energía solar.	40
2.1.3 Torres solares.....	44
2.2 Edificaciones bioclimáticas.....	46
2.3 Esquemas fotovoltaicos.	53
2.3.1 Fabricación de las Celdas Solares.....	56
2.3.2 Instalaciones fotovoltaicas aisladas de la red	58
2.3.2.1 Generador fotovoltaico.	58
2.3.2.2 Regulador de carga.	58
2.3.2.3 Inversor.	59
2.3.2.4 Baterías.....	60
2.4 Esquemas termoeléctricos.	60
2.4.1 Configuraciones de centrales solares termoeléctricas.....	62
2.4.1.1 Centrales de Colectores Cilindro Parabólicos (CCP).	62
2.4.1.2 Centrales de Receptor Central o Torre.	63
2.4.1.3 Centrales de Disco Parabólico.....	64
2.4.2 Ventajas de las centrales solares termoeléctricas.	65
Capítulo 3. Plantas termosolares de torre central.	67
3.1 Conceptos básicos.....	67
3.2 Configuraciones existentes y propuestas.....	68
3.1.1 Tecnología Híbrida.	69
3.1.2 Almacenamiento térmico.	70
3.1.3 Plantas Solares de torre a través de la historia.	71

3.3	Cuantificación y variabilidad de potencia.	76
3.4	Descripción de componentes.	79
3.3.1	Subsistema de captación de energía solar.	79
3.3.1.1	Helióstatos.	79
3.3.1.2	Receptor.	81
3.3.2	Subsistema de generación.	84
3.3.3	Subsistema de almacenamiento y recuperación de energía térmica.	87
3.5	Eficiencias de operación de componentes.	90
3.6	Cuantificación de capacidades.	92
Capítulo 4. Evaluación económica de plantas termosolares de torre central.		97
4.1	Costos de inversión.	97
4.2	Costos de operación y mantenimiento.	98
4.2.1	Mantenimiento Correctivo.	100
4.2.2	Mantenimiento Preventivo.	100
4.2.3	Mantenimiento Predictivo.	101
4.2.4	Mantenimiento Proactivo.	101
4.3	Ingresos por ventas de electricidad.	101
4.4	Índices de rentabilidad.	104
4.4.1	Suposiciones.	104
4.4.2	Hermosillo Base.	108
4.4.3	Hermosillo sin Almacenamiento.	109
4.4.4	Oaxaca 150.	109
4.4.5	Oaxaca 200.	109
4.4.6	Valor Presente Neto.	110
4.4.7	Beneficio-Costo.	111
4.4.8	Tasa Interna de Retorno.	112
4.4.9	Costos Nivelados.	113
4.5	Estudios paramétricos y resultados obtenidos.	114

4.5.1 Variante 1.....	115
4.5.2 Variante 2.....	115
4.5.3 Variante 3.....	116
Capítulo 5. Conclusiones.....	119
Bibliografía:.....	127
Mesografía:.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1.1 El Sol.....	4
Figura No. 1.2 Campo magnético del sol.....	5
Figura No. 1.3 Estructura del Sol.....	6
Figura No. 1.4 Energía radiada por el sol y la tierra.....	8
Figura No. 1.5 Espectro de radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra (curva 1) y a nivel del mar para condiciones de cielo despejado (curva 2)	9
Figura No. 1.6 Espectro electromagnético de la radiación solar.....	10
Figura No. 1.7 Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.....	13
Figura No. 1.8 Componente directa de la radiación Sol.....	14
Figura No. 1.9 Esquema de la distribución de la radiación en el sistema tierra – atmósfera.....	17
Figura No. 1.10 Valores de la constante solar medidos por medio de satélites.....	20
Figura No. 1.11 Valores de la constante solar medidos por medio de satélites. Datos originales (arriba) y valores compuestos (abajo).....	20
Figura No. 1.12 Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre.....	21
Figura No. 1.13 Distribución global de la radiación.....	22
Figura No. 1.14 Movimiento de la tierra alrededor del sol.....	23
Figura No. 1.15 Declinación solar.....	25
Figura No. 1.16 Variación anual de la declinación del Sol.....	25

Figura No. 1.17 Declinación solar.....	26
Figura No. 1.18 Sistema de coordenada celestes horizontales.	28
Figura No. 1.19 Sistema Coordenadas celestes ecuatoriales.....	29
Figura No. 1.20 Triangulo astronomico.....	30
Figura No. 1.21 Dirección del haz de radiación solar directa.	32
Figura No. 1.22 Variación anual de la ecuación del tiempo.	34
Figura No. 2.1 Algunas configuraciones de sistemas de concentración.	39
Figura No. 2.2 Concentradores cilíndrico-parabólicos.	40
Figura No. 2.3 Concentradores fresnel.	40
Figura No. 2.4 Calentador de agua con circulación natural, con aporte de energía auxiliar al depósito de almacenamiento.	41
Figura No. 2.5 Calentadores de agua con circulación forzada.....	42
Figura No. 2.6 Placa colectora y tubos en un colector convencional.	43
Figura No. 2.7 Alternativas para calentadores de agua de placas, a) Tubo único; b)Tubo de placa ondulada.....	43
Figura No. 2.8 Torre Solar.	45
Figura No. 2.9 Edificación bioclimática.	47
Figura No. 2.10 Posición recomendada entre dos edificaciones.	48
Figura No. 2.11 Posición recomendada de una edificación.	49
Figura No. 2.12 Adosamiento de un edificio.	49
Figura No. 2.13 Rebote de la insolación hacia la edificación.	50
Figura No. 2.14 Colchón térmico.	50
Figura No. 2.15 Configuración para proteger el interior contra pérdidas térmicas.	51
Figura No. 2.16 Orientación de las Ventanas de un edificio.	51
Figura No. 2.17 Edificación ecológica.....	52
Figura No. 2.18 Funcionamiento de una célula fotovoltaica.	54
Figura No. 2.19 Esquema de sistema conectado a red.	54
Figura No. 2.20 Conversión fotovoltaica.....	56
Figura No. 2.21 Fabricación de celdas solares.....	56

Figura No. 2.22 Esquema básico de funcionamiento de una CET	61
Figura No. 2.23 Colectores cilindro-parabólicos de alta temperatura.	63
Figura No. 2.24 Centrales termoeléctricas de torre central.....	63
Figura No. 2.25 Centrales de Disco parabólico.	64
Figura No. 3.1 Funcionamiento de una central solar de torre central.	67
Figura No. 3.2 Funcionamiento de una planta solar termoeléctrica Híbrida de cilindros parabólicos y ciclo combinado.....	70
Figura No. 3.3 Sistema de almacenamiento térmico para la PS10.....	71
Figura No. 3.4 Funcionamiento de la planta denominada SOLAR TRES.	73
Figura No. 3.5 Proyecto SOLAR TRES de 17MW.	73
Figura No. 3.6 PS10 y PS20 de 11MW Y 20MW respectivamente.....	74
Figura No. 3.7 Funcionamiento de la planta PS10	75
Figura No. 3.8 Mapa obtenido a partir del modelo de la NASA (2005)	76
Figura No. 3.9 Promedio anual de irradiación global diaria en MJ/m ² obtenidas en bases terrestres.	78
Figura No. 3.10 624 Helióstatos Sanlúcar de 120m ² C/U reflejan los rayos del Sol hacia la torre de la PS10.....	79
Figura No. 3.11 Fenómenos de Bloqueos en Helióstatos.....	80
Figura No. 3.12 La planta SOLAR TRES cuenta con un modelo continuo de espejos infinitesimales	81
Figura No. 3.13 El receptor de la PS10 es de tipo de cavidad.....	82
Figura No. 3.14 El receptor de la planta Solar Tres es de tipo de recepción exterior.	83
Figura No. 3.15 Ciclo Combinado Solar Integrado aplicado a una planta solar de Cilindros Parabólicos.....	85
Figura No. 3.16 Sistema de almacenamiento de sales fundidas utilizado en la planta Solar Tres.....	88
Figura No. 3.17 Despachabilidad de una planta de torre central con almacenamiento de sales fundidas	89
Figura No. 4.1 Curva de falla.....	100
Figura No. 4.2 Promedio de irradiación global diaria en Hermosillo, Sonora.....	105

Figura No. 4.3 Diagrama de pie que representa los porcentajes de los costos de los componentes.	110
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1.1 Características del Sol.	4
Tabla No. 1.2 Balance de radiación en W/m^2	18
Tabla No. 1.3 Conversiones útiles para radiación.	36
Tabla No. 3.1 Centrales de torre experimentales en el mundo.	72
Tabla No. 4.1 Tarifas CFE alta tensión Norte, Para energía \$/kWh, para demanda facturable \$/kW.	102
Tabla No. 4.2 Tarifas CFE alta tensión Norte, Para energía \$/kWh, para demanda facturable \$/kW.	102
Tabla No. 4.3 Horarios de demanda	103
Tabla No. 4.4 Costos y características de plantas solares termoeléctricas de torre central.	106
Tabla No. 4.5 VPN y VP Inversión en Millones de US\$ constantes de 2009, costo nivelado en dolares/MWh.	114
Tabla No. 4.6 VPN y VP Inversión en Millones de US\$ constantes de 2009, costo nivelado en dolares/MWh.	115
Tabla No. 4.7 VPN y VP Inversión en Millones de US\$ constantes de 2009, costo nivelado en dolares/MWh.	115
Tabla No. 4.8 VPN y VP Inversión en Millones de US\$ constantes de 2009, costo nivelado en dolares/MWh.	116
Tabla No. 4.9 VPN y VP Inversión en Millones de US\$ constantes de 2009, costo nivelado en dolares/MWh.	116
Tabla No. 4.10 VPN y VP Inversión en Millones de US\$ constantes de 2009, costo nivelado en dolares/MWh.	117
Tabla No. 4.11 VPN y VP Inversión en Millones de US\$ constantes de 2009, costo nivelado en dolares/MWh.	117