

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS



ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE UN SISTEMA TERMOSIFÓNICO CON UN DISPOSITIVO DE CONTROL DE FLUJO

IME Jeovany Rafael Rodríguez Mejía

Tesis de Maestría

presentada a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica
de acuerdo a los requerimientos de la Universidad para obtener el título de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Directores de tesis:

Dr. Francisco Eneldo López Montegudo y Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Zacatecas, Zac., Diciembre de 2015

APROBACIÓN DE TEMA DE TESIS DE MAESTRÍA



IME Jeovany Rafael Rodríguez Mejía

PRESENTE

De acuerdo a su solicitud de tema de Tesis de Maestría del Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con línea Procesamiento Digital de Señales y Mecatrónica, con fecha 3 de Febrero de 2014, se acuerda asignarle el tema titulado:

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE UN SISTEMA TERMOSIFÓNICO CON UN DISPOSITIVO DE CONTROL DE FLUJO

Se nombran revisores de Tesis a los profesores Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo y Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel, notificándole a usted que dispone de un plazo máximo de seis meses, a partir de la presente fecha, para la conclusión del documento final debidamente revisado.

Atentamente

Zacatecas, Zac., Julio de 2014

Dr. Carlos Hector Castañeda Ramírez

Director de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA



IME Jeovany Rafael Rodríguez Mejía

PRESENTE

La Dirección de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica le notifica a usted que la Comisión Revisora de su documento de Tesis de Maestría, integrada por los profesores Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo y Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel, ha concluido la revisión del mismo y ha dado la aprobación para su respectiva presentación.

Por lo anterior, se le autoriza a usted la impresión definitiva de su documento de Tesis para la respectiva defensa en el Examen Profesional, a presentarse el Diciembre de 2015

Atentamente

Zacatecas, Zac., Diciembre de 2015

Dr. Carlos Hector Castañeda Ramírez

Director de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica

APROBACIÓN DE EXAMEN PROFESIONAL



Se aprueba por unanimidad el Examen Profesional de IME Jeovany Rafael Rodríguez Mejía presentado el Diciembre de 2015 para obtener el título de:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Jurado:

Presidente: Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo _____

Primer vocal: Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel _____

Segundo vocal: Dr. Carlos Alberto Olvera Olvera _____

Tercer vocal: Dr. Jesus Manuel Rivas Martínez _____

Cuarto vocal: Dr. Alfonso López Martínez _____

RESUMEN

Las energías renovables hoy en día se han convertido en un tema de investigación, debido a los serios problemas a causa del cambio climático, el agotamiento de los recursos petrolíferos y los altos precios de los energéticos primarios. Se escucha hablar mucho de la producción de energía eléctrica a partir de los generadores eólicos, y las celdas fotovoltaicas. Por otra parte es poco lo que se transmite con respecto a la energía termosolar. Es por eso que la investigación se basó en los problemas que suelen presentar actualmente los calentadores solares de agua del tipo de placa plana, debido a que estos suelen afectar el rendimiento y operación del sistema termosolar. El objetivo de la investigación fue controlar el flujo del fluido en el proceso de calentamiento de agua de servicio en los sistemas termosifónicos de placa plana, buscando mejorar el rendimiento térmico durante su operación diaria.

La hipótesis planteada en este trabajo fue que mediante los dispositivos de control es posible incrementar al menos 1 % el rendimiento térmico en el proceso de calentamiento de agua, además de que al emplear el dispositivo de control es posible mantener la eficiencia térmica promedio en el equipo a distintas condiciones ambientales.

La metodología que se desarrolló fue basada en la simulación del proceso, caracterización y evaluación del equipo termosolar. Esto fue para identificar las variables posibles a controlar en el sistema, logrando proponer un controlador que mejoró la operación del calentador solar. El rendimiento del equipo termosolar fue evaluado con el controlador implementado, y se logró observar una mejora en la operación y rendimiento térmico del sistema termosifónico de placa plana.

Contenido General

	Pag.
Resumen	iv
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	xiv
Nomenclatura	xvi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	9
1.3 Justificación	9
1.4 Hipótesis	10
1.5 Objetivos	11
2 Fundamentos teóricos	12
2.1 Energía Solar	12
2.2 Instrumentos de medición	19
2.3 Sistemas de calentamiento solar de agua	23
2.4 Almacenamiento de energía térmica	32
2.5 Controlador diferencial de temperatura	38
2.6 Demanda de agua caliente	39
2.7 Control aplicado a sistemas térmicos	41
3 Planta solar de pruebas	52
3.1 Diseño de planta solar de pruebas	52
3.2 Proceso de caracterización del sistema de calentamiento solar de agua	52
3.2.1 Instrumentación	53
3.2.2 Mecanismos de medición	54
3.3 Planta solar de pruebas	55
3.3.1 Superficie de planta	55
3.3.2 Estación meteorológica	56
3.3.3 Sistema termosifónico de calentamiento solar (colector de placa plana)	63

	Pag.
3.4 Metodología de prueba de planta solar	67
3.4.1 Acondicionamiento inicial de la prueba	68
3.5 Evaluación y cálculos térmicos de la planta solar	70
4 Resultados experimentales	71
4.1 Modelo matemático del calentador solar en MatLab/Simulink	71
4.1.1 Simulación calentador solar	75
4.2 Evaluación térmica del sistema termosifónico	92
4.2.1 Operación del sistema	92
4.2.2 Gráficas y tablas de la operación del sistema	94
5 Resultados experimentales de la etapa de control	160
5.1 Evaluación térmica con el sistema de control	165
5.1.1 Gráficas y tablas de operación del sistema con etapa de control	165
Conclusiones	190
Referencias	196

Lista de figuras

Figura	Pag.
2.1 Espectro electromagnético de la radiación solar.	13
2.2 Distancia entre el Sol y Tierra.	14
2.3 Movimiento terrestre alrededor del sol.	15
2.4 Ángulos solares.	16
2.5 Componentes de la radiación en superficies inclinadas.	17
2.6 Ángulos solares con respecto a una superficie inclinada.	18
2.7 Piranómetro.	19
2.8 Pirheliómetro.	20
2.9 Flujómetro.	20
2.10 Sensor de temperatura.	21
2.11 Bomba centrífuga sumergible.	22
2.12 Colector de placa plana.	25
2.13 Calentador solar de placa plana.	26
2.14 Esquema de la transmisión y absorción de la radiación.	27
2.15 Modelo eléctrico R_L	28
2.16 Modelo eléctrico U_L	30
2.17 Constante de tiempo del colector.	32
2.18 Efecto de flotación.	36

Figura	Pag.
2.19	Uso típico de agua caliente. 40
2.20	Demanda de agua caliente. 41
2.21	Sistema de control lazo abierto. 42
2.22	Sistema de control lazo cerrado. 42
2.23	Modelo sistema térmico fuente de temperatura. 45
2.24	Modelo eléctrico del sistema térmico. 45
2.25	Modelo sistema térmico fuente de calor. 46
2.26	a) Modelo eléctrico equivalente b) Diagrama del calentador solar equivalente. 47
2.27	a) Modelo eléctrico equivalente b) Diagrama del tanque de almacenamiento equivalente. 48
2.28	Diagrama del modelo térmico del calentador solar Axol. 49
2.29	Módulo de control On/Off. 50
2.30	Módulo de control On/Off con histeresis. 51
3.1	a) Superficie de planta vista lateral, b) Superficie de planta vista frontal. 56
3.2	a) Estación meteorológica diseñada, b) Estación meteorológica instalada. 56
3.3	Sensor de radiación. 57
3.4	Anemómetro. 58
3.5	Sensor digital de temperatura. 59
3.6	Caudalímetro instalado. 59
3.7	Arduino Mega 2560. 60
3.8	a) Esquema eléctrico del DAQ, b) Vista real del esquema eléctrico del DAQ. 61
3.9	Diagrama acondicionado de velocidad. 62
3.10	Diagrama etapa de potencia. 62
3.11	Diagrama Hardware-Software. 63

Figura	Pag.
3.12 Tanque de almacenamiento.	63
3.13 Base estructural del calentador.	64
3.14 Colector plano.	64
3.15 a) Válvula de eliminación de aire, b) Válvula de anti congelamiento.	65
3.16 Colector solar de placa plana.	65
3.17 Adaptación de los sensores DS18B20.	66
3.18 Sensor YF-21 adaptado al sistema.	67
4.1 Diagrama del modelo eléctrico-matemático del colector solar.	72
4.2 Diagrama en bloques del modelo térmico del colector solar.	72
4.3 Diagrama del modelo eléctrico-matemático del tanque de almacenamiento.	73
4.4 Diagrama en bloques del modelo térmico del tanque de almacenamiento.	73
4.5 Diagrama del modelo eléctrico-matemático del Calentador Solar.	74
4.6 Diagrama de bloques del modelo térmico del Calentador Solar.	74
4.7 Modelo global del calentador solar Axol.	75
4.8 Diagrama equivalente del calentador solar Axol.	76
4.9 Modelo A de simulación respecto a R_1	78
4.10 Modelo B de simulación respecto a R_2	78
4.11 Modelo C de simulación respecto a R_3	78
4.12 Modelo A de simulación con R1.	79
4.13 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.	80
4.14 Gradiente de temperatura de simulación modelo A.	80
4.15 Modelo A modificado de simulación con R1.	81
4.16 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.	81

Figura	Pag.
4.17	Gradiente de temperatura de simulación del modelo A modificado. 81
4.18	Modelo B de simulación con R2. 82
4.19	a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada. 82
4.20	Gradiente de temperatura de simulación modelo B. 83
4.21	Modelo B modificado de simulación con R2. 83
4.22	a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada. 84
4.23	Gradiente de temperatura de simulación modelo B modificado. 84
4.24	Modelo C de simulación con R3. 85
4.25	a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada. 85
4.26	Gradiente de temperatura de simulación modelo C. 86
4.27	Modelo C modificado de simulación con R3. 86
4.28	a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada. 87
4.29	Gradiente de temperatura de simulación modelo C modificado. 87
4.30	Modelo termosifón. 88
4.31	a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada. 89
4.32	Gradiente de temperatura del modelo termosifón. 89
4.33	Modelo termosifón modificado de simulación. 90
4.34	a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada. 90
4.35	Gradiente de temperatura del modelo termosifón modificado. 91
4.36	Irradiancia: 30 de Marzo 2015. 94
4.37	Velocidad de viento: 30 de Marzo 2015. 94
4.38	Temperatura ambiente: 30 de Marzo 2015. 95
4.39	Temperatura entrada al colector: 30 de Marzo 2015. 95

Figura	Pag.
4.40	Temperatura salida del colector: 30 de Marzo 2015. 96
4.41	Temperatura salida servicio del tanque: 30 de Marzo 2015. 96
4.42	Operación del colector: 30 de Marzo 2015. 97
4.43	Irradiancia: 01 de Abril 2015. 99
4.44	Velocidad de viento: 01 de Abril 2015. 99
4.45	Temperatura ambiente: 01 de Abril 2015. 100
4.46	Temperatura entrada al colector: 01 de Abril 2015. 100
4.47	Temperatura salida del colector: 01 de Abril 2015. 101
4.48	Temperatura salida servicio del tanque: 01 de Abril 2015. 101
4.49	Operación del colector: 01 de Abril 2015. 102
4.50	Irradiancia: 02 de Abril 2015. 104
4.51	Velocidad de viento: 02 de Abril 2015. 104
4.52	Temperatura ambiente: 02 de Abril 2015. 105
4.53	Temperatura entrada al colector: 02 de Abril 2015. 105
4.54	Temperatura salida del colector: 02 de Abril 2015. 106
4.55	Temperatura salida servicio del tanque: 02 de Abril 2015. 106
4.56	Operación del colector: 02 de Abril 2015. 107
4.57	Irradiancia: 03 de Abril 2015. 109
4.58	Velocidad de viento: 03 de Abril 2015. 109
4.59	Temperatura ambiente: 03 de Abril 2015. 110
4.60	Temperatura entrada al colector: 03 de Abril 2015. 110
4.61	Temperatura salida del colector: 03 de Abril 2015. 111
4.62	Temperatura salida servicio del tanque: 03 de Abril 2015. 111

Figura	Pag.
4.63 Operación del colector: 03 de Abril 2015.	112
4.64 Irradiancia: 05 de Abril 2015.	114
4.65 Velocidad de viento: 05 de Abril 2015.	114
4.66 Temperatura ambiente: 05 de Abril 2015.	115
4.67 Temperatura entrada al colector: 05 de Abril 2015.	115
4.68 Temperatura salida del colector: 05 de Abril 2015.	116
4.69 Temperatura salida servicio del tanque: 05 de Abril 2015.	116
4.70 Operación del colector: 05 de Abril 2015.	117
4.71 Irradiancia: 07 de Abril 2015.	119
4.72 Velocidad de viento: 07 de Abril 2015.	119
4.73 Temperatura ambiente: 07 de Abril 2015.	120
4.74 Temperatura entrada al colector: 07 de Abril 2015.	120
4.75 Temperatura salida del colector: 07 de Abril 2015.	121
4.76 Temperatura salida servicio del tanque: 07 de Abril 2015.	121
4.77 Operación del colector: 07 de Abril 2015.	122
4.78 Irradiancia: 08 de Abril 2015.	124
4.79 Velocidad de viento: 08 de Abril 2015.	124
4.80 Temperatura ambiente: 08 de Abril 2015.	125
4.81 Temperatura entrada al colector: 08 de Abril 2015.	125
4.82 Temperatura salida del colector: 08 de Abril 2015.	126
4.83 Temperatura salida servicio del tanque: 08 de Abril 2015.	126
4.84 Operación del colector: 08 de Abril 2015.	127
4.85 Irradiancia: 09 de Abril 2015.	129

Figura	Pag.
4.86 Velocidad de viento: 09 de Abril 2015.	129
4.87 Temperatura ambiente: 09 de Abril 2015.	130
4.88 Temperatura entrada al colector: 09 de Abril 2015.	130
4.89 Temperatura salida del colector: 09 de Abril 2015.	131
4.90 Temperatura salida servicio del tanque: 09 de Abril 2015.	131
4.91 Operación del colector: 09 de Abril 2015.	132
4.92 Irradiancia: 30 de Abril 2015.	134
4.93 Velocidad de viento: 30 de Abril 2015.	134
4.94 Temperatura ambiente: 30 de Abril 2015.	134
4.95 Temperatura entrada al colector: 30 de Abril 2015.	135
4.96 Temperatura salida del colector: 30 de Abril 2015.	135
4.97 Temperatura salida servicio del tanque: 30 de Abril 2015.	135
4.98 Operación del colector: 30 de Abril 2015.	136
4.99 Irradiancia: 01 de Mayo 2015.	138
4.100 Velocidad de viento: 01 de Mayo 2015.	138
4.101 Temperatura ambiente: 01 de Mayo 2015.	138
4.102 Temperatura entrada al colector: 01 de Mayo 2015.	139
4.103 Temperatura salida del colector: 01 de Mayo 2015.	139
4.104 Temperatura salida servicio del tanque: 01 de Mayo 2015.	139
4.105 Operación del colector: 01 de Mayo 2015.	140
4.106 Irradiancia: 02 de Mayo 2015.	142
4.107 Velocidad de viento: 02 de Mayo 2015.	142
4.108 Temperatura ambiente: 02 de Mayo 2015.	142

Figura	Pag.
4.109 Temperatura entrada al colector: 02 de Mayo 2015.	143
4.110 Temperatura salida del colector: 02 de Mayo 2015.	143
4.111 Temperatura salida servicio del tanque: 02 de Mayo 2015.	143
4.112 Operación del colector: 02 de Abril 2015.	144
4.113 Irradiancia: 03 de Mayo 2015.	146
4.114 Velocidad de viento: 03 de Mayo 2015.	146
4.115 Temperatura ambiente: 03 de Mayo 2015.	146
4.116 Temperatura entrada al colector: 03 de Mayo 2015.	147
4.117 Temperatura salida del colector: 03 de Mayo 2015.	147
4.118 Temperatura salida servicio del tanque: 03 de Mayo 2015.	147
4.119 Operación del colector: 03 de Mayo 2015.	148
4.120 Irradiancia: 04 de Mayo 2015.	150
4.121 Velocidad de viento: 04 de Mayo 2015.	150
4.122 Temperatura ambiente: 04 de Mayo 2015.	150
4.123 Temperatura entrada al colector: 04 de Mayo 2015.	151
4.124 Temperatura salida del colector: 04 de Mayo 2015.	151
4.125 Temperatura salida servicio del tanque: 04 de Mayo 2015.	151
4.126 Operación del colector: 04 de Mayo 2015.	152
4.127 Irradiancia: 11 de Mayo 2015.	154
4.128 Velocidad de viento: 11 de Mayo 2015.	154
4.129 Temperatura ambiente: 11 de Mayo 2015.	155
4.130 Temperatura entrada al colector: 11 de Mayo 2015.	155
4.131 Temperatura salida del colector: 11 de Mayo 2015.	156

Figura	Pag.
4.132 Temperatura salida servicio del tanque: 11 de Mayo 2015.	156
4.133 Operación del colector: 11 de Mayo 2015.	157
5.1 Diagrama control on-off con histéresis.	161
5.2 Diagrama de control on-off con histéresis del sistema.	162
5.3 Ley de control del controlador On-Off con histéresis.	162
5.4 Gabinete de control.	163
5.5 a) Receptáculo de la bomba b) Tuberías acopladas c) Bomba sumergible d) Receptáculo completo.	164
5.6 Gabinete de control instalado.	164
5.7 Irradiancia: 07 de Mayo 2015.	166
5.8 Velocidad de viento: 07 de Mayo 2015.	166
5.9 Temperatura ambiente: 07 de Mayo 2015.	166
5.10 Temperatura entrada al colector: 07 de Mayo 2015.	167
5.11 Temperatura salida del colector: 07 de Mayo 2015.	167
5.12 Operación del colector: 07 de Mayo 2015.	168
5.13 Irradiancia: 08 de Mayo 2015.	170
5.14 Velocidad de viento: 08 de Mayo 2015.	170
5.15 Temperatura ambiente: 08 de Mayo 2015.	171
5.16 Temperatura entrada al colector: 08 de Mayo 2015.	171
5.17 Temperatura salida del colector: 08 de Mayo 2015.	172
5.18 Temperatura salida servicio del tanque: 08 de Mayo 2015.	172
5.19 Operación del colector: 08 de Mayo 2015.	173
5.20 Irradiancia: 09 de Mayo 2015.	175

Figura	Pag.
5.21 Velocidad de viento: 09 de Mayo 2015.	175
5.22 Temperatura ambiente: 09 de Mayo 2015.	176
5.23 Temperatura entrada al colector: 09 de Mayo 2015.	176
5.24 Temperatura salida del colector: 09 de Mayo 2015.	177
5.25 Operación del colector: 09 de Mayo 2015.	177
5.26 Irradiancia: 10 de Mayo 2015.	179
5.27 Velocidad de viento: 10 de Mayo 2015.	179
5.28 Temperatura ambiente: 10 de Mayo 2015.	180
5.29 Temperatura entrada al colector: 10 de Mayo 2015.	180
5.30 Temperatura salida del colector: 10 de Mayo 2015.	181
5.31 Temperatura salida servicio del tanque: 10 de Mayo 2015.	181
5.32 Operación del colector: 10 de Mayo 2015.	182
5.33 Irradiancia: 26 de Mayo 2015.	184
5.34 Velocidad de viento: 26 de Mayo 2015.	184
5.35 Temperatura ambiente: 26 de Mayo 2015.	185
5.36 Temperatura entrada al colector: 26 de Mayo 2015.	185
5.37 Temperatura salida del colector: 26 de Mayo 2015.	186
5.38 Temperatura salida servicio del tanque: 26 de Mayo 2015.	186
5.39 Operación del colector: 26 de Mayo 2015.	187

Lista de tablas

Tabla	Pag.
4.1 Parámetros constantes del sistema.	77
4.2 Parámetros cuantificados del sistema.	93
4.3 Variables medidas del sistema: 30 de Marzo 2015.	98
4.4 Variables medidas del sistema: 01 de Abril 2015.	103
4.5 Variables medidas del sistema: 02 de Abril 2015.	108
4.6 Variables medidas del sistema: 03 de Abril 2015.	113
4.7 Variables medidas del sistema: 05 de Abril 2015.	118
4.8 Variables medidas del sistema: 07 de Abril 2015.	123
4.9 Variables medidas del sistema: 08 de Abril 2015.	128
4.10 Variables medidas del sistema: 09 de Abril 2015.	133
4.11 Variables medidas del sistema: 30 de Abril 2015.	137
4.12 Variables medidas del sistema: 01 de Mayo 2015.	141
4.13 Variables medidas del sistema: 02 de Mayo 2015.	145
4.14 Variables medidas del sistema: 03 de Mayo 2015.	149
4.15 Variables medidas del sistema: 04 de Mayo 2015.	153
4.16 Variables medidas del sistema: 11 de Mayo 2015.	158
4.17 Parámetros cuantificados del sistema.	159
5.1 Variables medidas del sistema: 07 de Mayo 2015.	169

Tabla	Pag.
5.2 Variables medidas del sistema: 08 de Mayo 2015.	174
5.3 Variables medidas del sistema: 09 de Mayo 2015.	178
5.4 Variables medidas del sistema: 10 de Mayo 2015.	183
5.5 Variables medidas del sistema: 26 de Mayo 2015.	188
5.6 Parámetros cuantificados del calentador solar con un sistema de control.	189

Nomenclatura

Lista de símbolos

α	Factor de absorción de energía, ángulo de altitud solar
β	Ángulo de inclinación de la superficie del colector solar
γ	Ángulo de azimuth solar
γ_s	Ángulo de azimuth solar a la puesta de sol
δ	Ángulo de declinación solar
δ_a	Espesor del aislante
ϵ_g	Emisividad infrarroja de cubierta
ϵ_p	Emisividad infrarroja de la placa
η	Factor de eficiencia térmica del colector solar
η_c	Eficiencia promedio del captador solar
θ	Ángulo de incidencia solar
$\theta_i(t)$	Temperatura del flujo de entrada
$\theta_o(t)$	Temperatura del flujo de salida
θ_z	Ángulo zenith

λ	Calor de transformación de fase
ν	Viscosidad cinemática
ρ	Densidad del agua
ρ_D	Factor de reflectancia directa
ρ_s	Factor de corrección de reflectancia del suelo
σ	Constante Stefan Boltzman
τ	Factor de transmitancia de energía
τ_b	Factor de transmitancia atmosférica a cielo abierto
$\tau\alpha$	Factor de eficiencia óptica
ϕ	Ángulo de latitud
ω	Ángulo horario
ω_{ss}	Ángulo horario de puesta de sol
A_a	Área del aislante
A_c	Área de apertura del colector
c_f	Capacidad térmica del fluido
c_p	Capacidad térmica del tubo
C_p	Calor específico del agua
C_T	Capacitancia térmica
D	Demanda de energía
d_i	Diámetro interno del tubo

E_{pda}	Energía solar promedio diario anual
f	Constante de flujo laminar
F_R	Factor de remoción de calor
G	Irradiancia
G_b	Irradiancia componente directa
G_{Bt}	Irradiancia componente directa inclinada
G_{Bn}	Irradiancia componente directa normal
G_{cb}	Radiación solar a cielo claro
G_d	Irradiancia componente difusa
G_g	Irradiancia componente global
G_{on}	Radiación solar extraterrestre
G_{sc}	Factor de constante solar
G_T	Irradiancia componente inclinada
H_{cv}	Coficiente convectivo
h_f	Caída de presión por fricción
I	Irradiación
I_b	Irradiación componente directa
I_d	Irradiación componente difusa
I_T	Irradiación inclinada
K	Coficiente de transferencia de calor

k	Conductividad térmica
K_a	Conductividad térmica del aislante
K_{cd}	Coficiente de transferencia de calor por conducción
K_{cv}	Coficiente de transferencia de calor por convección
k_i	Constante de integración
k_p	Constante de proporcionalidad
L	Distancia entre la cubierta y la placa
l	Longitud de tubería
L_{loc}	Ángulo de longitud local
L_{st}	Ángulo del meridiano estándar
m	Constante definida de masa
m_f	Masa del fluido
m_p	Masa del tubo
N	Longitud del día solar
n	Número de días del año, del 1 al 365.
N_g	Número de cubiertas
p	Presión
Q	Calor sensible
q	Calor por conducción
Q_p	Calor perdido

Q_T	Calor en el tanque de almacenamiento
Q_u	Calor útil
R_b	Factor de relación entre el ángulo de incidencia solar y el de azimuth solar
R_L	Factor de correlación de pérdidas
R_T	Resistencia térmica
S	Radiación solar absorbida
S_{ON}	Energía absorbida al inicio
S_T	Radiación solar absorbida por una superficie inclinada
T_a	Temperatura ambiente
T_{ac}	Temperatura de agua caliente
T_{af}	Temperatura de agua fría
T_i	Temperatura de entrada
T_{iT}	Temperatura de entrada al tanque
T_m	Temperatura de agua fría de red municipal
T_o	Temperatura de salida
T_{of}	Temperatura del agua de salida final
T_{OFF}	Temperatura de desconexión
T_{ON}	Temperatura de conexión
T_{ot}	Temperatura del agua de salida después de un tiempo t
T_{oT}	Temperatura de salida del tanque

T_p	Temperatura de la placa
T_T	Temperatura del tanque
T_w	Temperatura de agua de distribución
U_b	Coficiente de pérdidas en la parte trasera
U_e	Coficiente de pérdidas en los laterales
U_L	Coficiente de pérdidas de calor
U_t	Coficiente de pérdidas en la superficie
V	Volumen de consumo
V_c	Velocidad del agua caliente
V_d	Volumen por día
V_f	Velocidad del agua fría
V_v	Velocidad de viento

Lista de abreviaturas

DTC	Controlador Diferencial de Temperatura
ET	Ecuación del tiempo
TC	Escala de tiempo civil
TS	Escala de tiempo solar
UV	Ultra Violeta

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El calentamiento de agua a partir de la energía solar ha existido desde hace bastante tiempo, ya que es una forma fácil de utilizar el recurso energético, además de proveer un ahorro de combustibles fósiles y dinero.

Las primeras aplicaciones de la energía solar se dieron al utilizar una olla llena de agua, y que al ponerla al sol durante todo el día se logró obtener agua caliente para utilizarse por la noche. Esta aplicación fue la base para el desarrollo de la investigación del calentamiento de agua a partir de la energía solar. El primer calentador solar de agua, estaba formado por un tanque de metal pintado de color negro colocado sobre el techo, con la finalidad de calentar el agua de forma mas rápida. Este equipo funcionó, pero tomó todo el día para calentar el agua y al final se enfrió con gran rapidez, por la falta de un aislamiento térmico. En base a este primer equipo, a la investigación termosolar aplicada y el avance tecnológico se dió el desarrollo de los calentadores solares como los conocemos hoy en día [1].

Los beneficios ambientales por el uso de los calentadores solares son altos, pues al ser utilizados por más de 20 años llegan a representar aproximadamente 50 toneladas de dióxido de carbono no emitidas al ambiente. Los beneficios económicos se ven al reducir el costo durante el proceso de calentamiento de agua, hasta el punto de hacer casi nula la necesidad del consumo de combustible fósil.

La energía térmica se utiliza para el calentamiento de fluidos como el agua o el aire, con el fin de elevar el confort en los diferentes sectores como el residencial ó industrial. Entonces el calentamiento de agua a partir de la energía solar es una alternativa aplicada mundialmente. Para finales del 2004 se tenían instalados a nivel global 164 millones de metros cuadrados de área de captación solar con una capacidad instalada de cerca de 115 GWh. En el ámbito internacional China es el líder del mercado con un 38 % de la capacidad instalada, seguido por Estados Unidos al tener el 17 %, la Unión Europea representa un 10.4 % y Japón un 4.7 %, en relación a estas cifras México representa un valor menor al 1 % por tal motivo no es contabilizado. Relacionando la producción anual de energía generada por los calentadores solares durante el período del 2004, en los países mencionados, se alcanzó alrededor de 68, 000 GWh, que equivale a 244, 800 TJ. Si se relaciona ésta energía con litros de petróleo alcanzan a ser 10.8 billones de litros reducidos, aproximadamente 29.6 millones de toneladas de dióxido de carbono [2].

El desarrollo de las energías renovables en México ha estado presente por más de 30 años, la cual ha sido una labor de desarrollo por parte de las instituciones académicas y centros de investigación, logrando la generación de empresas dedicadas a la fabricación, importación y comercialización de esta tecnología. En México se estima que la cantidad de energía usada para el calentamiento de fluidos de servicio a baja temperatura es cerca de 230 Peta Joules por año, de acuerdo al balance energético nacional alcanza a ser un 6 % del consumo energético final del país. Por lo tanto México debido a su ubicación preferente que tiene con respecto a otros países, cuenta con excelentes recursos energéticos alcanzando un promedio de 5 KWh/m² por día, si este recurso fuese aprovechado al máximo con equipos termo solares la cantidad de energía aprovechada sería equivalente a la existente en un metro cubico de gas natural [2].

Para que el país pudiera aprovechar este recurso en su totalidad y poder suplir el gasto energético de los 230 Peta Joules, tendría que tener un área con captadores solares de alrededor de 70 millones de m², reduciendo así hasta 4 millones de toneladas de emisiones de CO₂. Para el 2004 se tenían instalados alrededor de 650 000 m², con un crecimiento anual de 70, 000 m². Con base a las cifras postuladas por la Unión Europea, en algunos países existen alrededor de

240 m² de calentadores solares instalados por cada 100 habitantes, comparándolo con México donde por cada 100 habitantes solo hay 0.33 m² de colectores instalados [2].

Es por eso que el gobierno mexicano desarrolló el programa denominado PROCALSOL, el cual tenía como objetivo impulsar en distintos sectores del país para el aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua, garantizar la calidad de los productos, favorecer el desarrollo de la industria nacional y promover la adopción de la tecnología que es desarrollada en los centros de investigación nacional. Se planteó como meta tener instalados para el 2012 alrededor de 1,800,000 m² de calentadores solares. Además de tomar en cuenta para la verificación de la calidad del producto la Norma voluntaria NMX-ES-001-NORMEX-2005 desarrollada por la ANES en el 2005; así como tomar en cuenta el laboratorio de pruebas acreditado de la Universidad de Guanajuato para cumplir esta norma [2].

En cuanto al desarrollo de la investigación dada en el país con respecto a los calentadores solares de placa plana son vastas y se pueden mencionar los proyectos de mayor influencia. Dentro de las primeras investigaciones se da el proyecto desarrollado alrededor de 1979 por parte de ingenieros de la UNAM, los cuales llevaron a cabo un análisis experimental del calentamiento solar termosifónico, donde se presenta la experimentación de dos calentadores solares de agua modificando la colocación del tanque de almacenamiento térmico, además de presentar las características de cada uno de los elementos integrantes de un calentador solar. También se presenta la descripción del funcionamiento con base a la experimentación realizada, presentando como resultados la distribución del agua caliente en el tanque de almacenamiento, las diferentes temperaturas de calentamiento y enfriamiento del agua, así como algunas modificaciones realizadas en la cubierta de la placa del colector usando superficies selectivas y superficies negras [3].

El paso del tiempo generó nuevos conceptos y problemas a resolver con base al desarrollo de los calentadores solares, dando la pauta a seguir investigando en el tema y para el 2002 se encuentran algunas investigaciones referentes a los calentadores solares de placa plana, una de ellas es el desarrollo de un algoritmo para el diseño y evaluación de termosifones solares, donde se presenta una metodología para el análisis del comportamiento del termosifón, tomando en cuenta cada componente del calentador solar; por lo tanto se logra crear un algoritmo para el

diseño y evaluación analítica de un termosifón, profundizando en su operación y los fenómenos termohidráulicos que se presentan en el proceso del calentamiento de agua a partir de un equipo termosifónico, éste algoritmo se desarrolla en un lenguaje de programación [4].

En el reporte del diseño, construcción y evaluación de un calentador solar de plástico de tipo termosifón; se presentan los datos técnicos del termosifón, así como una descripción completa de sus componentes y los procesos de transferencia de energía, que hacen posible el aumento de temperatura del agua. Además de esta información técnica se realizan propuestas para el cambio de algunos materiales dentro de los componentes del termosifón para mejorar la eficiencia térmica, la reducción de costos y el diseño [5].

En los últimos años, se realizó un análisis experimental de un modelo de calentador solar de placa plana con la técnica del PIV (Velocimetría de partículas a partir de imágenes), teniendo como objetivo determinar los valores de velocidad del fluido y las temperaturas alcanzadas en diferentes configuraciones del modelo adaptado, con diferentes valores de energía incidida sobre el sistema. Como resultados se presentaron los valores alcanzados en la evaluación; la velocidad del fluido, temperatura alcanzada por el sistema, perfiles de velocidad del fluido y el rendimiento térmico logrado a diferentes configuraciones [6].

El desarrollo de la investigación en el ámbito de la energía solar y sus aplicaciones, ha sido vasta en México, este trabajo se ha realizado por parte de las instituciones educativas y centros de investigación los cuales han dado gran relevancia a la temática relacionada con las aplicaciones viables del recurso energético proveniente del sol. Los institutos de mayor relevancia se encuentran el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, quien realiza investigación relacionada con la aplicación de energía solar. Otras instituciones también enfocadas al ámbito solar son la Universidad Autónoma Metropolitana, el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad de Guanajuato en donde se realizan investigaciones relevantes que están firmemente relacionadas con el uso y aplicación de la energía solar. Con investigaciones enfocadas al desarrollo y aplicación de dispositivos solares, desarrollo de banco de pruebas de colectores solares, desarrollo de software para el diseño y la evaluación de calentadores de aire y agua [7].

En el ámbito internacional las investigaciones actuales que se han dado con respecto a los colectores solares muestran los rendimientos alcanzados a determinadas características, los valores logrados en la experimentación en laboratorio, así como las mejoras planteadas de los mismos prototipos.

- **Tasa de flujo de fluido óptimo para colectores solares.**

El estudio se basa en el análisis del flujo del fluido en calentadores solares y la relación que tiene con el rendimiento del sistema. El estudio muestra los resultados para sistemas a diferentes escalas de dimensión en cuanto a calentamiento de agua. Los valores obtenidos para sistemas de consumo pequeño; se demanda un mayor rendimiento a una tasa de flujo del fluido de entre 0.2 L/min m^2 y 0.3 L/min m^2 y para sistemas de consumo grande; el mayor rendimiento se da a una tasa de flujo de 0.2 L/min m^2 [8].

- **Diseño y construcción de un calentador solar didáctico.**

La investigación describe el diseño, construcción y operación de un prototipo para la demostración de la conversión de la energía solar en energía térmica por medio de la absorción de la radiación sobre una superficie negra. El prototipo consta de un sistema de captación solar, un acumulador térmico y un circuito electrónico para el monitoreo de la temperatura del sistema [9].

- **Obtención del flujo de diseño y rendimiento de los colectores de calentamiento solar de agua de circulación natural.**

En este estudio se muestra el diseño y análisis experimental del flujo de entrada al calentador solar de agua de circulación natural, donde el calentador fue construido y evaluado en Ado Ekiti, Nigeria con una latitud de 7.5° N . Los resultados obtenidos muestran que el rendimiento del sistema depende en gran medida de la tasa de flujo a través del colector así como la radiación solar incidente. Se evalúa el sistema en un día típico, donde

se muestra que la eficiencia del colector es alta especialmente alrededor del mediodía, cuando el sistema recibe la más alta cantidad de energía. Durante la evaluación los resultados mostraron que el prototipo exhibió una tasa de flujo másico óptimo de 0.1 kg/s m^2 logrando una eficiencia máxima de 68.5% . También se logra determinar el promedio de eficiencia diaria del sistema alcanzando un valor de 57.7% así como la temperatura máxima alcanzada en el agua de $83.5 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la temperatura ambiente alcanzada fue de $34.5 \text{ }^\circ\text{C}$ [10].

- **Predicción de las características térmicas para un calentador solar de agua.**

En este trabajo se lleva a cabo el estudio de la predicción de las características térmicas que influyen en el diseño de los colectores solares de placa plana. Determinando el prototipo de estudio con un área de captación de 2.34 m^2 , conectado a un tanque de 85 litros de capacidad. El modelo matemático fue representado y construido a través del desarrollo de ecuaciones matemáticas y fue numéricamente resuelto usando el método de diferencias finitas. Los resultados obtenidos de la investigación fueron, un valor de agua caliente con una temperatura promedio de hasta $52 \text{ }^\circ\text{C}$ al medio día de febrero, siendo este el valor más bajo del mes en la ciudad de Bagdad, alcanzando una eficiencia operativa promedio del sistema de un 53% [11].

- **Diseño y desarrollo experimental de un sistema de calentamiento solar de agua.**

En éste trabajo se diseña un prototipo experimental de calentamiento solar de agua para cumplir con las siguientes ponderaciones. El sistema deberá operar bajo el concepto de termosifón, donde el flujo del sistema es creado por la diferencia de densidades en el fluido. Se desea generar un incremento de la energía solar absorbida por el agua, por lo mismo el colector deberá tener la habilidad de rotar para mantenerse en una posición perpendicular a los rayos del sol. Entonces el prototipo que se construye rota conforme la posición angular del sol cambia, demostrando la funcionabilidad del sistema de control diseñado e implementado. Las evaluaciones experimentales indican que el agua del

tanque fue calentada por la energía absorbida del sol y de esta manera las mediciones de temperatura a diferentes alturas en el tanque muestran el efecto termosifónico obtenido [12].

- **Predicción del rendimiento de un sistema solar de agua caliente con el cambio de rendimiento de la bomba de circulación en los colectores solares.**

En el estudio se desarrolla un modelo matemático para predecir el rendimiento operativo de un colector solar bajo condiciones específicas climatológicas en Jeju Island, Korea. Donde se investiga una tasa de flujo óptimo a través del colector con relación entre el calor útil ganado del colector y el consumo de electricidad de la bomba solar. Además de los efectos de varios parámetros tales como el área del colector solar, la temperatura inicial del agua y el volumen del tanque de almacenamiento.

Los resultados de la simulación muestran que el rendimiento del sistema incrementa alrededor de 1.33 % con un flujo másico promedio de 0.442 kg/s, con un nuevo coeficiente $K_c = 0.17$. Además del rendimiento se ve afectado fuertemente por el cambio del área del colector, la temperatura inicial del agua y el volumen del tanque [13].

- **Sistema de calentamiento solar de agua con control de temperatura**

El reporte trata sobre el diseño, construcción e implementación de un sistema de calentamiento solar de agua, el cual tiene un micro controlador y un sensor electrónico de temperatura. En este trabajo se diseñó y construyó un sistema electrónico para el control de la temperatura basado en el dispositivo micro controlador PIC16F877A, más un sensor electrónico de temperatura del tipo LM35, con el objetivo de mantener el agua caliente almacenada en un depósito térmico, dentro de los rangos de temperatura deseados. En el dispositivo se adiciona a un prototipo de calentador solar de agua en forma de espiral, manufacturado con manguera negra [14].

- **Guía de usuario e instalación del Controlador diferencial análogo USDT 2005**

El desarrollo de sistemas de control eficiente para los calentadores solares busca incrementar el rendimiento del sistema mismo. El controlador diferencial análogo USDT 2005, tiene las siguientes funciones practicas: cuenta con dos entradas para sensores de temperatura, esta adecuada para sensores de tipo termistor y PT1000. Cuenta con una protección ajustable para el sobrecalentamiento del sistema con un rango de temperaturas de entre 70 °F hasta 210 °F, maneja un diferencial de temperatura ajustable delta T, proporciona de igual forma un accionamiento manual de la bomba de la circulación del sistema, tiene una pantalla donde se muestran todos los parámetros, incluye un indicador del estado actual de la bomba, el estado del sistema y el diagnóstico del mismo, además cuenta con un sensor de alerta de protección del colector. El control cuenta con un modo de operación, donde se asegura que la energía captada del sol se transfiera de manera eficiente, además de aprovechar las condiciones óptimas. Supervisa la temperatura del colector y la temperatura de la parte inferior del tanque de almacenamiento. La bomba de circulación funciona con un ciclo determinado, que cuando la temperatura del colector supera la temperatura de retorno recircula el fluido para evitar el sobrecalentamiento, la bomba de circulación se detiene si la temperatura de retorno alcanza el límite superior ajustable. La bomba funciona sólo cuando la temperatura en el sensor del colector es mayor que en el retorno [15].

En base a estos y algunos otros desarrollos se lleva a cabo el planteamiento del problema de la investigación, dando una introducción y sirviendo como referencia para la justificación del problema.

1.2 Planteamiento del problema

El uso de los calentadores solares de agua no ha podido ser implementado totalmente en la vida cotidiana de la población, por diversas razones:

La falta de integración total de la tecnología impide su desarrollo y ampliación en el mercado, ya que al ser una limitante estos sistemas siguen teniendo un bajo rendimiento, aunado a los malos hábitos al utilizar el agua caliente para servicio doméstico. Sin embargo, debido a la fluctuación en los costos de los hidrocarburos los cuales son necesarios para el calentamiento del agua, los calentadores solares se ven como una opción.

Los problemas que llegan a tener los calentadores solares de agua afectan en su rendimiento, la disponibilidad y costos. Estos principalmente se dan como consecuencia de las pérdidas de calor por convección en el ciclo termosifónico, debido a la baja estratificación de temperaturas en el tanque y el aumento de la temperatura del fluido que ingresa al captador. Además de las pérdidas de energía calorífica, sufridas tanto en el tanque de almacenamiento como en el colector por su permanencia en el medio ambiente.

Existen afecciones secundarias que disminuyen el rendimiento del sistema como son la variabilidad de la calidad del clima en la región donde están ubicados, las altas temperaturas alcanzadas en el agua que ingresa al colector, la variabilidad del caudal que ingresa al colector, la deficiente estratificación del fluido en el tanque de almacenamiento, las altas temperaturas alcanzadas por el fluido de trabajo que se entrega a servicio, la calidad de la radiación incidente, la incertidumbre en la cantidad de agua caliente existente en el tanque y en el sistema.

1.3 Justificación

El uso de los calentadores solares contribuye en un ahorro considerable en los gastos de la población en cuanto energéticos se refiere. Un desarrollo viable y eficiente para la sociedad podría generar grandes cambios en la misma, utilizando y aplicando las técnicas de control se puede llegar a dar un aumento en el rendimiento de los calentadores solares de agua, de esta manera la sociedad podría convencerse del uso de las energías renovables para la mitigación de gases efecto invernadero.

Por lo expuesto en la sección anterior, con este trabajo de investigación se busca minimizar las pérdidas de calor mediante la implementación y diseño de un dispositivo de control; el cual pueda reducir estos efectos ocasionados por las altas temperaturas del agua. Se propone controlar el fluido de trabajo en el colector solar, manteniéndolo a un caudal constante a través del paso por este. Donde se busca proporcionar un valor óptimo de la velocidad del flujo de fluido, y de esta manera aumentar el rendimiento durante el proceso de calentamiento de agua.

El diseño que se propone es de bajo costo para no incrementar el precio del calentador solar, además que cuente con la disponibilidad de implementación en cualquier otro equipo comercial. Se plantea diseñar un dispositivo de control utilizando una serie de sensores digitales para determinar las variables de control.

Por tal motivo se debe trabajar en aumentar su eficiencia durante el proceso de calentamiento; además de ofrecer una alternativa viable al consumidor. La existencia de diferentes equipos de calentamiento de agua con energía solar generan una alternativa para la sociedad, pero por la misma disponibilidad del recurso energético su rendimiento a veces no es tan satisfactorio y demerita su utilización. Por lo tanto, incrementar el rendimiento térmico del sistema es tema de investigación, para poder satisfacer las necesidades de la población y, de esta forma, reducir ese gasto de combustible innecesario contribuyendo en gran manera con la reducción de gases efecto invernadero, los cuales están provocando grandes consecuencias ambientales una de ellas y la de mayor impacto el calentamiento global.

1.4 Hipótesis

Las hipótesis planteadas son:

- Mediante los dispositivos de control es posible incrementar al menos 1 % el rendimiento térmico del proceso de calentamiento de agua de servicio actual, en los calentadores solares de placa plana.
- Empleando el dispositivo de control es posible mantener la eficiencia térmica promedio en el equipo, durante la incidencia de radiación solar en cielo claro y cielo nublado.

1.5 Objetivos

Objetivo general

- Controlar el flujo del fluido en el proceso de calentamiento de agua de servicio en los calentadores solares tipo termosifón de placa plana, para incrementar el rendimiento térmico.

Objetivos específicos

- Determinar el valor óptimo del flujo de agua en un calentador solar de placa plana mediante simulación.
- Determinar el valor óptimo del gradiente de temperatura en el tanque y el colector solar.
- Diseñar y construir un sistema de control de flujo de agua para un calentador solar de placa plana.
- Caracterizar el calentador solar tipo termosifón de placa plana.
- Evaluar el sistema de control en el calentador solar caracterizado.
- Determinar el rendimiento térmico del sistema termosifónico con control en su velocidad de flujo de fluido.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1 Energía Solar

Disponibilidad de la energía solar

El sol es considerado como una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de alrededor de 1.39×10^9 m. El cual emite sin interrupciones una inmensa cantidad de radiación térmica, tiene una temperatura efectiva de aproximadamente 5,760 K. Considerando esto entonces la energía que es irradiada se aproxima a los 3.8×10^{20} MW, pero a la tierra solo llega una porción equivalente a los 1.7×10^4 kW, por efecto de las dispersiones.

La energía radiante está dada en forma de radiación electromagnética con longitudes de onda que van desde $0.3 \mu\text{m}$ hasta de $3 \mu\text{m}$, las cuales corresponden al espectro de los rayos ultravioleta, visible, e infrarroja. La mayor parte de esta energía llega a concentrarse en el espectro visible y el rango de longitudes de onda cercano al infrarrojo. En la Fig. 2.1 se muestra el espectro electromagnético de acción de la energía radiante del sol. La radiación solar que incide sobre una superficie normal a los rayos del sol fuera de la atmósfera de la tierra a una distancia media entre la Tierra y el Sol se le conoce como constante solar. Esta constante se representa con el símbolo G_{sc} y tiene un valor de $1367 \pm 1.6 \text{ W/m}^2$ [22].

La radiación solar que esta exactamente un instante antes de atravesar la atmosfera terrestre se le conoce como radiación solar extraterrestre y se simboliza con G_{on} . Se entiende que hay una relación entre la radiación solar extraterrestre y la constante solar, por lo tanto es útil para determinar la energía efectiva irradiada en la atmosfera terrestre.

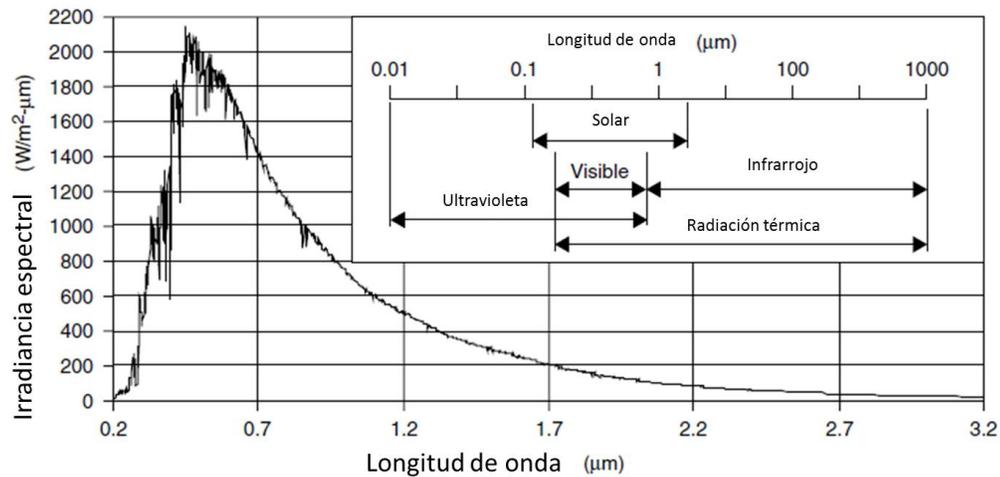


Figura 2.1 Espectro electromagnético de la radiación solar.

La radiación solar extraterrestre G_{on} puede ser determinada a partir de:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right] \quad (2.1)$$

donde n representa el día del año de 1 a 365.

Al atravesar la atmosfera terrestre el valor de G_{on} sufre atenuaciones debido a la dispersión y absorción de ciertos elementos contenidos en la atmosfera, por tal razón se define que la transmitancia atmosférica a cielo claro es la relación de esta atenuación, entendida como la razón entre la radiación solar directa a cielo claro G_{cb} y la radiación extraterrestre G_{on} . La radiación solar directa se determina a partir de:

$$G_{cb} = G_{on} * \tau_b * \cos(\theta_z) \quad (2.2)$$

donde τ_b es la transmitancia atmosférica a cielo claro y $\cos(\theta_z)$ es coseno del ángulo zenith.

La radiación solar incidente puede ser expresada de dos maneras como irradiación o como irradiancia. Irradiación queda entonces definida como la energía radiante por unidad de área en una superficie, su símbolo es I con unidades J/m^2 . Irradiancia es la irradiación instantánea, definida como la energía radiante sobre una superficie por unidad de tiempo y área, su símbolo es G con unidades W/m^2 . La irradiancia se obtiene a partir de los instrumentos de medición de la radiación solar ya sea en su componente directa G_b , global G_g o difusa G_d .

La radiación solar incidente sobre una superficie horizontal se conoce como radiación global, la cual se puede entregar en forma de su componente difusa y directa. La diferencia existente entre ellas se debe a las atenuaciones sufridas por efecto de la atmosfera y la desviación que sufre el rayo de luz incidente, entonces el modelo matemático de la radiación global se describe a partir de:

$$G_g = G_b \cos(\theta_z) + G_d \quad (2.3)$$

El movimiento de rotación y traslación de la tierra afecta en la disponibilidad de la radiación solar en la superficie de la Tierra. Entonces la radiación solar extra terrestre cambia a lo largo del año debido a la variación de la distancia Tierra-Sol. Los efectos se deben a la trayectoria que tiene la tierra alrededor del sol, ya que su distancia con respecto al sol va cambiando gradualmente con su movimiento pero puede considerarse un valor medio entre la tierra y el sol alrededor de 1.5×10^{11} m, como se puede observar en la Fig. 2.2 [22].

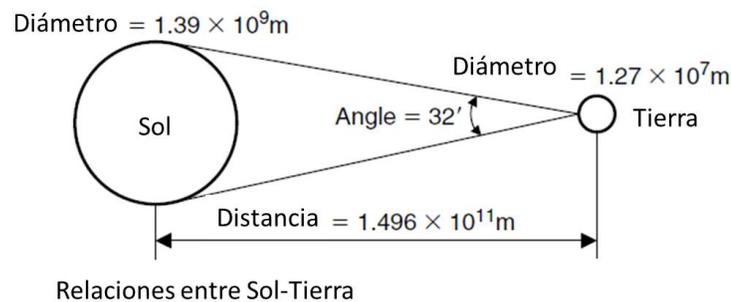


Figura 2.2 Distancia entre el Sol y Tierra.

Por efectos de la inclinación de la tierra, la energía radiante proveniente del sol sufre una alteración al ser recibida, esta puede ser calculada a partir del ángulo de la declinación solar con símbolo δ , el cual se define como la posición angular del sol al medio día solar cuando el sol está en el meridiano local con respecto al plano del ecuador. Hacia el norte el ángulo es positivo, por lo tanto el ángulo de declinación solar va desde -23.45° hasta 23.45° .

Este ángulo puede ser determinado para cualquier día, se considera el modelo matemático de la declinación solar a partir de:

$$\delta = 23.45^\circ \text{sen} \left[(284 + n) * \frac{360}{365} \right] \quad (2.4)$$

En la Fig. 2.3 se puede observar la trayectoria de la tierra con respecto al sol, donde se forma el ángulo de declinación. Debido a esta alteración se conciben las estaciones del año conocidas como solsticio de verano con un ángulo de declinación máxima de 23.45° , solsticio de invierno con el ángulo de declinación máximo de -23.45° , en tanto al equinoccio de primavera y otoño se encuentran a un ángulo de declinación de 0° , siempre y cuando se observe desde el ecuador [20].

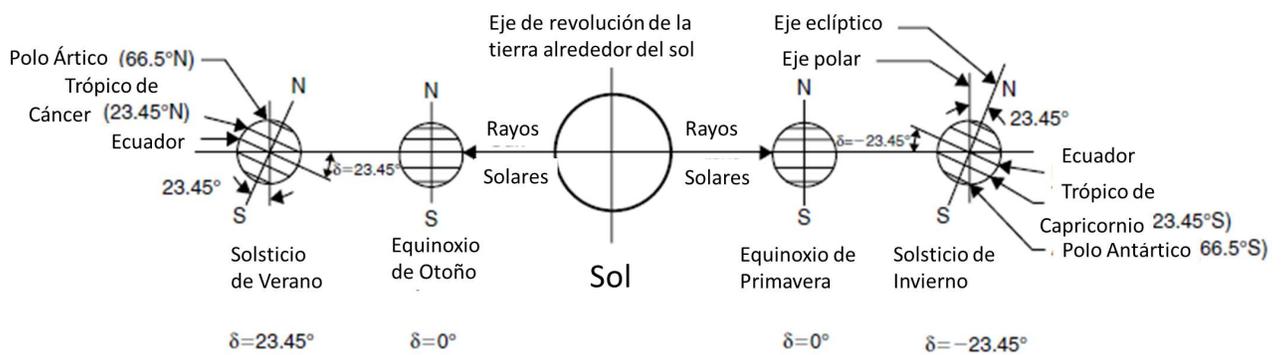


Figura 2.3 Movimiento terrestre alrededor del sol.

Por diversas situaciones geométricas y desplazamiento terrestre se cuenta con una escala de tiempo solar, diferente a la escala de tiempo civil la cual nos rige. Esta escala es necesaria para las aplicaciones de energía solar. El tiempo solar TS puede calcularse a partir del conocimiento del tiempo civil TC , el factor de la ecuación del tiempo ET , el ángulo del meridiano estándar L_{st} y la longitud local en cuestión L_{loc} . El tiempo solar se determina a partir de:

$$TS = TC + ET + 4(L_{st} - L_{loc}) \quad (2.5)$$

El factor de la ecuación del tiempo ET puede definirse como un factor de corrección en minutos que contabiliza las irregularidades del movimiento de la tierra alrededor del sol. Este factor se calcula empíricamente a partir de:

$$ET = 9.87\text{sen}(2B) - 7.53\text{sen}(B) - 1.5\text{sen}(B) \quad (2.6)$$

donde:

$$B = (n - 81) \frac{360}{365}$$

El sol tiene un movimiento aparente con respecto a la tierra, este movimiento es debido a la rotación de la tierra sobre su propio eje. Debido a esta situación se definen ciertos ángulos que minimizan esas alteraciones geométricas. La primer consideración es la del ángulo de altitud solar (α) y el ángulo de azimuth solar (γ). Cuáles se ven representados en la Fig. 2.4 [22].

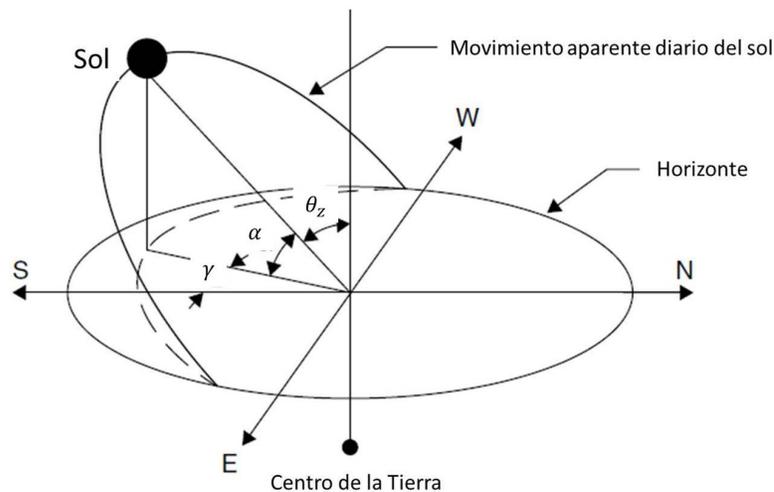


Figura 2.4 Ángulos solares.

El ángulo de altitud solar (α) puede ser calculado a partir de:

$$\text{sen}(\alpha) = \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega) + \text{sen}(\phi)\text{sen}(\delta) \quad (2.7)$$

El ángulo de latitud (ϕ) es definido como la localización angular de norte a sur del ecuador de la localidad, el cual se encuentra entre -90° y 90° . El ángulo horario (ω) es definido a partir del desplazamiento aparente del sol de este a oeste del meridiano local, donde la rotación de la tierra sobre su eje se da 15° por hora. Por la mañana es negativo y por la tarde positivo. Al medio día solar el ángulo horario es cero. Este ángulo puede ser calculado a partir de:

$$\omega = (TS - 12) * 15^\circ \quad (2.8)$$

El ángulo del azimuth solar (γ) puede ser calculado a partir de:

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\cos(\delta)\cos(\omega)}{\cos(\alpha)} \quad (2.9)$$

Existen otros ángulos que relacionan la dirección normal de la radiación directa con respecto a la horizontal. Estos son el ángulo de incidencia solar (θ), el ángulo zenith (θ_z) y el ángulo de inclinación (β) de la superficie en cuestión. El ángulo zenith (θ_z) se define como el ángulo formado entre la vertical y el rayo de la radiación directa del sol, lo mismo que el ángulo de incidencia de la radiación directa en una superficie horizontal. El ángulo de incidencia solar (θ) se define como el ángulo formado entre la incidencia de la radiación directa sobre la superficie y la normal de la misma. Este ángulo puede ser calculado a partir de:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z)\cos(\beta) + \sin(\theta_z)\sin(\beta)\cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.10)$$

El ángulo de inclinación (β) se define como la pendiente existente entre la superficie en cuestión y la horizontal. Otro ángulo que puede definirse con relación a la geometría solar es el ángulo horario de puesta de sol (ω_{ss}), obtenido a partir de:

$$\cos(\omega_{ss}) = -\tan(\phi) * \tan(\delta) \quad (2.11)$$

A partir de esta relación se puede calcular teóricamente la longitud del día solar, utilizando:

$$N = \frac{2}{15} * \cos^{-1}[-\tan(\phi) * \tan(\delta)] \quad (2.12)$$

Con el objeto de incrementar el aprovechamiento energético, se tiende a inclinar la superficie colectora con el propósito de minimizar el ángulo de incidencia solar para que la irradiancia en su mayoría sea directa, pero de igual forma se absorbe energía de la componente difusa y la reflectada por la superficie del suelo, en la Fig. 2.5 se observa la superficie colectora inclinada y de forma horizontal al plano [22].

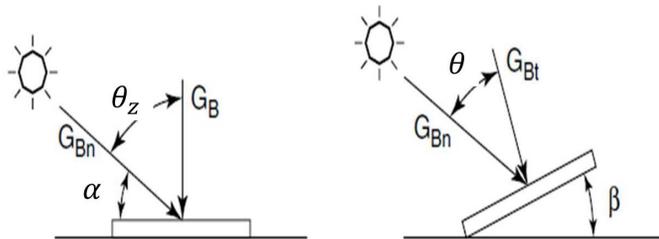


Figura 2.5 Componentes de la radiación en superficies inclinadas.

Entonces se considera como irradiación inclinada con el símbolo I_T , misma que puede ser calculada a partir de:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + I \rho_s \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (2.13)$$

donde:

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$$

Entonces ρ_s es definido como el factor de corrección de reflectancia del suelo, I_b es la irradiación directa, I_d es la irradiación difusa. $\left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right)$ es definido como el factor de vista al suelo y $\left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$ es el factor de vista al cielo. La orientación geométrica de los ángulos solares en una superficie inclinada se observan en la Fig. 2.6 [16].

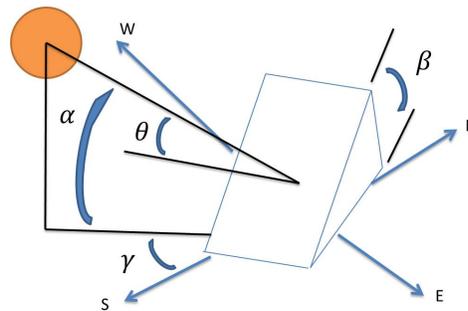


Figura 2.6 Ángulos solares con respecto a una superficie inclinada.

2.2 Instrumentos de medición

Medición de la energía solar

Los instrumentos de medición de la radiación solar la llevan a cabo para sus dos componentes, tanto difusa como directa. El instrumento que es utilizado para determinar la radiación global es el piranómetro, el cual mide la irradiancia global, expresada en W/m^2 , de igual forma puede determinar la irradiancia difusa añadiéndole un aro que evita la detección de la componente directa. El principio de funcionamiento es a través de termopares los cuales al calentarse debido a la radiación solar, emiten una pequeña tensión en mili volts. Esta señal es medida por un instrumento integrador, entonces para obtener la irradiancia global en W/m^2 , se multiplica el voltaje entregado por una constante del instrumento. En la Fig. 2.7 se observa la imagen del piranómetro.



Figura 2.7 Piranómetro.

El instrumento que se utiliza para determinar la radiación solar directa es el pirheliómetro, el cual solo mide la componente directa de la irradiancia sobre una superficie normal al haz de radiación incidente. El instrumento recibe la radiación en un cono de entre 5° a 7° de apertura, se utiliza generalmente con un seguimiento para mantenerlo alineado con el sol. El principio de funcionamiento es el mismo que el piranómetro a diferencia que solo se provoca el calentamiento de los termopares y la generación de pequeño voltaje debido a la captación de la componente directa de la irradiancia. El pirheliómetro se observa en la Fig. 2.8 [17].



Figura 2.8 Pirheliómetro.

Medición de flujo

Los flujómetros son los dispositivos utilizados para determinar la tasa del flujo en un conducto por donde se transporta un fluido de trabajo. El caudal puede ser determinado en litros por minuto y el flujo másico se obtendría en kilogramos por segundo, son instrumentos que pueden determinar la tasa de flujo a partir de sensores mecánicos, electrónicos, magnéticos, diferencial de presión y diferencial de temperatura. En la Fig. 2.9 se observa la imagen de un flujómetro [18].



Figura 2.9 Flujómetro.

Medición de la temperatura

Las escalas de medición de la temperatura se dividen fundamentalmente en dos tipos, las escalas relativas y las escalas absolutas. Los valores que adopta la temperatura en cualquier escala, no tienen un nivel máximo, sino un nivel mínimo y este es considerado como el cero absoluto. Mientras que las escalas absolutas se basan en el cero absoluto, las relativas tienen otras formas de definirse. Para el caso de la escala definida como Grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$), se

establece una base de medida de la temperatura utilizando los puntos de fusión y ebullición del agua. Entonces se considera que una mezcla de hielo y agua en equilibrio térmico con aire saturado a 1 atm se encuentra en su punto de fusión. En forma opuesta una mezcla de agua y vapor de agua sin aire en equilibrio térmico a 1 atm de presión se considera que está en su punto de ebullición. Celsius dividió el intervalo de temperatura que existe entre éstos dos puntos en 100 partes iguales a las que llamó grados centígrados °C.

La escala internacional de temperatura ha sido definida en términos de un conjunto de puntos fijos definidos como puntos de fusión de las sustancias puras, además de establecer un método para interpolar estos puntos fijos. La escala internacional está de acuerdo con la escala de temperatura termodinámica dada en Kelvin. Esta escala internacional de temperatura es la base de la ciencia y las calibraciones que se hacen al respecto.

Las calibraciones exactas no son suficientes para asegurar que los datos serán precisos, sin embargo, al utilizar un sensor para medir una temperatura, cualquier diferencia entre la temperatura del sensor y el objetivo de la medición debido a la transferencia de calor con el medio ambiente del sensor se define como un error [19].

Sensor digital de temperatura

El sensor de temperatura DS18B20 es el dispositivo que se comunica de forma digital. Existen diferentes plataformas para leer la temperatura que registra este sensor, el cual posee una característica peculiar. La plataforma más amigable es Arduino, el modelo de la sonda de temperatura puede observarse en la Fig. 2.10.



Figura 2.10 Sensor de temperatura.

Dispositivo de control de flujo

Bomba centrífuga

La bomba centrífuga es una máquina que transforma la energía mecánica para transferirla a un fluido y provocarle un movimiento a mayor presión, altura o velocidad, todas estas relacionadas con el principio de Bernoulli. Para la aplicación de bombas con bajo caudal se utilizan las bombas sumergibles donde se puede controlar con mayor proporción la cantidad de fluido a atravesar por la bomba o a la presión deseada de salida. Existen bombas sumergible con capacidades de hasta 230 *l/h*. En la Fig. 2.11 se observa la imagen de una bomba de bajo caudal [18].



Figura 2.11 Bomba centrífuga sumergible.

2.3 Sistemas de calentamiento solar de agua

Colectores solares

Los colectores solares de baja temperatura se clasifican con respecto a las pérdidas de calor, generadas entre la radiación solar absorbida y los alrededores. El colector solar consiste de una placa absorbidora la cual recibe y transforma la energía radiante del sol, transfiriéndola al fluido de trabajo en forma de calor. Para evitar que esa energía absorbida se pierda por los diferentes mecanismos de transferencia de calor, el colector debe estar acondicionado con un aislamiento térmico alrededor y detrás de la placa absorbidora. Es por eso que el colector cuenta también con una cubierta comúnmente de vidrio la cual funge como transmisora de la energía radiante, además de evitar las pérdidas por convección con el medio ambiente. Por último se utiliza un medio de transferencia y almacenamiento de calor tal como aire o agua, los cuales aprovechan la energía absorbida para su utilización directa.

El colector más simple es el calentador solar de agua de alberca el cual es un absorbedor sin cubierta, hecho de plástico resistente a los rayos UV. Tiene un coeficiente de pérdidas de calor $U_L=25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. El colector de placa plana es un calentador solar térmico con pérdidas de calor reducidas, esto es debido a la acción de una cubierta de vidrio transparente colocada por encima del absorbedor. El sistema alcanza un coeficiente de pérdidas de calor en rangos de $U_L= 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ a $U_L= 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; si esta acondicionado con materiales selectivos el coeficiente alcanza los rangos de $U_L= 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ hasta $U_L= 3.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ [20].

Otro colector es el de tubos evacuados, este sistema es un calentador solar térmico con un absorbedor y una cubierta de vidrio que los separa de los alrededores, el cual cuenta con un vacío de 10 Pa, lo cual minimiza las pérdidas de calor por convección. En este equipo se alcanzan a tener coeficientes de pérdidas de calor de $U_L= 1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Colectores solares de placa plana

Los colectores de placa plana se pueden diseñar para utilizar cualquier fluido como vehículo para la transferencia de calor. La elección de los materiales para la cubierta y la placa absorbidora son los que requieren mayor atención. El propósito de la cubierta es transmitir

la radiación solar de menor longitud de onda, pero a la vez bloquear la salida de la radiación reflejada por la placa de mayor longitud de onda, además de reducir las pérdidas de calor por convección desde la parte superior de la placa de absorción. El vidrio es el material más ampliamente utilizado. Las propiedades más importantes de la cubierta deben ser la alta transmitancia y baja reflectancia con el fin de permitir el paso de casi el 100 % de la energía radiante incidente.

La placa absorbidora debe tener excelentes propiedades en cuanto a absorción de la radiación solar además de ser un excelente conductor del calor. El cobre es el material más comúnmente usado para las placas y tubos de absorción debido a su alta conductividad térmica y alta resistencia a la corrosión. Con el fin de aumentar la absorción de la radiación solar y reducir la emisión de la placa absorbidora, las superficies metálicas están recubiertas de algún material selectivo. Para lograr alta absorción y baja emitancia. El sistema de absorción se conforma por una placa absorbidora de muy delgado espesor y un arreglo de tubos paralelos conectados por dos cabezales perpendiculares a ellos por donde el fluido de trabajo entra y sale del absorbedor. El material más utilizado para el arreglo de tubos es el cobre por sus propiedades de conductividad térmica. El aislante térmico debe tener una baja conductividad térmica para reducir las pérdidas de calor.

Los elementos del colector solar son colocados dentro de una carcasa resistente a la exposición al medio ambiente por periodos largos además de soportar las altas temperaturas las cuales sufre el sistema en operación. El material más utilizado es el aluminio. En la Fig. 2.12 se muestra un esquema del colector de placa plana. Los calentadores solares de agua son sistemas de calentamiento de agua a partir de la energía radiante del sol y representan la aplicación más común de la energía solar actual.

Los sistemas de pequeña escala se utilizan para aplicaciones de calentamiento de agua sanitaria, mientras que los sistemas de gran escala se utilizan en la industria para aplicaciones de calor de proceso. Existen básicamente dos tipos de sistemas de calentamiento de agua: circulación natural o termosifón y de circulación forzada. El sistema termosifónico es aquel que no requiere de una bomba para hacer circular el agua en el sistema y el tanque de almacenamiento se encuentra por encima del colector. Cuando el agua en el colector se calienta,

tiende a desplazarse hacia el tanque, debido al cambio de densidades, lo cual genera un circuito de circulación.

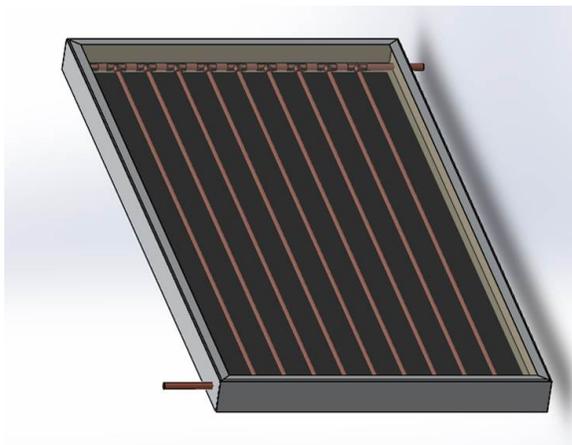


Figura 2.12 Colector de placa plana.

Los colectores solares térmicos tienen su principal uso en la producción de calor a una amplia gama de temperaturas adaptadas a una tarea específica. Las temperaturas a las cuales el calor puede ser producido por la radiación solar, están limitadas por las leyes termodinámicas, propiedades ópticas y, las limitantes de los materiales de fabricación. La mayoría de los colectores solares instalados son de placa plana; estos colectores son capaces de producir calor a temperaturas de hasta 100 °C.

El sistema contiene una cubierta normalmente de vidrio, una placa absorbidora de un metal de color negro o selectivo, una parte de aislamiento térmico en la parte trasera y lateral del absorbedor, así como una carcasa resistente a la intemperie de metal o de plástico. La cubierta del sistema está sellada y fija a la carcasa para evitar la entrada de agua, humedad y polvo.

Las tuberías están unidas térmicamente a la placa y contienen el fluido de trabajo por donde el calor producido se transfiere a su uso final. Las tuberías van unidas entre sí de modo que se disponga de una entrada y una salida. En la Fig. 2.13 se observa el calentador solar de placa plana en estudio [20].



Figura 2.13 Calentador solar de placa plana.

Análisis térmico para colectores de placa plana

El parámetro básico que debe ser considerado en el análisis térmico de un calentador solar de placa plana, es la eficiencia térmica del colector, la cual puede definirse como la tasa de energía útil entregada al sistema con respecto a la energía incidente en el sistema proveniente de la fuente de energía solar. Para determinar el rendimiento del sistema se requiere información sobre la energía solar absorbida por la placa, debido a la configuración geométrica de la tierra, esta energía incide sobre una superficie inclinada para maximizar el recurso. En este caso la energía estará en función de la componente difusa, directa y reflectada por la tierra.

El cálculo dependerá del modelo isotrópico de radiación utilizado. Por lo tanto el modelo matemático de la radiación solar absorbida S se calcula a partir de:

$$S = G_b R_b (\tau\alpha)_b + G_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + (G_b + G_d) (\tau\alpha)_g \rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (2.14)$$

donde la componente directa queda expresada como $G_b R_b (\tau\alpha)_b$, la componente difusa como $G_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right)$ y la componente reflectada como $(G_b + G_d) (\tau\alpha)_g \rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$. Considerando que el factor de vista del colector al cielo es $\left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right)$ y el factor de vista del colector al suelo es $\left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$ los cuales están afectados por el ángulo de inclinación del colector β . En la Fig. 2.14 se observa el esquema de transmisión y absorción de la radiación [22].

El factor de eficiencia óptica $(\tau\alpha)$ dependerá de la siguiente relación entre la transmisión de la energía radiante del sol a través del cristal y posteriormente la cantidad de energía absorbida

por la placa. El modelo matemático que define el factor de eficiencia óptica se calcula a partir de:

$$(\tau\alpha) = \left(\frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_D} \right) \quad (2.15)$$

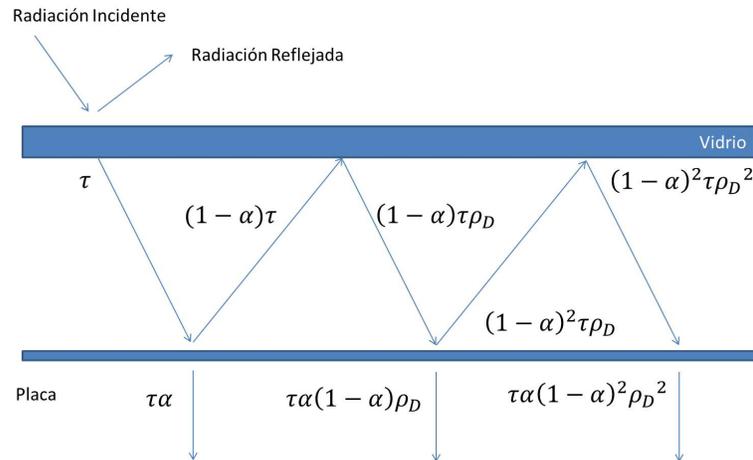


Figura 2.14 Esquema de la transmisión y absorción de la radiación.

Se puede definir una aproximación para el factor a partir de:

$$(\tau\alpha) = 1.01 * \tau\alpha \quad (2.16)$$

donde los valores típicos de $(\tau\alpha)$ son dependientes del tipo de vidrio utilizado y la superficie selectiva adherida en la placa absorbidora; para vidrio común se encuentran entre 0.70 y 0.75 y para vidrio bajo en hierro 0.85 y 0.9. Por lo mismo se puede inferir que la cantidad de energía absorbida por una superficie inclinada S_T , estará en función de la irradiancia en su componente global inclinada G_T y el factor de eficiencia óptica dependiente de las características constructivas del colector $(\tau\alpha)$ [22]. El modelo matemático que describe la cantidad de energía absorbida está definido por:

$$S_T = G_T(\tau\alpha) \quad (2.17)$$

Las pérdidas de energía en el sistema se pueden cuantificar como una cierta cantidad de calor cedido al ambiente por los tres mecanismos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación. Estas pérdidas se conocen como calor perdido Q_p , descrito por el modelo

matemático a partir de:

$$Q_p = \left(\frac{T_p - T_a}{R_L} \right) \quad (2.18)$$

Este modelo está en función de la temperatura de la placa T_p , temperatura ambiente T_a , coeficiente global de pérdidas de calor U_L y el área de apertura del colector A_c . Donde R_L es un factor de correlación de pérdidas, el cual está en función del coeficiente de pérdidas de calor y el área de apertura, se determina a partir de:

$$R_L = \left(\frac{1}{U_L A_c} \right) \quad (2.19)$$

La representación gráfica del modelo eléctrico de la resistencia térmica se observa en la Fig. 2.15 [22].

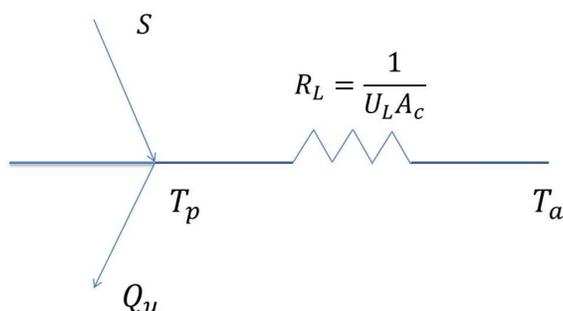


Figura 2.15 Modelo eléctrico R_L .

El coeficiente global de pérdidas U_L está definido como la sumatoria de tres coeficientes de pérdida específicos: el coeficiente de pérdidas de la superficie alta del colector U_t , el coeficiente de pérdidas traseras del colector U_b y el coeficiente de pérdidas alrededor del colector U_e . En el modelo eléctrico siguiente se puede observar cómo se relacionan cada una de las resistencias, respecto a cada mecanismo de transferencia de calor, expresado en $\left(\frac{W}{K m^2} \right)$. El modelo eléctrico del coeficiente global de pérdidas se observa en la Fig. 2.16 [22].

Bajo condiciones de estado estable se puede definir un modelo matemático del coeficiente de pérdidas en la superficie alta del colector U_t , mismo que está en función de la velocidad del viento V_v , temperatura ambiente y de la placa, así como de características constructivas del

colector, se calcula a partir de:

$$U_t = \left(\frac{\left(\frac{1}{N_g}\right)}{\left(\frac{C}{T_p}\right) * \left[\left(\frac{T_p - T_a}{N_g - f}\right)^{0.33} + \left(\frac{1}{h_w}\right)\right]} \right) + \left(\frac{\sigma * ((T_p)^2 + (T_a)^2) + (T_p + T_a)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_p + 0.05 * N_g * (1 - \varepsilon_p)}\right) + \left(\frac{2 * N_g + f - 1}{\varepsilon_g}\right) - N_g} \right) \quad (2.20)$$

donde:

$$f = (1 - 0.004 * h_w + 0.0005 * (h_w)^2)(1 + 0.091 * N_g)$$

$$C = 365.9 * (1 - 0.00883 * \beta + 0.0001298 * (\beta)^2)$$

$$h_w = \left(\frac{8.6 * (V_v)^{0.6}}{(L)^{0.4}} \right)$$

Teniendo en cuenta que la constante de Stefan Boltzman σ es igual a 5.67×10^{-8} . En la Ecuación 2.20, ε_p es la emisividad infrarroja de la placa absorbadora, ε_g es la emisividad infrarroja de la cubierta, N_g es el número de cubiertas y L es la distancia entre la cubierta y la placa [22]. El coeficiente de pérdidas traseras del colector es U_b , cuyo modelo matemático se determina a partir de:

$$U_b = \left(\frac{K_a}{\delta_a} \right) \quad (2.21)$$

El coeficiente de pérdidas alrededor del colector es U_e se calcula a partir de:

$$U_e = \left(\frac{(K_a / \delta_a) A_a}{A_c} \right) \quad (2.22)$$

Entonces pueden considerarse constantes U_b y U_e , ya que solo dependen de propiedades constructivas del colector, como son conductividad térmica del aislante k_a , espesor del aislante δ_a y área del aislante A_a . Considerando que el sistema se encuentra en estado estable, la tasa de calor útil que un colector puede entregar será igual a la tasa de energía absorbida por la transferencia de calor del fluido menos la cantidad de pérdidas de calor en forma directa e indirecta de la superficie del colector hacia el medio [22]. El modelo matemático del calor útil Q_u del sistema se calcula a partir de:

$$Q_u = A_c [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_p - T_a)] \quad (2.23)$$

Se puede expresar de igual forma en función del flujo másico del sistema \dot{m} , el calor específico del fluido de trabajo C_p y la diferencia de temperatura entre la salida del colector y la

entrada $(T_o - T_i)$, se calcula a partir de:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (2.24)$$

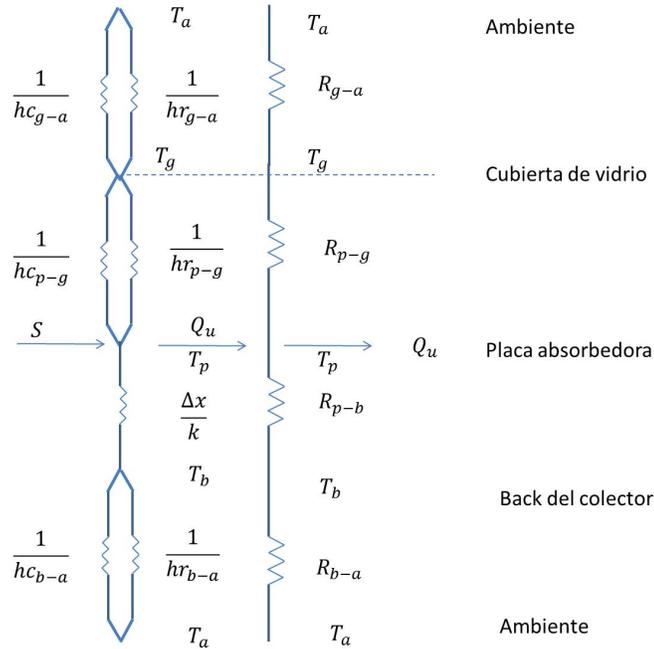


Figura 2.16 Modelo eléctrico U_L .

El modelo matemático del calor útil del colector puede expresarse en función de un factor denominado factor de remoción de calor F_R , que representa la tasa de energía útil actual obtenida que podría ser utilizada si la superficie absorbedora estuviera a la temperatura local del fluido, este se obtiene a partir de:

$$F_R = \left(\frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_c[G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]} \right) \quad (2.25)$$

Por lo tanto, otra forma de representar el calor útil, puede ser a partir de:

$$Q_u = A_c F_R [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (2.26)$$

Considerando la Ecuación 2.26 se puede definir que existe salida útil solo cuando la radiación solar disponible es más alta que la cantidad de pérdidas del sistema. Por lo consiguiente el rendimiento térmico del colector depende del calor útil y la cantidad de energía incidida sobre el área de apertura del colector [36].

El modelo matemático de la eficiencia térmica η del sistema se calcula a partir de:

$$\eta = \left(\frac{Q_u}{A_c G_T} \right) = \frac{A_c F_R [G_T (\tau \alpha) - U_L (T_i - T_a)]}{A_c G_T} \quad (2.27)$$

Reduciendo la Ecuación 2.27, la eficiencia térmica puede calcularse a partir de:

$$\eta = F_R (\tau \alpha) - \frac{[F_R U_L (T_i - T_a)]}{G_T} \quad (2.28)$$

Por otra parte la constante de tiempo solar determina la capacidad calorífica de un colector en función de un determinado período de tiempo. Entonces es necesario determinar el tiempo de respuesta del colector solar con relación al comportamiento transitorio del colector y seleccionar así el correcto intervalo de tiempo para el estado estable en las pruebas de eficiencia. Cualquier condición transitoria existente no gobierna el rendimiento térmico del colector, depende de la cantidad de energía solar absorbida usada para calentar el colector y sus componentes [22].

La constante de tiempo del colector es el tiempo requerido para que el fluido de salida del colector alcance el 63.2 % de su ultimo valor estable después de un cambio de energía radiante incidente. Considerando la nomenclatura de la norma ASHRAE2003, la constante de tiempo obedece el siguiente modelo matemático, se calcula a partir de:

$$\left(\frac{T_{of} - T_{ot}}{T_{of} - T_i} \right) = \left(\frac{1}{e} \right) = 0.368 \quad (2.29)$$

donde T_{ot} es la temperatura del agua de salida del colector después de un tiempo t , T_{of} es la temperatura del agua de salida final del colector y T_i es la temperatura del agua de entrada al colector. El calor transferido al fluido circula a través del colector a la misma tasa de flujo que la de las pruebas de eficiencia térmica. La constante de tiempo solar se puede obtener de la manera siguiente.

El área de apertura del colector inicia cubierta de la radiación para suprimir la fuente de energía radiante al colector. Cuando se alcanza un estado estable el sistema cubierto, se le remueve la cubierta y se mide continuamente hasta alcanzar condiciones nuevamente de estado estable. Se asume condición estable cuando la temperatura de salida del fluido varía por lo menos 0.05 °C por minuto.

La diferencia entre T_{ot} y T_a , es graficada nuevamente con respecto al tiempo. Iniciando con la condición inicial de estado estable ($T_i - T_a$) y continuando hasta el segundo estado estable alcanzado a alta temperatura ($T_{of} - T_a$).

La constante de tiempo del colector es definida como el tiempo tomado por la temperatura de salida del colector para subir un 63.2 % del incremento total de ($T_i - T_a$) hasta ($T_{of} - T_a$) seguido al paso de incremento en la irradiación solar desde el tiempo cero. El la Fig.2.17 se muestra la gráfica que representa la constante de tiempo [22].

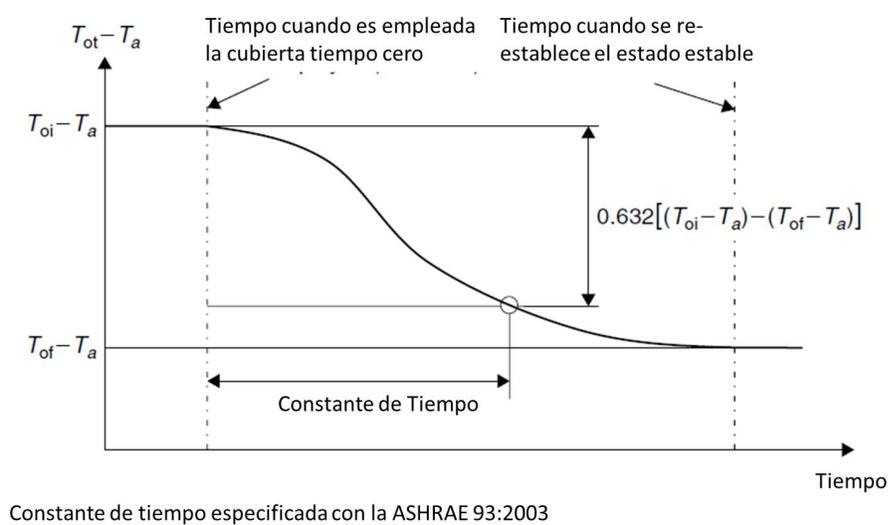


Figura 2.17 Constante de tiempo del colector.

2.4 Almacenamiento de energía térmica

El almacenamiento de energía es de suma importancia para los sistemas termosolares. Existen dos parámetros importantes para el almacenamiento de la energía térmica; uno es el tiempo de almacenamiento y el otro la densidad de energía. El tiempo de almacenamiento de energía puede variar de muchos años a una fracción de un segundo. Para este tipo de sistemas, el requisito de almacenamiento de energía puede ser sobre una base horaria, diaria o semanal. La densidad de energía es un factor crítico para el tamaño de un sistema de almacenamiento. Esta puede ser almacenada en forma de energía mecánica, térmica, química, eléctrica, o magnética.

La energía térmica se puede almacenar en forma de calor sensible, calor latente o calor termoquímico. El calor sensible Q , es aquel que se almacena en un material de masa m , con una capacidad calorífica C_p el cual depende de un diferencial de temperatura del material de almacenamiento. Puede ser calculado a partir de:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (2.30)$$

Los materiales con capacidad de almacenar calor sensible, más comunes son el agua, aceites orgánicos, rocas, cerámica, y sales fundidas. El agua tiene una capacidad calorífica muy alta, con un valor de $4187 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. La energía térmica también puede ser almacenada en forma de calor latente en un material de masa m ; que se somete a una fase transformación dada por el calor de fase de transformación λ , y se calcula a partir de:

$$Q = m\lambda \quad (2.31)$$

Existen cuatro tipos de transformaciones de fase útiles para el almacenamiento de calor latente las cuales son: líquido-sólido, líquido vapor, el vapor de sólidos y sólidos-sólidos. Las transformaciones de fase son procesos isotérmicos, donde la energía térmica se almacena y recupera una temperatura conocida como de transición. Algunos materiales comunes de cambio de fase son las ceras parafinas, no parafinas, sales inorgánicas y eutécticos de compuestos orgánicos o inorgánicos [17].

Energía térmica demandada por el sistema

El calentador solar de placa plana depende de la capacidad de energía solar aprovechable por el fluido de trabajo. Esta energía podrá ser calculada a partir de la necesidad del agua a calentar ya que depende directamente su calentamiento del área del captador determinada en cada sistema termosifónico. Esta área de captación podrá ser calculada a partir de la demanda de energía a satisfacer por medio de la energía solar, es decir la cantidad de agua y a la temperatura que se desea calentar, se debe tener en cuenta que el recurso solar es intermitente y existen parámetros promedios definidos. En este caso deberá considerarse la energía solar promedio diario anual de la localidad en cuestión.

Se debe considerar de igual forma que este tipo de sistemas alcanzan un rendimiento promedio en el proceso de conversión de la energía. Además de considerar como parte del diseño la cantidad de agua promedio al día a calentar, así como la temperatura a la cual se desea calentar. Para poder determinar el área de captación necesaria se requiere de las siguientes consideraciones:

Conocer la eficiencia promedio del captador solar plano η_c .

Definir el volumen de agua a calentar en promedio por día.

Determinar la temperatura deseada del agua caliente.

Conocer la temperatura del agua fría, al inicio del calentamiento.

Conocer la energía solar promedio diario anual E_{pda} .

Entonces, la energía útil promedio de transformación del sistema al día expresada en $kW * h/m^2 * día$, puede calcularse a partir de:

$$E_u = \eta_c E_{pda} \quad (2.32)$$

Por otro lado para obtener la energía demandada por el sistema se requiere del volumen promedio por día V_d en litros por día, la temperatura del agua fría T_{af} en $^{\circ}C$ y la temperatura del agua caliente T_{ac} . Considerando la capacidad calorífica del agua constante C_p , entonces la energía demandada, en $kWh/día$ se determina a partir de:

$$E_d = V_d C_p (T_{ac} - T_{af}) (1/3600) \quad (2.33)$$

Entonces seleccionando la energía útil de transformación del sistema, con respecto a la cantidad de energía de demanda se logra obtener el área de captación para satisfacer el sistema [23], por lo tanto el área de captación necesaria se calcula a partir de:

$$A_c = \left(\frac{E_d}{E_u} \right) \quad (2.34)$$

Sistema termosifónico

Termosifón puede ser definido como el efecto ocasionado por la diferencia de densidades en ciertos puntos del sistema, que ocasionan el movimiento del fluido que transporta la energía almacenada de un lugar a otro. Los componentes que integran un termosifón son el captador solar plano, el depósito de almacenamiento de agua caliente y el circuito hidráulico conformado por una red de tuberías por donde el agua caliente es transportada, además está conectado el captador con el tanque de almacenamiento.

El ciclo de operación del sistema puede considerarse como circuito cerrado, por donde el agua se calienta en el captador por medio de la transferencia de calor efectuada por el proceso de conversión de la energía térmica aprovechable, la cual es conducida hacia el tanque de almacenamiento; entonces el agua que sale del captador se reemplaza por agua fría, para calentarse nuevamente en el colector y así cerrar el ciclo.

Lo anterior se debe a que el agua caliente al ser menos densa que el agua fría, se acumula en la parte superior del tanque. Entonces existe una circulación del agua en todo el circuito de forma continua, siempre y cuando exista un diferencial de temperatura que provoque la transferencia de calor en el sistema, esta circulación usualmente es lenta. Por lo tanto y debido a este efecto el agua que se almacena en el tanque se distribuye en forma de estratos o capas horizontales del fluido almacenado las cuales se encuentran a distintos rangos de temperatura, este efecto es ocasionado por la diferencia de densidades y se conoce como estratificación térmica.

Este movimiento del fluido se considera como circulación natural en un circuito cerrado, donde la columna de fluido más ligera no es capaz de equilibrar la columna de fluido más pesada, generando así este efecto debido al desequilibrio de las cargas de las columnas del líquido. Se debe tener en cuenta que esta circulación natural será contrarrestada por la fricción del fluido en movimiento con las paredes de la red de tuberías, entonces la fuerza de flotación de la circulación debe ser mayor o al menos igual a la fuerza ocasionada por el efecto de fricción [24].

Este efecto puede ser observado en la Fig.2.18, donde se muestra gráficamente el efecto de flotación, donde h_t es la distancia mínima entre la salida de agua fría y caliente del tanque de almacenamiento, H es la distancia mínima entre la salida de agua fría del termotanque y la salida de agua caliente del colector solar, h_c es la distancia mínima entre la entrada y salida de agua en el colector. El ciclo termosifónico se representa en sentido horario considerando como punto inicial el número 1 marcado en el diagrama y punto final el 4 del mismo esquema [25].

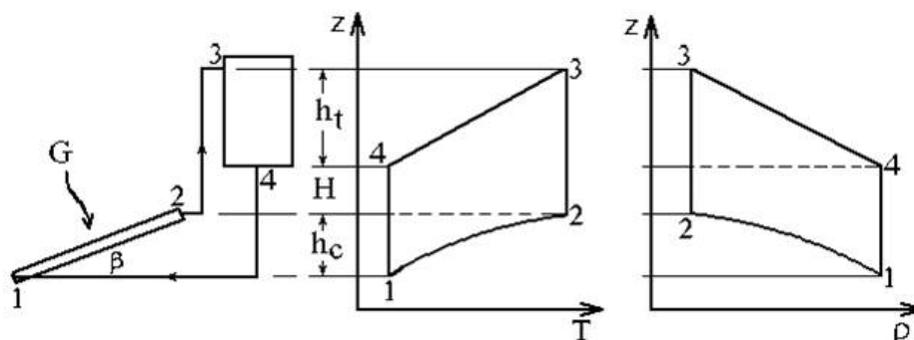


Figura 2.18 Efecto de flotación.

Tanque de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento para este tipo de sistemas son depósitos de acero de alta calidad con niveles de presión soportada de hasta 6×10^5 Pa. El agua almacenada en un depósito tiene una capacidad calorífica de 4187 J/kg K equivalente a 1.16 Wh/kg K , donde el diferencial de temperatura más común es de 40°C , entonces por cada litro almacenado se tiene una energía almacenada de 46.4 Wh por litro de volumen almacenado [20].

Las pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento se deben a las pérdidas a través del aislante y las pérdidas convectivas por la circulación del fluido a través de las conexiones. Los valores típicos de los coeficientes de pérdidas para 400 litros de agua potable almacenada son de entre $U_L = 1.7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ y $U_L = 3 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ y para 1000 litros almacenados son entre $U_L = 3.7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ y $U_L = 5.5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ [22].

Análisis térmico de sistemas de almacenamiento

Considerando un tanque totalmente mezclado o sin estratificación de energía y la capacidad de un líquido almacenado a temperatura uniforme, se podrá describir que el calor almacenado en el tanque Q_T es el producto entre la capacitancia térmica del sistema operado sobre una diferencia finita de temperatura en el tanque. Este puede ser calculado a partir de:

$$Q_T = (mC_p)_T \Delta T_T \quad (2.35)$$

donde m es la masa contenida del líquido en el tanque, ΔT_T es la diferencia entre la temperatura de entrada al tanque T_{iT} y la temperatura de salida del tanque T_{oT} . Los límites de temperatura sobre los cuales la unidad opera, dependen de los requerimientos del proceso. El límite superior es determinado por la presión de vapor del líquido. La densidad del fluido disminuye conforme la temperatura incrementa, por ello, cuando el fluido caliente entrante al tanque proveniente del colector viaja por el tanque hacia la descarga localizada en la parte más alta del mismo y el fluido frío tiende a ir hacia la parte más baja, crea el fenómeno de estratificación debido a la acción de la diferencia de densidades, creándose estratos a diferentes densidades del fluido por acción de la temperatura [20].

Con esto se logra que el agua más fría del tanque de almacenamiento entre al colector, incrementado el rendimiento. El agua de la parte más alta del tanque debe suplir la demanda de agua caliente. Por lo tanto el grado de estratificación se mide por la diferencia de temperaturas en el tanque ΔT_T y es crucial para la operación efectiva de un sistema solar. Existen dos modelos básicos para simular la estratificación definidos como multi nodo y flujo introducido.

Pérdidas en tuberías y circulación

Las pérdidas de calor en las tuberías aparecen en forma de potencia de recalentamiento de la operación temporal de colector y de agua caliente de retorno, de igual forma las pérdidas de calor constante en la circulación por las tuberías. El calentamiento de potencia se puede calcular con:

$$Q_h = (m_p c_p + m_f c_f)(T - T_a) \quad (2.36)$$

donde T es la temperatura del fluido, T_a es la temperatura del ambiente, la masa del tubo es m_p , la capacidad térmica del tubo es c_p , la masa del fluido es m_f y el calor de distribución del fluido es c_f [20].

Relacionando la longitud de la tubería aislada con el valor de pérdidas de calor. Las pérdidas a la salida de la circulación de la tubería se calculan con:

$$Q_l = (U_L l)(T - T_0)t_c \quad (2.37)$$

donde t_c son las horas de operación de la bomba de circulación y l es la longitud de la tubería de circulación [20].

2.5 Controlador diferencial de temperatura

Uno de los sistemas de control para equipos termosolares es el controlador diferencial de temperatura *DTC*, el cual es un simple termostato que opera por medio de la diferencia de temperaturas. El *DTC* es un control comparador entre las dos últimas temperaturas censadas del fluido, para así controlar un sistema de bombeo. Un sensor se localiza en la parte alta del colector y el otro en el tanque de almacenamiento, con los cuales se monitorea la diferencia de temperaturas.

Cuando la temperatura del colector excede la del tanque por una cantidad predeterminada de entre $4^\circ C$ y $11^\circ C$ el *DTC* enciende una bomba de recirculación. Entonces cuando la temperatura del colector decrece en un rango de entre $2^\circ C$ y $5^\circ C$ con respecto al tanque el *DTC* detiene la bomba. La temperatura en el *DTC* puede ser ajustable y depende de los requerimientos del sistema. El óptimo diferencial inicial de encendido se encuentra entre $5^\circ C$ y $9^\circ C$ sobre el offset point. En sistemas cerrados se utiliza el concepto de radiación absorbida, cuando la bomba del colector está apagada la salida útil del colector es igual a cero por lo que se supone que la placa absorbidora está en equilibrio térmico, esto puede calcularse a partir de:

$$[S - U_L(T_p - T_a)] = 0 \quad (2.38)$$

El valor de S cambia cuando la temperatura de la placa T_P es igual a la temperatura inicial más un diferencial de temperatura de encendido $T_i + \Delta T_{ON}$. Entonces S_{ON} se calcula a partir de:

$$S_{ON} = U_L(T_i + \Delta T_{ON} - T_a) \quad (2.39)$$

Por lo tanto cuando la bomba está encendida, la ganancia útil del colector se calcula sustituyendo S_{ON} en la Ecuación 2.41 y puede definirse como el modelo de ganancia de calor útil del sistema. Obteniendo de esta manera una representación diferente del modelo matemático del calor útil, el cual puede calcularse a partir de:

$$Q_u = A_c F_R [S_{ON} - U_L(T_i - T_a)] \quad (2.40)$$

Reduciendo la Ecuación 2.43 se obtiene:

$$Q_u = A_c F_R [U_L(\Delta T_{ON})] \quad (2.41)$$

Por lo tanto, el criterio de apagado debe satisfacer la siguiente desigualdad al correlacionar la Ecuación 2.44 con la Ecuación 2.25, obteniendo así una representación del diferencial de temperatura de apagado, el cual puede calcularse a partir de:

$$\Delta T_{OFF} \leq \left(\frac{A_c F_R U_L}{\dot{m} c_p} \right) \Delta T_{ON} \quad (2.42)$$

donde ΔT_{ON} es el diferencial de temperatura de encendido y ΔT_{OFF} es el diferencial de temperatura de apagado. Definiendo de esta manera un rango de valores mínimos en $\Delta T_{ON} \cong 5^\circ C$ y $9^\circ C$ y para $\Delta T_{OFF} \cong 1^\circ C$ y $4^\circ C$, respectivamente [22].

2.6 Demanda de agua caliente

La demanda de agua caliente en un cierto periodo de tiempo, puede describirse como la demanda de energía D requerida para la generación de agua caliente sanitaria, la cual puede ser obtenida si el volumen V de consumo es conocido por el periodo de tiempo. Se requieren los datos de las temperaturas de agua fría, a la que se entregada por la red municipal T_m y la

de distribución T_w [35]. A partir del modelo matemático definido por la ASHRAE2007, puede calcularse la demanda de energía D con:

$$D = V\rho C_p(T_w - T_m) \quad (2.43)$$

Entonces el volumen de consumo V se calcula a partir de:

$$V = N_d N_p V_p \quad (2.44)$$

El modelo incluye todos los componentes físicos del sistema como colector, tanque, descarga y pérdidas de calor. Las entradas son las variables meteorológicas y condiciones iniciales del fluido de trabajo. El periodo de tiempo del modelo es a una hora. La Fig. 2.19 muestra el uso típico de agua caliente, al igual que la Fig. 2.20 muestra la demanda de agua caliente diaria [22].

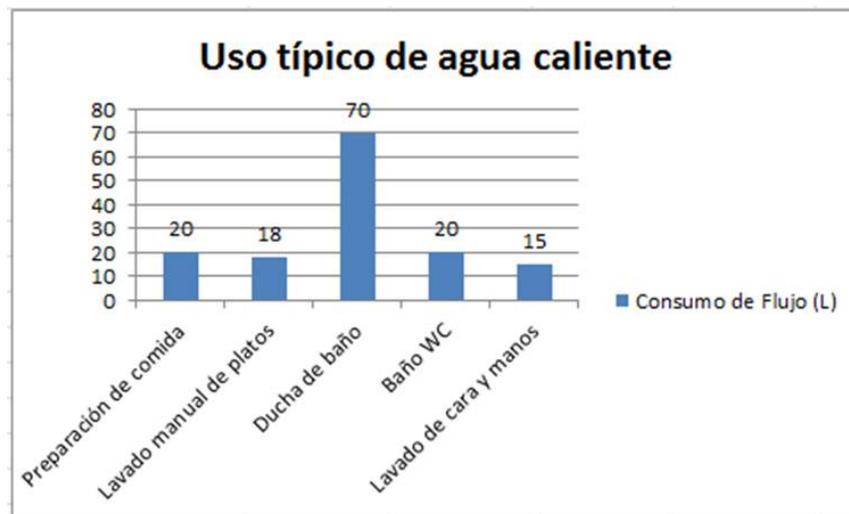


Figura 2.19 Uso típico de agua caliente.

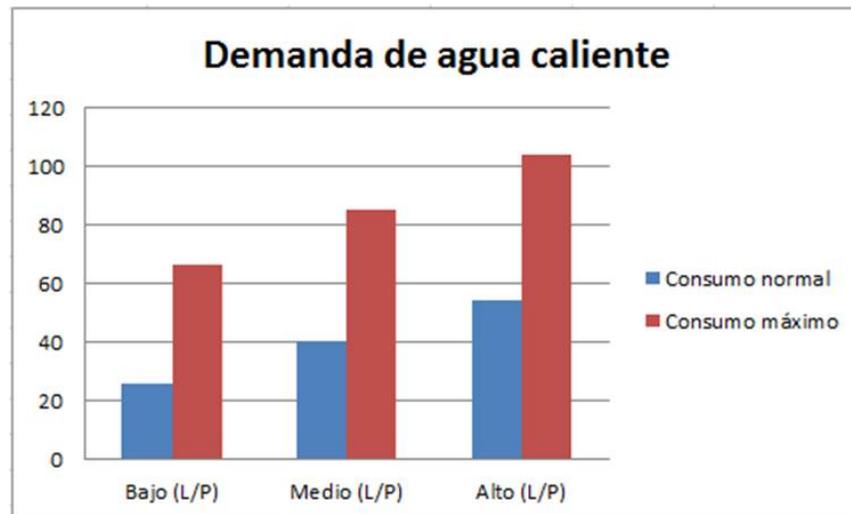


Figura 2.20 Demanda de agua caliente.

2.7 Control aplicado a sistemas térmicos

Sistemas de control

El control de un sistema puede definirse como la adecuada operación de una serie de elementos que darán una respuesta de salida deseada en base a las necesidades y a los requerimientos expresados en forma de instrucciones. Los circuitos de control son aquellos que reciben y procesan la información de cualquier sistema sobre las condiciones del mismo. Los sistemas de control se clasifican básicamente en dos tipos, los de lazo abierto como se observa en la Fig. 2.21 y los de lazo cerrado representado en la Fig. 2.22. En ambos casos se pretende que alguna variable del sistema sea llevada a un cierto valor. Tanto en lazo abierto como en lazo cerrado los sistemas de control están formados por algunos elementos comunes.

Se conoce como planta al sistema que se desea controlar. Se define la existencia de una entrada y una salida, en donde la salida es la variable a controlar y la entrada es la variable que se debe modificar para conseguir que la salida llegue a un valor deseado. La entrada se define como $V(s)$ y la salida como $Y(s)$. El comportamiento de la planta es descrito a partir de una ecuación diferencial en función del tiempo. Estas ecuaciones se conocen como el modelo matemático del sistema.



Figura 2.21 Sistema de control lazo abierto.

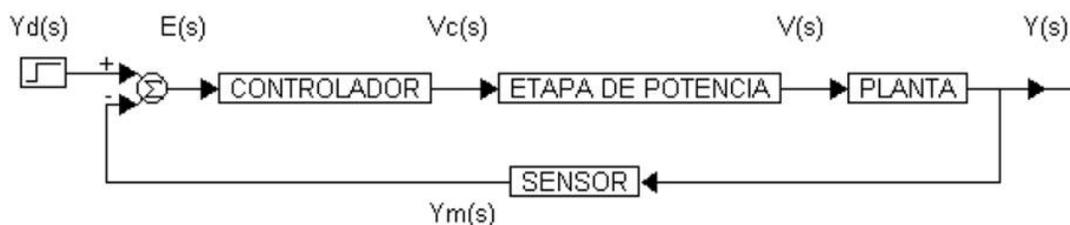


Figura 2.22 Sistema de control lazo cerrado.

Como se muestra en la Fig. 2.22, el controlador es el elemento encargado de proporcionar la señal adecuada a la entrada de la planta, con la finalidad de que la salida $Y(s)$ alcance su valor deseado $Y_d(s)$.

En los sistemas de control en lazo abierto no existe información del estado de la salida, solo se recibe en su entrada la señal del valor deseado $Y_d(s)$. Entonces en base a un conocimiento previo del comportamiento de la planta, el controlador se debe ajustar para que aplique la señal necesaria en su salida $V_c(s)$ y así conseguir que $Y(s)$ se aproxime a $Y_d(s)$.

En los sistemas de control en lazo cerrado, la entrada al controlador es la diferencia entre el valor deseado $Y_d(s)$ y el valor medido de la salida de la planta por un sensor $Y_m(s)$. Esta diferencia es conocida como el error $E(s)$ y le permite al controlador conocer el estado de la salida de la planta. Entonces el objetivo es aplicar la señal necesaria en su salida $V_c(s)$ para llevar el error $E(s)$ a cero, para que así la salida alcance el valor deseado.

La etapa de potencia se conforma por elementos que permiten aplicar la señal generada por el controlador con la potencia necesaria. En general está conformada por amplificadores operacionales. Los sensores son aquellos elementos que proporcionan información confiable y con la capacidad de transformar la señal de tal forma que el controlador la pueda descifrar [26].

Modelado de sistemas térmicos

Se considera un sistema térmico a aquel que involucra la transferencia de calor de una sustancia a otra. Puede analizarse en términos eléctricos a partir de resistencias, capacitancias, fuentes de energía sea de voltaje o de corriente. La capacitancia térmica y la resistencia térmica no se pueden representar con precisión como elementos de parámetros concentrados ya que son diferentes para todas las sustancias.

Por simplificación, un sistema térmico se representa mediante un modelo de parámetros concentrados ya que las sustancias que se caracterizan por una resistencia al flujo de calor, tienen una capacitancia térmica insignificante. Por consiguiente las sustancias que se caracterizan por una capacitancia térmica tienen una resistencia insignificante al flujo de calor.

El flujo de calor puede transferirse de una sustancia a otra de tres formas diferentes: conducción, convección y radiación. Por simplificación solo se va a considerar la transferencia de calor por conducción y convección. Entonces el modelo que representa el flujo de calor transferido puede calcularse a partir de:

$$q = K \Delta T \quad (2.45)$$

donde K es el coeficiente de transferencia de calor, el cual puede ser por conducción o convección. El cálculo del coeficiente de transferencia por conducción K_{cd} se calcula con:

$$K_{cd} = \left(\frac{kA}{\Delta x} \right) \quad (2.46)$$

donde k es la conductividad térmica de la sustancia en $W/m^\circ C$, Δx se define como el espesor del conductor en metros. Por lo tanto, el calor de convección K_{cv} se determina a partir de:

$$K_{cv} = H_{cv}A \quad (2.47)$$

donde A es el área normal para flujo de calor m^2 y H_{cv} el coeficiente convectivo $W/m^\circ C$. Entonces la resistencia térmica se define como la razón entre el cambio de la diferencia de temperatura y el cambio en el flujo de calor, expresada en $\left(\frac{^\circ C}{W}\right)$, la cual se calcula con:

$$R_T = \left(\frac{d(\Delta T)}{dq} \right) = \left(\frac{1}{K} \right) = \left(\frac{1}{\dot{m}c_p} \right) \quad (2.48)$$

La capacitancia térmica se define como el cambio en el calor almacenado con respecto al cambio de la temperatura, expresada en $\left(\frac{J}{^\circ C}\right)$, esta puede calcularse a partir de:

$$C_T = mc_p \quad (2.49)$$

donde m es la masa del sistema en kg y c_p el calor específico del fluido en $J/kg^\circ C$. Las variables a considerar en los sistemas térmicos pueden ser tomadas como fuentes de entrada y salida del sistema, las cuales son temperatura o flujo de calor respectivamente. $\theta_i(t)$ es considerada como la temperatura del flujo del fluido de entrada al sistema en $^\circ C$, $\theta_o(t)$ es considerada como la temperatura del flujo del fluido de salida del sistema en $^\circ C$ y $q_i(t)$ es considerado como el flujo de calor proporcionado por la fuente de energía al sistema en W .

Los sistemas térmicos pueden ser representados esquemáticamente en forma de circuitos eléctricos donde cada variable y cada constante es emulada por algún elemento eléctrico, sea éste fuente de voltaje, fuente de corriente, capacitor o resistencia. En la mayoría de los sistemas térmicos pueden considerarse dos entradas; la primera, **la temperatura del flujo inicial** es relacionada con respecto a una **fuentes de voltaje**; la segunda, **el flujo de calor emitido** por una fuente de energía es relacionada directamente con una **fuentes de corriente**, de igual forma la resistencia térmica y capacitancia térmica son relacionados con sus equivalentes en circuitos eléctricos.

Entonces, la salida del sistema térmico será la temperatura de la sustancia después de ser sometida al flujo de calor e indicara la capacidad que tiene esta para almacenar el calor y su resistencia a transferirlo, por lo que la temperatura de salida será el voltaje en el capacitor, mismo que se carga a través de una resistencia desde las fuentes de corriente y voltaje. En la Fig. 2.23 se observa el modelo eléctrico de un sistema térmico.

Para dar solución al circuito y lograr el modelo matemático del sistema térmico se aplica el teorema de superposición. Analizando el efecto de cada fuente por separado y posteriormente sumar los resultados obtenidos. En primera instancia se considera el flujo de calor de la fuente igual a cero y establece que la única fuente es la temperatura del flujo de entrada. En la Fig. 2.24 se observa el modelo de una sola fuente en función de la temperatura. La representación

matemática diferencial del modelo se calcula con:

$$\left(\frac{\theta_i(t) - \theta_o(t)}{R} \right) = C \left(\frac{d\theta_o(t)}{dt} \right) \quad (2.50)$$

Entonces la temperatura de salida en el modelo se calcula a partir de:

$$\theta_o(t) = -RC \left(\frac{d\theta_o(t)}{dt} \right) + \theta_i(t) \quad (2.51)$$

Por lo tanto, al obtener la transformada de Laplace de la Ecuación 2.54 se logra la función de transferencia del modelo térmico como:

$$\left(\frac{\Theta_o(s)}{\Theta_i(s)} \right) = \left(\frac{1}{RCs + 1} \right) \quad (2.52)$$

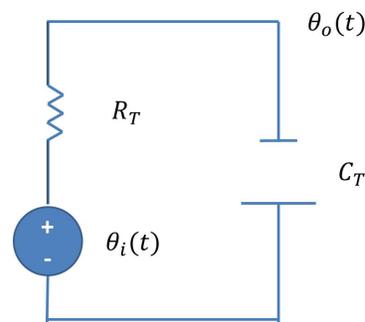


Figura 2.23 Modelo sistema térmico fuente de temperatura.

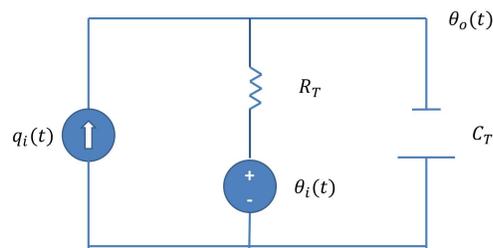


Figura 2.24 Modelo eléctrico del sistema térmico.

Como segundo punto se considera solo el flujo de calor de la fuente como energía entrante y se establece que la única fuente es el flujo de calor. El flujo de calor en forma diferencial a una sola fuente se calcula con:

$$q_i(t) = C \left(\frac{d\theta_o(t)}{dt} \right) + \left(\frac{\theta_o(t)}{R} \right) \quad (2.53)$$

Entonces, al obtener la transformada de Laplace de la Ecuación 2.56 se logra definir la función de transferencia del modelo térmico como:

$$\left(\frac{\Theta_o(s)}{Q_i(s)} \right) = \left(\frac{R}{RCs + 1} \right) \quad (2.54)$$

En la Fig. 2.25 se observa el modelo del sistema con una sola fuente de entrada en función del calor.

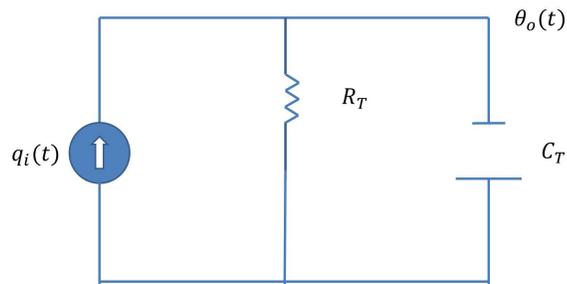


Figura 2.25 Modelo sistema térmico fuente de calor.

Mediante el teorema de superposición se puede resolver el modelo donde se integra la fuente de energía proveedora de calor y la de temperatura. Considerando que la suma de ambos resultados indica que la temperatura de salida depende de las dos fuentes proveedoras de energía calorífica[19]. La función de transferencia del modelo térmico con dos fuentes se expresa como:

$$\Theta_o(s) = \left(\frac{RQ_i(s)}{RCs + 1} \right) + \left(\frac{\Theta_i(s)}{RCs + 1} \right) \quad (2.55)$$

Por lo tanto es necesario conocer el flujo másico del fluido de trabajo, el calor específico de mismo, la cantidad de masa contenida en el sistema, la cantidad de energía que entra al sistema considerando que esta es variable.

Modelo eléctrico-matemático del calentador solar

El calentador solar es un sistema compuesto por elementos que realizan ciertas tareas; la función es generar y almacenar energía a partir de ciertos mecanismos de transferencia de calor y bajo ciertas condiciones de entrada. Considerando entonces la relación existente con los sistemas térmicos, se obtienen los modelos eléctrico-matemático del colector solar, tanque de almacenamiento y el sistema completo.

Entonces el colector solar se rige bajo las siguientes condiciones: dos fuentes de calor de entrada al sistema, una en función de la temperatura inicial del fluido y la otra en función del calor aprovechado de la transformación de la energía solar. Además el sistema tiene una sola salida en función de la temperatura final del fluido. Homologando así estas condiciones con los sistemas térmicos descritos en la sección 2.7. Se logra definir el diagrama equivalente entre el colector solar y el sistema térmico como se observa en la Fig. 2.26.

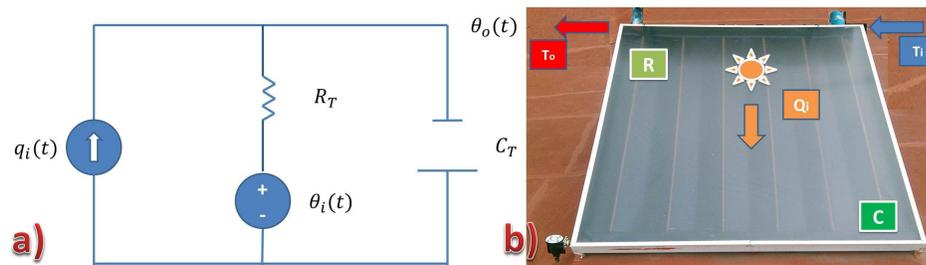


Figura 2.26 a) Modelo eléctrico equivalente b) Diagrama del calentador solar equivalente.

Donde la ecuación diferencial en función del tiempo que rige el comportamiento del colector solar se define a partir de:

$$RC_c\dot{\theta}_o(t) + \theta_o(t) = \theta_i(t) + RQ_i(t) \quad (2.56)$$

$$R = \left(\frac{1}{\dot{m}C_p} \right)$$

$$C_c = (m_c C_p)$$

donde se sabe que C_p es la capacidad calorífica del agua, \dot{m} es el flujo másico del agua y m_c es la masa de agua en el colector. Todos estos parámetros son considerados como constantes definidas. Entonces θ_o se define como la temperatura de salida del fluido en el sistema, θ_i es entonces la temperatura de entrada del fluido en el sistema y Q_i es el calor que entra al sistema. Obteniendo la transformada de Laplace resulta:

$$(RC_c s + 1)\theta_o(s) = \theta_i(s) + RQ_i(s) \quad (2.57)$$

Por lo tanto, la salida del sistema termosifónico puede ser representada en función de sus dos posibles entradas, como se observa en:

$$\theta_o(s) = \frac{\theta_i(s) + RQ_i(s)}{(RC_c s + 1)} \quad (2.58)$$

Así la Ecuación 2.61 es la que rige la operación del colector solar. Por consiguiente debe obtenerse la ecuación que rige el comportamiento del tanque de almacenamiento. Este es considerado como un sistema SISO el cual depende solo de una entrada para modificar su salida. Considerando nuevamente la semejanza existente entre el sistema termosifónico y los modelos térmicos, se obtiene el diagrama del modelo eléctrico-matemático del tanque de almacenamiento, como se observa en la Fig. 2.27.

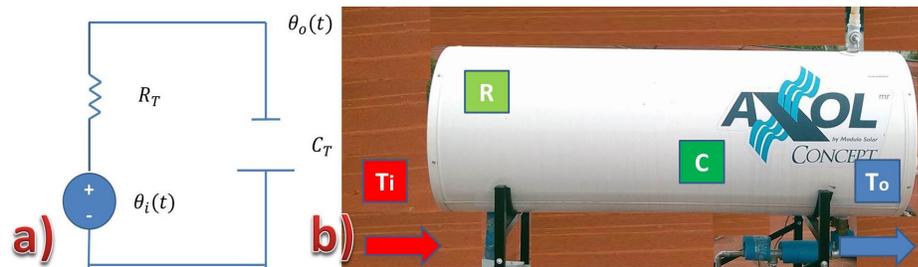


Figura 2.27 a) Modelo eléctrico equivalente b) Diagrama del tanque de almacenamiento equivalente.

Donde la ecuación diferencial en función del tiempo que rige el comportamiento del tanque de almacenamiento se define a partir de:

$$RC_T \dot{\theta}_o(t) + \theta_o(t) = \theta_i(t) \quad (2.59)$$

$$C = (m_T C_p)$$

dónde se considera que m_T es la masa de agua en el tanque. Obteniendo de la Ecuación 2.62 la transformada de Laplace, resulta:

$$\theta_o(s) = \frac{\theta_i(s)}{(RC_T s + 1)} \quad (2.60)$$

Así la Ecuación 2.63 es la que rige el comportamiento del tanque de almacenamiento, la cual se expresa como función de transferencia. Para unificar el sistema, se denota una correlación existe que es de suma importancia. Se tiene en cuenta que la salida del primer subsistema

se convierte en la entrada del segundo subsistema, de igual forma la salida del segundo se convierte en la entrada del primero. De esta forma el sistema se convierte en un sistema de lazo cerrado. Entonces debe considerarse la siguiente correlación.

$$(\theta_o(s))_c = (\theta_i(s))_T$$

$$(\theta_o(s))_T = (\theta_i(s))_c$$

A partir de esta correlación entre los subsistemas se logra obtener la función de transferencia del sistema completo del calentador solar de agua, representada en función de la entrada de calor y la temperatura de salida, como se observa en:

$$\frac{\theta_o(s)_T}{Q_i(s)} = \frac{R}{s^2(R^2 C_T C_c) + s(RC_c + RC_T)} \quad (2.61)$$

Entonces, la Ecuación 2.64 es la que rige el comportamiento del sistema termosifónico y es representada en diagrama de bloques como se observa en la Fig. 2.28

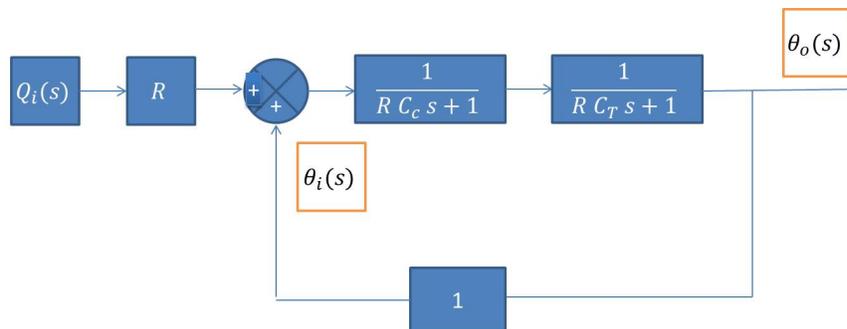


Figura 2.28 Diagrama del modelo térmico del calentador solar Axol.

Control on-off

El control on-off es considerado como el control de dos posiciones, que para la mayoría de los casos es encendido y apagado. Esta acción de control es popular en sistemas de respuesta muy lenta. Si se tiene una señal de salida del controlador $v_c(t)$ y de igual forma se tiene

una señal de error $e(t)$; con la acción de control on-off, $v_c(t)$ permanecerá en un valor ya sea máximo o mínimo, el cual depende si $e(t)$ es positivo o negativo. La señal de salida del controlador en modo de apagado deberá cumplir con la desigualdad $e(t) < 0$, y se calcula con:

$$v_c(t) = U_{off} \quad (2.62)$$

donde $v_c(t)$ se considera como la salida del controlador, $e(t) = (y_d(t) - y_m(t))$ es el error definido por la diferencia entre el valor deseado $y_d(t)$ y el valor medido $y_m(t)$, U_{off} es el estado apagado. Por lo tanto, la la señal de salida en modo encendido deberá cumplir con la desigualdad $e(t) \geq 0$, y se calcula con:

$$v_c(t) = U_{on} \quad (2.63)$$

donde $v_c(t)$ se considera como la salida del controlador y U_{on} es el estado encendido. En la Fig. 2.29 se observa un esquema representativo del control on-off.



Figura 2.29 Modelo de control On/Off.

La otra opción del control on-off es adicionándole una banda de histéresis, definida como una brecha diferencial en la que puede moverse la señal de error antes de que ocurra la conmutación, esta banda provoca que $v_{cB}(t)$ conserve su valor presente hasta que $e_B(t)$ se haya desplazado ligeramente más allá de cero. Esta brecha es usada con frecuencia para evitar una operación demasiado frecuente del mecanismo de encendido y apagado.

La acción de control llevada a cabo por el on-off con histéresis es a partir de la relación entre la salida del controlador y la señal de error. Entonces la señal de salida en modo apagado deberá cumplir con la desigualdad $e_B(t) - (B/2) < 0$, y se calcula con:

$$v_{cB}(t) = U_{off} \quad (2.64)$$

Por lo tanto, la señal de salida en modo encendido deberá cumplir con la desigualdad $e_B(t) + (B/2) \geq 0$, y se calcula con:

$$v_{cB}(t) = U_{on} \quad (2.65)$$

donde B queda definida como la brecha diferencial. La magnitud de la misma debe determinarse a partir de las consideraciones de precisión y vida del componente, puesto que la reducción de ésta aumenta la cantidad de conmutaciones reduciendo proporcionalmente la vida del componente. En la Fig. 2.30 se observa un esquema representativo del control on-off con histéresis.



Figura 2.30 Modelo de control On/Off con histéresis.

Este tipo de acción de control se implementa con relevadores que conectan la energía a la entrada de la planta cuando se detecta que la salida está por debajo del valor deseado y se desconecta la energía cuando la salida ya está por encima del valor deseado [26].

Control PI

El control proporcional integral PI se define como la combinación entre el control proporcional y el integral, con el objetivo de eliminar el error que el control proporcional no logra corregir. El control PI se rige a partir del modelo matemático descrito por:

$$v_c(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.66)$$

Por lo tanto, la representación de su función de transferencia se calcula con:

$$\left(\frac{V_c(s)}{E(s)} \right) = k_p + \left(\frac{k_i}{s} \right) = \left(\frac{k_p s + k_i}{s} \right) \quad (2.67)$$

donde k_p es definida como la constante de proporcionalidad y k_i es la constante de integración.

Capítulo 3

Planta solar de pruebas

3.1 Diseño de planta solar de pruebas

En este capítulo se describe la planta solar. Se caracterizó un calentador solar de placa plana modelo Axol Concept 150, ubicada en las instalaciones de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica en el edificio de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas, con las coordenadas: Latitud 22.76 °N, Longitud 102.56 °O y Altitud 2464.6 metros sobre el nivel del mar.

La planta se equipó considerando las recomendaciones de la Norma Mexicana NMX-004-NORMEX-2010, Energía Solar- Evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua-método de prueba y la Norma Mexicana NMX-001-NORMEX-2005 Energía Solar- Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua- Métodos de Prueba y Etiquetado [28]. La planta solar se compone de los siguientes elementos: superficie de planta, estación meteorológica, sistema de adquisición de datos, sistema termosifónico de calentamiento solar y, sensores de acondicionamiento de señales [27].

3.2 Proceso de caracterización del sistema de calentamiento solar de agua

La sociedad mexicana de normalización y certificación S. C. (NORMEX), es el organismo mexicano establecido para la normalización desde el 3 de diciembre de 1993. Fue acreditado

para elaborar y expedir normas mexicanas en el área de energía solar [29]. Con base a lo establecido en la NMX-ES-001-NORMEX-2005, se considera lo siguiente [30].

Para determinar el rendimiento térmico del sistema se deben realizar ciertas evaluaciones, donde debe ponerse énfasis es en la instrumentación, los mecanismos de medición, el procedimiento de pruebas y el cálculo.

3.2.1 Instrumentación

Recomendaciones en la medición de la radiación solar

Se utiliza el piranómetro para la medición de la radiación solar global. Considerando los requerimientos mínimos del sensor donde la variación de la respuesta de la señal eléctrica por efecto de la temperatura debe ser menor al $\pm 1\%/^{\circ}\text{C}$. La respuesta espectral debe permanecer dentro del $\pm 2\%$ y en rango de $0.3\ \mu\text{m}$ hasta $2.5\ \mu\text{m}$, de longitud de onda. La constante de tiempo del sensor debe ser menor a 5 segundos. El sensor debe ser colocado en su posición de prueba al menos 30 minutos antes de iniciar el censado, con el objetivo de que alcance su equilibrio térmico.

Recomendaciones en la medición de la temperatura

La medición de la temperatura debe realizarse de acuerdo con la norma ASHRAE41.1 – 74. Considerando una exactitud y precisión en los instrumentos como se describe, al medir la temperatura en cierto tiempo deberá tener una precisión de $\pm 0.5\ ^{\circ}\text{C}$ y una diferencia de temperaturas existente con una precisión de $\pm 0.1\ ^{\circ}\text{C}$. Se recomienda utilizar termopares y/o termistores con constante de tiempo menor a un segundo de respuesta. [34].

Medición del flujo másico

La precisión en la medición del flujo másico de agua debe ser al menos $\pm 1.0\ \%$ del valor medido. La escala del instrumento no debe exceder dos veces la precisión especificada y su constante de tiempo debe ser menor a un segundo de respuesta.

Medición de la velocidad de viento

La velocidad de viento deberá ser medida a cada minuto, para así poder determinar la velocidad de viento promedio en un rango mínimo de 10 minutos. Las mediciones deberán contar con una precisión de $\pm 0.8 \text{ m/s}$.

3.2.2 Mecanismos de medición

Mecanismo de medición de la temperatura ambiente

Se considera utilizar el Método *II* de la Norma ASHRAE41.1 – 74, que se describe brevemente. El sensor de temperatura debe ser alojado en una cámara sombreada y ventilada de dimensiones adecuadas. Ubicado 15 *cm* detrás del colector solar, con esto se evita que la temperatura aumente por la incidencia de la radiación solar directa [34].

Mecanismo de medición de la radiación solar

Las mediciones de la irradiancia deben reportarse en W/m^2 , acompañada de la fecha, hora local y tiempo solar, correspondientes al sitio de pruebas. El piranómetro deberá estar posicionado con la misma inclinación que el colector, de esta manera reciba la misma radiación solar por unidad de área.

Mecanismo de medición de la diferencia de temperatura a través del colector

Para minimizar los errores en la medición de la temperatura, las sondas deberán estar ubicadas lo más cerca de la entrada o salida del colector además de colocarse dentro de un dispositivo mezclador, mismo que deberá estar aislado para minimizar la transferencia de calor hacia el ambiente. Se consideran los requerimientos de la Norma ASHRAE41.1 – 74 [34].

Condiciones del viento para las pruebas

Para la velocidad de viento es recomendable medirse en los alrededores más próximos al colector solar, a una altura media del mismo y donde no se tengan obstrucciones de viento. Además deberá determinarse y reportarse la dirección del viento promedio para cada prueba.

Consideraciones para la evaluación de planta solar

El rendimiento térmico del colector solar es determinado mediante la obtención de su eficiencia instantánea, además de la combinación de valores de irradiancia solar y temperatura. Es necesario medir experimentalmente la radiación solar y la tasa de incremento de la

energía calorífica en el agua, en función del tiempo bajo condiciones de estado cuasi estático. Para la obtención del rendimiento térmico del colector solar, puede considerarse tanto en la Ecuación 2.25 que representa el calor útil del sistema.

La eficiencia instantánea del colector solar puede definirse como la energía calorífica entregada por el sistema con respecto a la energía solar incidente sobre el mismo. Por lo tanto puede representarse matemáticamente como en la Ecuación 2.29. Para el desarrollo de las pruebas de eficiencia se requiere de un valor mínimo de irradiancia promedio de 800 W/m^2 , considerando que la componente difusa no sea mayor al 20 % del total. Con respecto a la temperatura ambiente esta debe estar por debajo de los $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Las condiciones de viento se consideran a una velocidad de viento promedio de entre 2.5 m/s durante cualquier periodo de prueba con un tiempo mínimo de registro de 10 minutos. El flujo de agua a través del colector solar debe permanecer constante, con valores recomendados entre los 0.02 kg/sm^2 .

Los puntos a considerar para el registro de datos son mínimo cuatro por cada valor de temperatura de fluido de entrada, de estos datos dos deben ser tomados durante el periodo de tiempo anterior al medio día solar y los otros deben ser tomados en el periodo posterior al medio día solar cuidando sean simétricos respecto al medio día solar.

3.3 Planta solar de pruebas

3.3.1 Superficie de planta

Se define así a la superficie horizontal donde se instaló el colector solar caracterizado, la cual cuenta con el espacio adecuado para instalar a sus cercanías la estación meteorológica y el tanque de alimentación de agua. Esta superficie requiere no tener obstrucciones de la incidencia de la radiación solar dentro del período de pruebas establecido en cualquier día del año, como se muestra en el diseño de la superficie de planta en la Fig. 3.1.

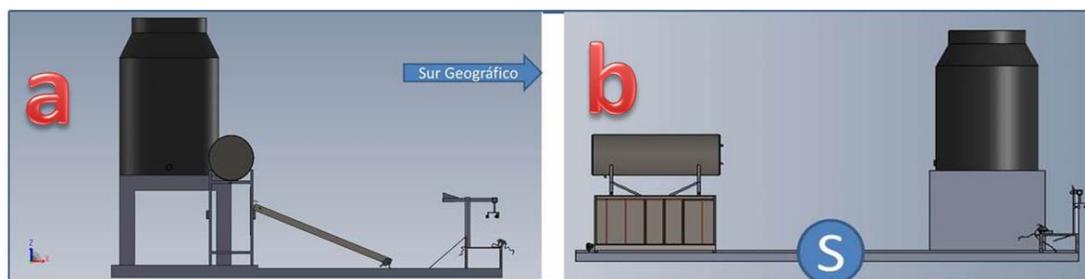


Figura 3.1 a) Superficie de planta vista lateral, b) Superficie de planta vista frontal.

3.3.2 Estación meteorológica

Se define de esta manera al conjunto de instrumentos que miden las variables climatológicas locales en un determinado periodo de tiempo. En dicha estación están integrados los sensores de radiación solar, temperatura ambiente, velocidad y dirección de viento.

En la siguiente Fig. 3.2 se muestra el esquema considerado de la estación meteorológica, así como la instalada en la planta de pruebas, misma que consta de los instrumentos siguientes: Piranómetro, Anemómetro y Termómetro digital. La mesa que contiene los instrumentos de medición tiene una dimensión de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, con una altura de 28 cm , se le integró una superficie horizontal que puede ser acoplada a un ángulo de inclinación variable, por requerimiento del piranómetro a estar a la misma inclinación del colector solar.

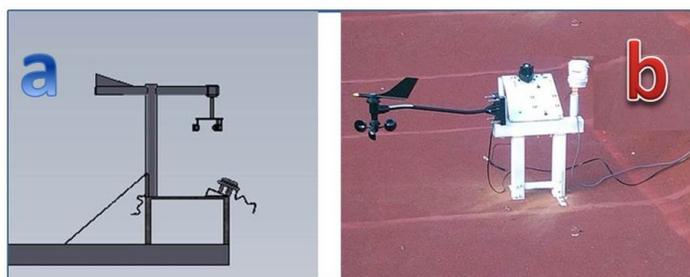


Figura 3.2 a) Estación meteorológica diseñada, b) Estación meteorológica instalada.

Sensor de radiación solar y UV, modelo Davis Instrument (DA 06450)

El sensor mide la radiación solar global, considerada como la suma del punto de medición de la componente difusa y directa de la irradiancia solar. El sensor consta de un transductor que convierte la radiación incidente en energía eléctrica, debido al funcionamiento del fotodiodo

de Silicón el cual responde a la banda espectral desde 400 *nm* hasta 1100 *nm*. El sensor tiene su salida en forma de voltaje, entonces por la acción del transductor convierte la corriente vía amplificador operacional en una salida de 0 a 2.5 *VDC*. Los rangos de operación de temperatura se encuentran de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la Fig. 3.3 se observa el sensor de radiación utilizado. Las características del sensor de radiación solar son:

Precisión de $\pm 2\%$ en la escala total del espectro.

Resolución de 1.67 *mV* por cada W/m^2



Figura 3.3 Sensor de radiación.

Anemómetro, modelo Davis Instrument (7911)

El sensor mide la velocidad y dirección de viento de la zona donde se localiza. El sensor de velocidad de viento funciona a partir de un dispositivo de cazoletas con interruptor magnético, el sensor de dirección de viento esta dado a partir de un dispositivo de veleta con potenciómetro. Los rangos de medición para la velocidad se pueden dar en millas por hora, metros por segundo y kilómetros por hora.

Los rangos de medición para la dirección de viento se encuentran basados en la rosa de los vientos en grados, obteniendo 16 puntos a cada 22.5° . En la Fig. 3.4 se observa el sensor de velocidad de viento utilizado. Los rangos de precisión para los sensores que conforman el anemómetro se dan tanto para velocidad y dirección. La resolución del anemómetro se da tanto para velocidad y dirección. Las características del sensor de velocidad de viento son:

Velocidad de viento 0.5 m/s a 89 m/s

Dirección 0° a 360° , o 16 puntos de la rosa de los vientos



Figura 3.4 Anemómetro.

Sensor digital de temperatura, modelo DS18B20 dispositivo de comunicación digital

El sensor se basa en un termómetro digital de alta precisión entre 9 y 12 bits de temperatura en grados centígrados. Se basa en un protocolo especial que permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable, comunicación One Wire. El código requiere de las librerías Dallas Temperature y One Wire. Este sensor fue acondicionado para determinar la temperatura ambiente. Las características del sensor de temperatura son:

La temperatura operativa se encuentra entre 50°C y 125°C

La precisión en el rango de -10°C y 85°C , es de $\pm 0.5^\circ\text{C}$

La conversión de la temperatura a 12 bits digital es en 750 ms

La resolución del sensor de temperatura está en función de la configuración, 9 bits 0.5°C , 10 bits 0.25°C , 11 bits 0.125°C y 12 bits 0.0625°C . En la Fig. 3.5 se muestra el tipo de sensor de temperatura utilizado.



Figura 3.5 Sensor digital de temperatura.

Caudalímetro, modelo YF-21

El sensor mide el caudal registrado al paso por el sensor de paletas. El caudalímetro tiene su funcionamiento de acuerdo al paso del fluido a través de unas paletas rotatorias que al cubrir una revolución efectúan la acción de un campo magnético que afecta al sensor de tipo efecto hall el cual envía un pulso, por lo que al medir la frecuencia del pulso registrado y multiplicarlo por un factor que los correlaciona, se logra obtener la tasa de flujo en litros por minuto. En la Fig. 3.6 se observa el tipo de sensor de medición de caudal instalado [31]. Las características del sensor de caudal son:

Rango de flujo 1 *lpm* hasta 30 *lpm*

Señal de salida Onda cuadrada

Error 5%

Pulso característico $F=7Q$



Figura 3.6 Caudalímetro instalado.

Sistema de adquisición de datos

Es el sistema capaz de concentrar y distribuir las señales provenientes de cada uno de los sensores, hacia un programa de computadora el cual trata cada una de las señales para posteriormente almacenarlas. Está conformado por una tarjeta de adquisición de datos implementada a partir de un microcontrolador Arduino Mega 2560, una tarjeta de circuitos impresos que interconecta los sensores con el microcontrolador y la computadora, software de adquisición de datos, el cual está ligado con las plataformas Arduino-MatLab [33].

Tarjeta de adquisición de datos Arduino Mega 2560

Es un microcontrolador basado en el ATmega2560, contiene 54 pins digitales de entrada/salida de los cuales son 15 utilizados como salida PWM. Contiene 16 entrada/salida analógicas, 4 UART's un oscilador cristal a 16 MHz , conexión USB, ICSP y botón de reset. En la Fig. 3.7 se observa la tarjeta Arduino instalada. Las características de la tarjeta de adquisición de datos son:

Microcontrolador ATmega 2560

Pines digitales I/O 54 pines (15 PWM)

Pines Analógicos I/O 16

EEPROM 4 KB

Velocidad del reloj 16 MHz

Energizado vía USB o conexión externa.



Figura 3.7 Arduino Mega 2560.

Se desarrolló una tarjeta de circuitos impresos la cual hace la interconexión mecánica y eléctrica entre los sensores y la tarjeta Arduino Mega2560. En esta se incluyen los sensores de caracterización como los de la estación anemométrica. En la Fig. 3.8 se observa la tarjeta de adquisición de datos diseñada, tanto su diagrama eléctrico como la tarjeta real.

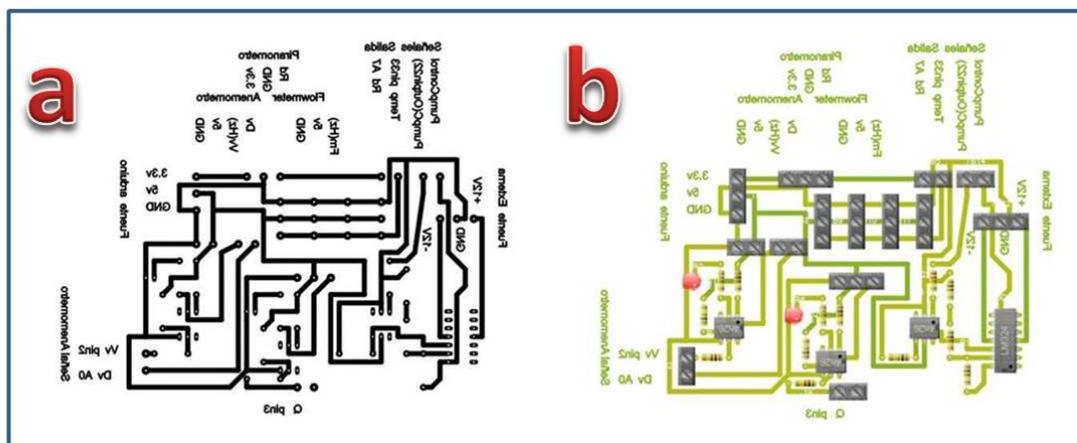


Figura 3.8 a) Esquema eléctrico del DAQ, b) Vista real del esquema eléctrico del DAQ.

Acondicionamiento de señales

Las señales que provienen de cualquier sensor deben acondicionarse de tal forma que sean adecuadas en el momento del procesamiento de la información. En algunos casos las señales requieren de amplificación, filtrado en caso de contener información que no se requiera o sea errónea, la transformación de variable, para los casos en que la señal del sensor se da en forma de frecuencia o corriente. Entonces para la adquisición de información y procesamiento posterior las señales deben de ser adecuadas y homogéneas, las mismas que generaran una tensión en corriente directa.

De igual forma se debe proteger la tarjeta de adquisición de datos de los retornos de corriente, esto es cuando se utilizan elementos de potencia, los cuales demandan mayor cantidad de corriente y voltaje para realizar su acción de trabajo, entonces se diseña una etapa de potencia para separar las señales de baja potencia con las de alta. Previendo de esta manera daños en el funcionamiento de la tarjeta de adquisición.

Las señales que provienen del sensor de velocidad de viento y el sensor de caudal, se acondicionaron a partir de un opto acoplador con el objeto de lograr una señal en frecuencia efectiva para que esta fuera detectada por la tarjeta de adquisición de datos. En la Fig. 3.9 se muestra la configuración elegida.

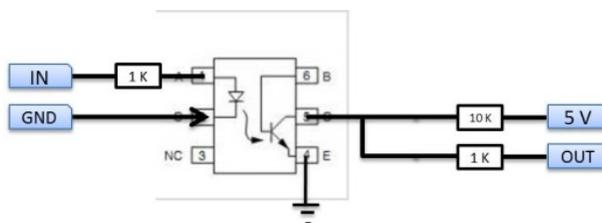


Figura 3.9 Diagrama acondicionado de velocidad.

Le etapa de potencia diseñada se conforma por un opto acoplador para separar las señales de la tarjeta con las de control, además de un amplificador de voltaje con una ganancia de 1.5 para alcanzar los parámetros de voltaje del dispositivo a controlar. La configuración de la etapa de potencia se muestra en la Fig. 3.10.

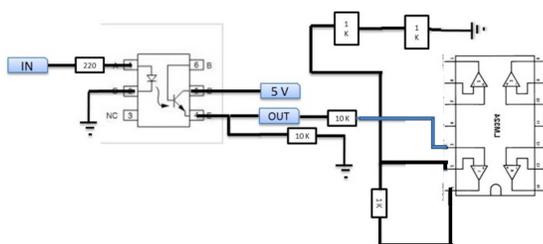


Figura 3.10 Diagrama etapa de potencia.

Software de adquisición de datos

El software utilizado para la adquisición de datos es MatLab R2013a, el cual a partir de un programa desarrollado adquiere la información transferida por medio del puerto COM4, conectado por USB a la tarjeta de adquisición de datos. La información se almacena en un vector virtual para posteriormente ser direccionada a los vectores definidos por cada variable; velocidad y dirección de viento, radiación solar, caudal, temperatura ambiente, salida del colector, ingreso del colector y salida a servicio. Las señales son adquiridas en un periodo de tiempo de un segundo, posteriormente llevan un procesamiento estadístico con el objetivo de almacenar

información cada diez minutos [32]. En la Fig. 3.11 se observa la interconexión de Hardware y Software.

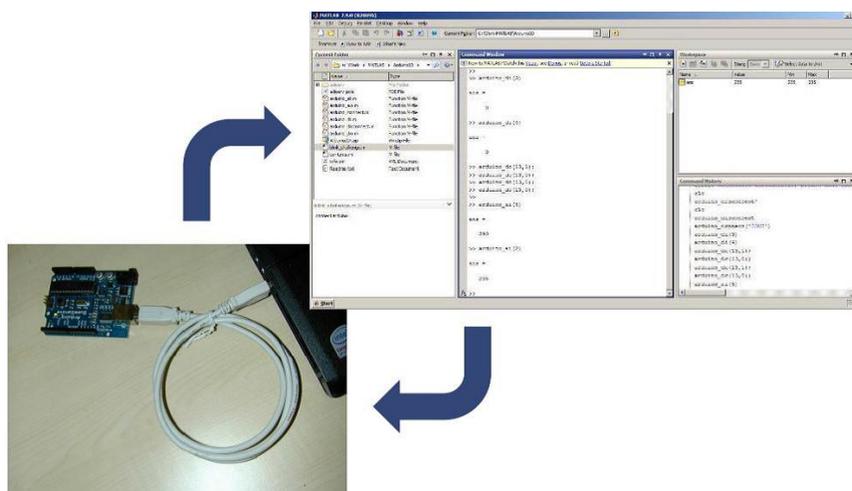


Figura 3.11 Diagrama Hardware-Software.

3.3.3 Sistema termosifónico de calentamiento solar (colector de placa plana)

El sistema termosifónico lo conforma un calentador solar de placa plana de la marca Axol HVA 150, contiene un termo tanque de 150 litros de capacidad con recubrimiento de porcelana, probado a una presión máxima de 9 kg/cm^2 , el cual se puede observar en la Fig. 3.12. Tiene una base estructural con travesaño y tiras protectoras de goma auto adheribles, que mantienen firme al tanque, como se observa en la Fig. 3.13.



Figura 3.12 Tanque de almacenamiento.



Figura 3.13 Base estructural del calentador.

El colector está compuesto de un arreglo de seis tubos de cobre de media pulgada; por donde se da la circulación del agua. La placa absorbidora es corrugada y tiene una superficie selectiva Tinox (azul-titanio) logrando una absorción del 97% y emitancia de solo un 3%, los cabezales del sistema son de tres cuartos de pulgada de cobre. El colector en conjunto lleva un aislamiento térmico de poliuretano de alta densidad el cual tiene una conductividad térmica de 0.04 W/mK , una estructura protectora de aluminio en forma rectangular y una cubierta de vidrio templado de 3.2 mm , con una transmitancia del 91% y área de apertura de 1.8 m^2 , en la Fig. 3.14 se observa la estructura del colector.



Figura 3.14 Colector plano.

Tiene dos conexiones de manguera flexible que unen el tanque con el colector. Además tiene como protección al sistema una válvula de alivio de presión, una válvula eliminadora de aire y una válvula anticongelante, las válvulas utilizadas pueden observarse en la Fig. 3.15.



Figura 3.15 a) Válvula de eliminación de aire, b) Válvula de anti congelamiento.

El calentador solar de agua completo puede observarse en la Fig. 3.16, el cual se conforma por el termo tanque, colector plano, estructura de soporte y las conexiones mecánicas.

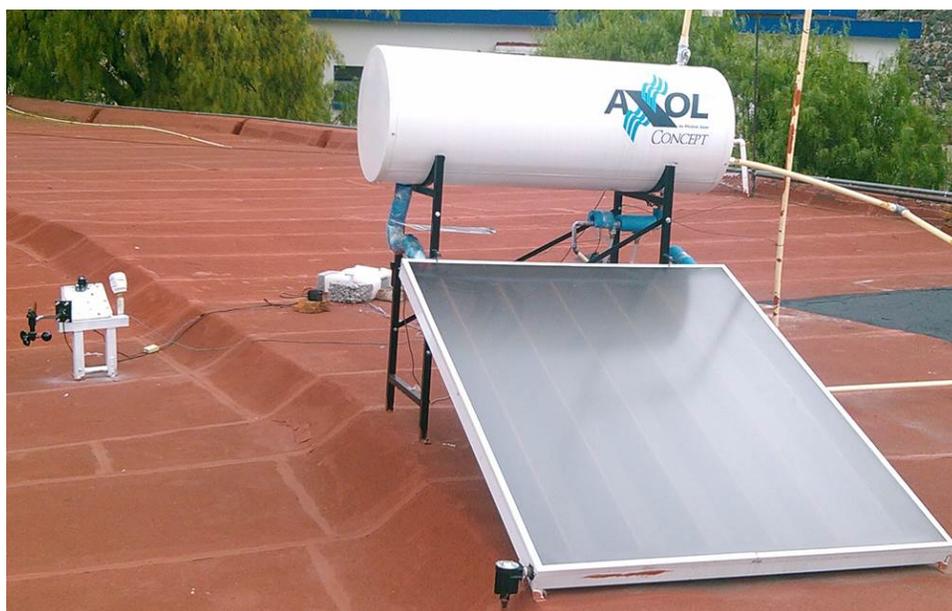


Figura 3.16 Colector solar de placa plana.



Figura 3.18 Sensor YF-21 adaptado al sistema.

3.4 Metodología de prueba de planta solar

El sistema se preparó para llevar a cabo la evaluación, instalando el banco de pruebas conformado por el calentador caracterizado, la estación meteorológica y el sistema de adquisición de datos. Se verificó la instalación corroborando la inexistencia de fugas de agua y que todos los sensores instalados funcionen adecuadamente de tal forma que la información que proporcionan sea la adecuada y concuerde con los datos esperados. Se verifica la orientación geográfica sobre la cual está instalado el sistema. Respecto a la medición de la radiación solar el ángulo al que debe estar instalado el sensor deberá ser el mismo que el de la placa de colector. Para la realización de la prueba se debe considerar y determinar lo siguiente:

- El volumen máximo de agua disponible útil en el sistema permanece constante a 150 litros.
- El área de apertura del colector permanece constante y es de 1.8 m^2 .
- La relación existente entre el volumen del sistema con respecto al área de apertura permanece constante quedando en $150/1.8$.
- Se evalúa en cada prueba la temperatura promedio del agua, después que sea homogeneizada en el sistema.
- Se evalúa en cada prueba la energía térmica útil, después de ocho horas de exposición a la radiación solar.

- Considerando el medio día solar como punto medio de la prueba, entonces se debe evaluar por lo menos cuatro horas antes y cuatro horas después del medio día solar. El horario se define con respecto al tiempo solar 8 : 00 horas como punto de partida y 16 : 00 fin de la prueba, considerando el cambio de horario en el tiempo civil la evaluación inicia a las 9 : 00 horas y concluye a las 17 : 00 horas.

Además debe tomarse en cuenta la energía térmica útil después de ocho horas de exposición a la radiación solar, iniciando la prueba a alta temperatura para simular el comportamiento del sistema con una diferencia de temperatura entre el agua contenida y la temperatura ambiente equivalente a la utilización del sistema en la ciudad con el clima más desfavorable que se desea incluir en la curva de evaluación térmica.

3.4.1 Acondicionamiento inicial de la prueba

Para poder evaluar de forma efectiva el sistema debe tomarse en cuenta el procedimiento descrito a continuación.

- Llenar el calentador solar con agua a temperatura ambiente.
- Considerar que la temperatura inicial de la prueba T_i , se obtiene cuando la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del sistema es mínima, calculando así el promedio.
- La prueba inicia cuatro horas antes del medio día solar verdadero, en este caso el horario es 8 : 00 horas tomando en cuenta que la escala manejada es el tiempo solar.
- Exponer el sistema a la radiación solar; al mismo tiempo se debe iniciar el registro de la irradiancia, temperatura ambiente y fluido, así como la velocidad del viento. La duración total de la prueba es de ocho horas, la adquisición de datos deberá ser registrada cada sesenta segundos.
- La prueba finaliza cuatro horas después del medio día solar, en este caso el horario es 16 : 00 horas tomando en cuenta que la escala manejada es el tiempo solar.

- Considerar que la temperatura final de la prueba T_f , se obtiene cuando la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del sistema sea mínima, calculando así el promedio.
- Para finalizar deben de registrarse todos los valores obtenidos, considerando que los parámetros obtenidos deben cumplir con las condiciones climatológicas anteriormente especificadas.

Para proceder a realizar el cálculo del rendimiento térmico del sistema como primer punto deben integrarse los valores instantáneos de irradiancia sobre el periodo de ocho horas, con el objetivo de obtener el valor de la irradiación solar MJ/m^2 , considerando:

$$H = \frac{60}{1000000} \sum_0^{480} G \quad (3.1)$$

donde H es definida como la irradiación solar comprendida en el periodo de ocho horas de insolación en unidades de energía, MJ/m^2 . G se define como la irradiancia solar en unidades de potencia, W/m^2 . Posteriormente deben obtenerse los valores promedio durante el periodo de la prueba de la temperatura ambiente considerando:

$$T_{amb} = \left(\frac{1}{481} \right) \sum_0^{480} T_{amb,reg} \quad (3.2)$$

donde T_{amb} es el valor de la temperatura ambiente promedio durante la prueba y $T_{amb,reg}$ es el valor de cada registro de temperatura ambiente. Entonces la velocidad del viento se calcula a partir de:

$$V_v = \left(\frac{1}{481} \right) \sum_0^{480} V_{v,reg} \quad (3.3)$$

donde V_v es el valor de la velocidad de viento promedio durante la prueba y $V_{v,reg}$ es el valor de cada registro de la velocidad de viento. La presentación de los datos obtenidos se realiza por medio de tablas y gráficas que muestren los resultados durante el desarrollo de la prueba, así como cálculos y constantes características[27].

3.5 Evaluación y cálculos térmicos de la planta solar

La evaluación térmica del sistema se obtiene mediante un balance de energía, combinando la irradiancia solar, la temperatura ambiente promedio y la temperatura del fluido dentro del sistema al inicio y final de la prueba. Entonces se logra calcular la ganancia de energía absorbida por el agua en el sistema para las condiciones definidas[27].

La evaluación de la eficiencia instantánea del sistema se logra describir de forma precisa, a partir de:

$$\frac{Q_U}{HA_c} = \frac{m_v C_p (T_f - T_i)}{HA_c} \quad (3.4)$$

donde Q_U es el calor útil en el agua almacenada al final del periodo diurno expresada en (MJ) , A_c es el área de apertura del sistema considerada en m^2 , T_i es la temperatura del agua contenida al inicio de la prueba en $^{\circ}C$, T_f es la temperatura homogénea del agua contenida al final de la prueba en $^{\circ}C$, m_v es la masa de agua contenida en el equipo en kg y C_p es la capacidad calorífica del agua líquida con un valor constante de $0.004186 MJ/kg^{\circ}C$.

Capítulo 4

Resultados experimentales

4.1 Modelo matemático del calentador solar en MatLab/Simulink

El modelo matemático del sistema termosifónico descrito en la sección 2.7 está conformado por dos subsistemas. El primero de ellos es definido como el colector solar de placa plana, el cual realiza la transferencia de energía solar a energía calorífica útil. El otro subsistema es el tanque de almacenamiento el cual tiene como función almacenar y mantener el agua caliente por el mayor tiempo posible, además de retroalimentar de agua al colector solar para conformar un sistema en circuito cerrado.

Mediante el entorno de MatLab se simula el calentador solar de placa plana, utilizando las ecuaciones constitutivas descritas en la sección 2.7. A partir de la Ecuación 2.63 y el modelo eléctrico de la Fig. 4.1, se logró desarrollar el primer diagrama de simulación que representa el colector solar, como se observa en la Fig. 4.2.

El segundo modelo de simulación que se diseñó representa el tanque de almacenamiento en forma de diagrama de bloques, a partir de la Ecuación 2.65 y el esquema eléctrico-matemático de la Fig. 4.3, como se muestra en la Fig. 4.4.

Por lo tanto, la representación del sistema termosifónico en forma de modelo de simulación se logró a partir de la Ecuación 2.66 y el diagrama eléctrico-matemático de la Fig. 4.5, como se observa en la Fig. 4.6.

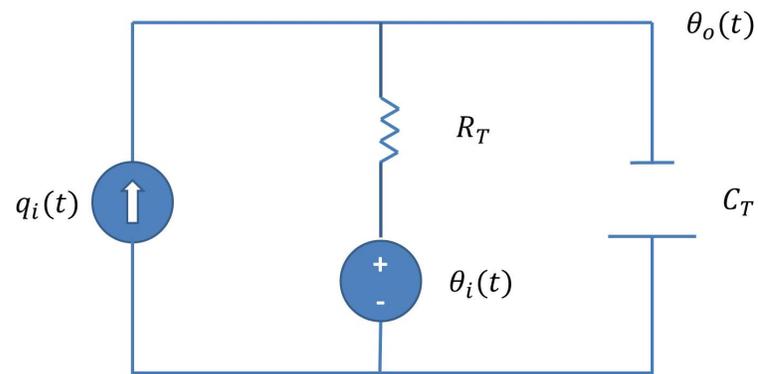


Figura 4.1 Diagrama del modelo eléctrico-matemático del colector solar.

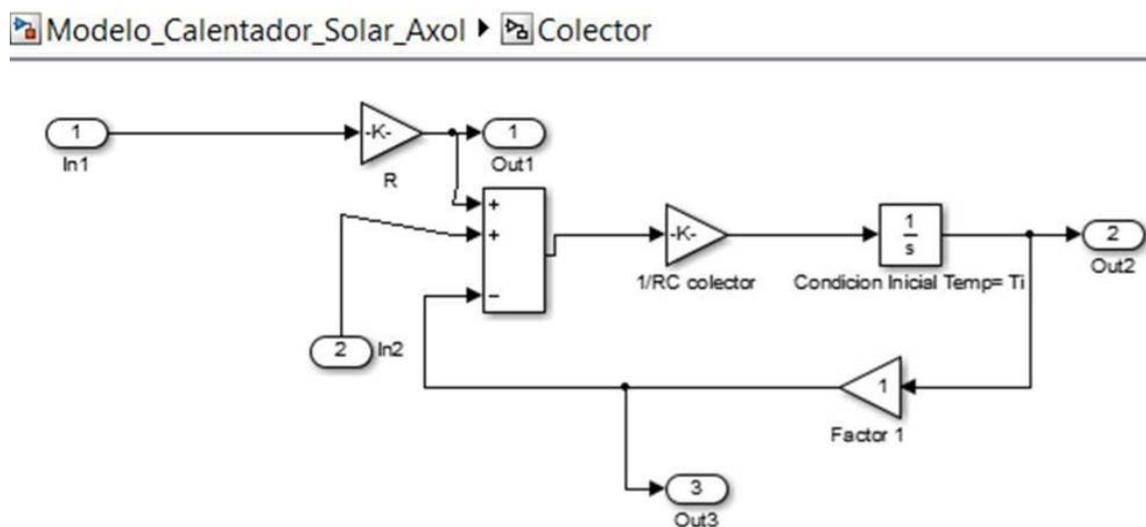


Figura 4.2 Diagrama en bloques del modelo térmico del colector solar.

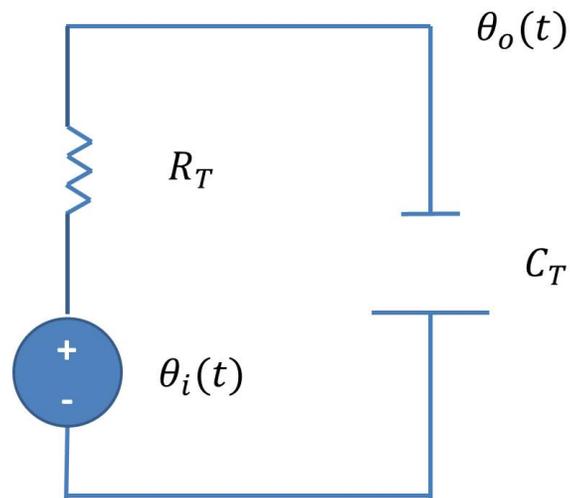


Figura 4.3 Diagrama del modelo eléctrico-matemático del tanque de almacenamiento.

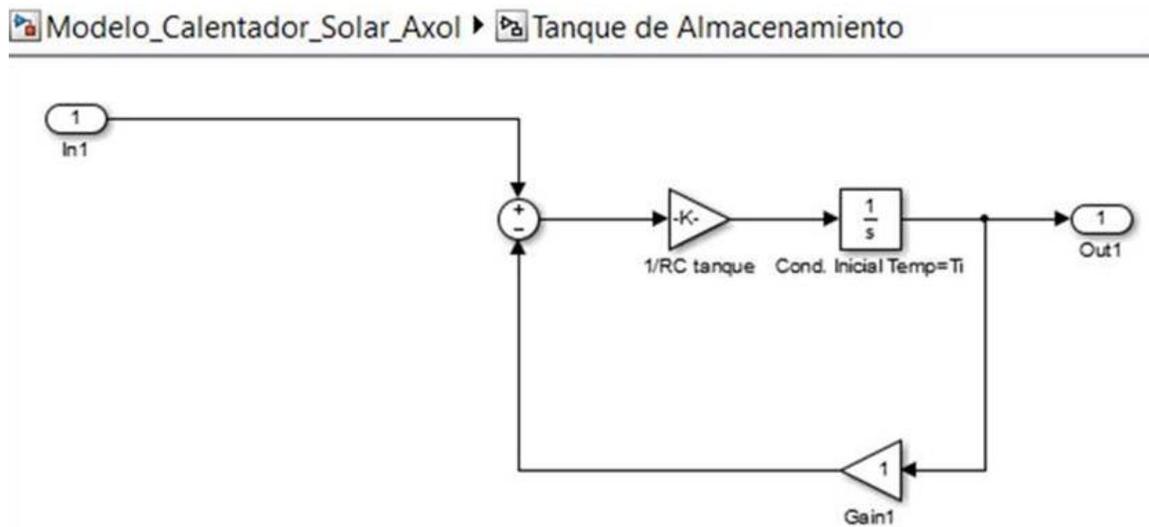


Figura 4.4 Diagrama en bloques del modelo térmico del tanque de almacenamiento.

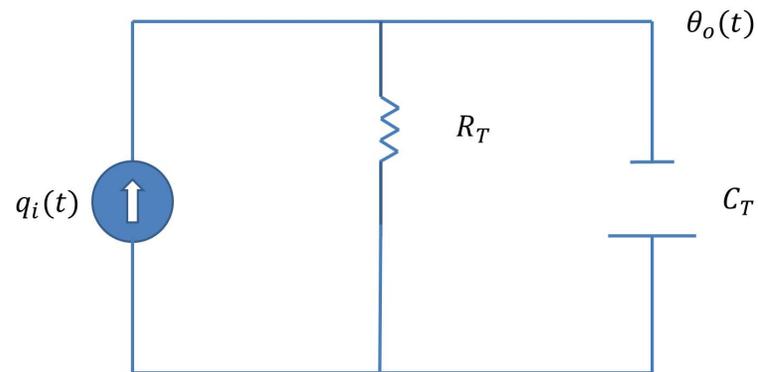


Figura 4.5 Diagrama del modelo eléctrico-matemático del Calentador Solar.

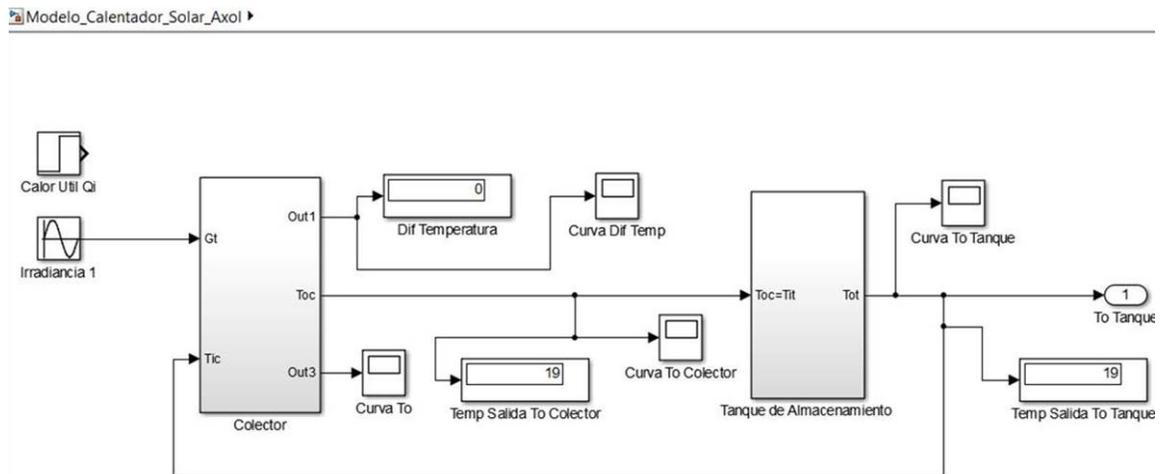


Figura 4.6 Diagrama de bloques del modelo térmico del Calentador Solar.

4.1.1 Simulación calentador solar

En la simulación del calentador solar de placa plana se consideró la Ecuación 2.66 como la función de transferencia que rige su operación. Entonces a partir de los modelos eléctrico-matemáticos de la sección 2.7.3 se logró diseñar un modelo del calentador considerándolo como un sistema SISO. Este consiste en una entrada, la cual es representada por el calor inicial que ingresa al sistema y una salida que representa la temperatura final del agua a la salida. Además se considera que existe una retroalimentación del fluido de salida, con el objeto de lograr un sistema de lazo cerrado. La forma de representar este modelo del calentador solar en Simulink es a partir de la función de transferencia de cada subsistema, logrando así un modelo global el cual se observa en la Fig. 4.7.

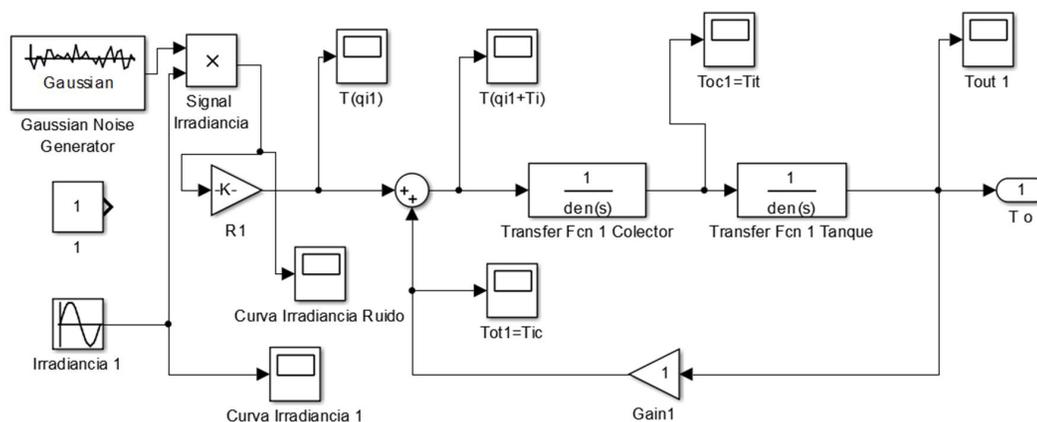


Figura 4.7 Modelo global del calentador solar Axol.

En la Fig. 4.8 se observa el diagrama equivalente del calentador solar en cuestión. Los parámetros constructivos del sistema Axol fueron utilizados para determinar la resistencia y capacitancia térmica, tanto en el tanque como en el colector. El sistema se consideró que opera en estado estacionario, entonces por conservación de la materia, el flujo másico del sistema es igual en el tanque y en el colector. Por lo tanto, el valor de la resistencia térmica es igual en los dos casos. Caso contrario sucede con la capacitancia, debido a que se encuentra en función de la masa de agua contenida y la capacidad calorífica del fluido.

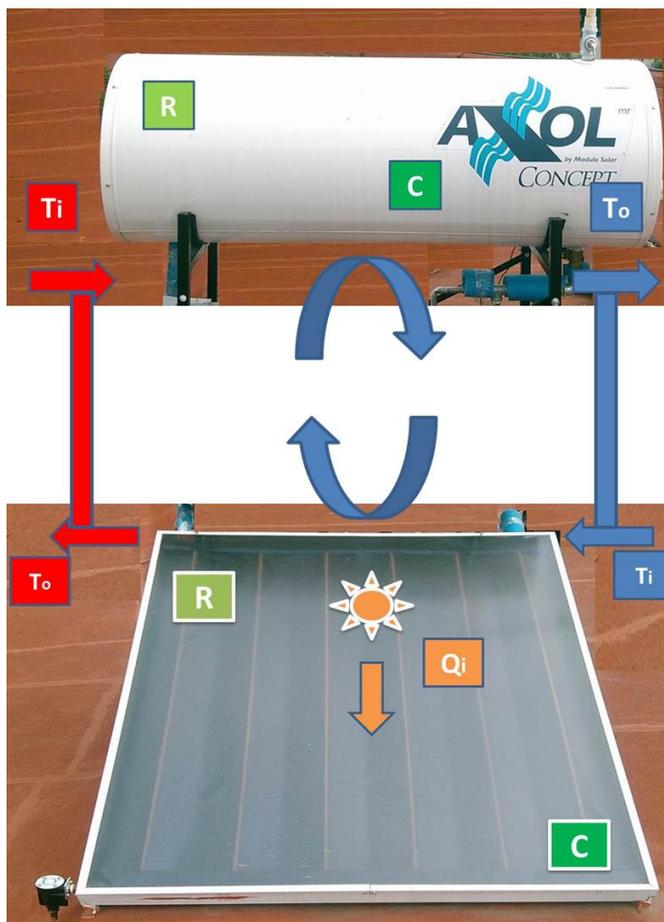


Figura 4.8 Diagrama equivalente del calentador solar Axol.

Para el colector se consideró que la masa contenida de agua depende del volumen capaz de ser almacenado en los tubos que lo conforman, y la relación con la densidad del fluido. El colector solar tiene una configuración de parrilla, formada por una serie de 6 tubos en paralelo de 12.7 mm de diámetro, con una longitud de 1500 mm. Estos se encuentran unidos entre sí a través de un cabezal, el cual se encuentra en la parte inferior y superior del arreglo de tubos en paralelo. Este cabezal tiene un diámetro de 19.05 mm y una longitud de 1200 mm.

Entonces el volumen total de agua contenido en los tubos del colector fue de 1.818 L, considerando la densidad del agua como una constante igual a 1 kg/L. La masa total de agua almacenada en el colector es de 1.818 kg. Para el tanque la cantidad de agua contenida será diferente, ya que este tiene una capacidad de almacenar 150 L, por consiguiente la masa de agua será de 150 kg.

En la Tabla 4.1 se encuentran los valores de las constantes designadas para la simulación. Considerando que el flujo másico óptimo en los calentadores solares se encuentra dentro del rango de 30 a 60 kg/h-m². Se considero entonces tres caudales diferentes para la simulación, a partir de estos valores se obtuvo el valor de la resistencia térmica en cada caso.

Constantes	Subsistemas	
	Colector Solar	Tanque Almacenamiento
Masa contenida (m)	1.818 kg	150 kg
Capacidad calorífica del fluido (C_p)	4186 J/kg °C	4186 J/kg °C
Densidad del fluido (ρ)	1 kg/L	1 kg/L
Flujo másico 1 (\dot{m}_1)	0.015 kg/s	0.015 kg/s
Flujo másico 2 (\dot{m}_2)	0.0225 kg/s	0.0225 kg/s
Flujo másico 3 (\dot{m}_3)	0.03 kg/s	0.03 kg/s
Capacitancia Térmica (C)	7610.148 J/°C	627900 J/°C
Resistencia Térmica 1 (R_1)	0.015926 °C/W	0.015926 °C/W
Resistencia Térmica 2 (R_2)	0.010617 °C/W	0.010617 °C/W
Resistencia Térmica 3 (R_3)	0.007963 °C/W	0.007963 °C/W

Tabla 4.1 Parámetros constantes del sistema.

Se consideró tener tres modelos de simulación, basados en el modelo global del calentador solar Axol. En la Fig. 4.9 se observa el modelo A, el cual describe el comportamiento del sistema considerando la resistencia térmica 1. En la Fig. 4.10 se observa el modelo B y en la Fig. 4.11 se observa el modelo C, los cuales describen el comportamiento del sistema considerando la resistencia térmica 2 y 3, respectivamente. Es posible simular la entrada de energía solar como una señal tipo sinusoidal con amplitud máxima de 1000 W, esto si se considera la curva ideal de irradiancia, en caso contrario puede adicionársele una señal de ruido blanco, y el periodo de simulación fue de 31416 segundos. Se simularon los modelos del calentador solar con el fin de obtener las temperaturas de salida en el tanque y en el colector. Estas temperaturas se muestran en una serie de gráficas con las cuales se describe el comportamiento del sistema.

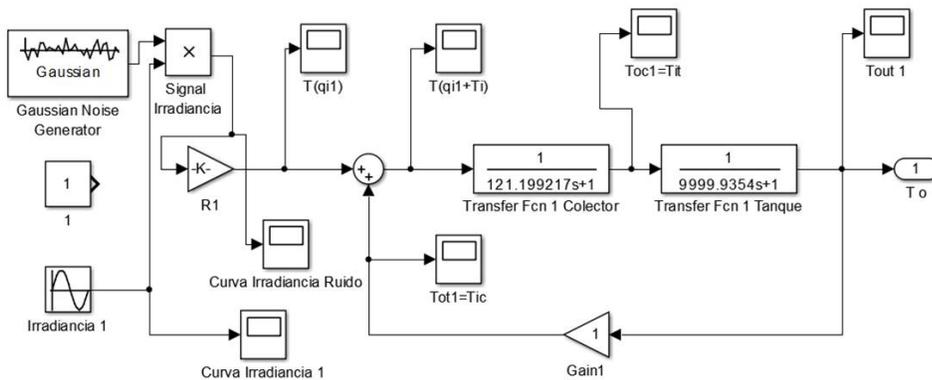


Figura 4.9 Modelo A de simulación respecto a R_1 .

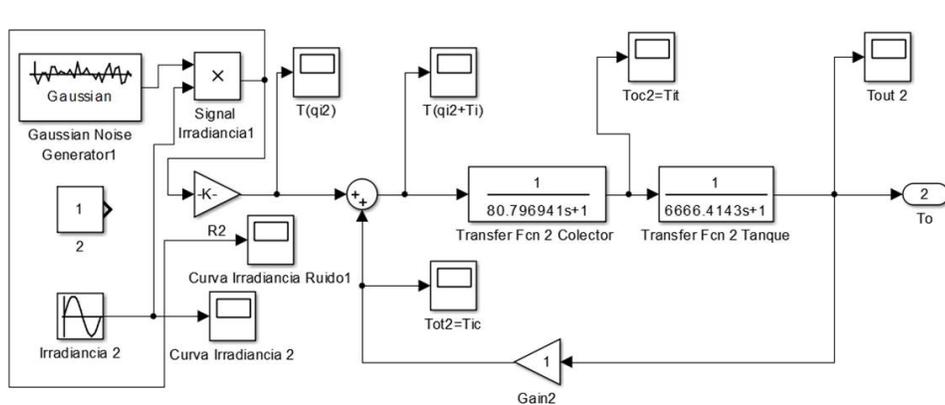


Figura 4.10 Modelo B de simulación respecto a R_2 .

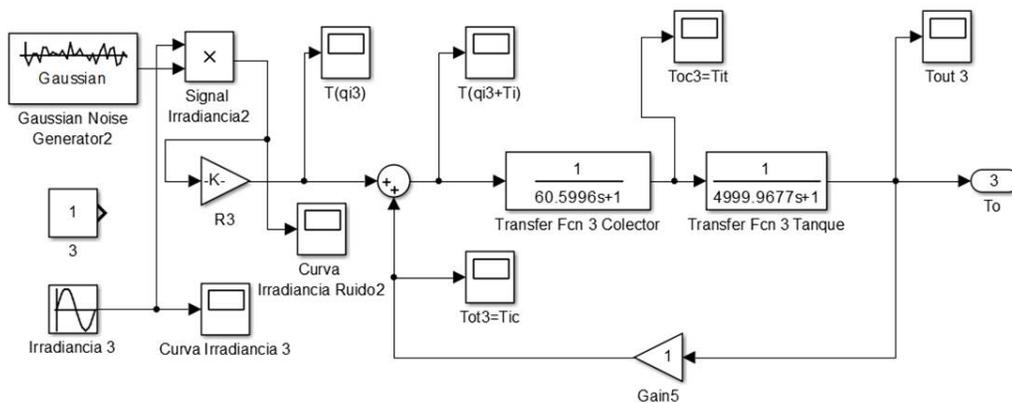


Figura 4.11 Modelo C de simulación respecto a R_3 .

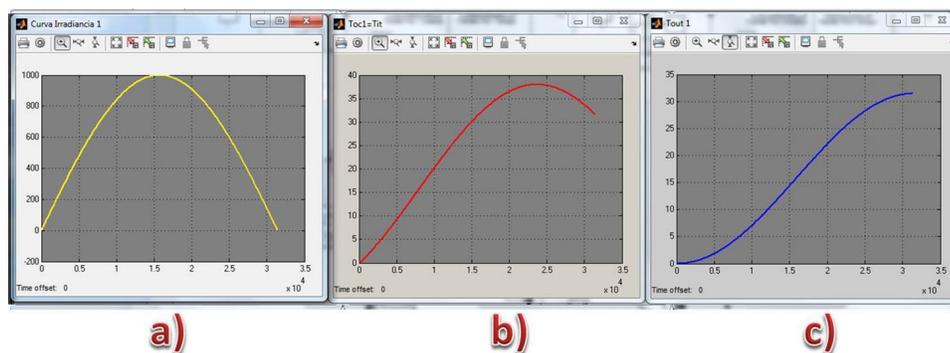


Figura 4.13 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

En la Fig. 4.14 se muestra como varia el gradiente de temperatura. En la operación del calentador solar se genera un gradiente de temperatura, por la diferencia existente entre la temperatura de entrada y la de salida del colector.

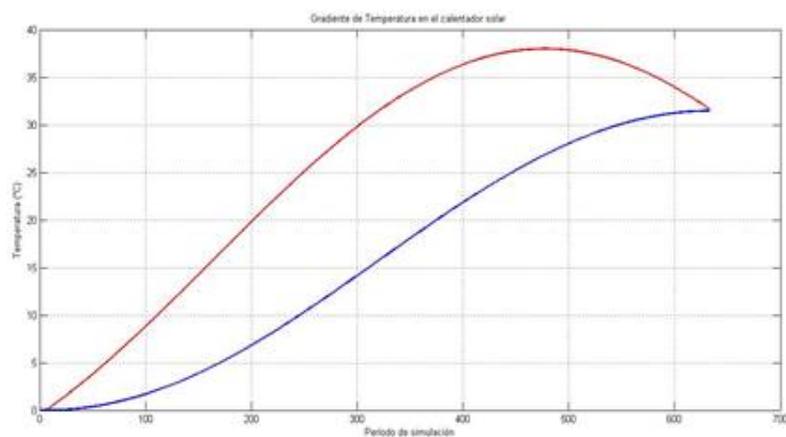


Figura 4.14 Gradiente de temperatura de simulación modelo A.

El comportamiento del sistema con una curva de irradiancia adicionada con una señal de ruido blanco, provoca que la energía de entrada sea intermitente en el sistema, se considera el modelo A modificado como se observa en la Fig. 4.15. Los parámetros obtenidos en esta simulación son graficados de la siguiente manera: la Fig. 4.16a muestra la curva de irradiancia adicionada con ruido blanco, la Fig. 4.16b y la Fig. 4.16c muestran las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del colector, respectivamente. En la Fig. 4.17 se muestra como varia el gradiente de temperatura.

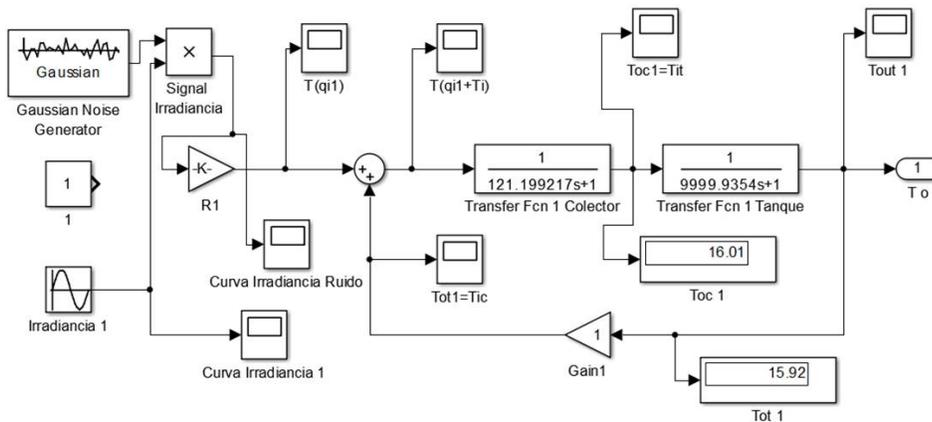


Figura 4.15 Modelo A modificado de simulación con R1.

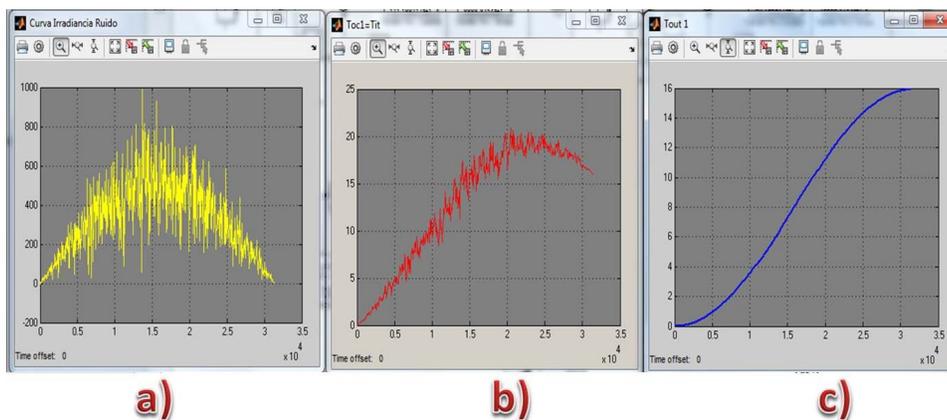


Figura 4.16 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

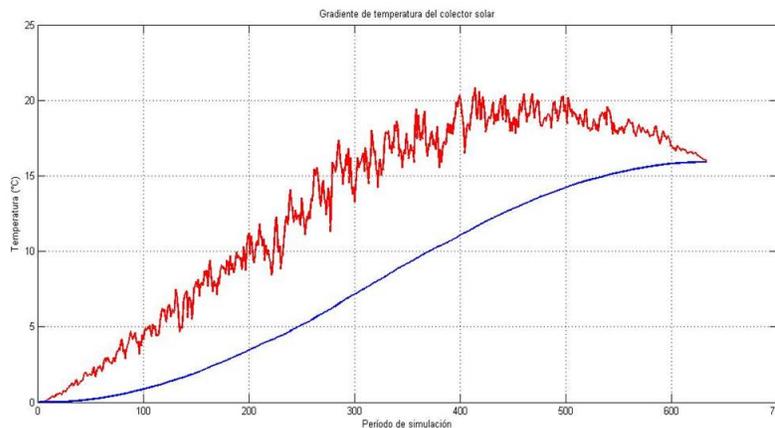


Figura 4.17 Gradiente de temperatura de simulación del modelo A modificado.

Resultados del Modelo B

La simulación del modelo B se basa en el modelo global con su propia función de transferencia como se observa en la Fig. 4.18.

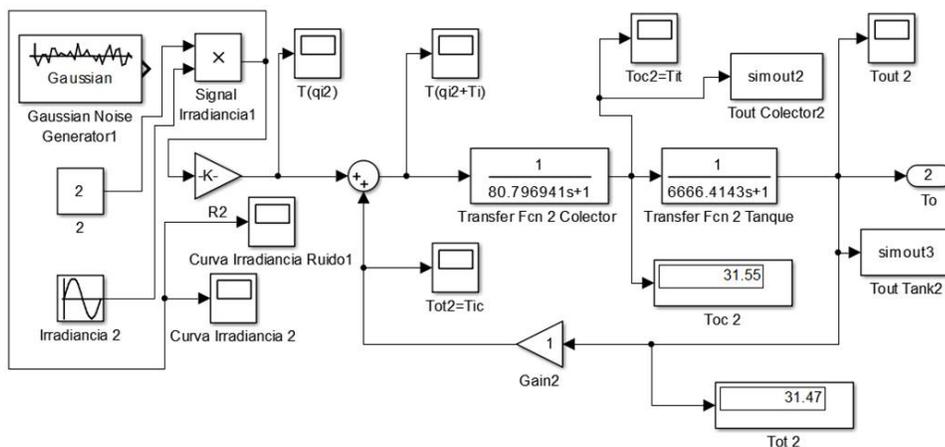


Figura 4.18 Modelo B de simulación con R2.

Los valores alcanzados en la simulación fueron: la Fig. 4.19a que muestra la curva de irradiancia, la Fig. 4.19b y la Fig. 4.19c muestran las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del colector, respectivamente. En la Fig. 4.20 se observa como varía el gradiente de temperatura.

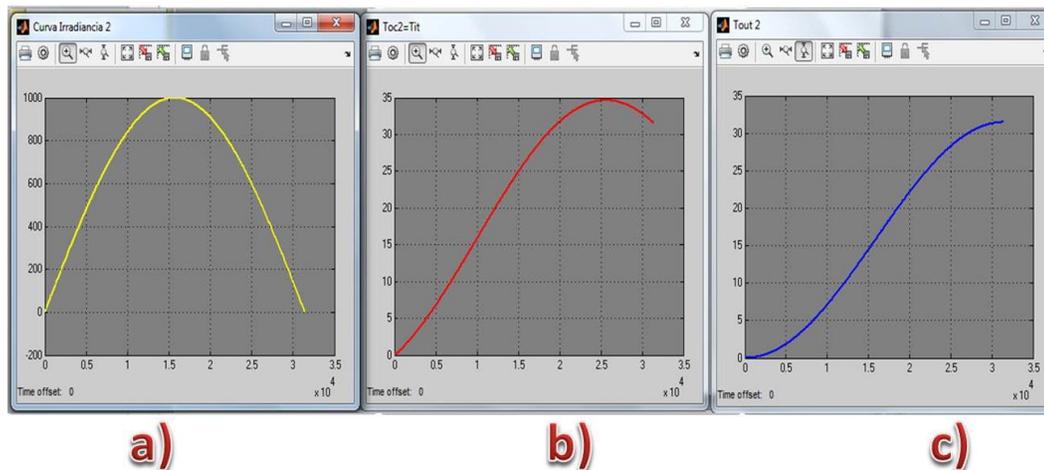


Figura 4.19 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

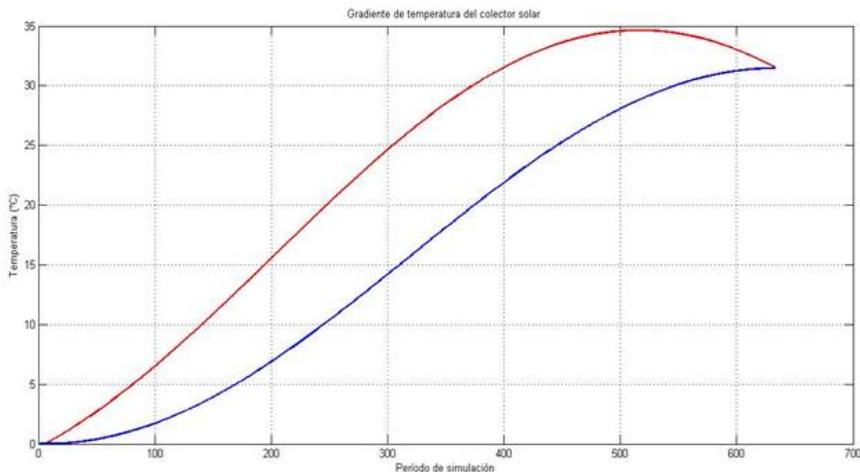


Figura 4.20 Gradiente de temperatura de simulación modelo B.

El comportamiento del sistema con la curva de irradiancia modificada provoca que la energía de entrada sea intermitente en el sistema, se considera el modelo B modificado de la Fig. 4.21, para la simulación. Los parámetros obtenidos en esta simulación son graficados como: la Fig. 4.22a donde se muestra la curva de irradiancia adicionada con ruido blanco, la Fig. 4.22b y la Fig. 4.22c que muestran las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del colector, respectivamente. En la Fig. 4.23 finalmente se muestra como varía el gradiente de temperatura.

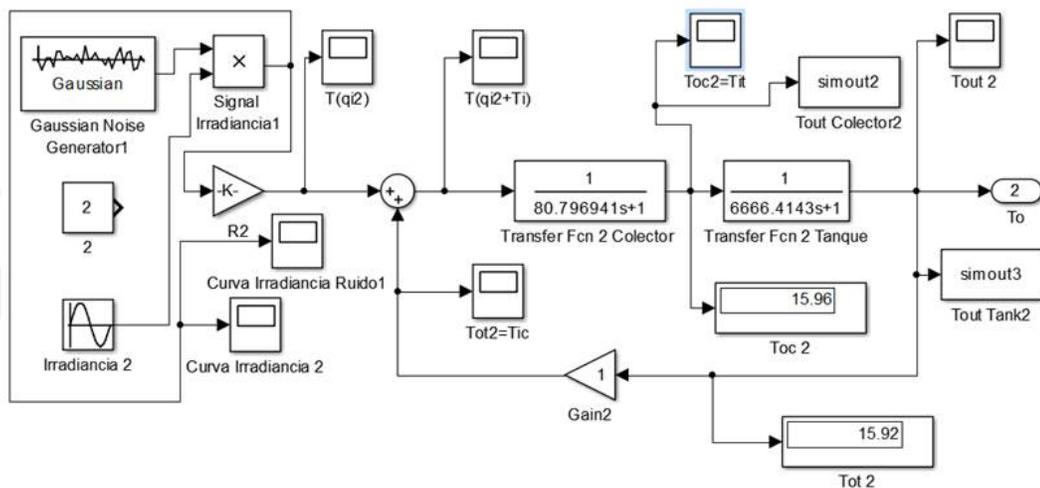


Figura 4.21 Modelo B modificado de simulación con R2.

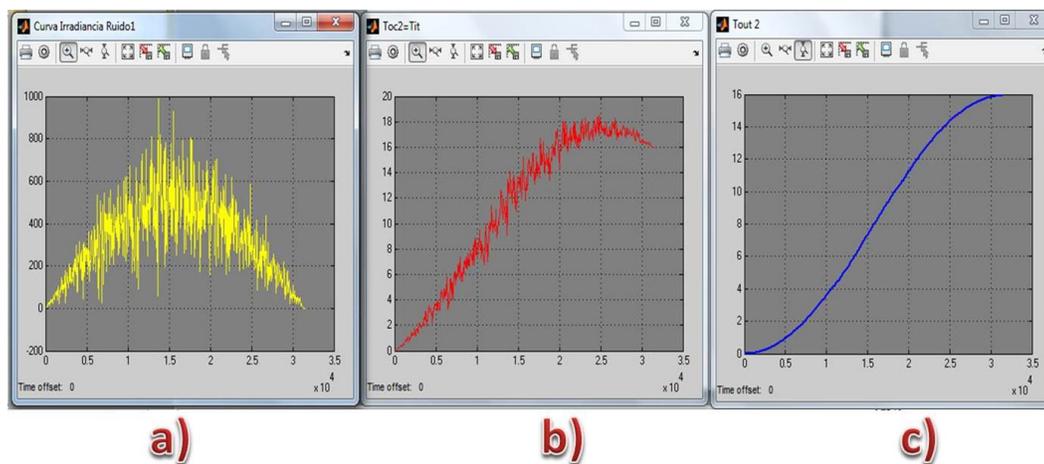


Figura 4.22 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

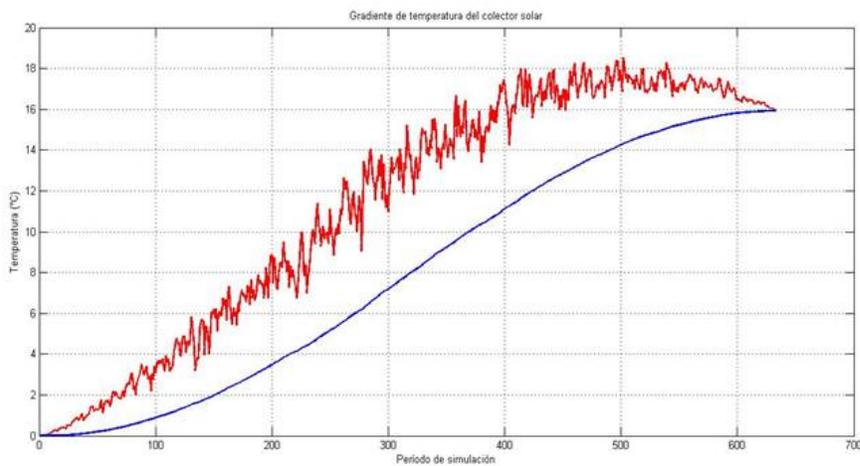


Figura 4.23 Gradiente de temperatura de simulación modelo B modificado.

Resultados del Modelo C

La simulación del modelo C se basa en el modelo global y función de transferencia como se observa en la Fig. 4.24.

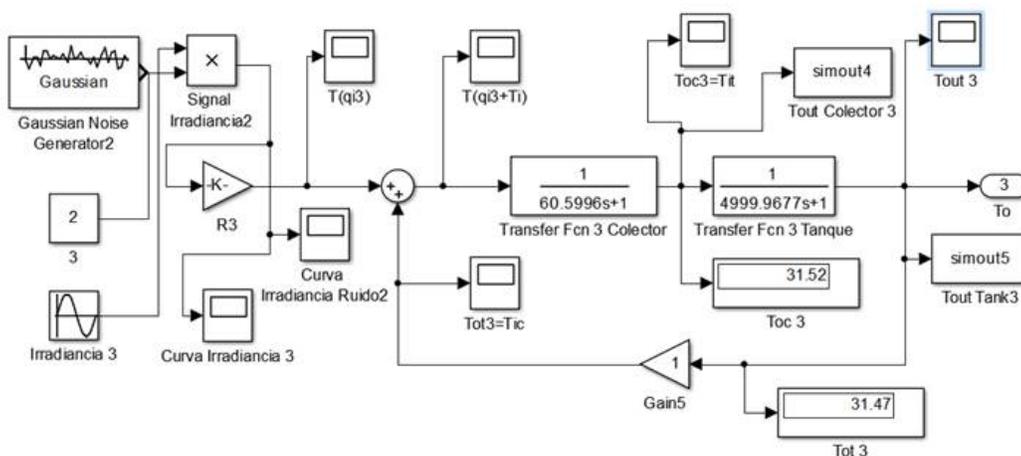


Figura 4.24 Modelo C de simulación con R3.

Los valores resultantes de la simulación fueron: la Fig. 4.25a que muestra la curva de irradiancia, la Fig. 4.25b y la Fig. 4.25c muestran las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del colector, respectivamente. En la Fig. 4.26 se observa como varia el gradiente de temperatura.

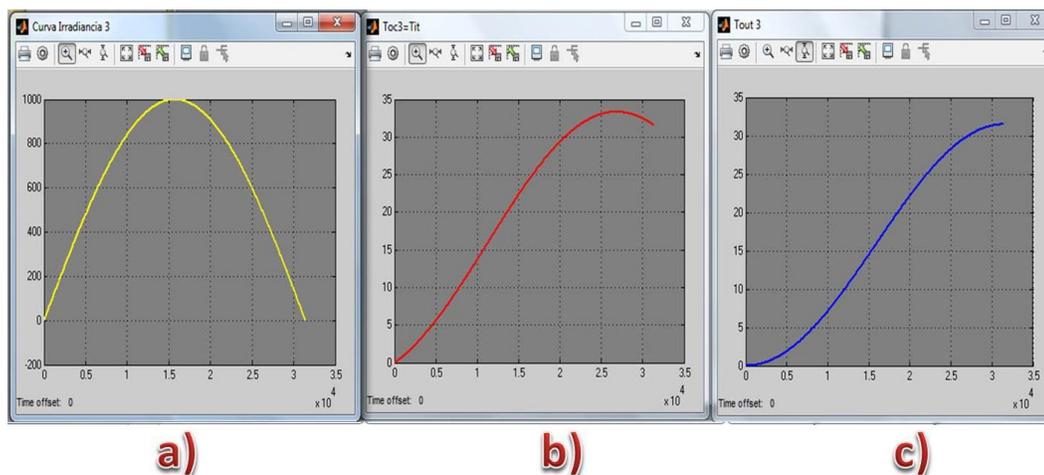


Figura 4.25 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

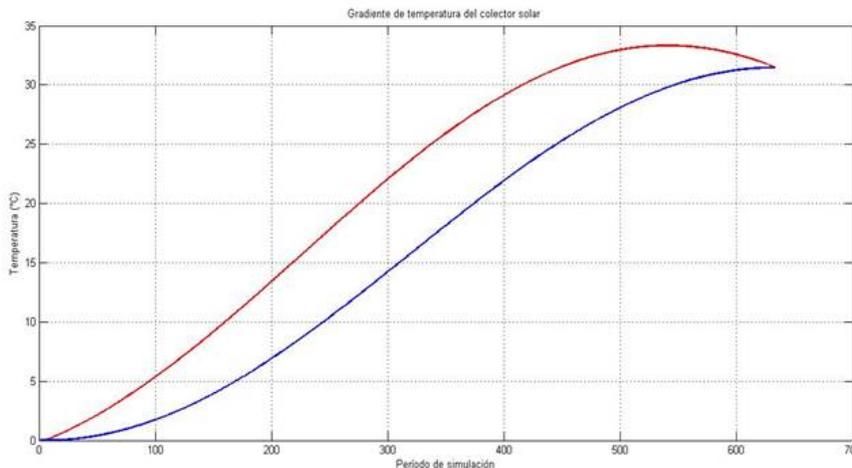


Figura 4.26 Gradiente de temperatura de simulación modelo C.

El comportamiento del sistema con irradiancia intermitente provoca que la energía de entrada sea variable en el sistema, se considera el modelo C modificado de la Fig. 4.27, para la simulación. Los parámetros obtenidos en la simulación son graficados como: la Fig. 4.28a donde se muestra la curva de irradiancia adicionada con ruido blanco, la Fig. 4.28b y la Fig. 4.28c que muestran las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del colector, respectivamente. En la Fig. 4.29 donde se muestra como varía el gradiente de temperatura.

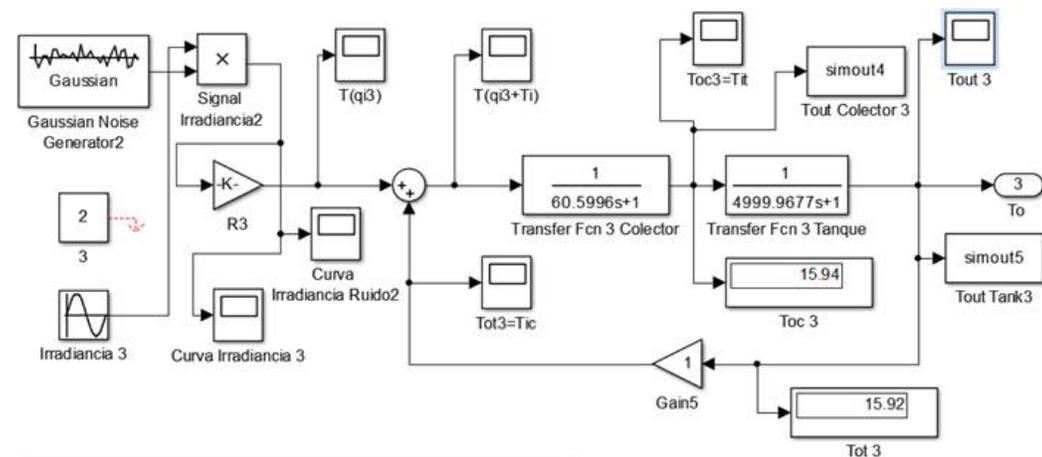


Figura 4.27 Modelo C modificado de simulación con R3.

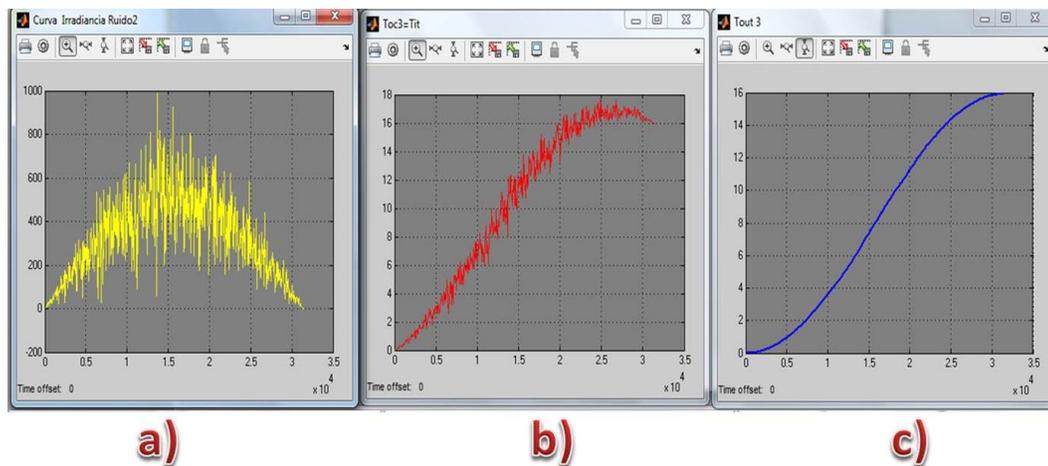


Figura 4.28 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

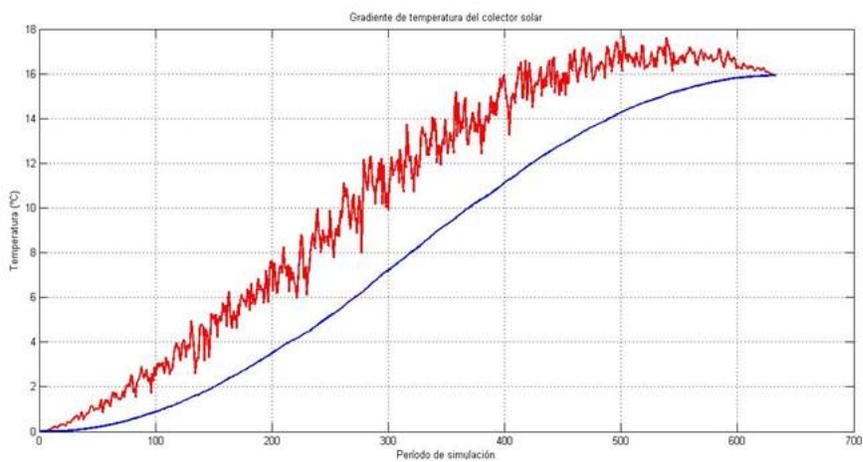


Figura 4.29 Gradiente de temperatura de simulación modelo C modificado.

Resultados del Modelo termosifón

Al modelo de calentador solar de agua tipo termosifón en Simulink se le pudo añadir una condición inicial de temperatura del agua de $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual favoreció en los resultados obtenidos de la operación del sistema considerando como energía de entrada la curva ideal de irradiancia. El modelo se identificó como modelo termosifón y el diagrama utilizado se observa en la Fig. 4.30.

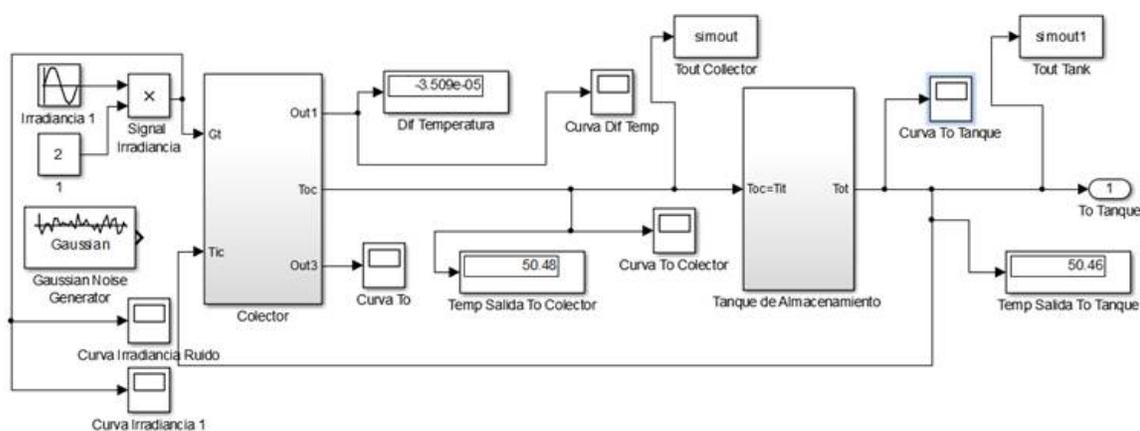


Figura 4.30 Modelo termosifón.

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo termosifón se presentan como: la curva de irradiancia solar, como se observa en la Fig. 4.31a, la temperatura de entrada al colector en la Fig. 4.31b y la temperatura de salida del colector en la Fig. 4.31c. Finalmente en la Fig. 4.32 se puede ver el gradiente de temperatura alcanzado en la operación del sistema.

El comportamiento del sistema termosifón con irradiancia intermitente provoca que la energía de entrada varíe fuertemente, entonces se considera el modelo termosifón modificado de la Fig. 4.33, para la simulación. Los parámetros obtenidos en la simulación son graficados como: la Fig. 4.34a donde se muestra la curva de irradiancia adicionada con ruido blanco, la Fig. 4.34b y la Fig. 4.34c que muestran las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del colector, respectivamente. En la Fig. 4.35 donde se muestra como varía el gradiente de temperatura.

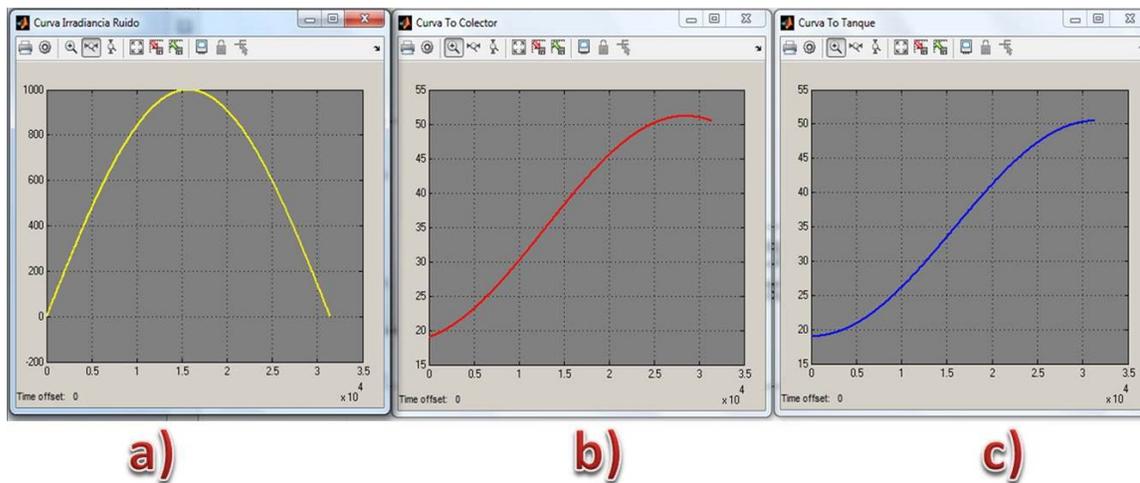


Figura 4.31 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

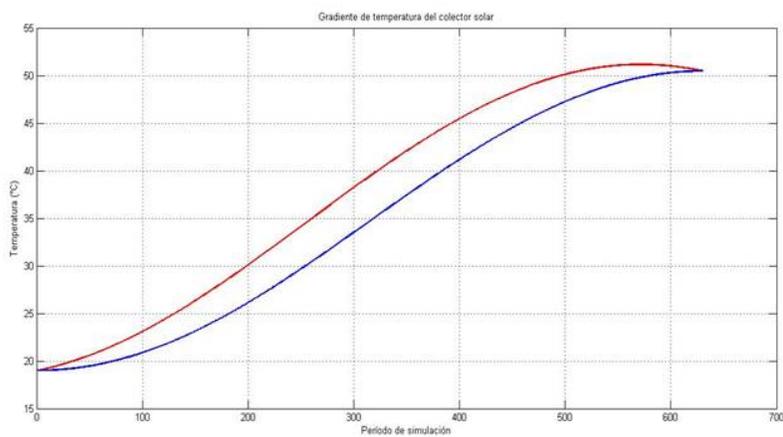


Figura 4.32 Gradiente de temperatura del modelo termosifón.

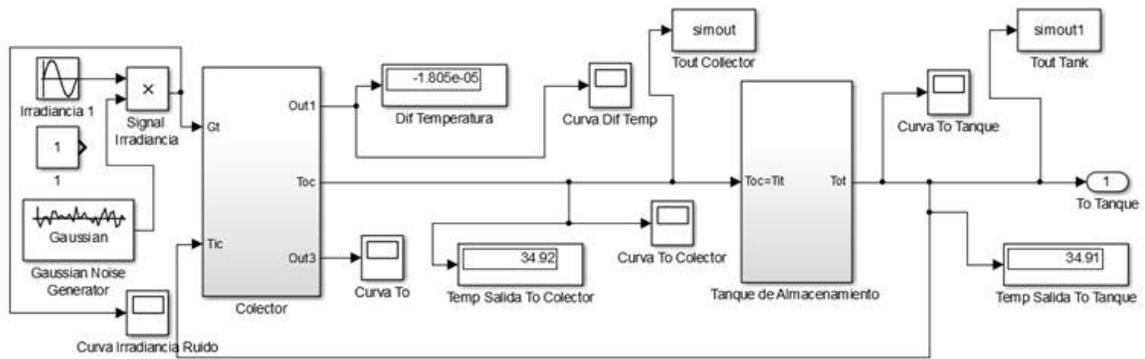


Figura 4.33 Modelo termosifón modificado de simulación.

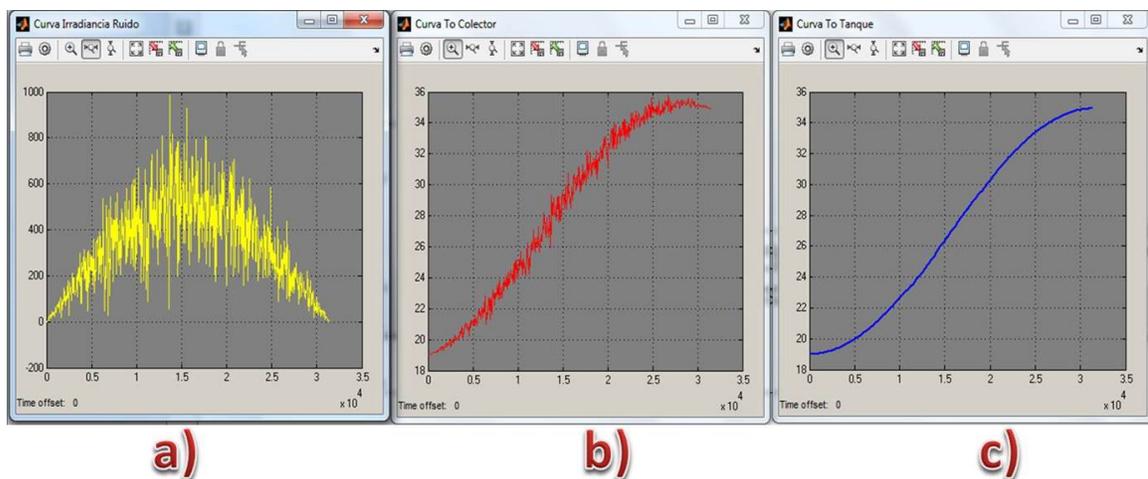


Figura 4.34 a) Curva de irradiancia b) Temperatura de salida c) Temperatura de entrada.

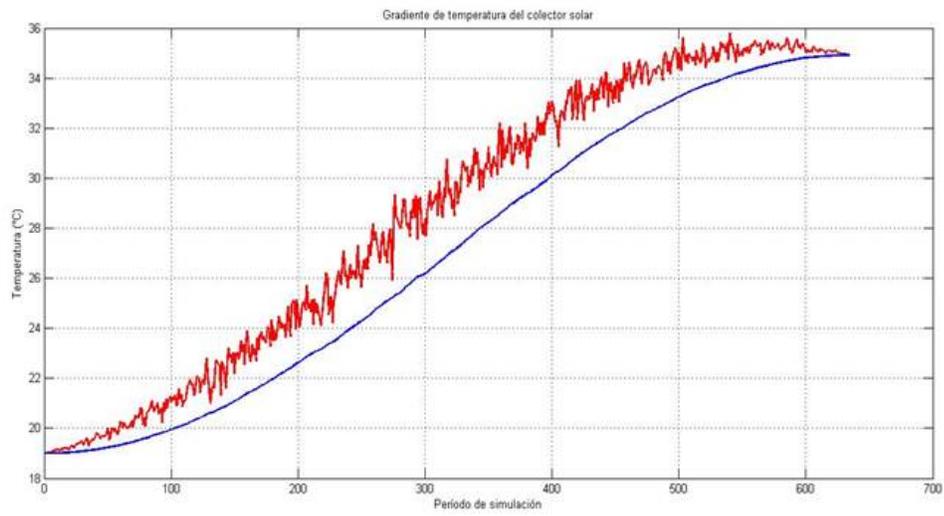


Figura 4.35 Gradiente de temperatura del modelo termosifón modificado.

4.2 Evaluación térmica del sistema termosifónico

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del sistema termosifónico de calentamiento de agua. Los datos mostrados pertenecen a la operación normal del calentador solar modelo Axol, caracterizado con el objetivo de cuantificar su rendimiento.

4.2.1 Operación del sistema

Como se definió en el Capítulo 3, el sistema termosifónico fué instrumentado con la intención de medir las variables físicas necesarias para determinar su rendimiento durante un cierto periodo de tiempo.

Una de las variables medidas y considerada la de mayor importancia es la temperatura. En este caso se midieron las temperaturas del agua a la entrada del colector, a la salida del colector y a la salida del tanque de almacenamiento. Estas fueron cuantificadas con un sensor digital de temperatura, el cual fué instalado y acondicionado en cada sección del sistema. Esta variable fué muestreada a cada segundo, utilizando la tarjeta de adquisición de datos desarrollada con las plataformas Arduino-Matlab. Posteriormente se llevó un post-procesamiento de los datos con el objetivo de obtener la temperatura a cada diez minutos, utilizando la media muestral.

Se utilizó la estación anemométrica instalada a las cercanías del colector, para obtener los valores de irradiancia solar, velocidad de viento, dirección de viento y temperatura ambiente. Estas variables se muestrearon a cada segundo y llevaron un post-procesamiento para obtener los datos a cada diez minutos.

Los días en que se llevó a cabo la evaluación del sistema fueron el 30 de Marzo, 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 30 de Abril y 1, 2, 3, 4, 11 de Mayo del año 2015. Se seleccionaron estos días por que cumplieron con la condición de irradiancia constante y cielo despejado. Se consideró que la evaluación del sistema iniciará a las 9:00 horas y concluyera a las 17:00 horas, en la escala del tiempo civil.

Para determinar el rendimiento termico del sistema a partir de las variables medidas, se consideró que la irradiación se calculara con la Ecuación 3.1, la temperatura ambiente para cada prueba con la Ecuación 3.2 y la velocidad de viento usando la Ecuación 3.3.

Para el caso de la temperatura inicial se consideró el promedio entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida del colector, al inicio de la evaluación. Para el caso de la temperatura final calcular el promedio entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida del colector, al final de la evaluación.

La Ecuación 3.6 fue utilizada para cuantificar el rendimiento termico del sistema a partir de las variables medidas y finalmente los valores obtenidos de cada evaluación son presentados en una tabla utilizando el formato seguido se observa en la Tabla 4.2.

Evaluación	H (MJ/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Ti (°C)	Tf (°C)	Qu (MJ)	η (%)
No	Irradiación	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Calor útil	Eficiencia

Tabla 4.2 Parámetros cuantificados del sistema.

4.2.2 Gráficas y tablas de la operación del sistema

Los resultados obtenidos de la evaluación del calentador solar de placa plana modelo Axol, se presentan de forma gráfica considerando las variables obtenidas de la estación meteorológica y las temperaturas del fluido del sistema. Los resultados mostrados son para cada día de evaluación del sistema.

Resultados del día 30 de Marzo de 2015

En primer instancia se muestran tres gráficas las cuales representan la irradiancia solar Fig. 4.36, velocidad de viento Fig. 4.37 y temperatura ambiente Fig. 4.38, a cada minuto para el día 30 de Marzo 2015.

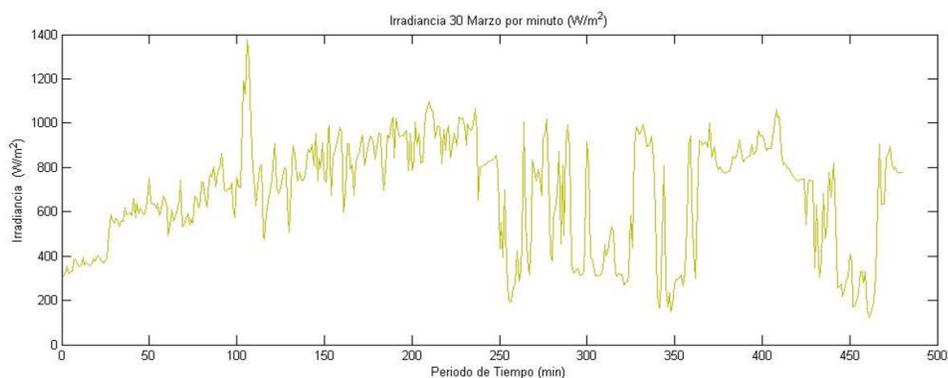


Figura 4.36 Irradiancia: 30 de Marzo 2015.

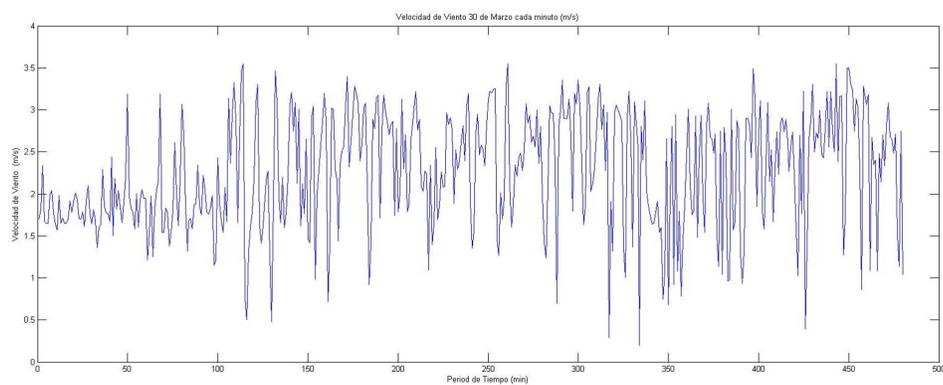


Figura 4.37 Velocidad de viento: 30 de Marzo 2015.

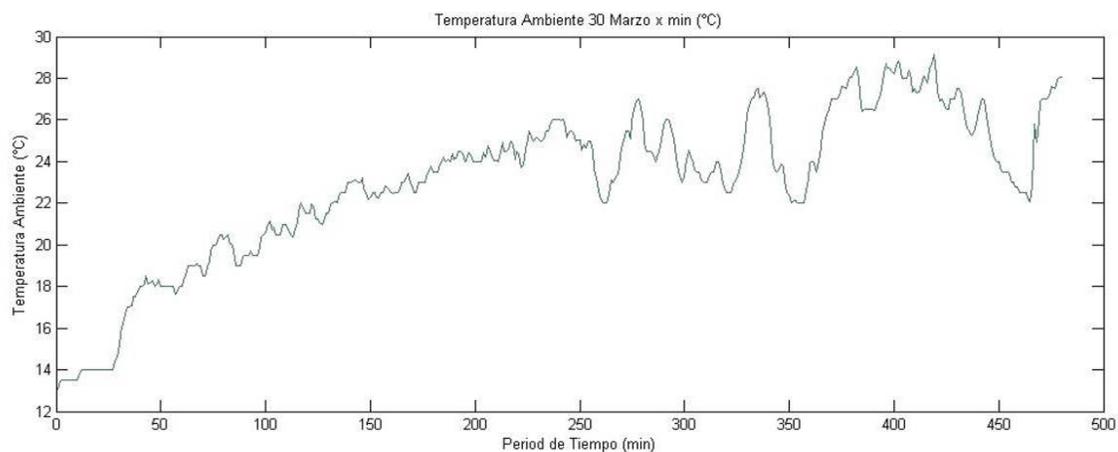


Figura 4.38 Temperatura ambiente: 30 de Marzo 2015.

La Fig. 4.39 es la temperatura de entrada al colector, la Fig 4.40 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.41 la temperatura de salida de servicio del tanque, estas se grafican a cada diez minutos.

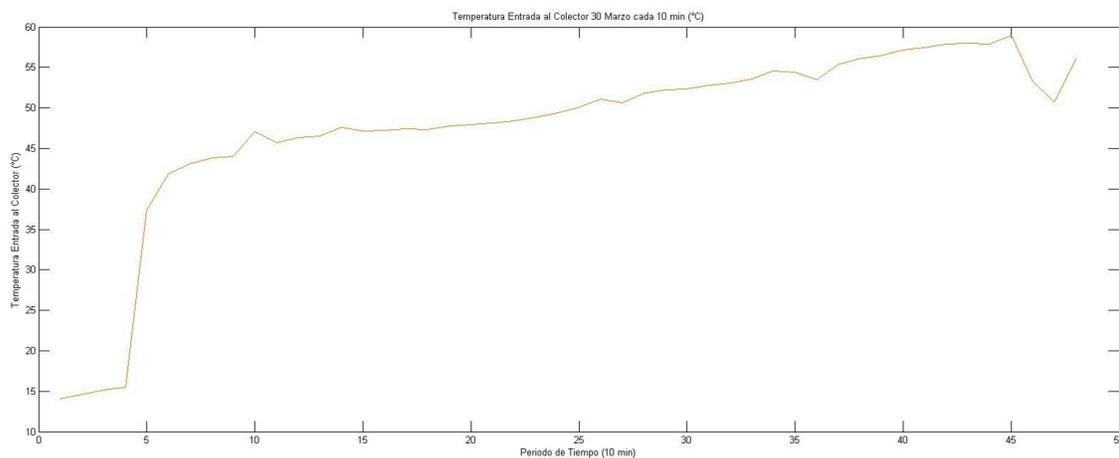


Figura 4.39 Temperatura entrada al colector: 30 de Marzo 2015.

La Fig. 4.42 muestra el gradiente de operación del sistema, donde se puede observar como se relacionan la temperatura de entrada y la de salida del colector, esto debido a la diferencia de temperaturas existentes.

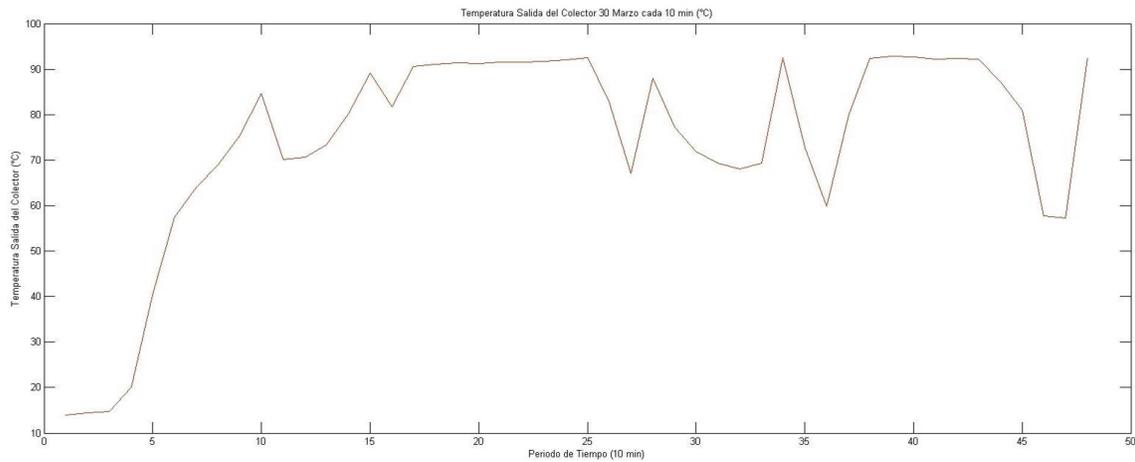


Figura 4.40 Temperatura salida del colector: 30 de Marzo 2015.

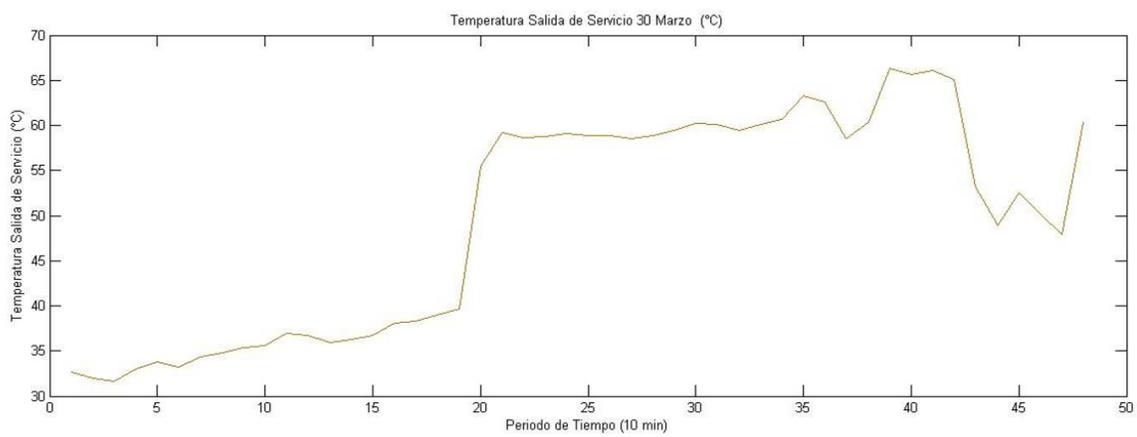


Figura 4.41 Temperatura salida servicio del tanque: 30 de Marzo 2015.

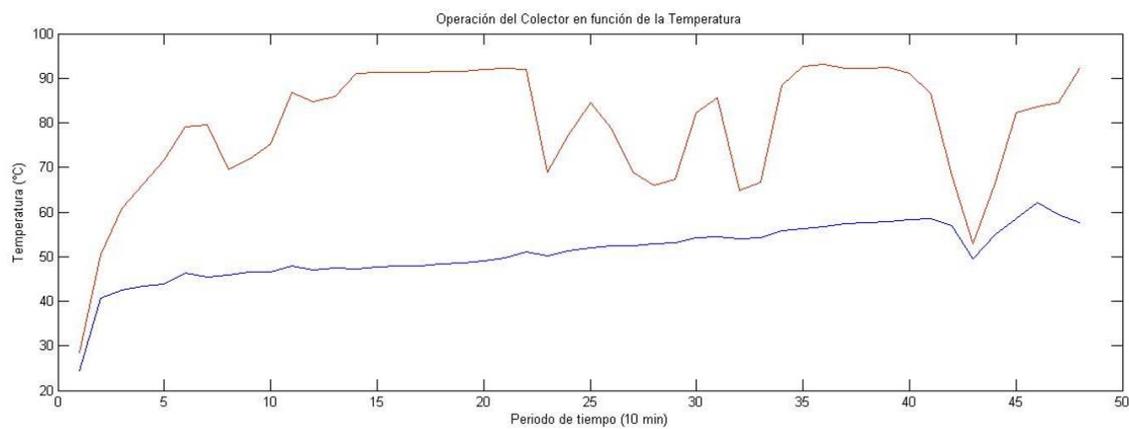


Figura 4.42 Operación del colector: 30 de Marzo 2015.

En la Tabla 4.3 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 30 de Marzo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
30-03-15 9:00	602.445	17.845	1.910	24.345	28.504	32.624
30-03-15 9:10	636.551	18.071	1.988	40.782	50.433	32.013
30-03-15 9:20	595.613	18.305	1.751	42.528	60.713	31.694
30-03-15 9:30	587.461	19.075	1.842	43.465	66.207	33.036
30-03-15 9:40	684.303	20.203	2.119	43.847	71.744	33.814
30-03-15 9:50	766.501	19.348	1.908	46.408	79.136	33.249
30-03-15 10:00	800.191	20.475	1.744	45.405	79.547	34.360
30-03-15 10:10	883.900	20.717	2.717	45.955	69.536	34.766
30-03-15 10:20	694.186	21.624	1.804	46.484	71.860	35.326
30-03-15 10:30	746.931	21.622	2.017	46.594	75.322	35.566
30-03-15 10:40	824.071	22.850	2.466	47.927	86.668	36.977
30-03-15 10:50	829.550	22.504	2.045	47.007	84.768	36.766
30-03-15 11:00	854.226	22.629	2.388	47.530	85.948	35.942
30-03-15 11:10	842.853	22.939	2.507	47.189	91.025	36.218
30-03-15 11:20	874.400	23.571	2.525	47.595	91.261	36.672
30-03-15 11:30	957.820	24.199	2.816	47.837	91.196	38.057
30-03-15 11:40	900.078	24.134	2.420	47.974	91.393	38.300
30-03-15 11:50	992.088	24.407	2.533	48.292	91.559	39.012
30-03-15 12:00	933.118	24.436	1.992	48.609	91.593	39.675
30-03-15 12:10	967.070	25.191	2.448	49.055	91.955	55.490
30-03-15 12:20	844.698	25.806	2.474	49.726	92.279	59.215
30-03-15 12:30	613.631	25.009	2.815	51.098	91.934	58.677
30-03-15 12:40	395.773	22.827	2.132	50.214	68.946	58.716
30-03-15 12:50	654.601	24.425	2.624	51.335	77.283	59.089
30-03-15 13:00	683.443	25.646	2.301	51.954	84.515	58.903
30-03-15 13:10	584.435	25.177	2.687	52.510	78.719	58.815
30-03-15 13:20	457.290	23.798	2.612	52.460	68.852	58.572
30-03-15 13:30	406.468	23.331	2.719	52.775	66.094	58.884
30-03-15 13:40	329.933	23.04	2.303	53.211	67.359	59.444
30-03-15 13:50	881.238	25.849	2.224	54.220	82.330	60.235
30-03-15 14:00	560.561	25.671	2.006	54.504	85.560	60.101
30-03-15 14:10	245.831	22.631	1.666	53.974	64.788	59.408
30-03-15 14:20	636.113	23.311	1.937	54.250	66.568	60.153
30-03-15 14:30	884.848	26.6	2.410	55.740	88.299	60.622
30-03-15 14:40	801.053	27.739	1.936	56.354	92.695	63.313
30-03-15 14:50	863.453	26.793	2.107	56.635	93.043	62.573
30-03-15 15:00	905.098	28.455	2.535	57.42	92.242	58.488
30-03-15 15:10	917.283	27.779	2.515	57.604	92.190	60.333
30-03-15 15:20	745.708	27.718	2.256	57.927	92.356	66.328
30-03-15 15:30	556.098	26.863	2.431	58.29	91.030	65.649
30-03-15 15:40	545.936	26.044	2.816	58.607	86.552	66.105
30-03-15 15:50	261.455	24.01	2.892	57.024	68.145	65.043
30-03-15 16:00	230.75	22.620	2.421	49.477	52.798	53.232
30-03-15 16:10	629.828	26.053	2.217	54.826	66.497	48.954
30-03-15 16:20	535.065	27.395	2.336	58.643	82.212	52.494
30-03-15 16:30	447.161	25.963	2.663	62.073	83.583	50.137
30-03-15 16:40	379.628	25.675	2.194	59.492	84.545	47.926
30-03-15 16:50	917.283	27.779	2.515	57.604	92.190	60.333

Tabla 4.3 Variables medidas del sistema: 30 de Marzo 2015.

Resultados del día 01 de Abril de 2015

La Fig. 4.43 representa la irradiancia, la Fig. 4.44 la velocidad de viento y la Fig. 4.45 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 01 de Abril 2015.

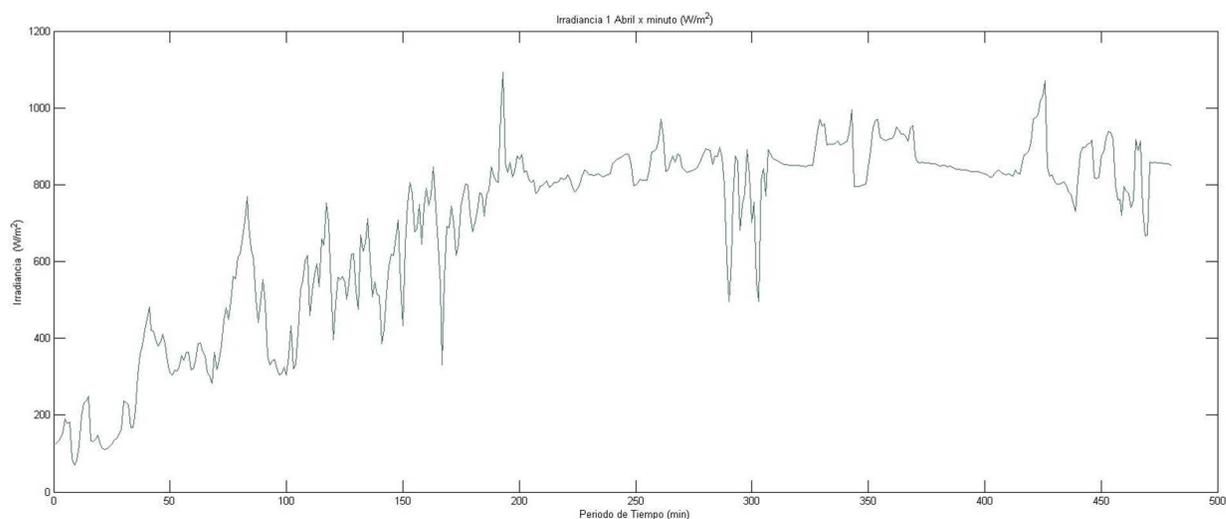


Figura 4.43 Irradiancia: 01 de Abril 2015.

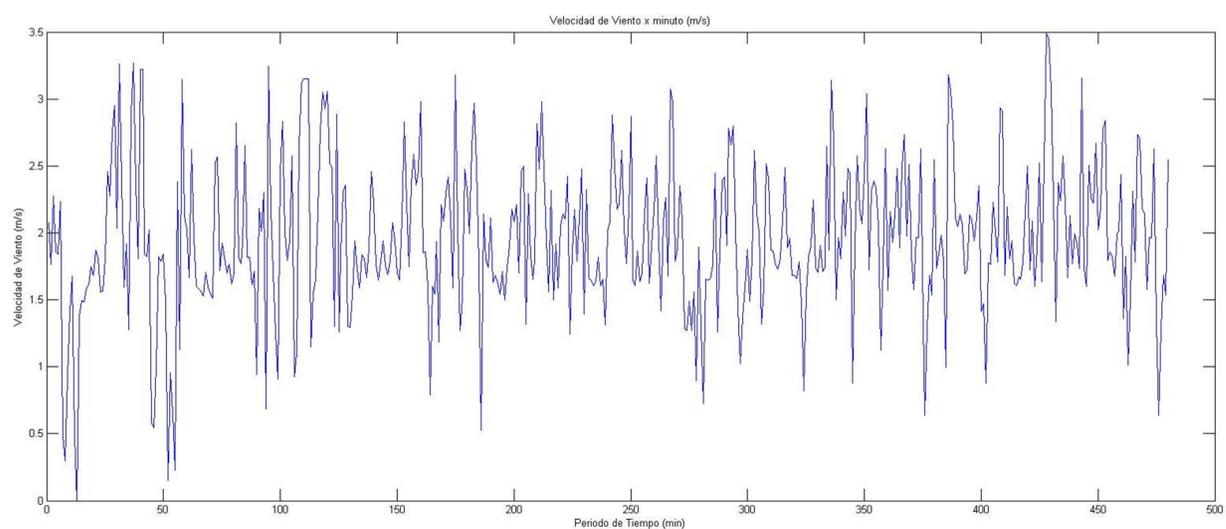


Figura 4.44 Velocidad de viento: 01 de Abril 2015.

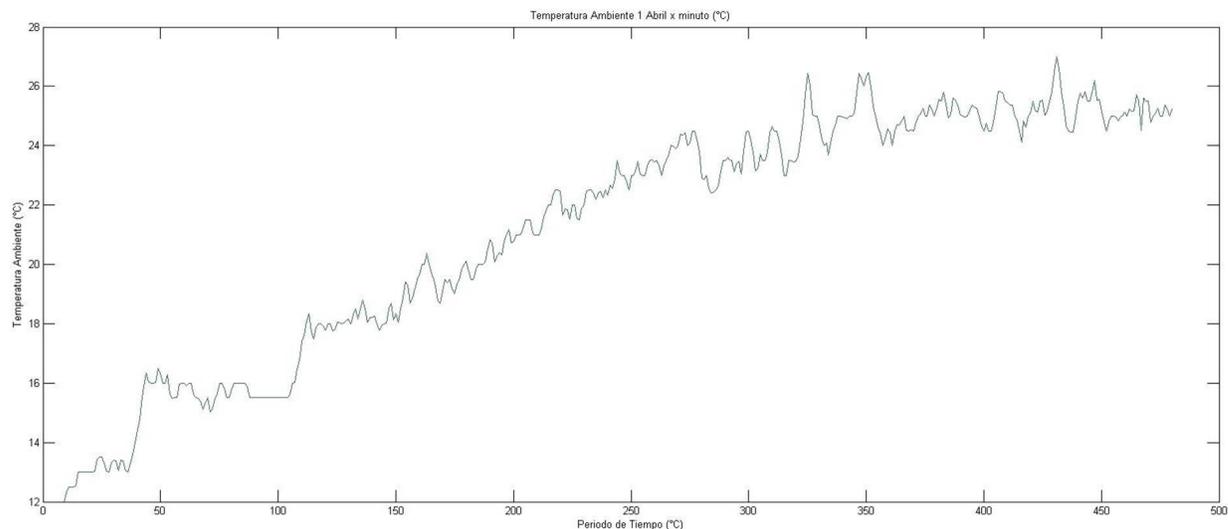


Figura 4.45 Temperatura ambiente: 01 de Abril 2015.

La Fig. 4.46 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.47 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.48 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

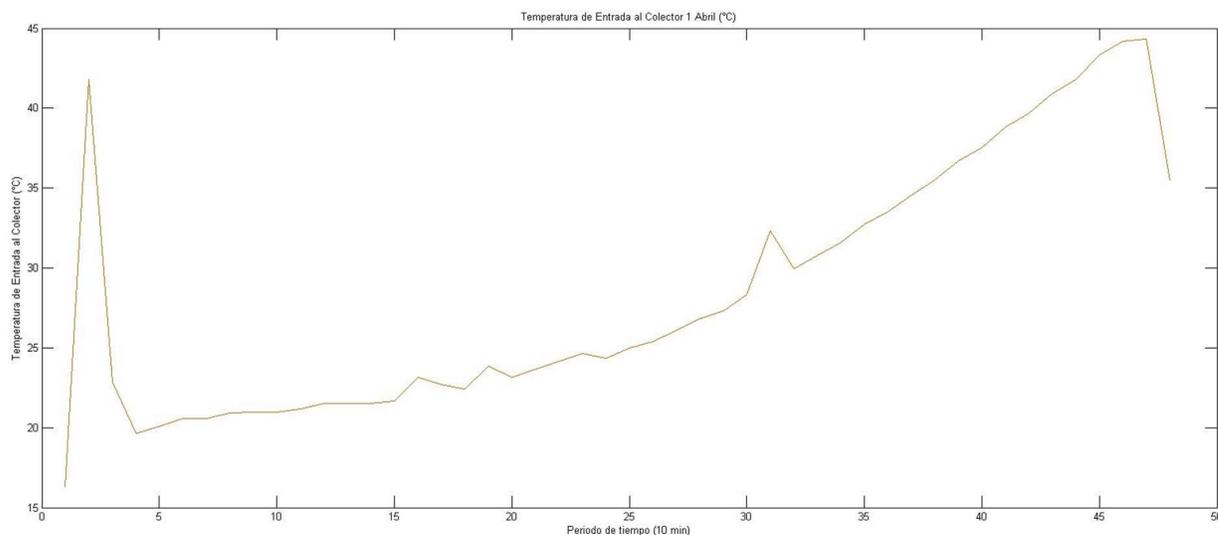


Figura 4.46 Temperatura entrada al colector: 01 de Abril 2015.

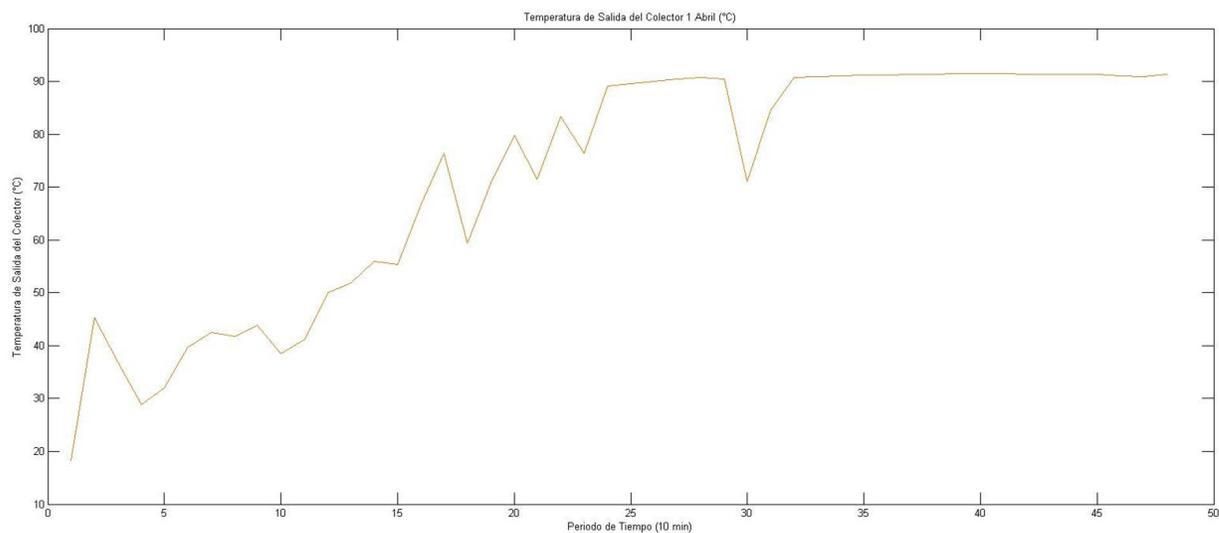


Figura 4.47 Temperatura salida del colector: 01 de Abril 2015.

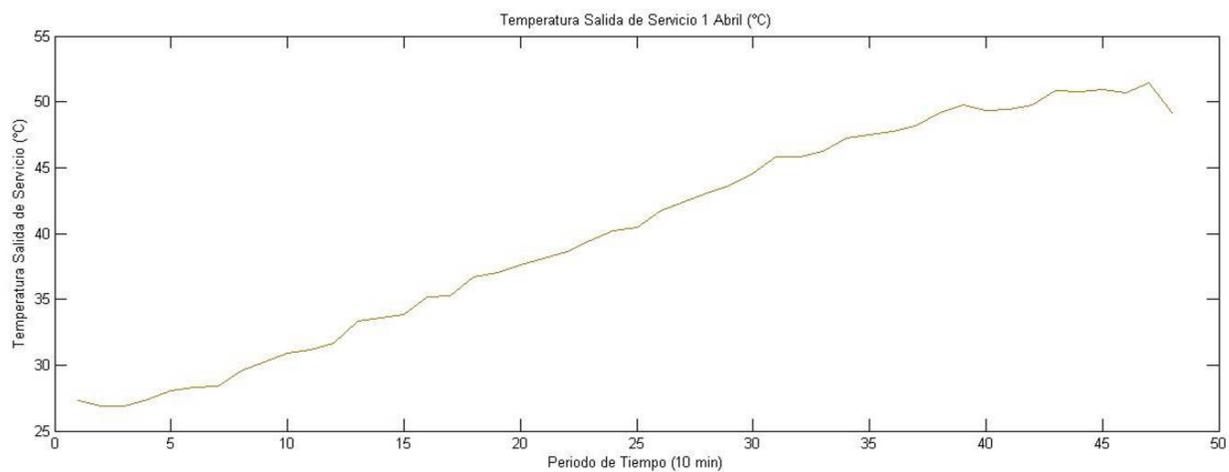


Figura 4.48 Temperatura salida servicio del tanque: 01 de Abril 2015.

La Fig. 4.49 muestra el gradiente de operación del sistema.

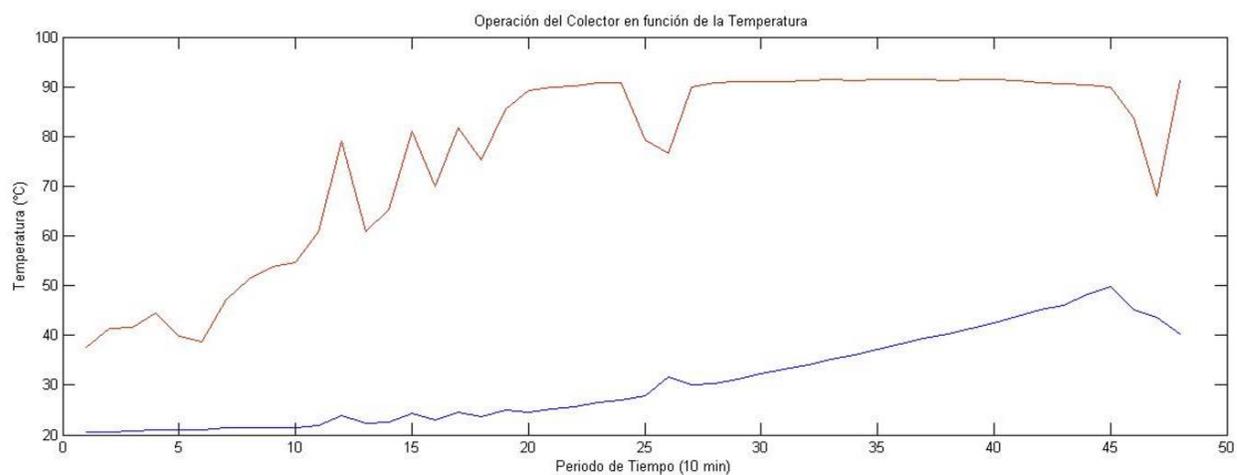


Figura 4.49 Operación del colector: 01 de Abril 2015.

En la Tabla 4.4 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 01 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
01-04-15 9:00	343.155	15.996	1.157	20.463	37.508	27.281
01-04-15 9:10	354.878	15.798	1.968	20.638	41.456	29.905
01-04-15 9:20	376.89	15.440	1.828	20.712	41.518	26.896
01-04-15 9:30	638.271	15.859	1.977	20.999	44.506	27.347
01-04-15 9:40	428.79	15.559	1.849	21.001	39.905	28.077
01-04-15 9:50	353.558	15.542	1.871	21.009	38.663	28.273
01-04-15 10:00	568.788	17.306	2.255	21.467	47.176	28.402
01-04-15 10:10	568.433	17.936	2.406	21.501	51.377	29.568
01-04-15 10:20	602.123	18.222	1.778	21.505	53.824	30.260
01-04-15 10:30	519.648	18.131	1.885	21.503	54.605	30.876
01-04-15 10:40	665.676	18.632	1.969	21.84	60.922	31.192
01-04-15 10:50	733.835	19.64	2.049	23.975	79.074	31.654
01-04-15 11:00	634.578	19.174	2.093	22.217	60.928	33.365
01-04-15 11:10	746.253	19.777	2.046	22.5	65.379	33.550
01-04-15 11:20	870.608	20.361	1.705	24.289	81.072	33.859
01-04-15 11:30	839.035	21.067	1.998	23.001	70.079	35.155
01-04-15 11:40	796.17	21.394	2.208	24.582	81.800	35.303
01-04-15 11:50	806.401	22.070	1.888	23.641	75.368	36.698
01-04-15 12:00	826.046	22.120	1.850	25.011	85.515	37.043
01-04-15 12:10	853.626	22.702	2.071	24.608	89.281	37.629
01-04-15 12:20	822.361	22.996	1.969	25.202	89.924	38.098
01-04-15 12:30	888.675	23.373	2.030	25.740	90.159	38.610
01-04-15 12:40	849.420	24.145	1.900	26.490	90.705	39.449
01-04-15 12:50	875.756	23.192	1.601	27.076	90.798	40.230
01-04-15 13:00	738.541	23.305	2.149	27.905	79.310	40.425
01-04-15 13:10	737.118	23.737	1.735	31.579	76.555	41.707
01-04-15 13:20	861.560	23.944	1.959	30.037	89.972	42.361
01-04-15 13:30	849.678	24.375	1.680	30.378	90.894	40.033
01-04-15 13:40	921.738	24.470	2.004	31.136	91.045	43.615
01-04-15 13:50	891.405	24.981	2.040	32.250	91.128	44.570
01-04-15 14:00	881.513	25.749	2.318	33.221	91.094	45.802
01-04-15 14:10	928.34	24.470	1.993	34.128	91.253	45.857
01-04-15 14:20	885.901	24.817	2.011	35.098	91.385	46.215
01-04-15 14:30	850.903	25.305	1.723	36.096	91.321	47.221
01-04-15 14:40	838.506	25.239	2.225	37.203	91.551	47.496
01-04-15 14:50	829.046	24.873	1.816	38.296	91.416	47.731
01-04-15 15:00	830.813	25.241	2.019	39.382	91.503	48.197
01-04-15 15:10	950.93	25.114	1.930	40.231	91.213	49.137
01-04-15 15:20	822.938	25.715	2.548	41.416	91.370	49.727
01-04-15 15:30	841.778	25.280	1.996	42.585	91.367	49.375
01-04-15 15:40	879.510	25.192	2.293	43.785	91.184	49.411
01-04-15 15:50	785.090	25.149	1.774	45.136	90.894	49.754
01-04-15 16:00	696.166	25.613	1.993	45.992	90.676	50.851
01-04-15 16:10	603.525	25.611	2.243	48.194	90.278	50.788
01-04-15 16:20	571.838	26.1025	1.844	49.748	89.946	50.966
01-04-15 16:30	558.203	25.15	2.137	45.188	83.659	50.719
01-04-15 16:40	618.918	25.360	1.699	43.515	68.007	51.444
01-04-15 16:50	950.930	25.114	1.930	40.231	91.213	49.137

Tabla 4.4 Variables medidas del sistema: 01 de Abril 2015.

Resultados del día 02 de Abril de 2015

La Fig. 4.50 representa la irradiancia, la Fig. 4.51 la velocidad de viento y la Fig. 4.52 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 02 de Abril 2015.

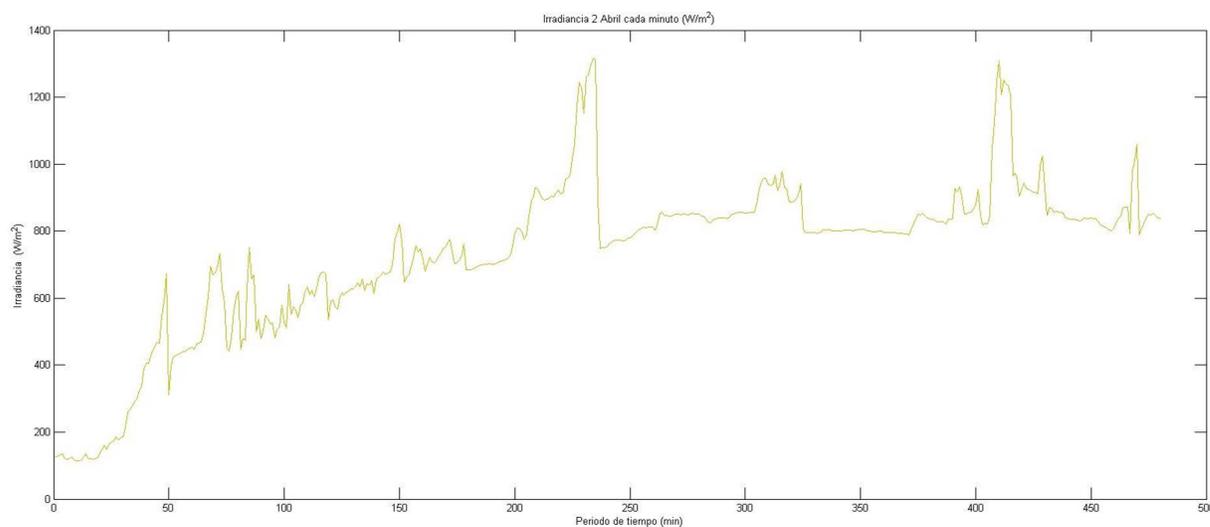


Figura 4.50 Irradiancia: 02 de Abril 2015.

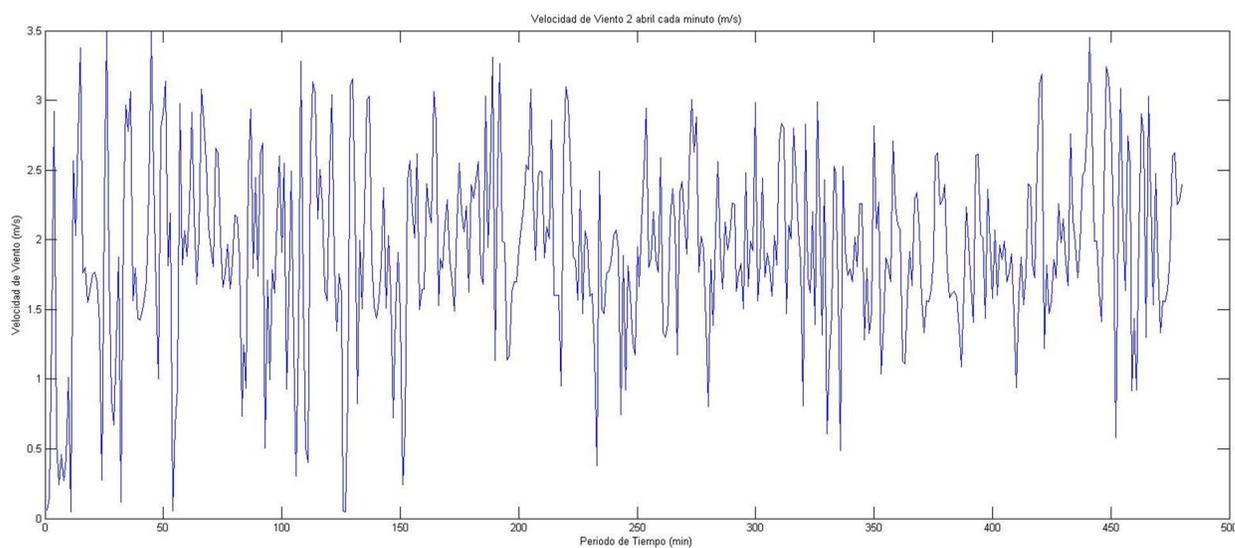


Figura 4.51 Velocidad de viento: 02 de Abril 2015.

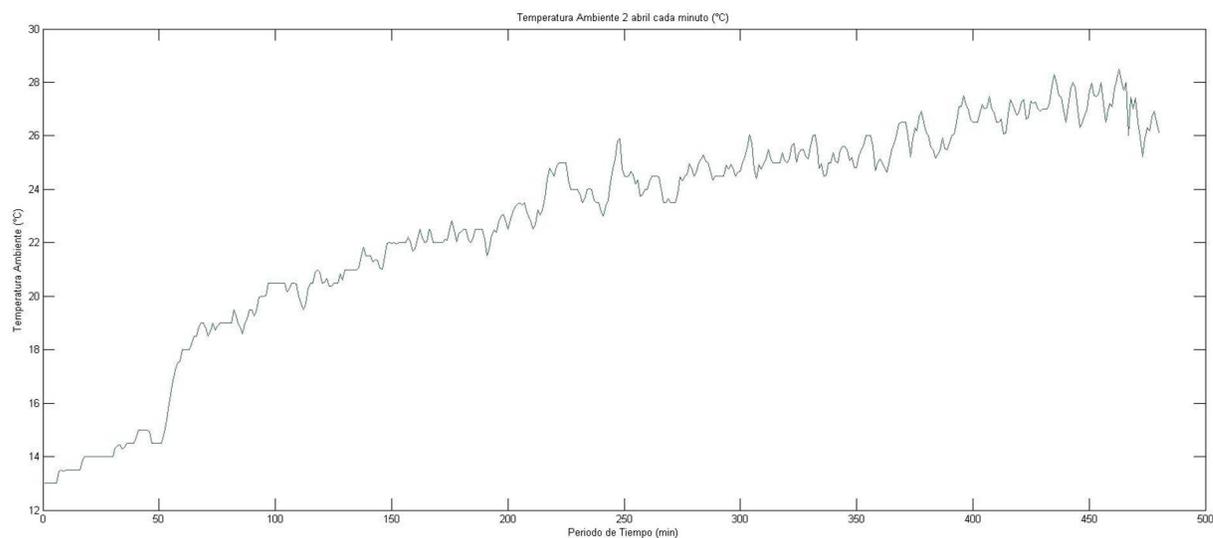


Figura 4.52 Temperatura ambiente: 02 de Abril 2015.

La Fig. 4.53 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.54 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.55 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

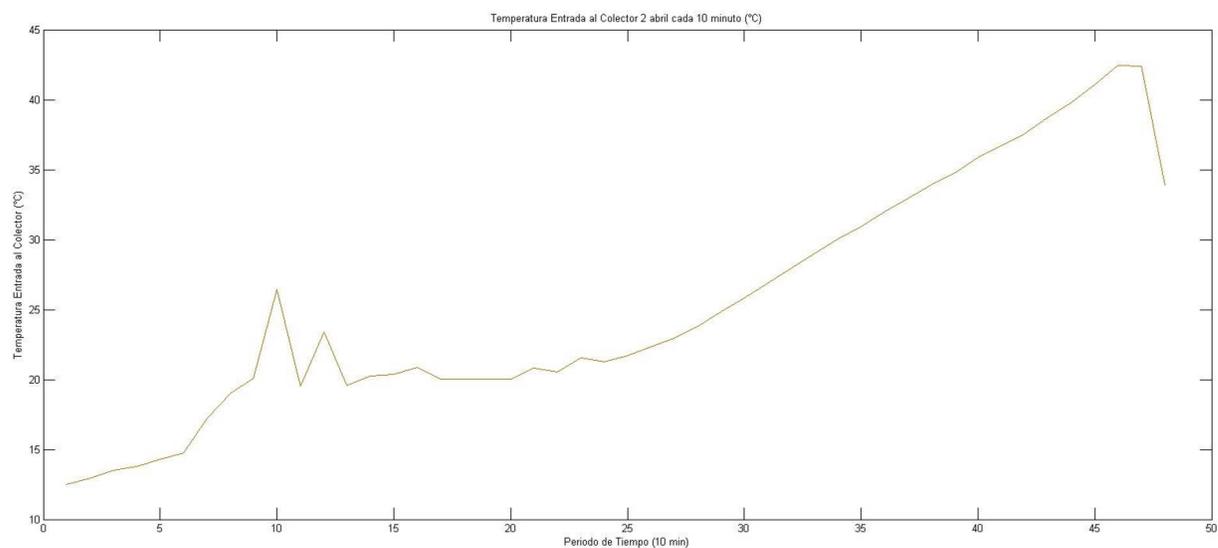


Figura 4.53 Temperatura entrada al colector: 02 de Abril 2015.

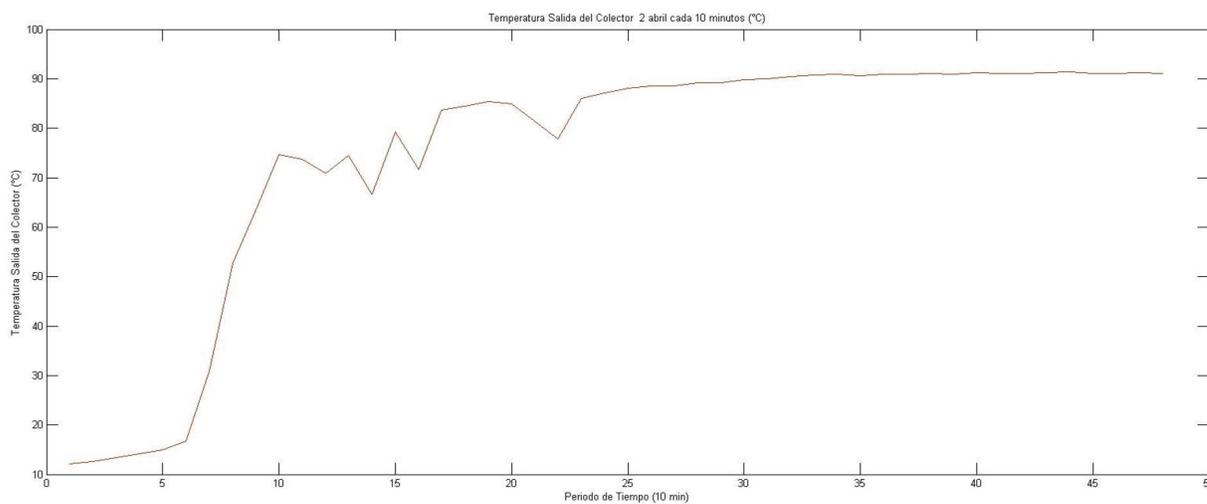


Figura 4.54 Temperatura salida del colector: 02 de Abril 2015.

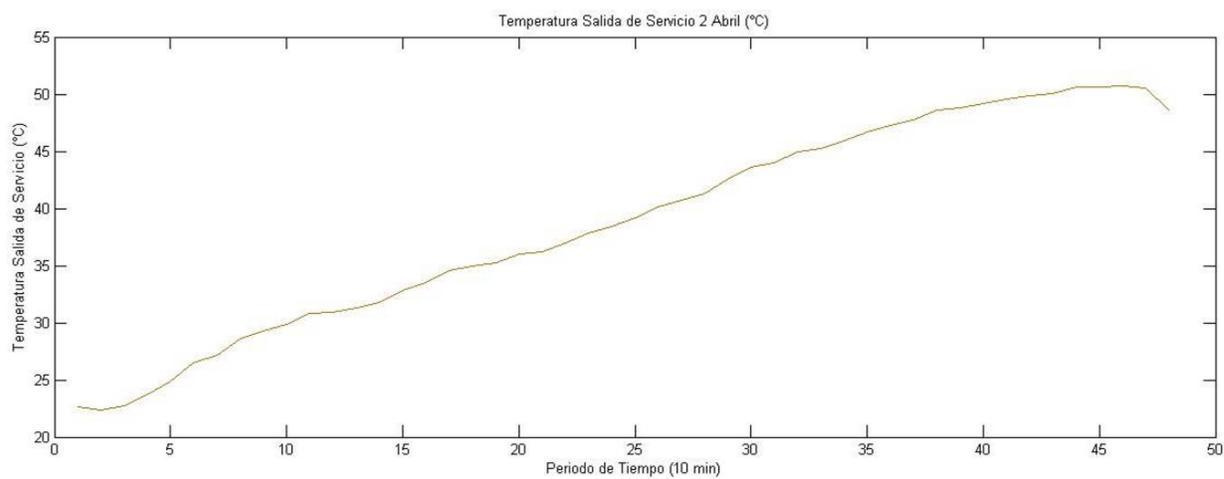


Figura 4.55 Temperatura salida servicio del tanque: 02 de Abril 2015.

La Fig. 4.56 muestra el gradiente de operación del sistema.

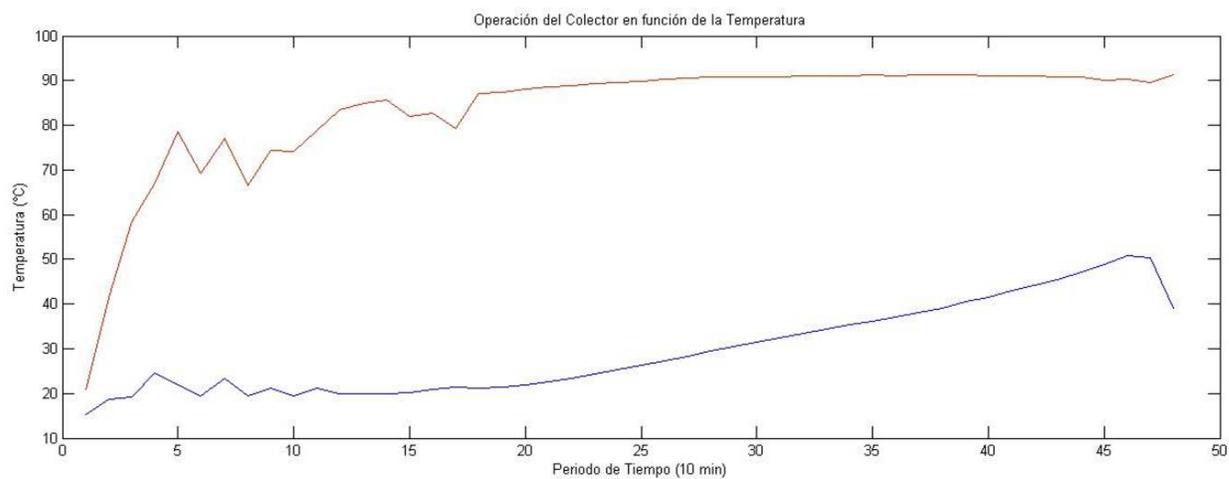


Figura 4.56 Operación del colector: 02 de Abril 2015.

En la Tabla 4.5 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 02 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
02-04-15 9:00	453.655	17.690	1.993	15.217	21.016	22.656
02-04-15 9:10	632.388	18.775	2.349	18.734	41.415	22.315
02-04-15 9:20	533.808	19.074	1.654	19.200	58.409	22.735
02-04-15 9:30	560.621	19.383	1.990	24.663	67.053	23.691
02-04-15 9:40	541.191	20.416	1.971	21.880	78.542	24.822
02-04-15 9:50	605.250	20.127	1.706	19.508	69.183	26.529
02-04-15 10:00	613.061	20.623	2.122	23.464	77.094	27.144
01-04-15 10:10	629.531	20.817	1.509	19.500	66.459	28.591
02-04-15 10:20	653.966	21.395	2.047	21.145	74.303	29.273
02-04-15 10:30	720.266	21.793	1.507	19.500	74.024	29.874
02-04-15 10:40	720.006	22.057	2.170	21.096	78.766	30.809
02-04-15 10:50	735.758	22.141	1.985	20.038	83.351	30.901
02-04-15 11:00	703.273	22.345	2.124	20.012	84.871	31.336
02-04-15 11:10	703.603	22.258	2.324	20.005	85.542	31.778
02-04-15 11:20	765.685	22.995	1.950	20.063	81.919	32.849
02-04-15 11:30	894.110	23.058	2.263	21.009	82.777	33.547
02-04-15 11:40	930.430	24.607	2.071	21.339	79.280	34.568
02-04-15 11:50	1216.290	23.985	1.693	21.043	87.133	34.993
02-04-15 12:00	801.500	23.626	1.602	21.455	87.480	35.215
02-04-15 12:10	784.415	24.877	1.912	21.980	88.204	35.999
02-04-15 12:20	822.298	24.207	1.796	22.606	88.553	36.238
02-04-15 12:30	848.111	23.776	2.322	23.336	88.860	36.933
02-04-15 12:40	844.235	24.816	1.812	24.2875	89.222	37.844
02-04-15 12:50	839.625	24.640	1.910	25.296	89.480	38.433
02-04-15 13:00	855.631	25.063	2.035	26.296	89.851	39.141
02-04-15 13:10	939.273	24.972	2.095	27.389	90.266	40.127
02-04-15 13:20	913.033	25.208	2.042	28.384	90.596	40.733
02-04-15 13:30	797.186	25.449	1.849	29.477	90.821	41.2745
02-04-15 13:40	801.993	25.076	1.792	30.507	90.819	42.515
02-04-15 13:50	803.003	25.351	1.765	31.405	90.872	43.599
02-04-15 14:00	797.431	25.167	1.840	32.332	90.896	44.031
02-04-15 14:10	804.640	26.075	1.853	33.391	90.954	44.956
02-04-15 14:20	838.653	26.031	1.999	34.287	91.071	45.221
02-04-15 14:30	868.056	26.013	1.823	35.346	91.073	45.889
02-04-15 14:40	856.090	26.890	1.900	36.187	91.190	46.636
02-04-15 14:50	1152.425	26.703	1.667	37.055	91.050	47.293
02-04-15 15:00	949.366	27.025	2.134	38.140	91.315	47.771
02-04-15 15:10	910.283	27.241	2.018	39.065	91.212	48.561
02-04-15 15:20	842.676	27.483	2.356	40.641	91.386	48.802
02-04-15 15:30	833.591	27.208	2.261	41.39	91.042	49.139
02-04-15 15:40	825.236	27.516	1.980	43.030	91.158	49.555
02-04-15 15:50	1009.450	27.956	1.955	44.315	91.039	49.824
02-04-15 16:00	1002.968	28.451	1.883	45.537	90.896	50.050
02-04-15 16:10	1085.555	27.901	1.597	47.130	90.768	50.633
02-04-15 16:20	687.246	27.160	2.355	48.987	90.066	50.618
02-04-15 16:30	567.046	26.935	1.753	50.827	90.302	50.680
02-04-15 16:40	658.496	26.609	1.860	50.427	89.586	50.572
02-04-15 16:50	910.285	27.241	2.018	39.065	91.212	48.561

Tabla 4.5 Variables medidas del sistema: 02 de Abril 2015.

Resultados del día 03 de Abril de 2015

La Fig. 4.57 representa la irradiancia, la Fig. 4.58 la velocidad de viento y la Fig. 4.59 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 03 de Abril 2015.

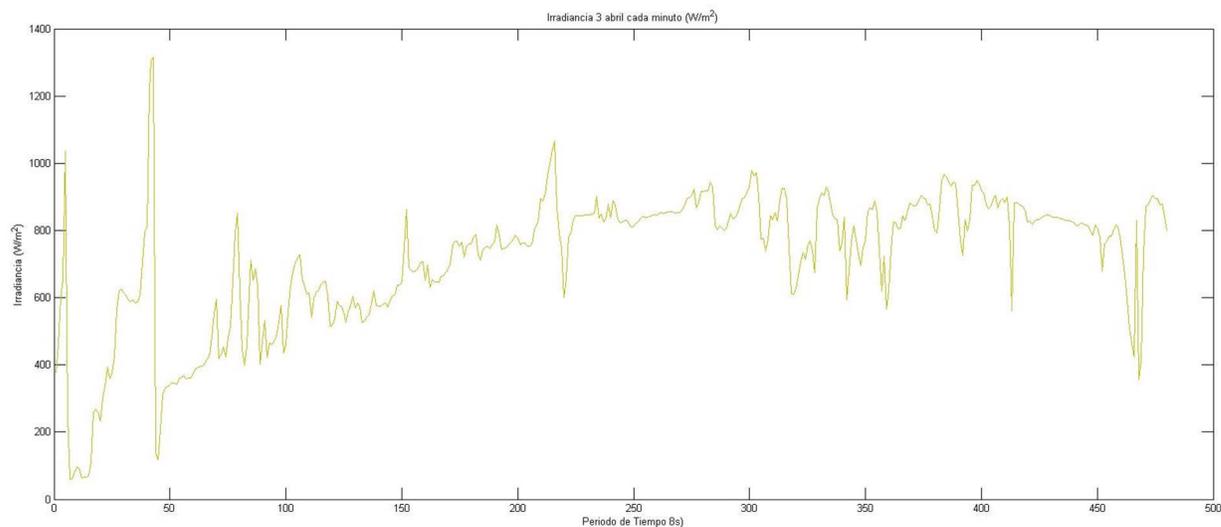


Figura 4.57 Irradiancia: 03 de Abril 2015.

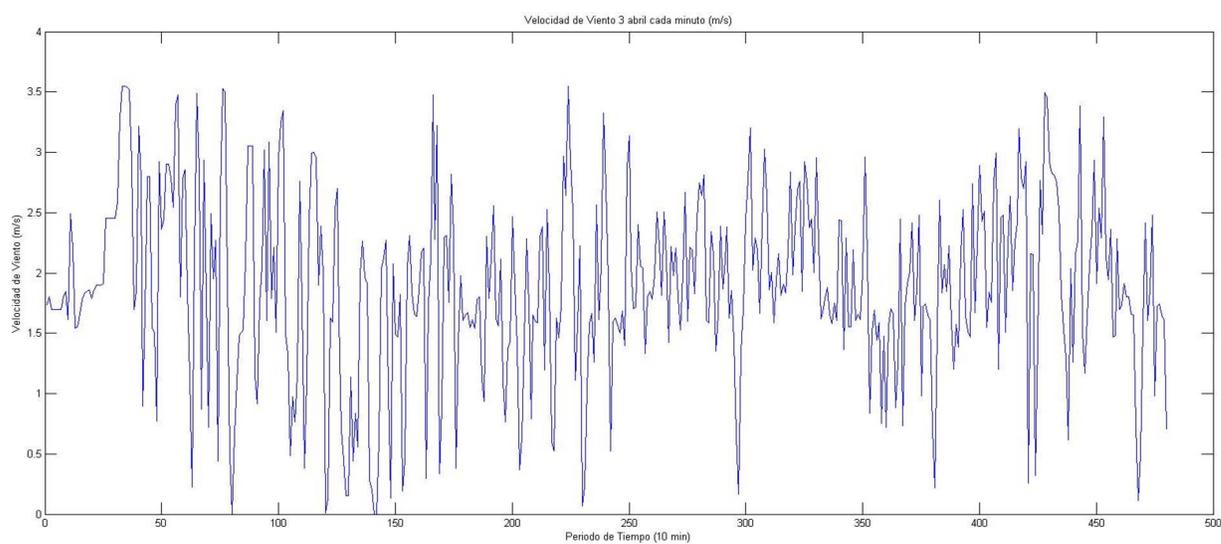


Figura 4.58 Velocidad de viento: 03 de Abril 2015.

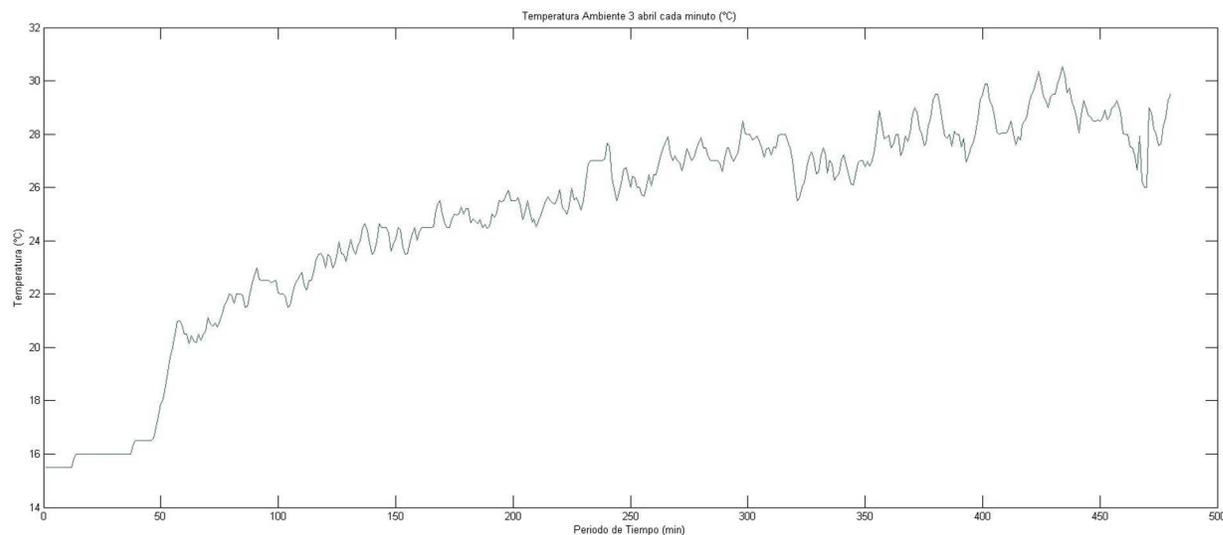


Figura 4.59 Temperatura ambiente: 03 de Abril 2015.

La Fig. 4.60 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.61 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.62 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

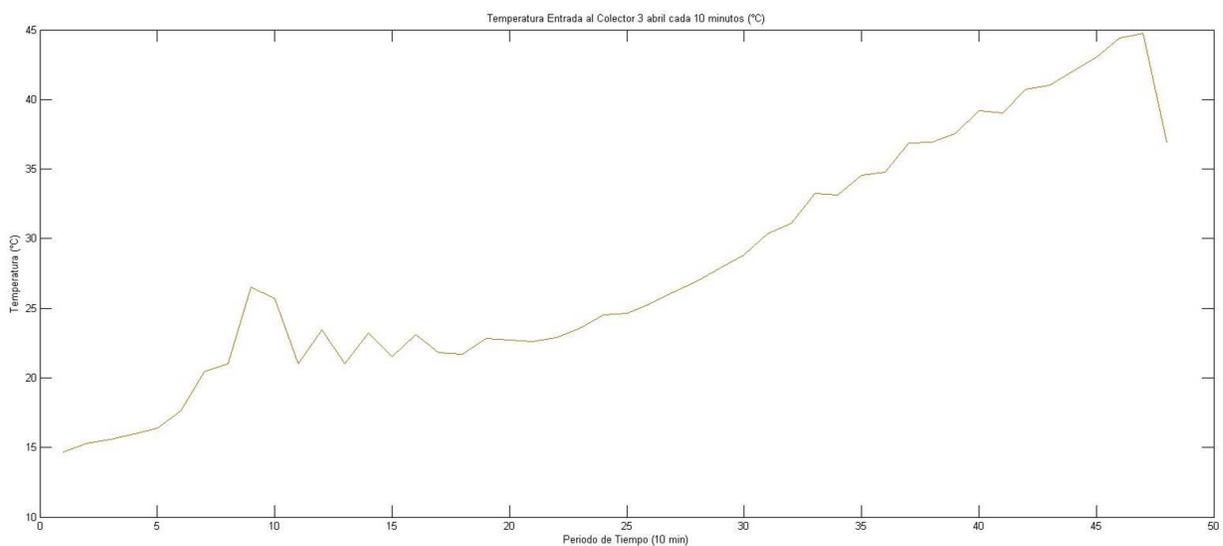


Figura 4.60 Temperatura entrada al colector: 03 de Abril 2015.

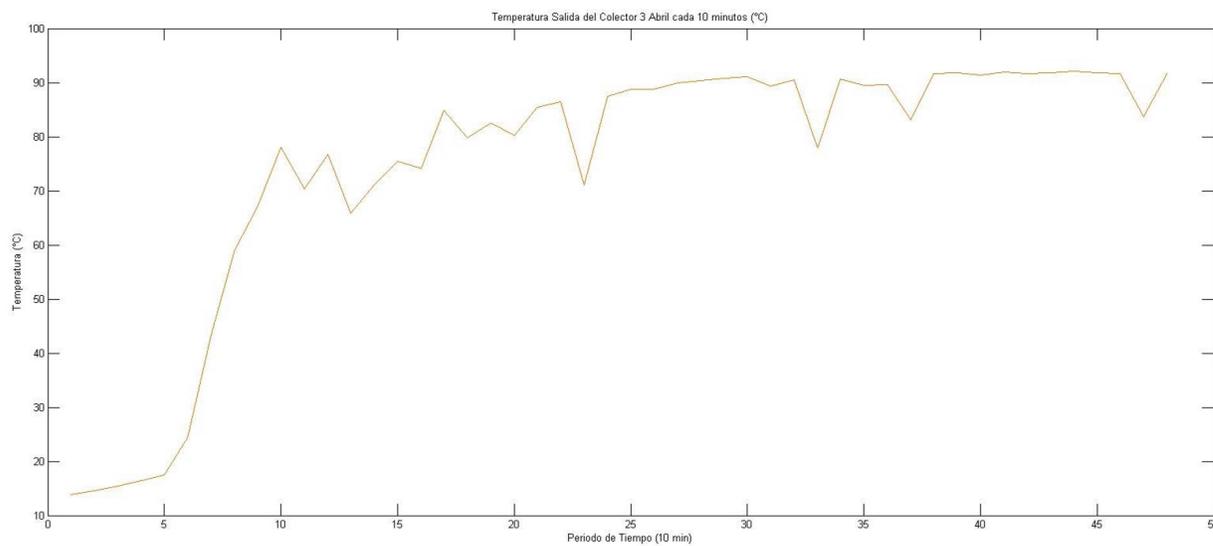


Figura 4.61 Temperatura salida del colector: 03 de Abril 2015.

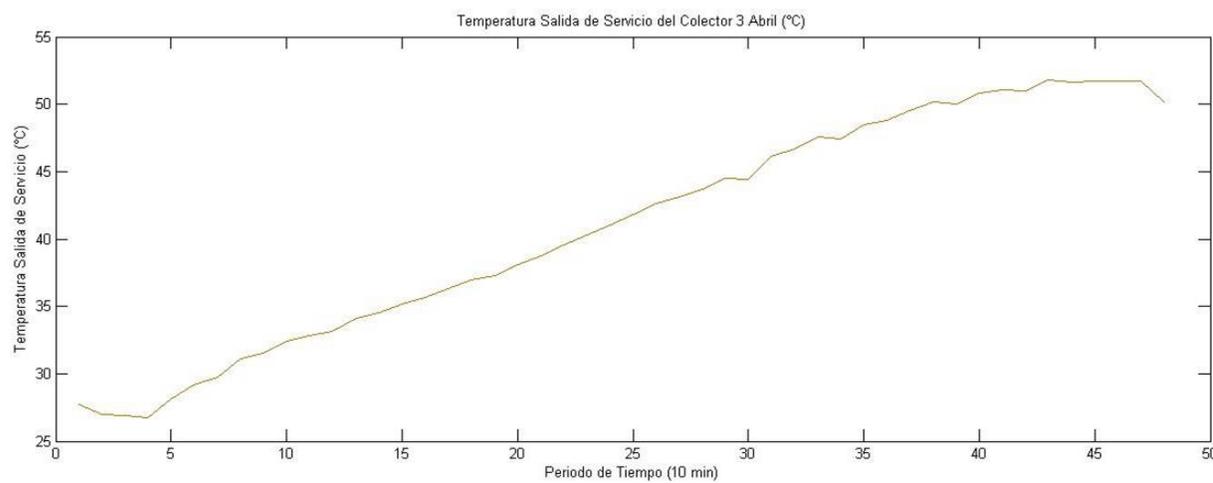


Figura 4.62 Temperatura salida servicio del tanque: 03 de Abril 2015.

La Fig. 4.63 muestra el gradiente de operación del sistema.

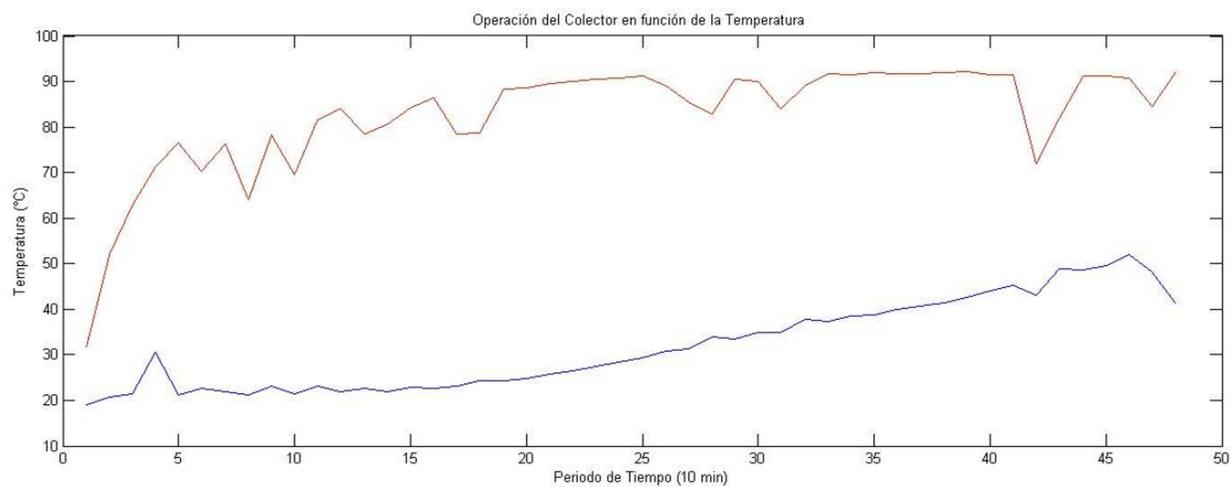


Figura 4.63 Operación del colector: 03 de Abril 2015.

En la Tabla 4.6 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 03 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
03-04-15 9:00	377.076	20.512	2.275	19.084	31.778	27.709
03-04-15 9:10	463.003	20.685	1.897	20.784	51.929	27.007
03-04-15 9:20	584.433	21.756	1.703	21.454	62.908	26.871
03-04-15 9:30	536.316	22.284	2.218	30.552	71.300	26.778
03-04-15 9:40	561.746	22.151	2.177	21.176	76.625	28.157
03-04-15 9:50	630.355	22.377	1.562	22.556	70.199	29.152
03-04-15 10:00	581.545	23.294	1.802	21.875	76.330	29.729
03-04-15 10:10	559.486	23.672	0.837	21.216	63.913	31.115
03-04-15 10:20	577.865	24.187	1.136	23.224	78.177	31.499
03-04-15 10:30	674.315	24.063	1.264	21.500	69.523	32.448
03-04-15 10:40	672.916	24.292	1.805	23.102	81.491	32.802
03-04-15 10:50	700.348	24.855	2.192	21.861	84.060	33.130
03-04-15 11:00	752.606	24.983	1.531	22.676	78.490	34.150
03-04-15 11:10	761.118	24.820	1.757	22.001	80.619	34.517
03-04-15 11:20	764.798	25.465	1.347	22.930	84.254	35.137
03-04-15 11:30	871.411	25.042	1.746	22.701	86.310	35.640
03-04-15 11:40	811.075	25.437	1.977	23.005	78.444	36.295
03-04-15 11:50	851.393	26.069	1.410	24.434	78.626	36.939
03-04-15 12:00	847.918	26.756	1.941	24.374	88.299	37.319
03-04-15 12:10	825.358	26.272	2.029	24.864	88.517	38.069
03-04-15 12:20	846.925	26.508	1.945	25.725	89.493	38.735
03-04-15 12:30	866.945	27.202	2.013	26.525	90.036	39.593
03-04-15 12:40	909.185	27.330	2.171	27.344	90.558	40.287
03-04-15 12:50	821.608	27.083	1.980	28.383	90.824	41.047
03-04-15 13:00	917.295	27.861	1.814	29.320	91.299	41.843
03-04-15 13:10	826.421	27.566	2.127	30.882	88.975	42.611
03-04-15 13:20	717.281	26.720	2.269	31.270	85.414	43.119
03-04-15 13:30	842.115	26.996	2.262	34.059	82.861	43.726
03-04-15 13:40	775.068	26.649	1.785	33.441	90.420	44.504
03-04-15 13:50	802.173	26.912	1.849	34.940	90.009	44.394
03-04-15 14:00	729.633	28.015	1.327	34.804	84.090	46.081
03-04-15 14:10	867.768	28.109	1.844	37.746	88.971	46.717
03-04-15 14:20	878.386	28.578	1.501	37.296	91.708	47.572
03-04-15 14:30	863.133	27.690	1.765	38.470	91.556	47.401
03-04-15 14:40	907.380	28.925	2.089	38.803	91.832	48.450
03-04-15 14:50	848.911	28.085	2.279	39.945	91.813	48.810
03-04-15 15:00	848.285	29.072	2.048	40.625	91.736	49.535
03-04-15 15:10	840.215	29.692	2.764	41.449	91.905	50.212
03-04-15 15:20	823.721	29.059	1.800	42.491	92.065	49.985
03-04-15 15:30	781.936	28.627	2.171	43.933	91.518	50.863
03-04-15 15:40	716.360	28.360	1.874	45.247	91.527	51.094
03-04-15 15:50	652.023	26.673	1.471	43.045	71.906	50.959
03-04-15 16:00	1170.206	29.820	2.552	48.964	81.926	51.778
03-04-15 16:10	1096.065	29.454	1.897	48.665	91.132	51.673
03-04-15 16:20	939.826	28.785	2.428	49.607	91.230	51.679
03-04-15 16:30	508.318	28.679	1.308	51.891	90.803	51.735
03-04-15 16:40	470.746	27.547	1.932	48.119	84.505	51.754
03-04-15 16:50	840.215	29.692	2.764	41.449	91.905	50.212

Tabla 4.6 Variables medidas del sistema: 03 de Abril 2015.

Resultados del día 05 de Abril de 2015

La Fig. 4.64 representa la irradiancia, la Fig. 4.65 la velocidad de viento y la Fig. 4.66 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 05 de Abril 2015.

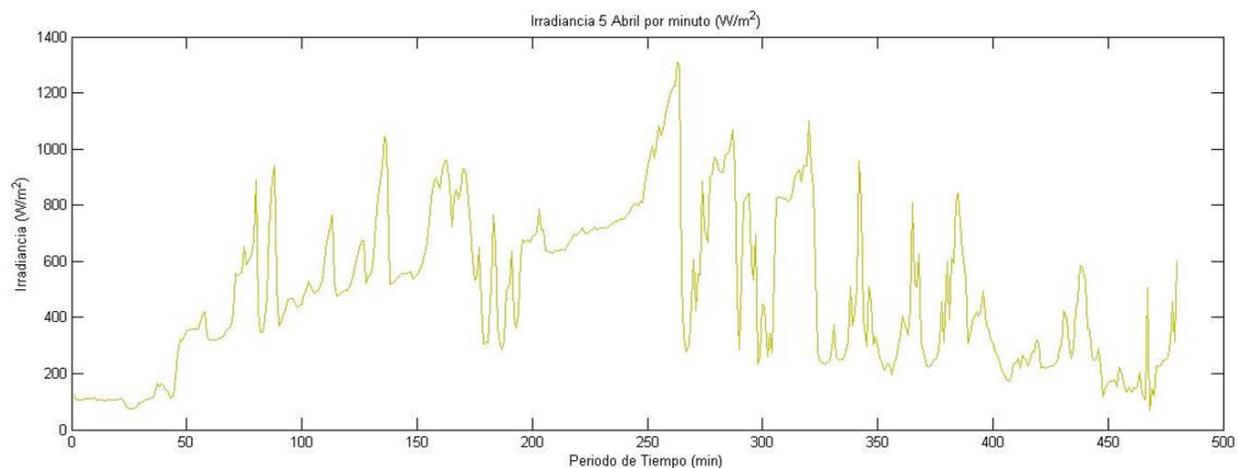


Figura 4.64 Irradiancia: 05 de Abril 2015.

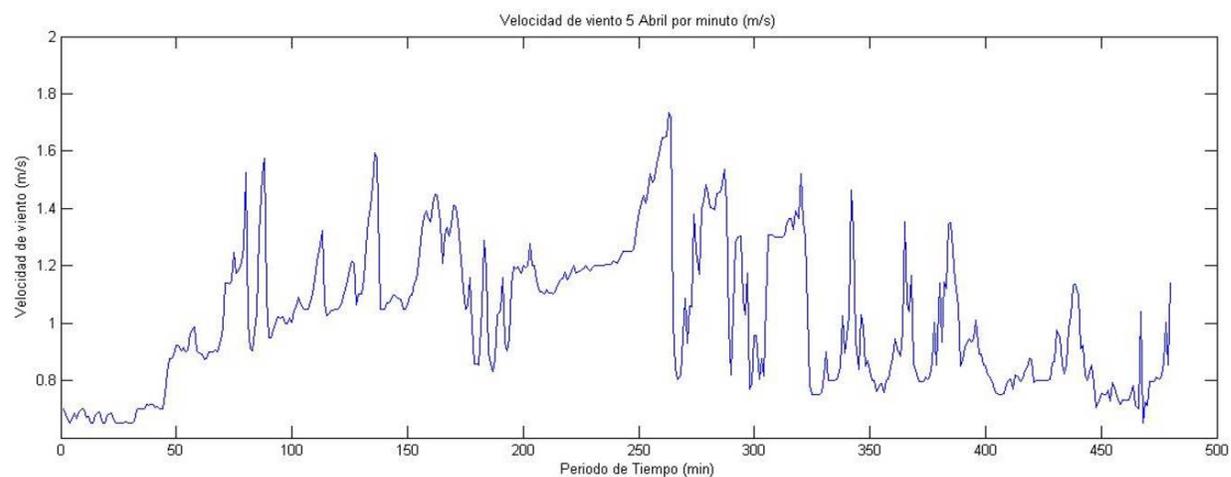


Figura 4.65 Velocidad de viento: 05 de Abril 2015.

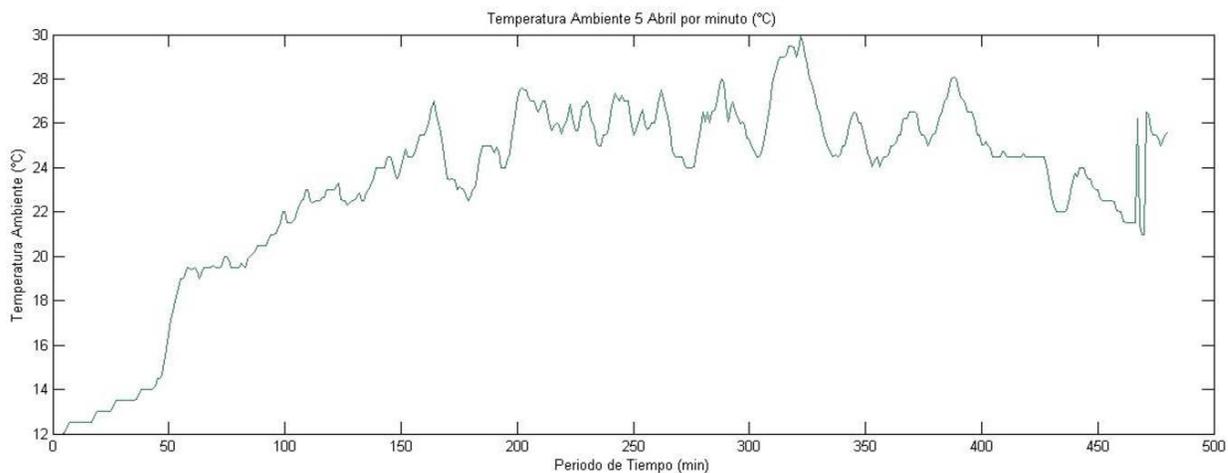


Figura 4.66 Temperatura ambiente: 05 de Abril 2015.

La Fig. 4.67 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.68 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.69 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

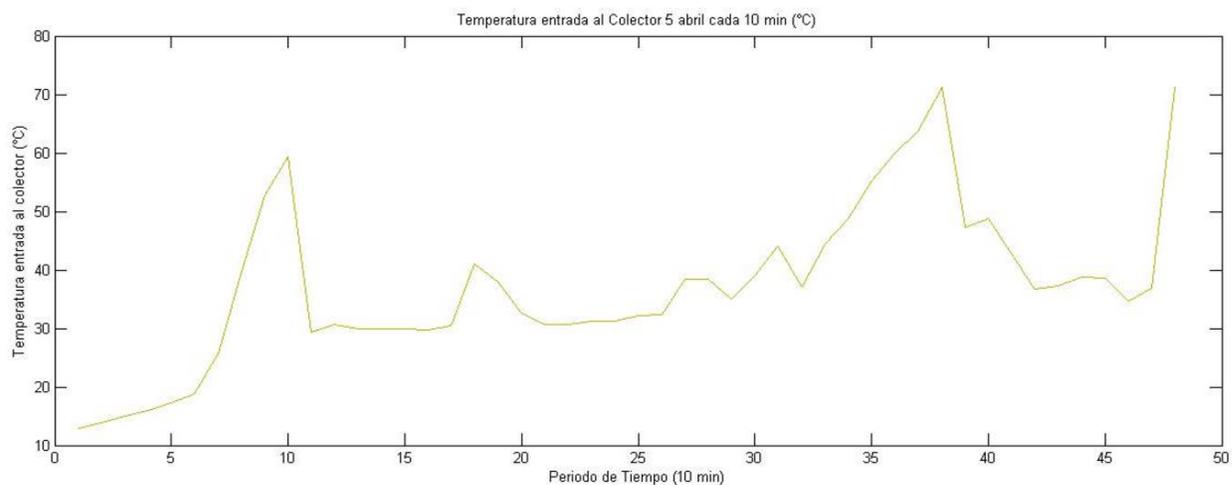


Figura 4.67 Temperatura entrada al colector: 05 de Abril 2015.

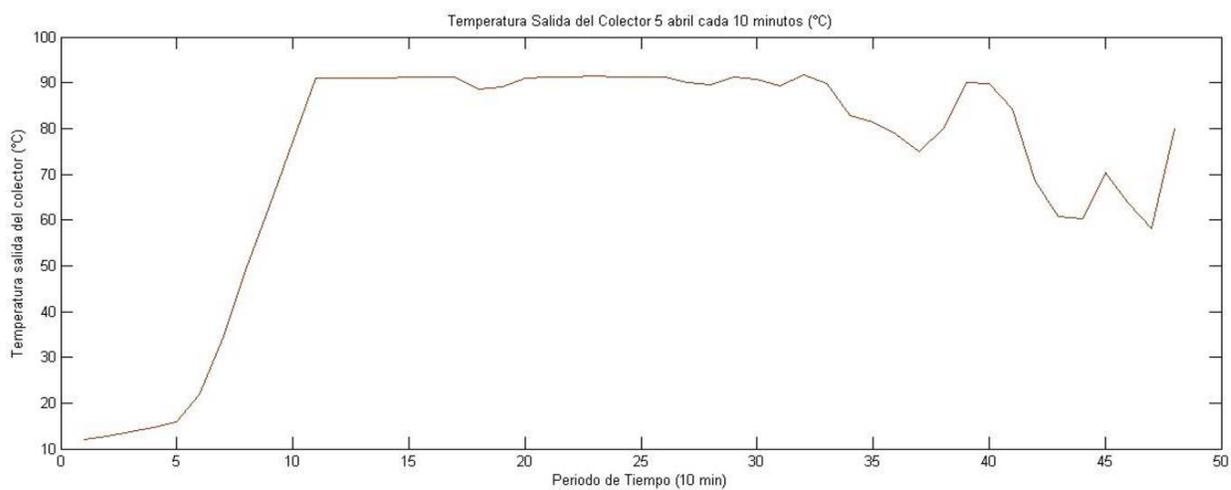


Figura 4.68 Temperatura salida del colector: 05 de Abril 2015.

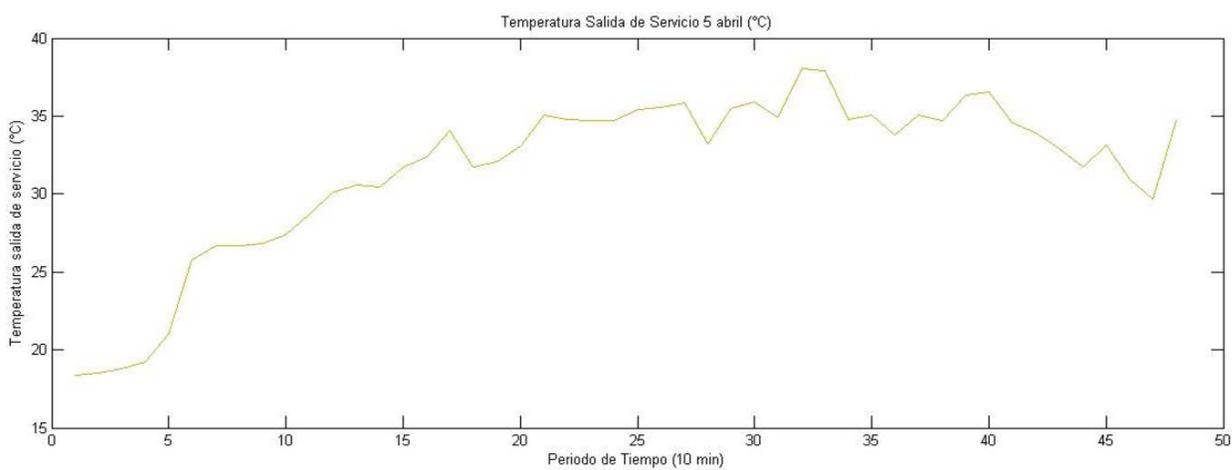


Figura 4.69 Temperatura salida servicio del tanque: 05 de Abril 2015.

La Fig. 4.70 muestra el gradiente de operación del sistema.

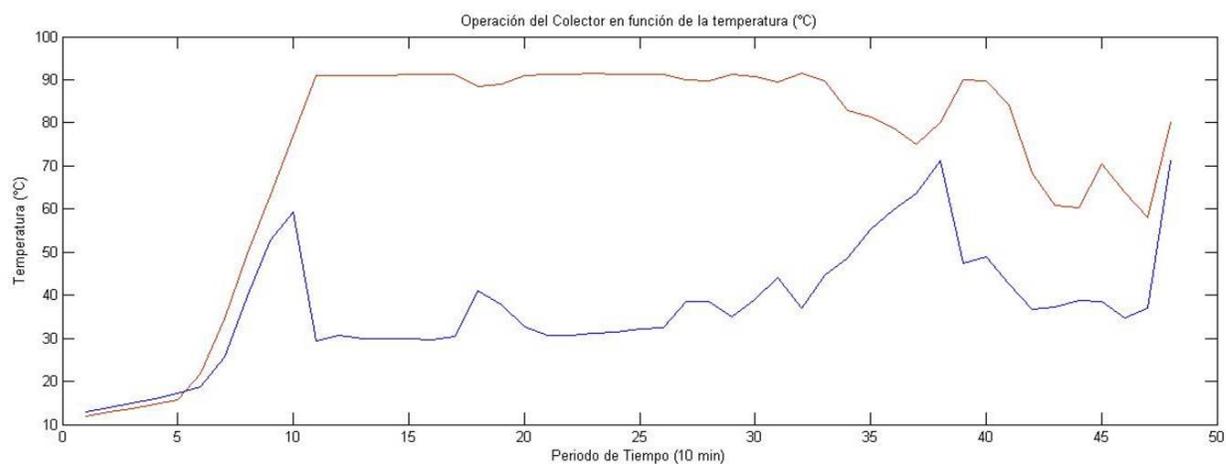


Figura 4.70 Operación del colector: 05 de Abril 2015.

En la Tabla 4.7 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 05 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
05-04-15 9:00	110.331	12.226	0.680	12.920	12.016	18.395
05-04-15 9:10	105.543	12.641	0.667	13.883	12.805	18.536
05-04-15 9:20	88.901	13.224	0.658	14.916	13.714	18.769
05-04-15 9:30	131.305	13.685	0.696	16.016	14.713	19.190
05-04-15 9:40	229.895	14.741	0.796	17.255	15.782	21.006
05-04-15 9:50	366.661	18.723	0.927	18.720	21.772	25.795
05-04-15 10:00	344.086	19.421	0.907	25.693	34.590	26.652
05-04-15 10:10	625.448	19.654	1.217	39.701	49.669	26.680
05-04-15 10:20	542.886	20.050	1.126	52.703	63.163	26.813
05-04-15 10:30	439.603	21.160	1.001	59.343	77.087	27.360
05-04-15 10:40	512.986	22.157	1.073	29.343	91.019	28.638
05-04-15 10:50	560.200	22.670	1.111	30.610	91.028	30.062
05-04-15 11:00	588.951	22.682	1.130	29.993	91.013	30.590
05-04-15 11:10	763.671	23.127	1.299	29.847	91.094	30.478
05-04-15 11:20	550.978	24.048	1.075	29.963	91.189	31.752
05-04-15 11:30	743.596	24.927	1.249	29.730	91.308	32.369
05-04-15 11:40	872.771	25.596	1.356	30.437	91.240	34.038
05-04-15 11:50	590.401	23.044	1.107	41.098	88.576	31.760
05-04-15 12:00	453.893	24.447	0.991	37.882	89.063	32.053
05-04-15 12:10	580.343	24.979	1.102	32.634	90.897	33.103
05-04-15 12:20	677.413	27.122	1.165	30.580	91.359	35.090
05-04-15 12:30	664.21	26.148	1.135	30.668	91.341	34.805
05-04-15 12:40	711.820	26.356	1.187	31.217	91.405	34.693
05-04-15 12:50	736.483	25.663	1.204	31.305	91.292	34.740
05-04-15 13:00	816.595	26.821	1.266	32.109	91.348	35.403
05-04-15 13:10	1067.990	26.075	1.507	32.385	91.346	35.527
05-04-15 13:20	754.675	25.854	1.226	38.413	90.011	35.880
05-04-15 13:30	754.415	24.703	1.259	38.436	89.609	33.184
05-04-15 13:40	849.633	26.922	1.334	35.044	91.350	35.501
05-04-15 13:50	580.885	26.097	1.072	39.004	90.692	35.920
05-04-15 14:00	600.676	25.472	1.1045	44.094	89.369	34.889
05-04-15 14:10	909.351	29.060	1.359	37.055	91.619	38.022
05-04-15 14:20	413.021	28.291	0.905	44.486	89.682	37.878
05-04-15 14:30	327.090	24.944	0.862	48.755	82.958	34.804
05-04-15 14:40	485.533	25.815	1.015	55.178	81.339	35.059
05-04-15 14:50	249.428	24.405	0.802	59.871	78.860	33.805
05-04-15 15:00	460.053	25.768	1.002	63.609	74.963	35.072
05-04-15 15:10	311.898	25.624	0.868	71.245	80.006	34.733
05-04-15 15:20	580.490	27.209	1.107	47.327	90.022	36.373
05-04-15 15:30	389.221	26.263	0.918	48.835	89.813	36.546
05-04-15 15:40	221.726	24.750	0.779	42.660	84.241	34.599
05-04-15 15:50	265.051	24.512	0.823	36.721	68.525	33.941
05-04-15 16:00	240.725	24.195	0.812	37.337	60.745	32.956
05-04-15 16:10	425.433	22.418	0.984	38.860	60.289	31.715
05-04-15 16:20	243.751	23.541	0.812	38.628	70.460	33.169
05-04-15 16:30	167.828	22.362	0.747	34.640	63.747	30.927
05-04-15 16:40	173.328	21.866	0.753	36.980	58.044	29.700
05-04-15 16:50	311.898	25.624	0.868	71.245	80.006	34.733

Tabla 4.7 Variables medidas del sistema: 05 de Abril 2015.

Resultados del día 07 de Abril de 2015

La Fig. 4.71 representa la irradiancia, la Fig. 4.72 la velocidad de viento y la Fig. 4.73 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 07 de Abril 2015.

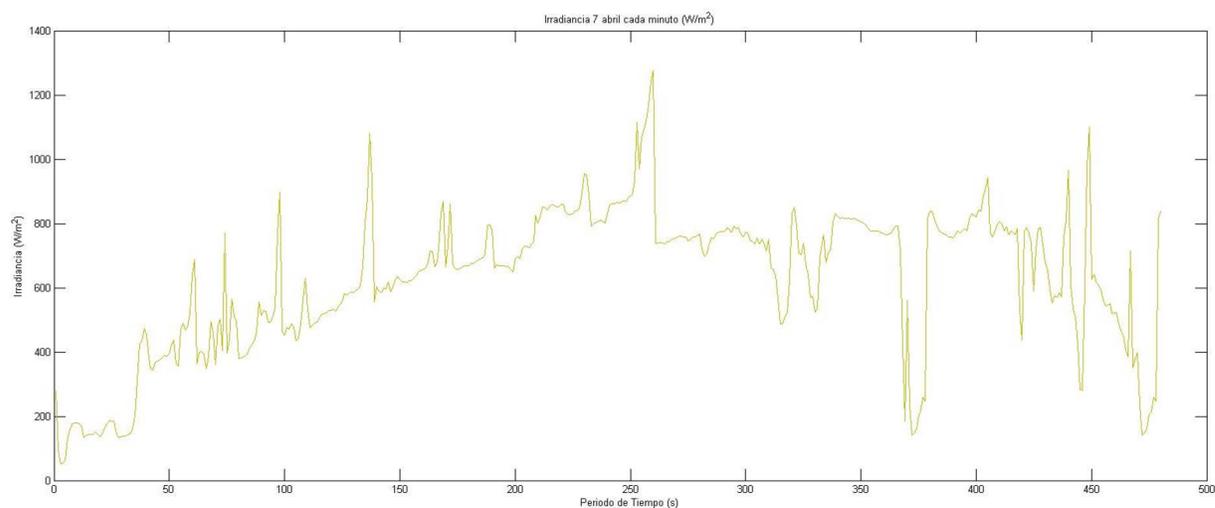


Figura 4.71 Irradiancia: 07 de Abril 2015.

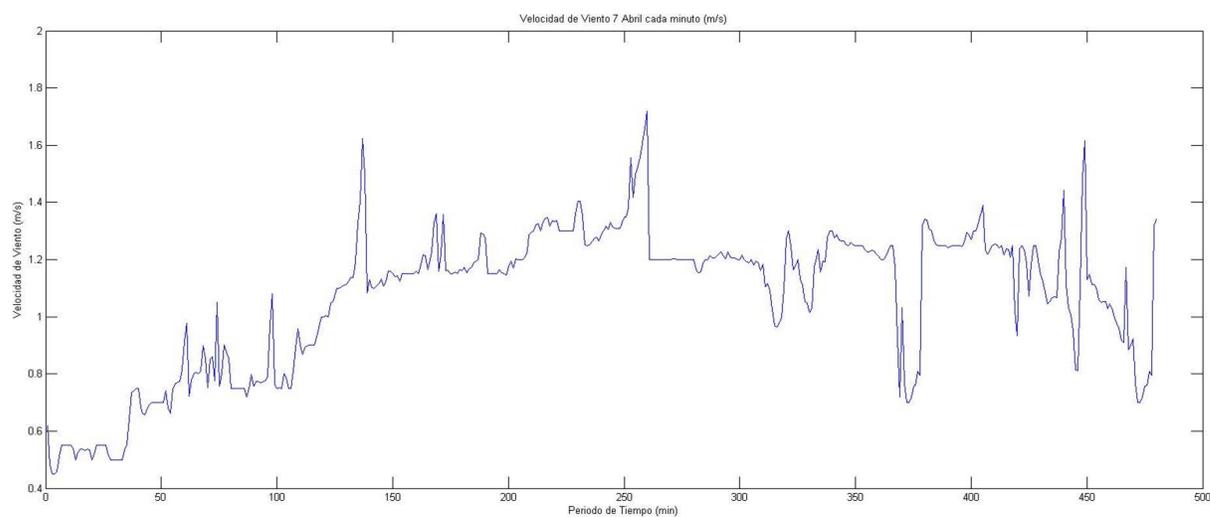


Figura 4.72 Velocidad de viento: 07 de Abril 2015.

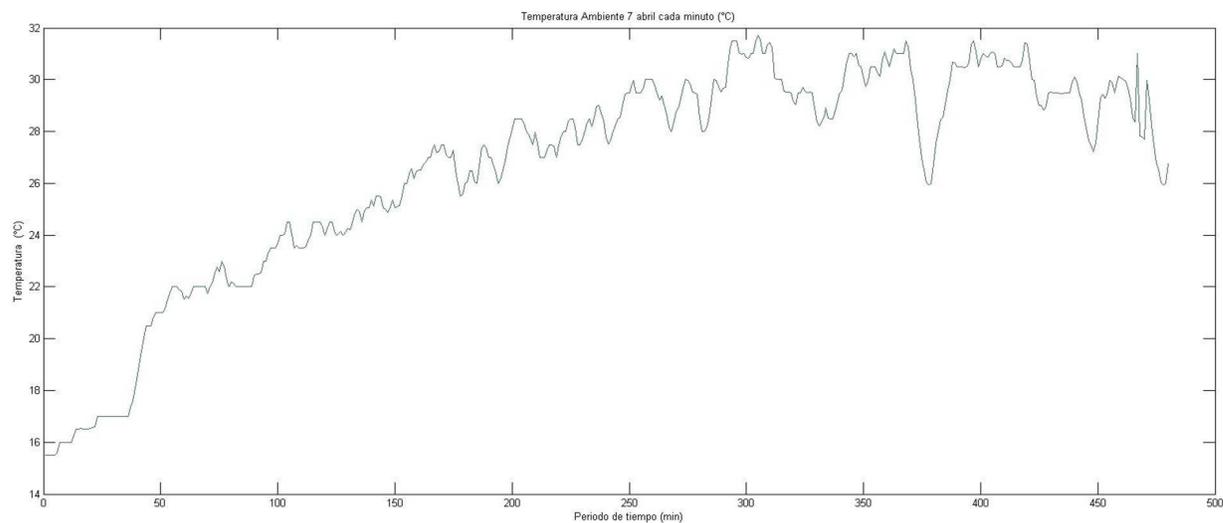


Figura 4.73 Temperatura ambiente: 07 de Abril 2015.

La Fig. 4.74 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.75 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.76 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

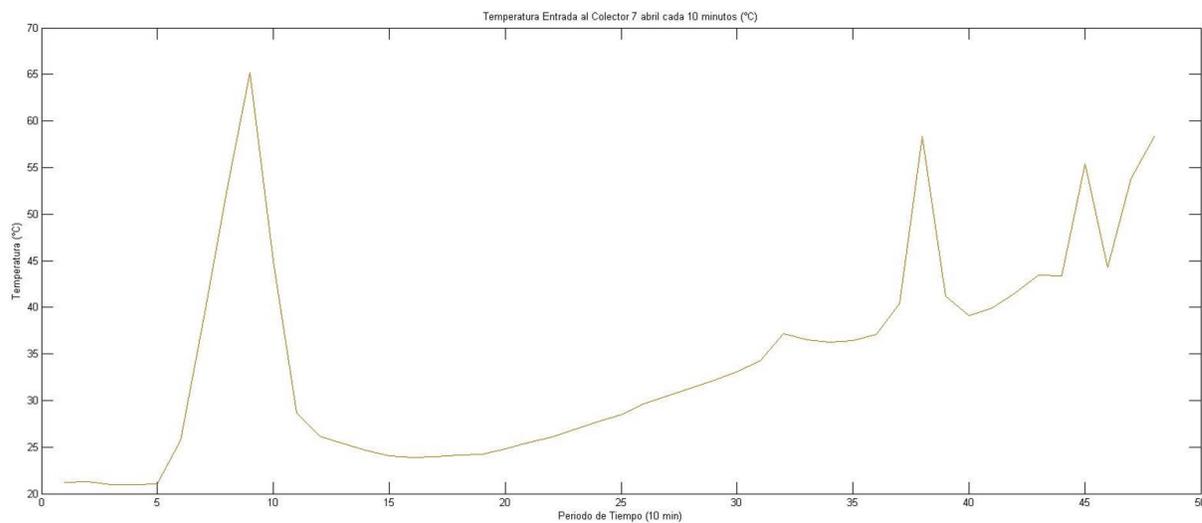


Figura 4.74 Temperatura entrada al colector: 07 de Abril 2015.

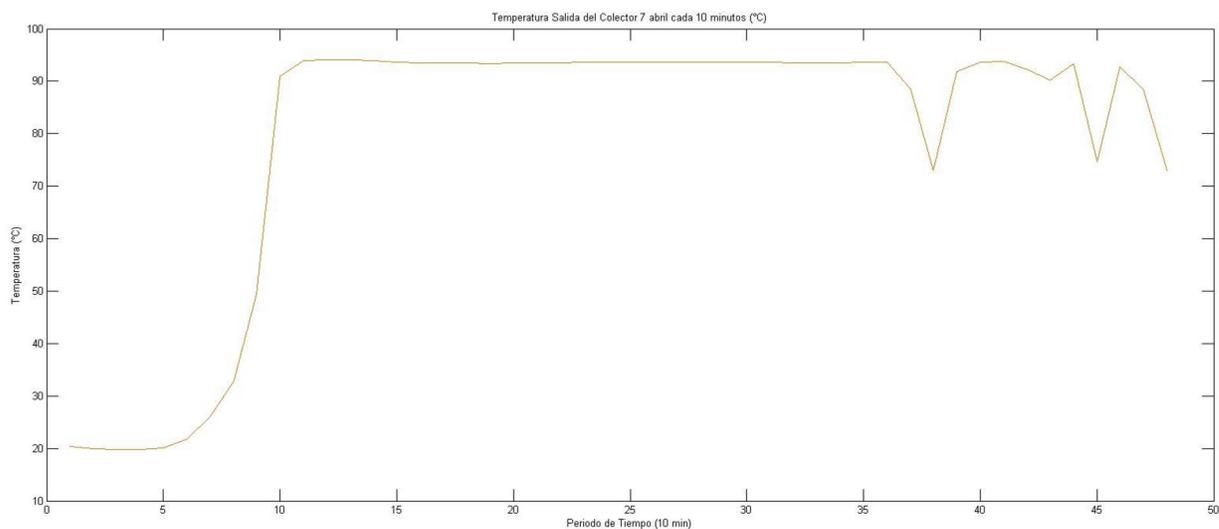


Figura 4.75 Temperatura salida del colector: 07 de Abril 2015.

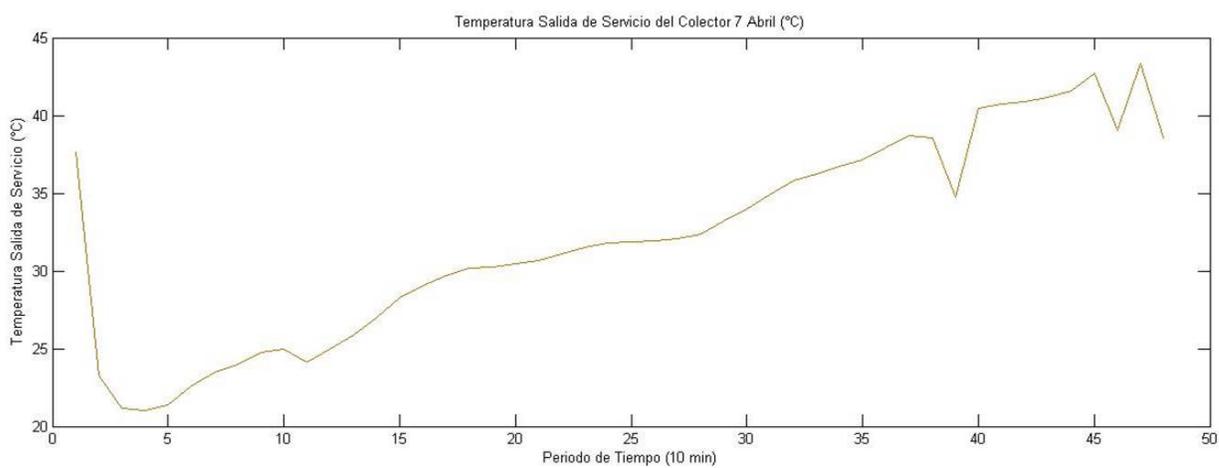


Figura 4.76 Temperatura salida servicio del tanque: 07 de Abril 2015.

La Fig. 4.77 muestra el gradiente de operación del sistema.

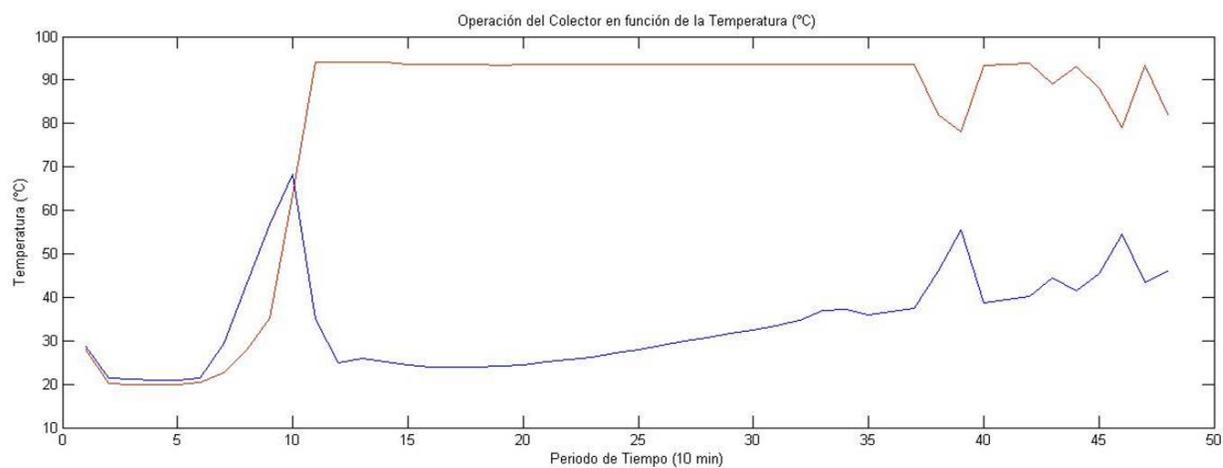


Figura 4.77 Operación del colector: 07 de Abril 2015.

En la Tabla 4.8 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 07 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
07-04-15 9:00	192.468	15.380	0.556	28.650	27.938	37.658
07-04-15 9:10	142.986	15.891	0.521	21.481	20.214	23.260
07-04-15 9:20	149.375	16.574	0.532	21.124	19.865	21.194
07-04-15 9:30	153.725	16.994	0.516	21.000	19.800	21.047
07-04-15 9:40	354.9	18.156	0.671	21.001	19.901	21.345
07-04-15 9:50	388.901	20.903	0.698	21.355	20.394	22.545
07-04-15 10:00	487.575	21.800	0.793	29.397	22.710	23.488
07-04-15 10:10	423.900	22.048	0.821	43.306	27.987	23.986
07-04-15 10:20	470.861	22.375	0.823	56.804	35.118	24.757
07-04-15 10:30	475.498	22.208	0.759	68.182	63.528	24.972
07-04-15 10:40	556.391	23.564	0.821	35.007	93.997	24.105
07-04-15 10:50	502.203	23.800	0.851	25.009	94.022	24.952
07-04-15 11:00	522.041	24.363	0.965	25.870	94.036	25.905
07-04-15 11:10	582.006	24.234	1.106	25.162	94.053	27.014
07-04-15 11:20	729.003	25.095	1.256	24.487	93.730	28.307
07-04-15 11:30	614.206	25.174	1.135	23.964	93.595	29.061
07-04-15 11:40	653.398	26.418	1.161	23.870	93.522	29.682
07-04-15 11:50	741.386	27.235	1.239	24.009	93.501	30.155
07-04-15 12:00	667.918	26.275	1.158	24.170	93.417	30.226
07-04-15 12:10	714.770	26.800	1.206	24.355	93.500	30.484
07-04-15 12:20	678.025	27.446	1.166	25.132	93.544	30.702
07-04-15 12:30	781.681	27.725	1.257	25.600	93.514	31.077
07-04-15 12:40	849.475	27.507	1.324	26.222	93.526	31.499
07-04-15 12:50	866.485	28.111	1.326	27.153	93.614	31.803
07-04-15 13:00	824.758	28.278	1.279	27.967	93.590	31.864
07-04-15 13:10	905.426	29.199	1.354	28.888	93.732	31.932
07-04-15 13:20	1013.723	29.708	1.456	30.029	93.592	32.107
07-04-15 13:30	750.108	28.825	1.200	30.647	93.615	32.359
07-04-15 13:40	742.146	29.080	1.187	31.567	93.644	33.197
07-04-15 13:50	767.956	29.819	1.209	32.456	93.692	33.985
07-04-15 14:00	768.791	31.119	1.205	33.436	93.642	34.916
07-04-15 14:10	713.058	31.081	1.160	34.764	93.628	35.795
07-04-15 14:20	638.238	29.521	1.102	36.986	93.555	36.205
07-04-15 14:30	639.640	29.015	1.115	37.285	93.488	36.715
07-04-15 14:40	778.455	29.259	1.249	35.943	93.537	37.148
07-04-15 14:50	806.660	30.515	1.253	36.626	93.663	37.899
07-04-15 15:00	772.140	30.660	1.219	37.455	93.707	38.676
07-04-15 15:10	472.686	30.439	0.970	46.062	81.950	38.538
07-04-15 15:20	522.645	26.949	1.048	55.494	78.100	34.769
07-04-15 15:30	766.780	30.066	1.250	38.768	93.367	40.465
07-04-15 15:40	820.185	30.924	1.279	39.349	93.688	40.767
07-04-15 15:50	811.436	30.754	1.266	40.105	93.885	40.892
07-04-15 16:00	716.251	30.628	1.182	44.450	89.116	41.141
07-04-15 16:10	682.011	29.266	1.153	41.576	93.169	41.589
07-04-15 16:20	648.093	29.605	1.135	45.369	88.192	42.716
07-04-15 16:30	616.135	28.308	1.129	54.410	79.182	39.057
07-04-15 16:40	554.351	29.933	1.054	43.563	93.459	43.355
07-04-15 16:50	472.686	30.439	0.970	46.062	81.950	38.538

Tabla 4.8 Variables medidas del sistema: 07 de Abril 2015.

Resultados del día 08 de Abril de 2015

La Fig. 4.78 representa la irradiancia, la Fig. 4.79 la velocidad de viento y la Fig. 4.80 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 08 de Abril 2015.

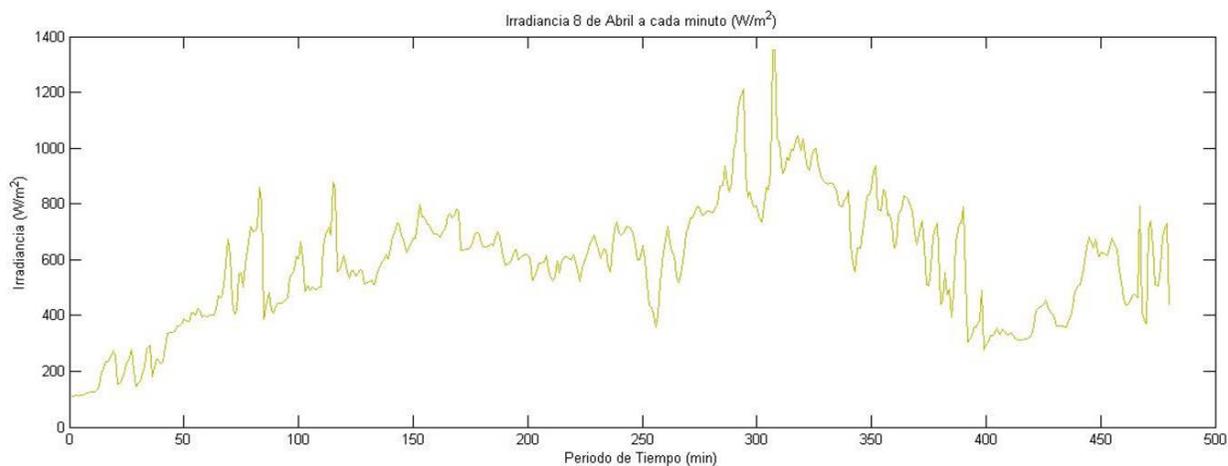


Figura 4.78 Irradiancia: 08 de Abril 2015.

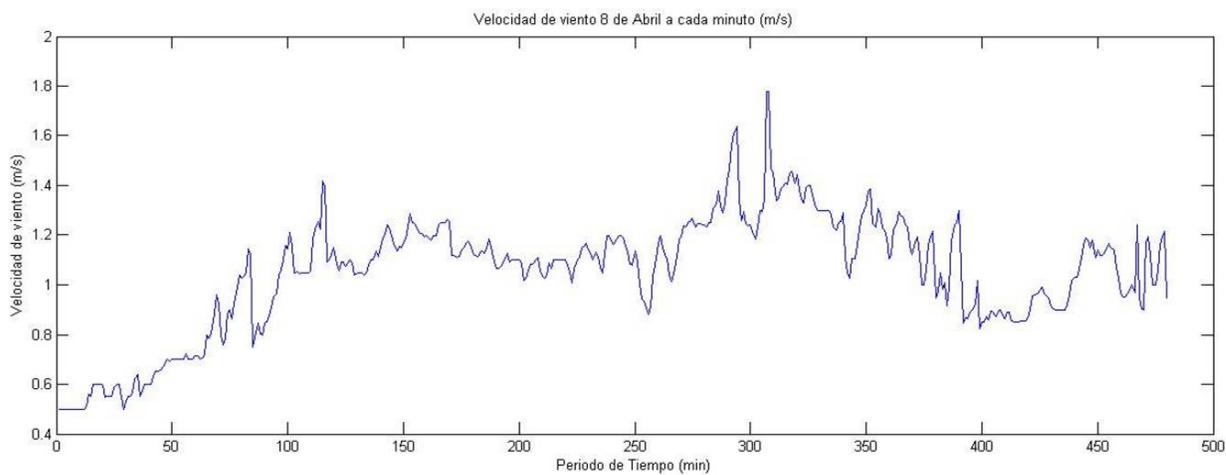


Figura 4.79 Velocidad de viento: 08 de Abril 2015.

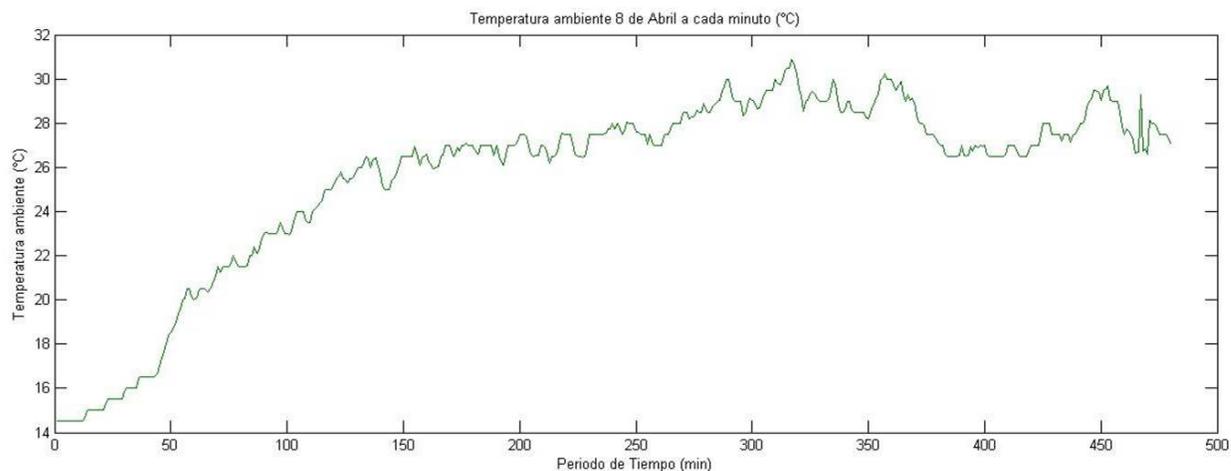


Figura 4.80 Temperatura ambiente: 08 de Abril 2015.

La Fig. 4.81 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.82 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.83 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

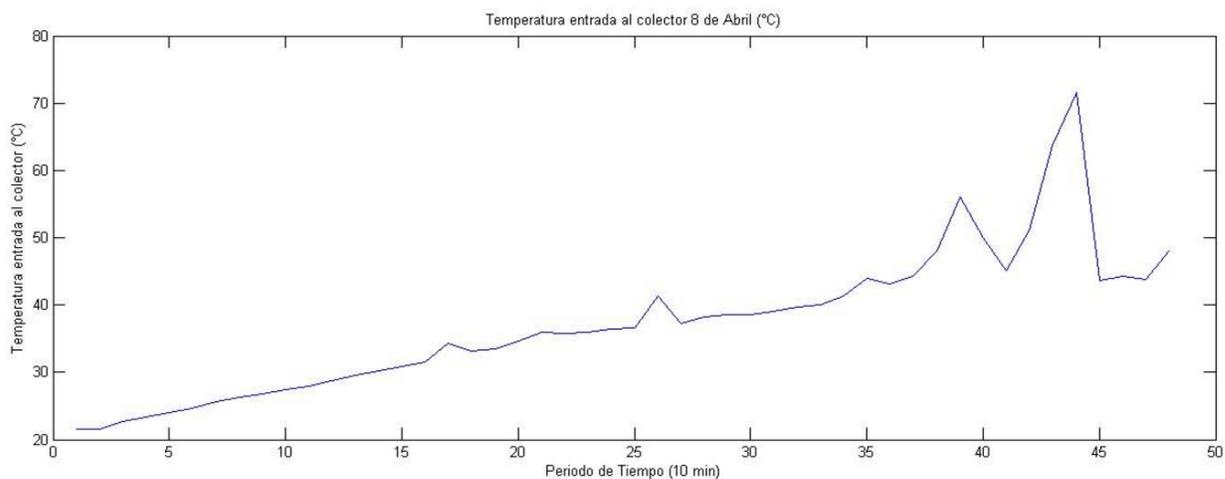


Figura 4.81 Temperatura entrada al colector: 08 de Abril 2015.

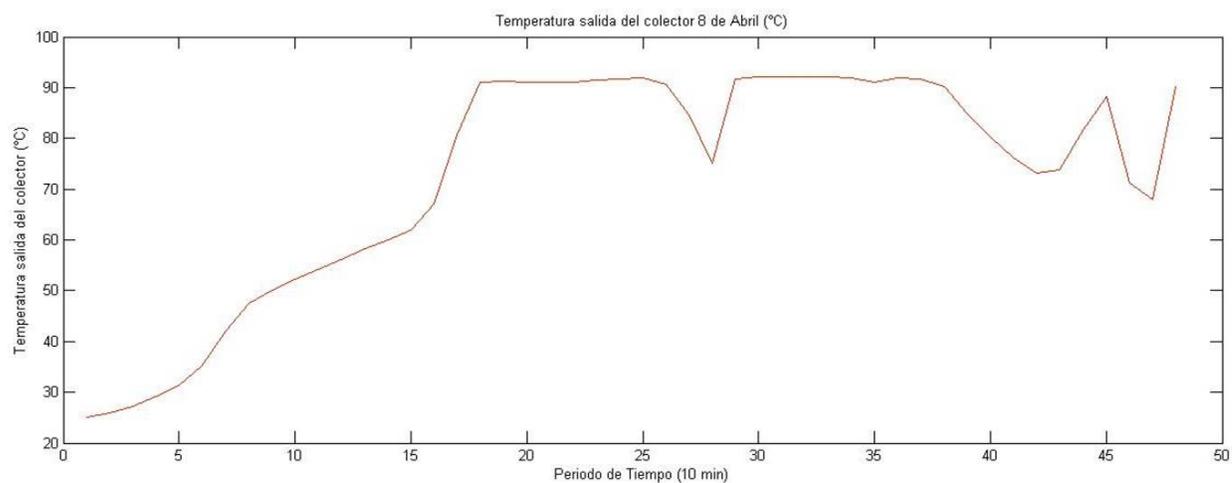


Figura 4.82 Temperatura salida del colector: 08 de Abril 2015.

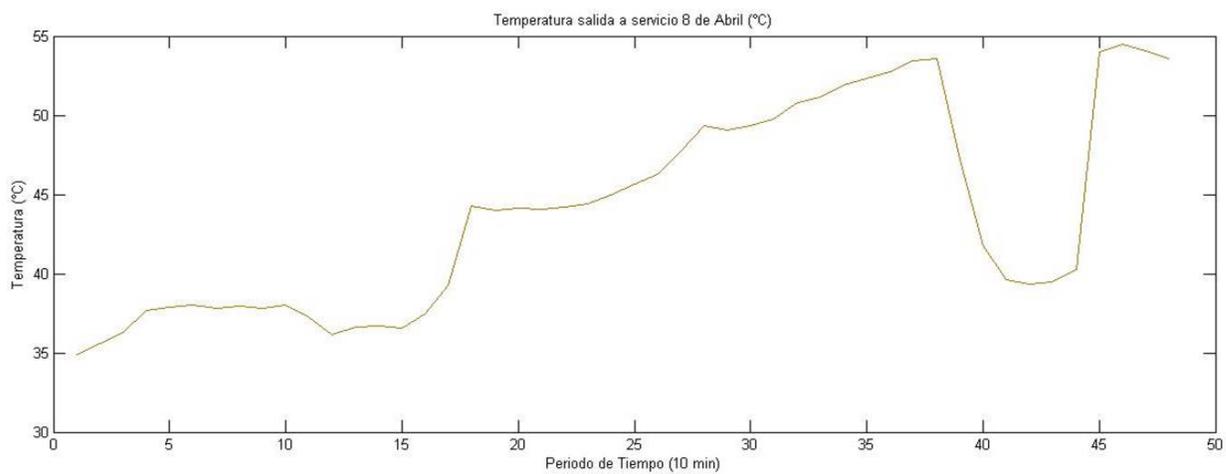


Figura 4.83 Temperatura salida servicio del tanque: 08 de Abril 2015.

La Fig. 4.84 muestra el gradiente de operación del sistema.

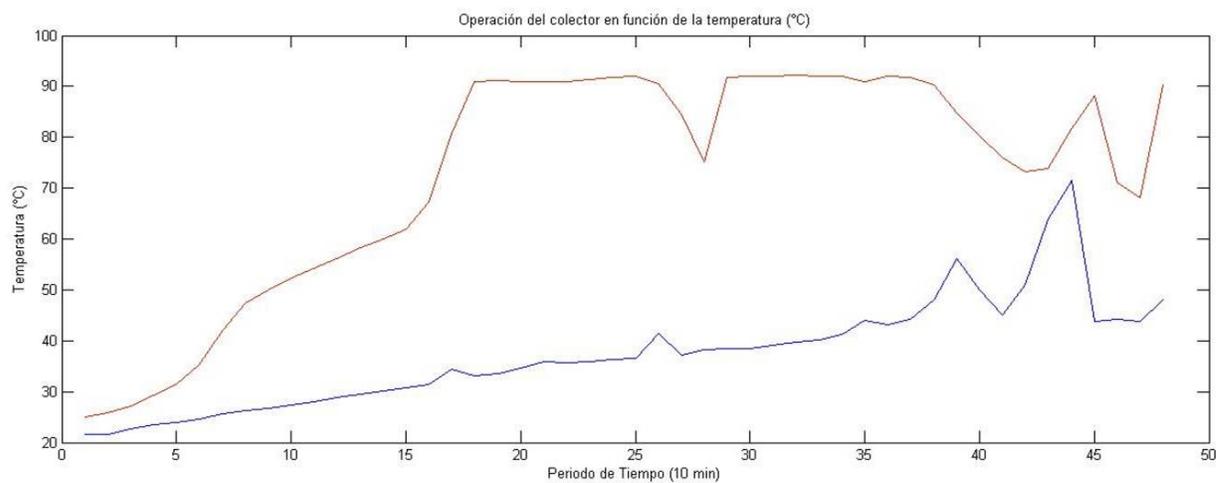


Figura 4.84 Operación del colector: 08 de Abril 2015.

En la Tabla 4.9 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 08 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
08-04-15 9:00	116.660	14.500	0.499	21.500	25.082	34.909
08-04-15 9:10	206.783	14.868	0.562	21.540	25.905	35.569
08-04-15 9:20	193.013	15.466	0.556	22.645	27.220	36.292
08-04-15 9:30	225.443	16.250	0.584	23.430	29.209	37.693
08-04-15 9:40	336.898	17.305	0.664	24.052	31.342	37.914
08-04-15 9:50	400.986	19.797	0.7035	24.590	35.223	38.023
08-04-15 10:00	487.845	20.619	0.797	25.583	42.108	37.827
08-04-15 10:10	554.606	21.558	0.897	26.236	47.459	37.936
08-04-15 10:20	564.398	22.116	0.918	26.818	49.994	37.794
08-04-15 10:30	511.056	23.094	1.005	27.423	52.309	38.020
08-04-15 10:40	525.371	23.616	1.076	27.980	54.273	37.246
08-04-15 10:50	679.166	24.640	1.217	28.805	56.191	36.148
08-04-15 11:00	546.450	25.570	1.076	29.585	58.239	36.605
08-04-15 11:10	570.150	26.164	1.087	30.202	59.895	36.702
08-04-15 11:20	681.145	25.589	1.183	30.846	61.886	36.552
08-04-15 11:30	725.176	26.507	1.223	31.503	67.197	37.436
08-04-15 11:40	736.786	26.437	1.227	34.367	80.634	39.301
08-04-15 11:50	659.771	26.891	1.140	33.165	91.015	44.247
08-04-15 12:00	652.655	26.880	1.128	33.472	91.215	44.018
08-04-15 12:10	609.475	26.807	1.095	34.605	90.996	44.104
08-04-15 12:20	570.403	26.952	1.066	35.873	90.976	44.029
08-04-15 12:30	584.991	26.911	1.082	35.713	90.998	44.180
08-04-15 12:40	615.023	26.898	1.102	35.940	91.444	44.398
08-04-15 12:50	643.081	27.605	1.129	36.377	91.787	44.956
08-04-15 13:00	672.196	27.812	1.153	36.572	91.920	45.648
08-04-15 13:10	495.906	27.281	0.997	41.349	90.551	46.259
08-04-15 13:20	625.883	27.760	1.116	37.195	84.539	47.731
08-04-15 13:30	769.100	28.486	1.245	38.290	75.168	49.352
08-04-15 13:40	861.680	29.173	1.310	38.546	91.694	49.078
08-04-15 13:50	952.301	28.930	1.390	38.474	92.047	49.310
08-04-15 14:00	968.130	29.252	1.404	39.125	92.032	49.762
08-04-15 14:10	983.671	30.220	1.404	39.731	92.147	50.789
08-04-15 14:20	937.638	29.095	1.352	40.092	92.057	51.165
08-04-15 14:30	839.476	29.067	1.273	41.284	91.973	51.942
08-04-15 14:40	705.295	28.549	1.168	44.001	91.035	52.332
08-04-15 14:50	799.530	29.580	1.257	43.215	91.968	52.765
08-04-15 15:00	757.546	29.344	1.219	44.275	91.742	53.408
08-04-15 15:10	625.123	27.645	1.107	47.989	90.234	53.544
08-04-15 15:20	576.195	26.661	1.087	56.057	84.764	47.183
08-04-15 15:30	365.726	26.802	0.905	49.926	80.223	41.774
08-04-15 15:40	333.485	26.567	0.878	45.063	76.079	39.652
08-04-15 15:50	319.966	26.739	0.861	51.071	73.185	39.365
08-04-15 16:00	417.593	27.542	0.953	63.784	73.884	39.478
08-04-15 16:10	400.150	27.455	0.933	71.550	81.823	40.245
08-04-15 16:20	619.993	28.846	1.132	43.686	88.150	54.016
08-04-15 16:30	601.545	28.851	1.103	44.204	71.130	54.461
08-04-15 16:40	470.100	27.291	0.981	43.744	68.070	54.060
80-04-15 16:50	625.123	27.645	1.107	47.989	90.234	53.544

Tabla 4.9 Variables medidas del sistema: 08 de Abril 2015.

Resultados del día 09 de Abril de 2015

La Fig. 4.85 representa la irradiancia, la Fig. 4.86 la velocidad de viento y la Fig. 4.87 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 09 de Abril 2015.

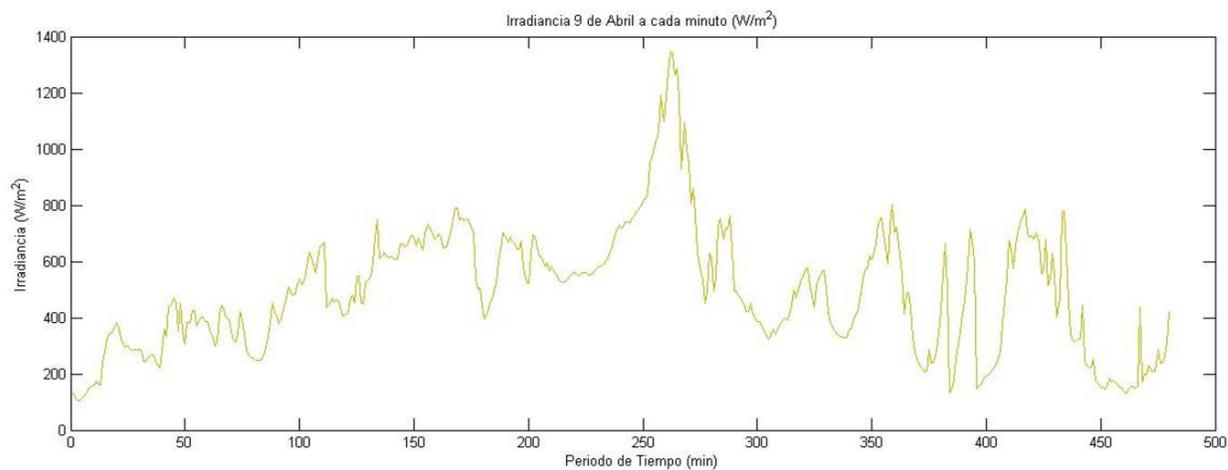


Figura 4.85 Irradiancia: 09 de Abril 2015.

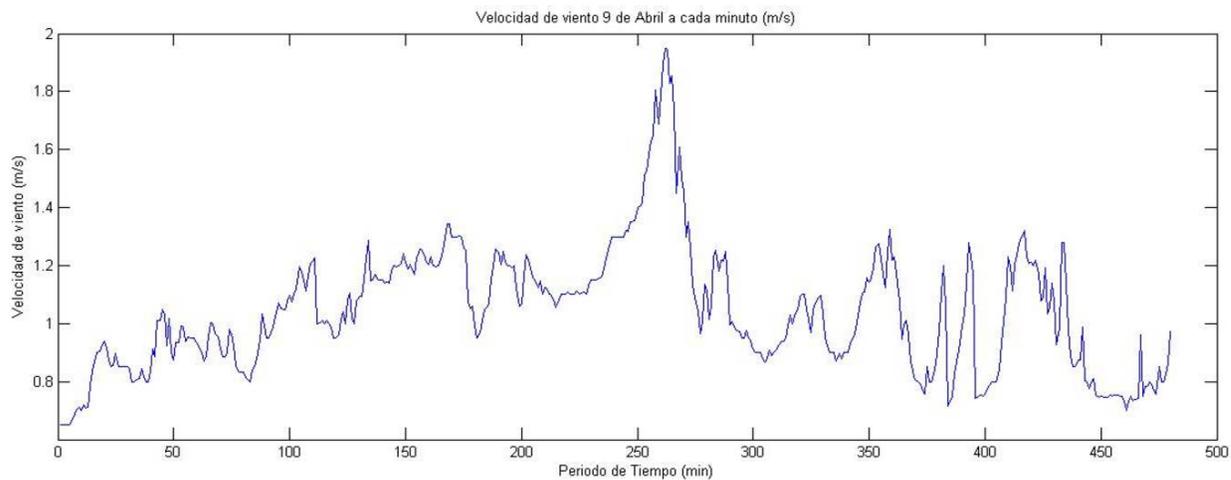


Figura 4.86 Velocidad de viento: 09 de Abril 2015.

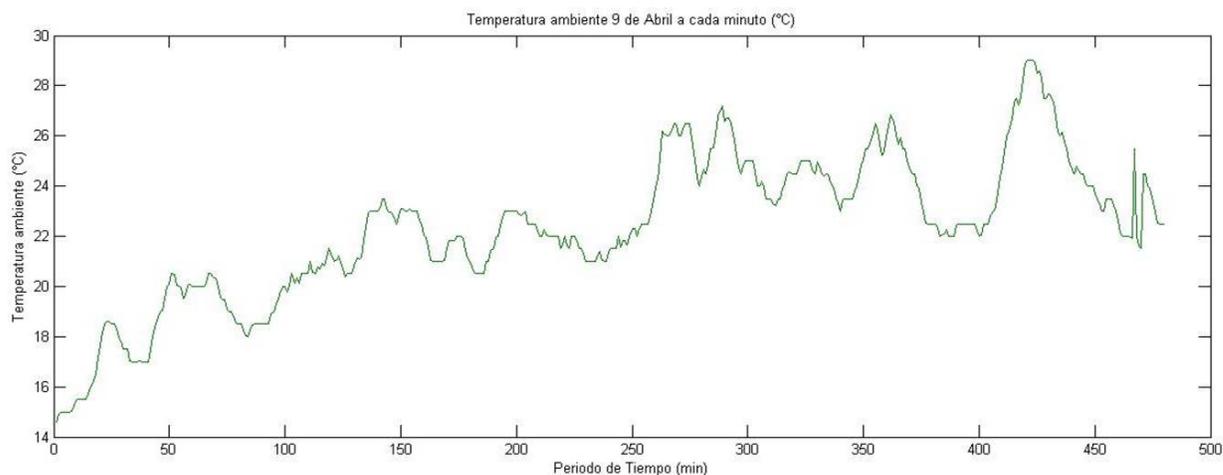


Figura 4.87 Temperatura ambiente: 09 de Abril 2015.

La Fig. 4.88 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.89 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.90 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

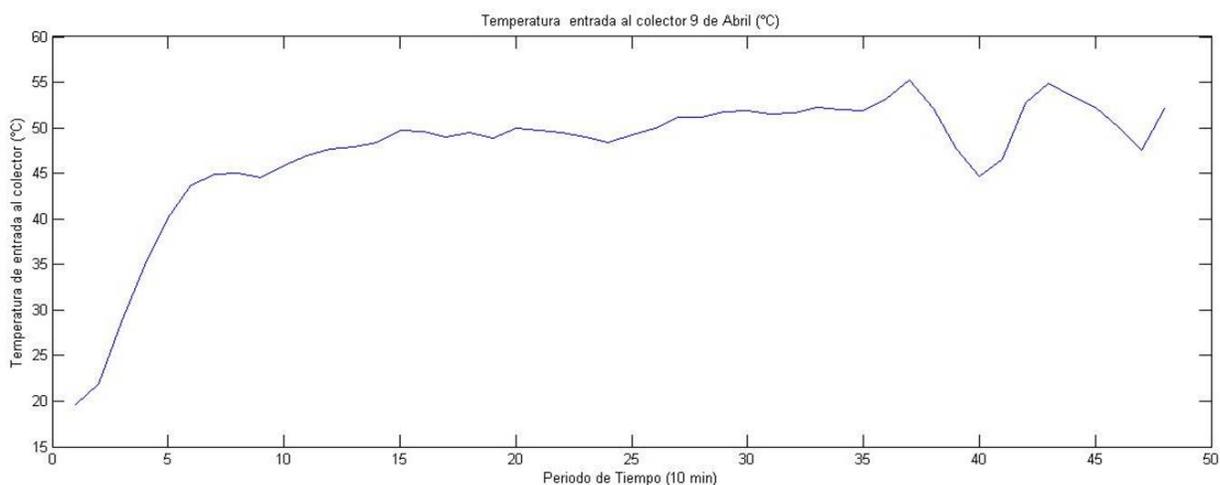


Figura 4.88 Temperatura entrada al colector: 09 de Abril 2015.

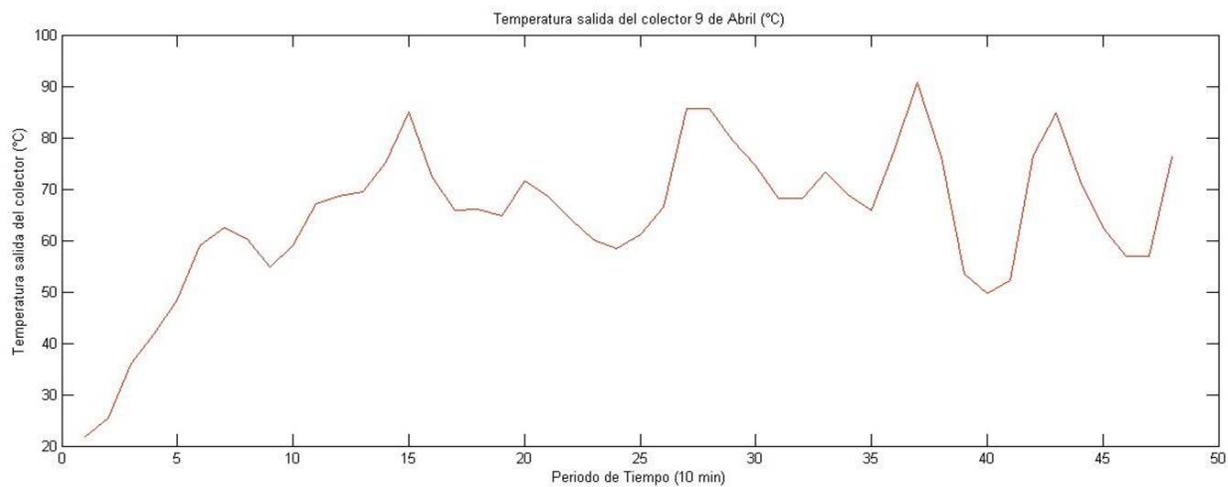


Figura 4.89 Temperatura salida del colector: 09 de Abril 2015.

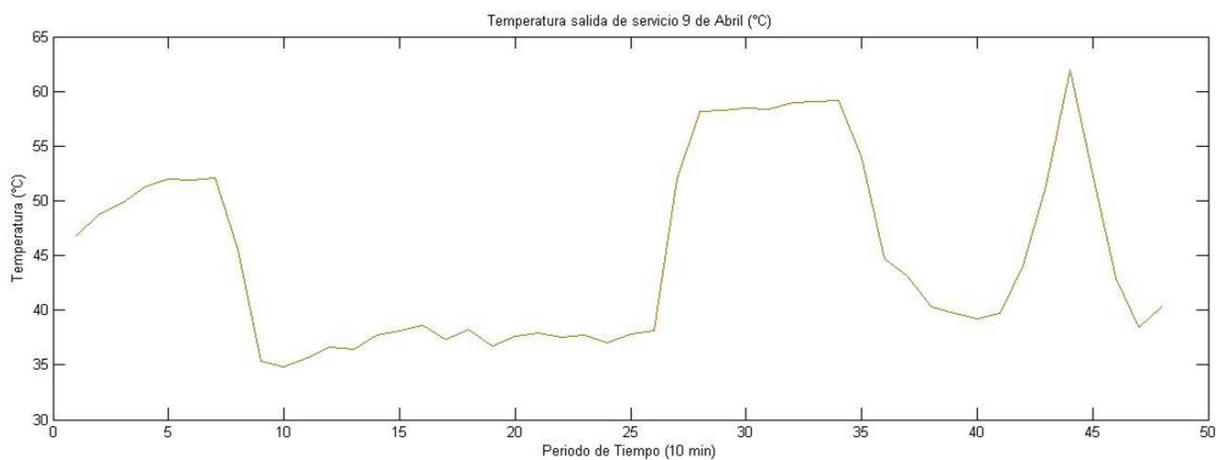


Figura 4.90 Temperatura salida servicio del tanque: 09 de Abril 2015.

La Fig. 4.91 muestra el gradiente de operación del sistema.

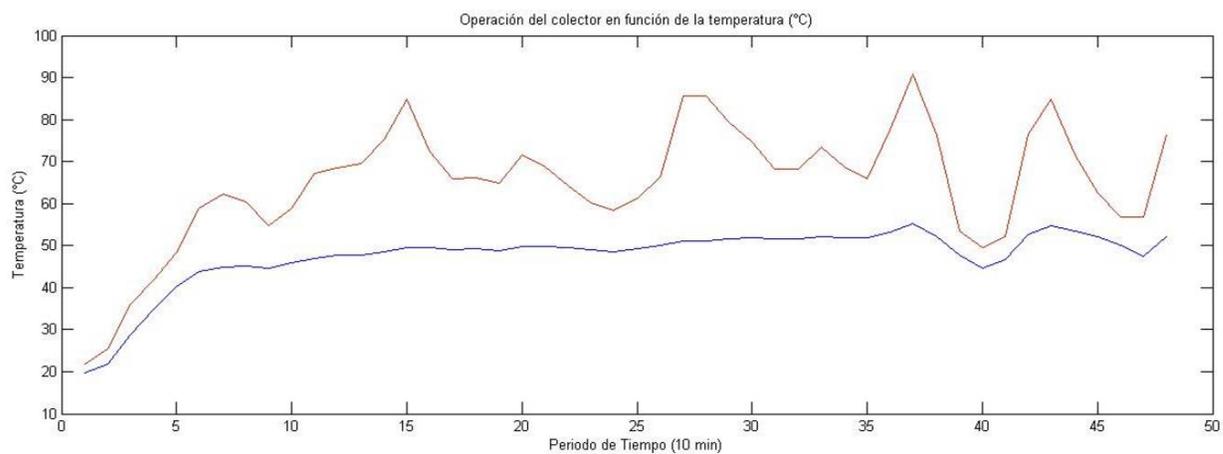


Figura 4.91 Operación del colector: 09 de Abril 2015.

En la Tabla 4.10 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 09 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
09-04-15 9:00	128.780	15.040	0.670	19.624	21.884	46.760
09-04-15 9:10	277.945	16.117	0.830	21.870	25.431	48.813
09-04-15 9:20	301.899	18.248	0.864	28.801	36.025	49.821
09-04-15 9:30	253.810	17.102	0.815	34.862	41.829	51.330
09-04-15 9:40	395.978	18.737	0.962	40.131	48.339	51.948
09-04-15 9:50	395.151	20.026	0.952	43.749	58.984	51.902
09-04-15 10:00	372.918	20.172	0.936	44.897	62.388	52.118
09-04-15 10:10	320.405	19.128	0.888	45.079	60.398	45.497
09-04-15 10:20	325.166	18.350	0.890	44.571	54.834	35.319
09-04-15 10:30	468.301	19.203	1.033	45.885	59.001	34.833
09-04-15 10:40	592.406	20.288	1.152	46.987	67.170	35.607
09-04-15 10:50	465.038	20.924	1.013	47.703	68.527	36.662
09-04-15 11:00	487.113	20.779	1.038	47.865	69.431	36.470
09-04-15 11:10	627.891	22.247	1.167	48.395	75.287	37.694
09-04-15 11:20	652.325	23.041	1.186	49.681	84.912	38.077
09-04-15 11:30	685.895	22.836	1.213	49.594	72.486	38.649
09-04-15 11:40	714.730	21.216	1.257	48.972	65.935	37.300
09-04-15 11:50	640.085	21.694	1.189	49.415	66.165	38.253
09-04-15 12:00	538.605	20.820	1.096	48.820	64.819	36.695
09-04-15 12:10	627.370	22.712	1.170	49.939	71.581	37.678
09-04-15 12:20	621.180	22.580	1.162	49.722	68.673	37.892
09-04-15 12:30	545.036	21.949	1.095	49.455	64.214	37.559
09-04-15 12:40	558.255	21.624	1.111	48.972	60.122	37.768
09-04-15 12:50	644.293	21.109	1.210	48.430	58.424	37.052
09-04-15 13:00	761.843	21.765	1.329	49.255	61.122	37.877
09-04-15 13:10	1015.993	22.685	1.600	49.955	66.491	38.151
09-04-15 13:20	1166.05	25.880	1.722	51.205	85.664	51.977
09-04-15 13:30	636.131	25.518	1.139	51.096	85.696	58.214
09-04-15 13:40	652.785	25.875	1.155	51.755	79.479	58.226
09-04-15 13:50	438.936	25.505	0.962	51.885	74.615	58.516
09-04-15 14:00	353.555	24.125	0.893	51.525	68.217	58.340
09-04-15 14:10	458.548	23.956	0.994	51.605	68.102	58.982
09-04-15 14:20	525.751	24.828	1.056	52.181	73.382	59.097
09-04-15 14:30	353.446	24.057	0.902	51.990	68.846	59.144
09-04-15 14:40	498.061	23.949	1.037	51.879	65.811	53.954
09-04-15 14:50	696.255	25.783	1.219	53.172	77.652	44.686
09-04-15 15:00	462.281	25.822	0.991	55.26	90.720	43.160
09-04-15 15:10	262.241	23.327	0.822	52.006	76.278	40.273
09-04-15 15:20	358.183	22.164	0.921	47.709	53.554	39.692
09-04-15 15:30	392.050	22.420	0.961	44.709	49.615	39.180
09-04-15 15:40	342.358	23.127	0.907	46.622	52.247	39.673
09-04-15 15:50	696.595	27.097	1.233	52.686	76.437	44.104
09-04-15 16:00	609.761	28.399	1.125	54.848	84.848	51.420
09-04-15 16:10	480.231	26.087	1.005	53.388	71.679	61.926
09-04-15 16:20	243.170	24.280	0.809	52.273	62.430	52.315
09-04-15 16:30	159.846	23.220	0.748	50.119	56.897	42.908
09-04-15 16:40	188.796	22.261	0.767	47.516	56.923	38.404
09-04-15 16:50	262.241	23.327	0.822	52.060	76.278	40.273

Tabla 4.10 Variables medidas del sistema: 09 de Abril 2015.

Resultados del día 30 de Abril de 2015

La Fig. 4.92 representa la irradiancia, la Fig. 4.93 la velocidad de viento y la Fig. 4.94 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 30 de Abril 2015.

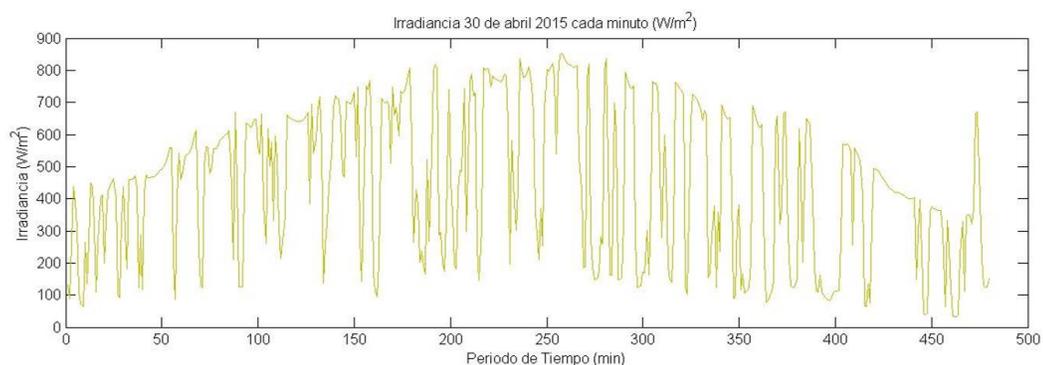


Figura 4.92 Irradiancia: 30 de Abril 2015.

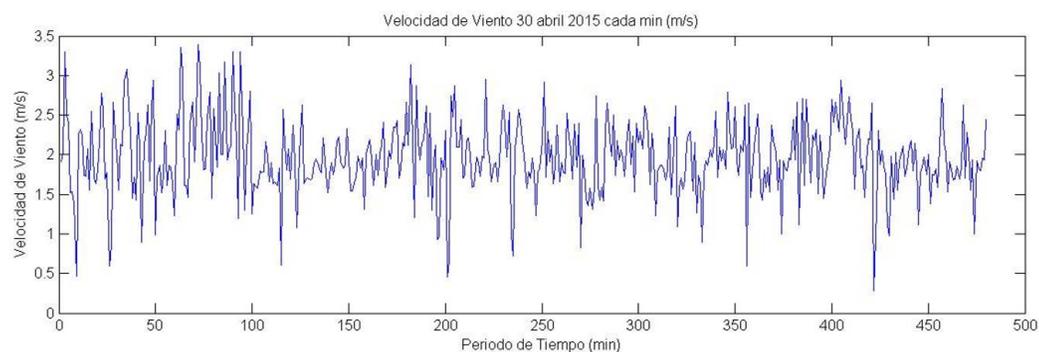


Figura 4.93 Velocidad de viento: 30 de Abril 2015.

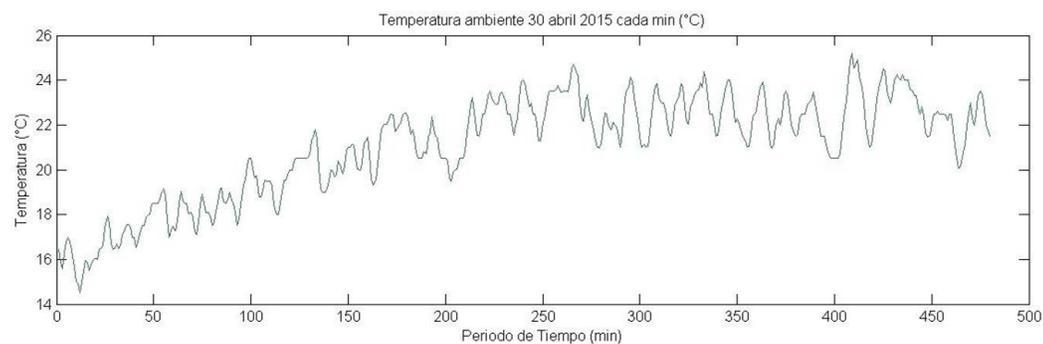


Figura 4.94 Temperatura ambiente: 30 de Abril 2015.

La Fig. 4.95 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.96 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.97 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

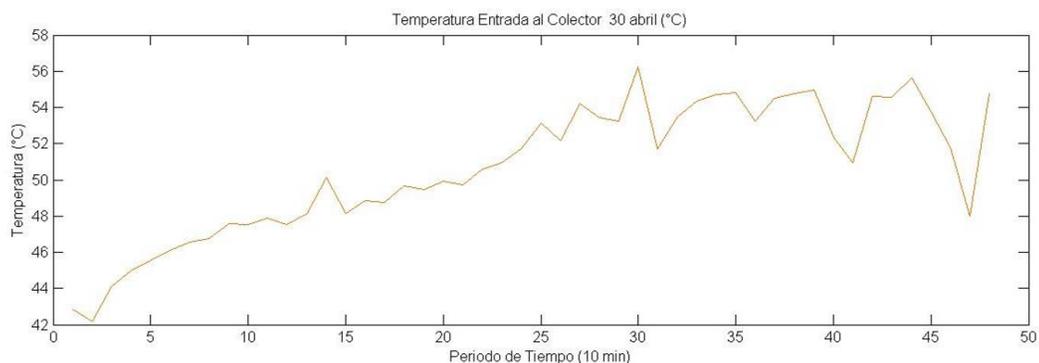


Figura 4.95 Temperatura entrada al colector: 30 de Abril 2015.

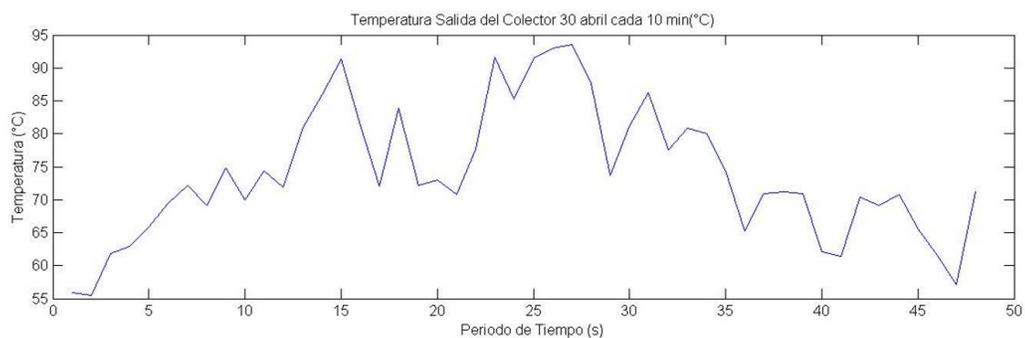


Figura 4.96 Temperatura salida del colector: 30 de Abril 2015.



Figura 4.97 Temperatura salida servicio del tanque: 30 de Abril 2015.

La Fig. 4.98 muestra el gradiente de operación del sistema.

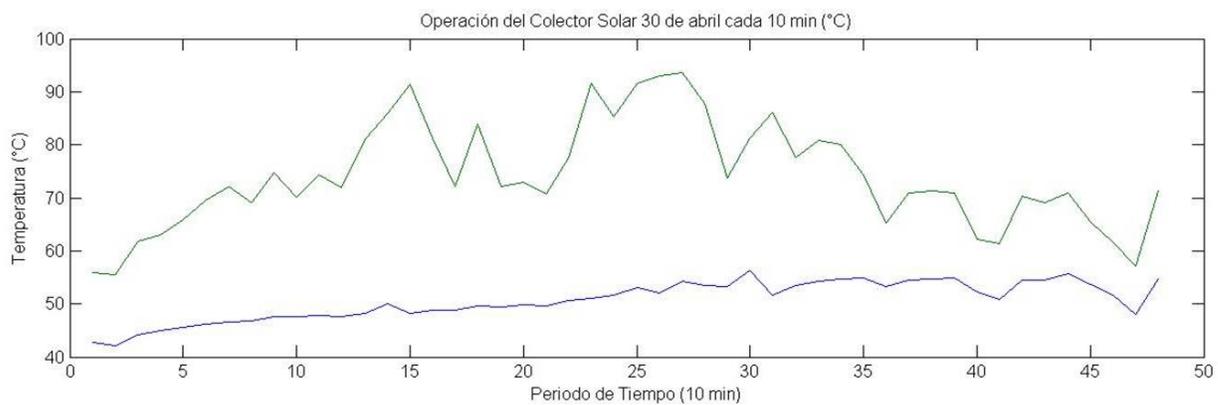


Figura 4.98 Operación del colector: 30 de Abril 2015.

En la Tabla 4.11 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 30 de Abril 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
30-04-15 9:00	213.580	16.180	1.934	42.815	55.855	31.328
30-04-15 9:10	299.288	15.508	1.937	42.201	55.505	29.460
30-04-15 9:20	347.643	16.815	1.937	44.115	61.829	30.824
30-04-15 9:30	329.158	17.081	2.128	44.966	62.966	31.970
30-04-15 9:40	469.301	17.621	2.074	45.519	65.814	32.586
30-04-15 9:50	435.720	18.225	1.732	46.087	69.416	33.578
30-04-15 10:00	480.826	18.215	2.289	46.580	72.143	33.786
30-04-15 10:10	498.151	17.946	2.421	46.760	69.178	33.292
30-04-15 10:20	497.618	18.605	2.366	47.563	74.842	33.233
30-04-15 10:30	505.381	19.075	2.139	47.532	70.023	33.788
30-04-15 10:40	500.093	19.407	1.788	47.887	74.318	34.646
30-04-15 10:50	505.905	19.008	1.761	47.550	71.852	33.752
30-04-15 11:00	610.700	20.454	1.866	48.139	80.998	34.966
30-04-15 11:10	506.848	20.189	1.827	50.111	85.994	35.811
30-04-15 11:20	655.115	20.190	1.980	48.130	91.327	34.909
30-04-15 11:30	507.910	20.791	1.763	48.876	81.277	36.645
30-04-15 11:40	517.373	20.834	1.939	48.769	72.032	36.329
30-04-15 11:50	706.415	22.231	2.158	49.672	83.889	52.921
30-04-15 12:00	319.436	21.087	2.250	49.464	72.174	60.193
30-04-15 12:10	490.336	21.247	1.733	49.924	73.039	60.118
30-04-15 12:20	444.363	20.182	1.930	49.726	70.756	59.794
30-04-15 12:30	615.336	22.238	1.910	50.593	77.674	59.128
30-04-15 12:40	758.763	23.174	2.099	50.946	91.657	59.114
30-04-15 12:50	558.695	22.713	2.013	51.685	85.332	58.701
30-04-15 13:00	518.761	22.474	1.780	53.133	91.518	58.741
30-04-15 13:10	789.768	23.367	2.038	52.149	93.038	59.335
30-04-15 13:20	620.846	23.749	1.950	54.220	93.516	59.877
30-04-15 13:30	387.556	21.968	1.683	53.422	87.671	59.225
30-04-15 13:40	375.306	21.918	2.049	53.260	73.718	57.908
30-04-15 13:50	463.758	22.94	2.063	56.257	81.195	59.214
30-04-15 14:00	479.118	22.235	2.065	51.718	86.195	59.388
30-04-15 14:10	481.935	22.515	1.842	53.493	77.511	60.293
30-04-15 14:20	548.55	23.08	1.819	54.358	80.852	60.284
30-04-15 14:30	368.601	22.929	1.852	54.691	79.973	61.117
30-04-15 14:40	464.095	23.037	2.150	54.810	74.421	63.183
30-04-15 14:50	347.023	21.787	1.903	53.219	65.319	63.118
30-04-15 15:00	325.495	22.390	1.909	54.489	70.924	63.411
30-04-15 15:10	316.796	22.481	1.840	54.755	71.273	58.412
30-04-15 15:20	435.270	22.681	2.071	54.945	70.886	51.306
30-04-15 15:30	106.041	21.231	2.012	52.348	62.109	51.278
30-04-15 15:40	412.693	22.730	2.496	50.931	61.397	43.157
30-04-15 15:50	317.600	22.770	1.981	54.587	70.402	41.969
30-04-15 16:00	457.623	23.555	1.616	54.550	69.096	42.029
30-04-15 16:10	409.735	23.964	1.871	55.620	70.819	41.818
30-04-15 16:20	233.698	22.393	1.842	53.727	65.485	39.495
30-04-15 16:30	288.551	22.475	1.894	51.743	61.517	39.495
30-04-15 16:40	184.566	21.290	1.908	48.007	57.185	40.252
30-04-15 16:50	316.796	22.481	1.840	54.755	71.273	58.412

Tabla 4.11 Variables medidas del sistema: 30 de Abril 2015.

Resultados del día 01 de Mayo de 2015

La Fig. 4.99 representa la irradiancia, la Fig. 4.100 la velocidad de viento y la Fig. 4.101 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 01 de Mayo 2015.



Figura 4.99 Irradiancia: 01 de Mayo 2015.

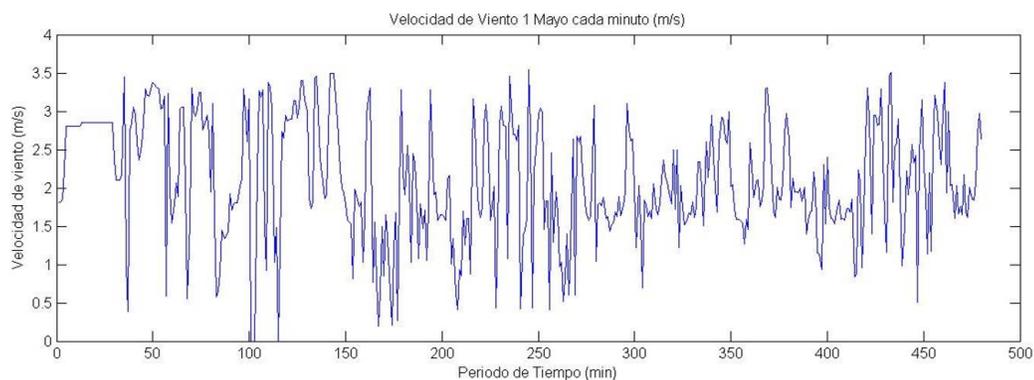


Figura 4.100 Velocidad de viento: 01 de Mayo 2015.

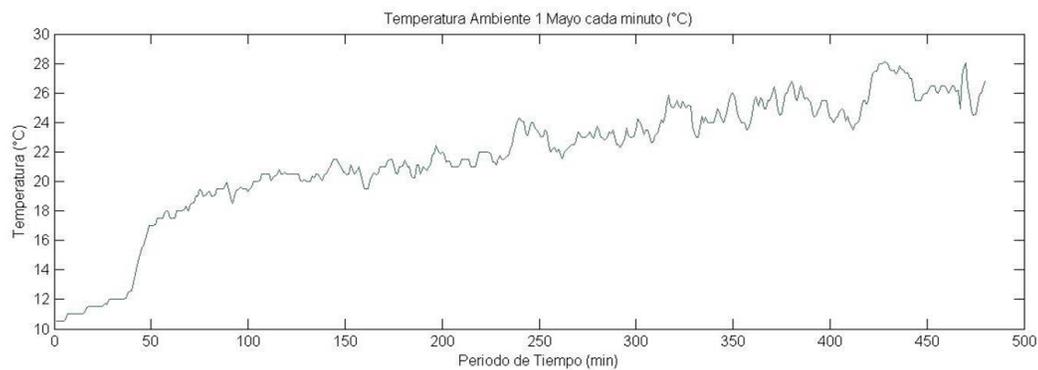


Figura 4.101 Temperatura ambiente: 01 de Mayo 2015.

La Fig. 4.102 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.103 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.104 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.



Figura 4.102 Temperatura entrada al colector: 01 de Mayo 2015.

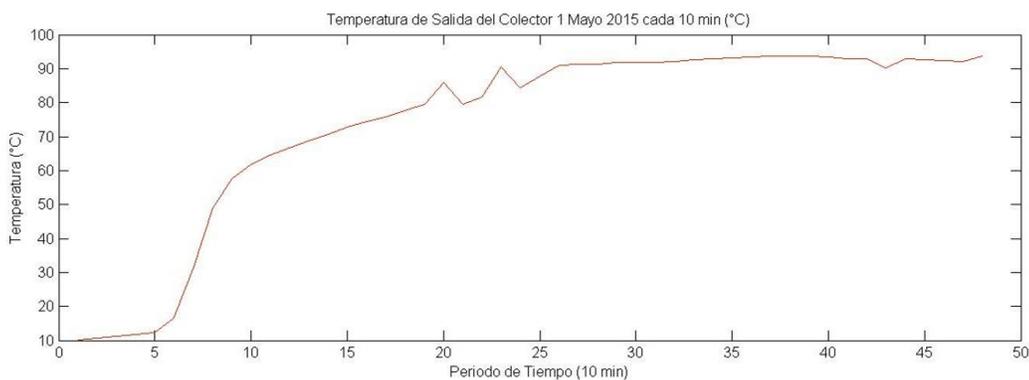


Figura 4.103 Temperatura salida del colector: 01 de Mayo 2015.



Figura 4.104 Temperatura salida servicio del tanque: 01 de Mayo 2015.

La Fig. 4.105 muestra el gradiente de operación del sistema.

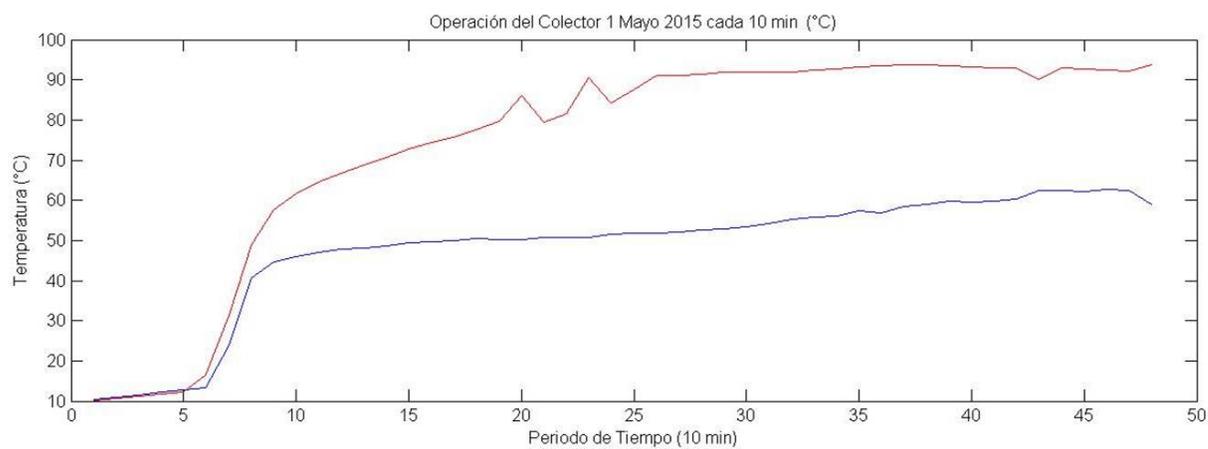


Figura 4.105 Operación del colector: 01 de Mayo 2015.

En la Tabla 4.12 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 01 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
01-05-15 9:00	287.093	19.210	2.054	43.331	53.970	35.523
01-05-15 9:10	319.276	19.336	1.645	45.382	59.993	36.603
01-05-15 9:20	345.973	19.642	1.927	46.57	63.009	36.939
01-05-15 9:30	372.665	20.364	2.210	47.403	65.586	36.782
01-05-15 9:40	399.916	20.547	2.662	48.035	67.719	36.743
01-05-15 9:50	424.463	20.185	2.813	48.349	69.631	36.299
01-05-15 10:00	448.938	20.749	2.780	49.107	71.629	37.772
01-05-15 10:10	471.125	20.832	1.860	49.558	73.637	39.898
01-05-15 10:20	494.004	20.185	2.008	49.770	75.033	38.521
01-05-15 10:30	520.583	21.040	0.903	50.374	76.711	38.383
01-05-15 10:40	543.515	20.839	1.929	50.277	78.361	37.808
01-05-15 10:50	561.270	20.890	1.830	50.042	82.033	36.562
01-05-15 11:00	579.166	21.750	1.766	50.272	83.888	37.749
01-05-15 11:10	596.311	21.258	1.134	50.870	80.098	37.946
01-05-15 11:20	610.826	21.702	2.339	50.578	85.949	38.315
01-05-15 11:30	624.643	21.529	2.110	50.952	89.105	38.181
01-05-15 11:40	637.670	23.552	2.229	51.881	83.208	40.563
01-05-15 11:50	649.998	23.425	2.283	51.875	90.722	40.069
01-05-15 12:00	661.893	22.040	1.177	51.827	90.944	38.965
01-05-15 12:10	665.356	22.860	1.943	52.564	91.410	39.751
01-05-15 12:20	675.036	23.160	1.849	52.455	91.852	40.104
01-05-15 12:30	681.498	22.930	1.649	53.038	91.778	40.452
01-05-15 12:40	686.383	23.415	2.054	54.006	91.966	41.018
01-05-15 12:50	688.455	23.438	1.827	54.413	91.868	42.207
01-05-15 13:00	694.565	25.268	1.986	55.770	92.251	55.722
01-05-15 13:10	694.516	24.059	1.827	55.722	92.680	65.703
01-05-15 13:20	691.843	24.275	2.285	56.615	92.978	65.215
01-05-15 13:30	690.330	24.990	2.201	57.390	93.372	65.267
01-05-15 13:40	686.091	24.675	1.854	57.585	93.542	64.754
01-05-15 13:50	677.760	25.284	2.272	58.549	93.813	65.083
01-05-15 14:00	669.610	26.004	2.185	59.549	93.735	65.242
01-05-15 14:10	664.973	25.193	1.791	59.507	93.494	66.553
01-05-15 14:20	653.566	24.739	1.610	59.736	93.110	67.024
01-05-15 14:30	641.760	24.166	1.548	59.715	93.043	67.746
01-05-15 14:40	631.313	26.240	2.255	61.605	91.876	68.827
01-05-15 14:50	615.310	27.763	2.570	62.341	91.084	69.817
01-05-15 15:00	596.478	26.950	2.085	62.571	92.666	69.688
01-05-15 15:10	575.845	26.060	1.990	62.369	92.777	69.773
01-05-15 15:20	562.323	26.304	2.674	62.702	92.408	70.694
01-05-15 15:30	553.345	27.398	2.175	63.650	91.448	72.021
01-05-15 15:40	532.686	26.263	1.649	62.986	91.458	71.750
01-05-15 15:50	517.581	25.965	1.262	63.685	83.557	71.726
01-05-15 16:00	487.856	26.603	1.813	63.644	82.386	63.266
01-05-15 16:10	463.870	26.476	1.686	64.845	85.907	56.119
01-05-15 16:20	441.138	24.982	2.028	62.039	90.090	53.060
01-05-15 16:30	410.475	26.012	2.093	69.973	88.531	49.672
01-05-15 16:40	411.863	27.005	2.294	75.079	87.405	51.953
01-04-15 16:50	575.845	26.060	1.990	62.369	92.777	69.773

Tabla 4.12 Variables medidas del sistema: 01 de Mayo 2015.

Resultados del día 02 de Mayo de 2015

La Fig. 4.106 representa la irradiancia, la Fig. 4.107 la velocidad de viento y la Fig. 4.108 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 02 de Mayo 2015.

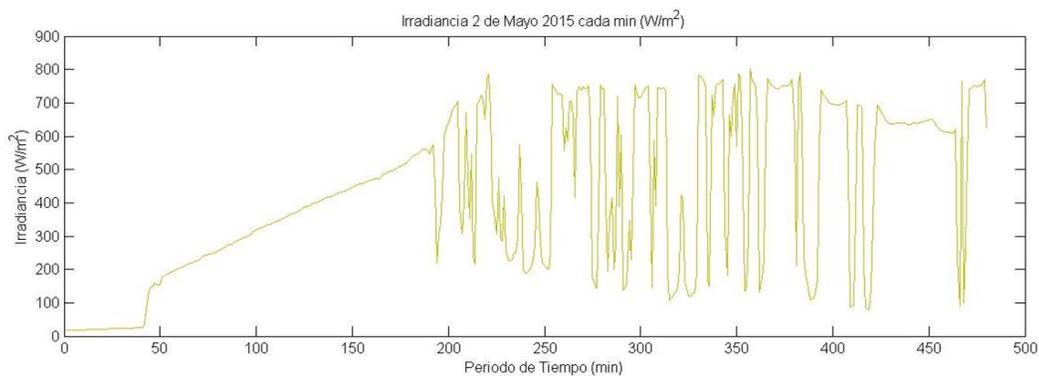


Figura 4.106 Irradiancia: 02 de Mayo 2015.

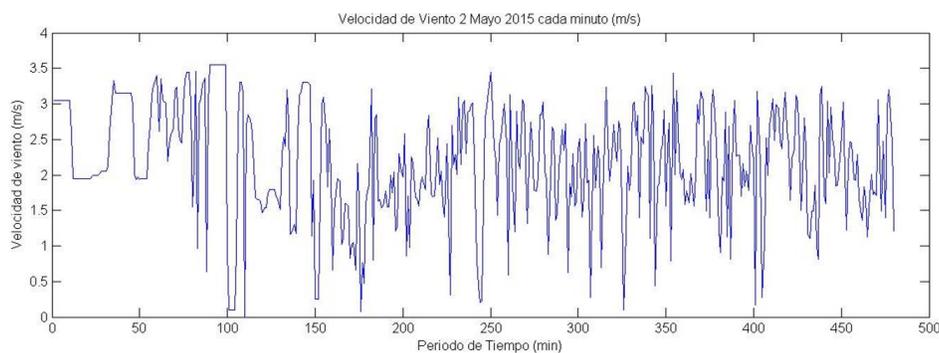


Figura 4.107 Velocidad de viento: 02 de Mayo 2015.

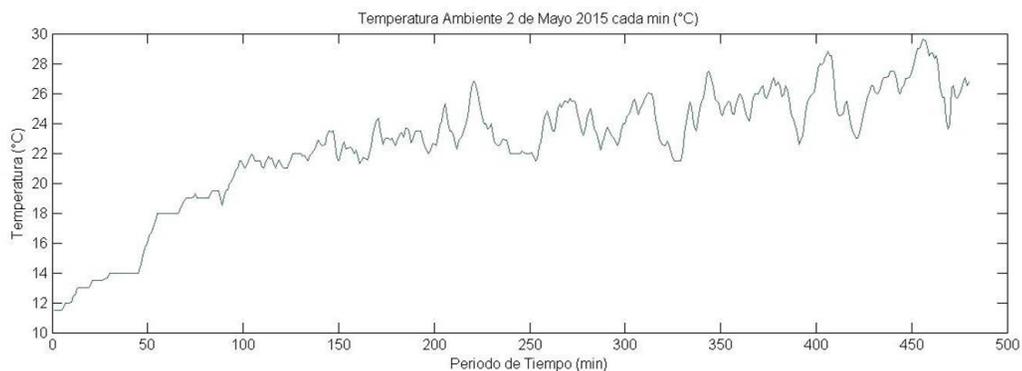


Figura 4.108 Temperatura ambiente: 02 de Mayo 2015.

La Fig. 4.109 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.110 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.111 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

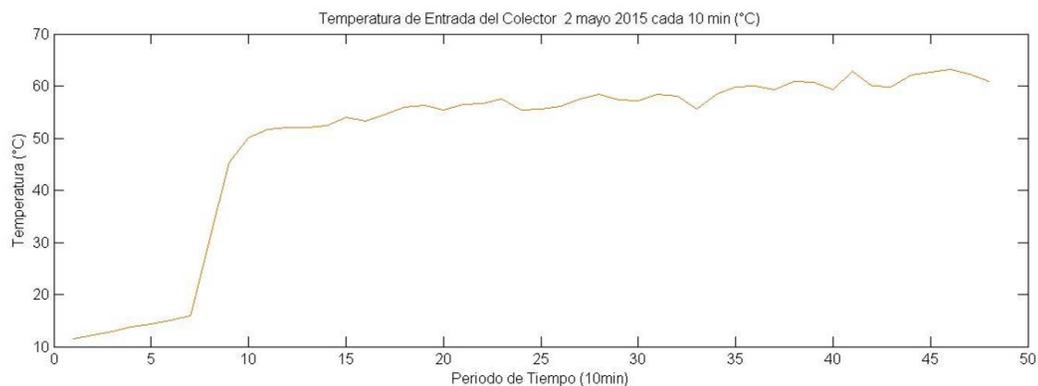


Figura 4.109 Temperatura entrada al colector: 02 de Mayo 2015.

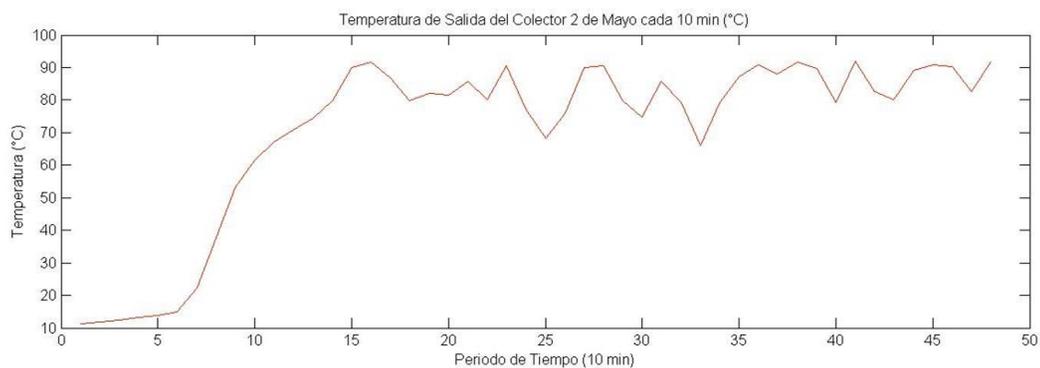


Figura 4.110 Temperatura salida del colector: 02 de Mayo 2015.

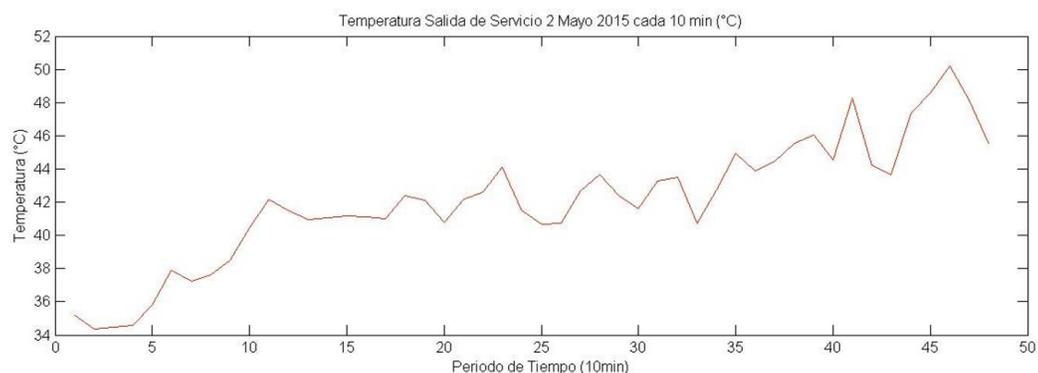


Figura 4.111 Temperatura salida servicio del tanque: 02 de Mayo 2015.

La Fig. 4.112 muestra el gradiente de operación del sistema.

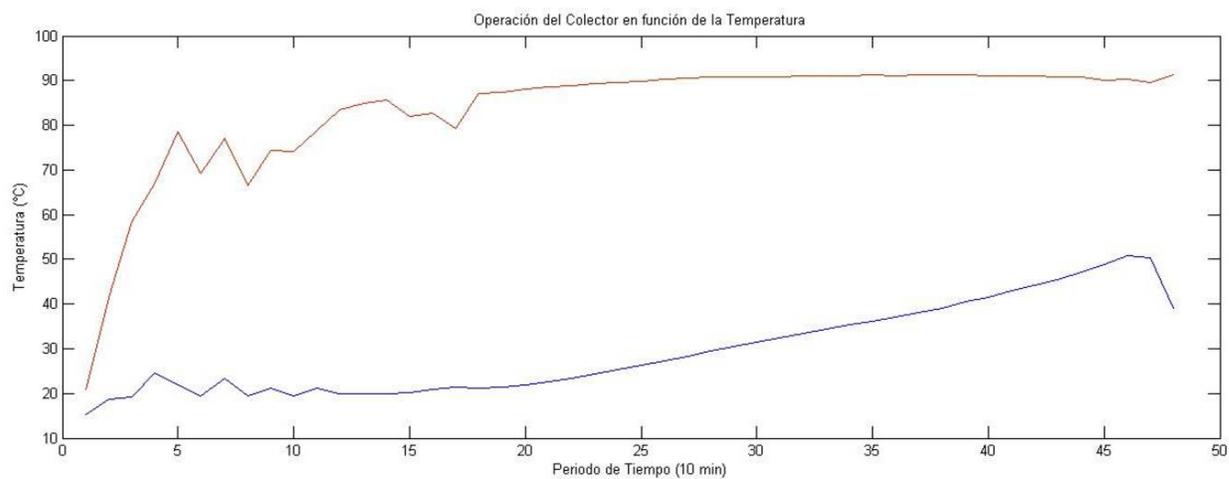


Figura 4.112 Operación del colector: 02 de Abril 2015.

En la Tabla 4.13 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 02 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
02-05-15 9:00	209.395	18.025	2.961	15.494	19.270	37.413
02-05-15 9:10	237.208	18.970	2.910	23.962	32.547	37.512
02-05-15 9:20	263.045	19.235	2.726	42.954	49.544	38.332
02-05-15 9:30	292.461	19.825	3.206	49.137	59.242	39.479
02-05-15 9:40	324.241	21.468	1.541	51.423	65.774	41.960
02-05-15 9:50	349.853	21.380	2.272	51.843	69.861	41.751
02-05-15 10:00	377.570	21.419	1.678	52.080	73.331	41.065
02-05-15 10:10	403.993	21.888	2.037	51.841	77.901	40.939
02-05-15 10:20	427.693	22.937	2.790	54.247	87.390	41.271
02-05-15 10:30	452.170	22.219	1.590	53.192	91.675	41.284
02-05-15 10:40	474.716	21.830	1.623	53.737	90.482	40.367
02-05-15 10:50	502.190	23.363	1.126	55.944	79.690	42.566
02-05-15 11:00	541.903	23.168	1.873	56.341	81.233	42.296
02-05-15 11:10	453.331	22.925	1.630	55.454	82.841	41.127
02-05-15 11:20	598.776	23.537	1.847	56.108	85.517	41.449
02-05-15 11:30	504.691	23.228	1.962	56.380	77.884	42.149
02-05-15 11:40	542.171	25.450	1.726	57.280	89.162	44.275
02-05-15 11:50	305.015	23.068	2.579	56.075	82.620	42.329
02-05-15 12:00	277.376	22.150	1.722	55.555	68.717	40.776
02-05-15 12:10	435.081	22.195	2.627	55.636	70.815	40.266
02-05-15 12:20	644.260	24.436	2.134	57.228	90.134	41.998
02-05-15 12:30	553.893	25.060	2.227	58.956	89.660	43.792
02-05-15 12:40	449.460	23.714	2.174	57.260	84.357	43.169
02-05-15 12:50	395.613	23.080	2.010	56.974	73.132	41.472
02-05-15 13:00	626.28	24.642	1.809	58.110	85.891	42.596
02-05-15 13:10	462.811	25.312	2.093	58.616	82.843	44.012
02-05-15 13:20	197.855	22.255	1.928	56.222	67.249	41.304
02-05-15 13:30	524.365	23.528	2.385	56.890	74.061	41.785
02-05-15 13:40	622.881	26.070	2.300	59.705	85.784	44.592
02-05-15 13:50	561.275	25.033	2.407	60.040	89.017	43.985
02-05-15 14:00	556.848	25.190	1.849	59.294	88.761	44.147
02-05-15 14:10	748.326	26.156	2.562	60.435	90.955	45.260
02-05-15 14:20	507.873	26.139	1.877	61.544	91.692	46.429
02-05-15 14:30	413.448	24.084	2.201	58.692	77.733	44.249
02-05-15 14:40	698.003	27.660	1.939	61.662	91.683	47.516
02-05-15 14:50	348.380	25.539	2.674	61.254	87.584	45.737
02-05-15 15:00	461.865	24.071	2.451	59.429	75.550	42.811
02-05-15 15:10	638.866	26.515	1.606	61.860	89.035	46.442
02-05-15 15:20	638.273	26.849	2.441	62.390	91.399	48.667
02-05-15 15:30	636.756	28.460	2.191	63.314	89.772	49.613
02-05-15 15:40	467.246	27.645	1.725	63.285	88.051	49.799
02-05-15 15:50	512.815	25.873	1.690	61.919	77.658	47.974
02-05-15 16:00	423.661	25.833	2.130	62.332	80.464	48.078
02-05-15 16:10	506.996	26.065	2.073	61.814	84.493	47.276
02-05-15 16:20	478.105	27.359	1.846	63.850	84.684	49.145
02-05-15 16:30	374.248	26.314	2.23	63.028	77.126	48.776
02-05-15 16:40	465.746	26.491	2.302	62.821	77.627	47.793
02-05-15 16:50	638.866	26.515	1.606	61.860	89.035	46.442

Tabla 4.13 Variables medidas del sistema: 02 de Mayo 2015.

Resultados del día 03 de Mayo de 2015

La Fig. 4.113 representa la irradiancia, la Fig. 4.114 la velocidad de viento y la Fig. 4.115 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 03 de Mayo 2015.

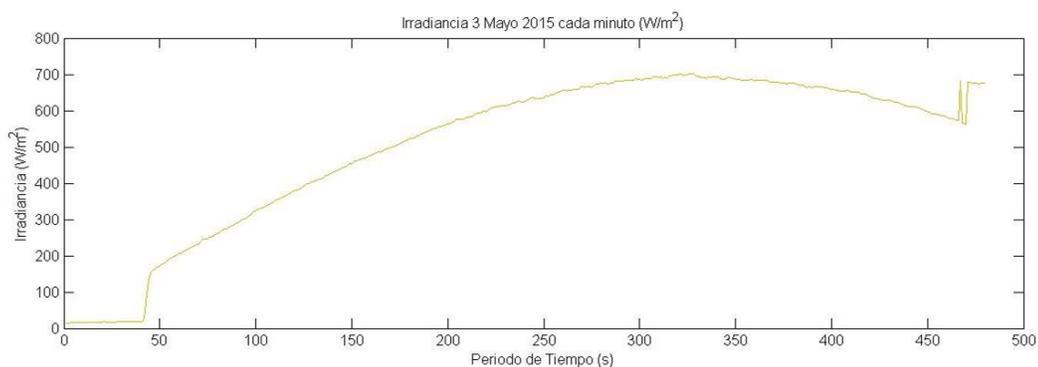


Figura 4.113 Irradiancia: 03 de Mayo 2015.

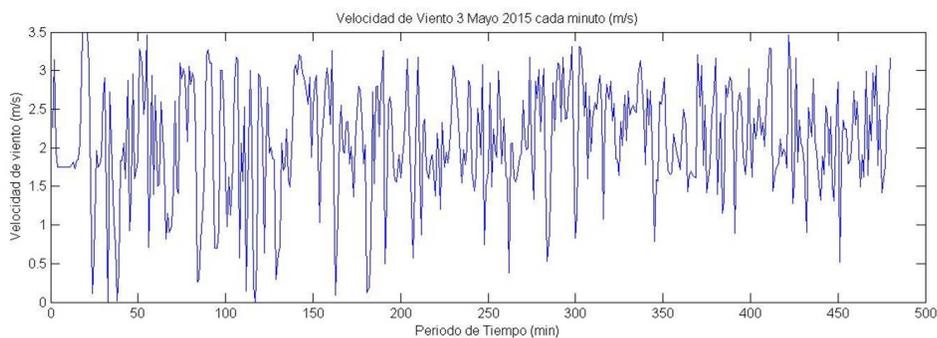


Figura 4.114 Velocidad de viento: 03 de Mayo 2015.

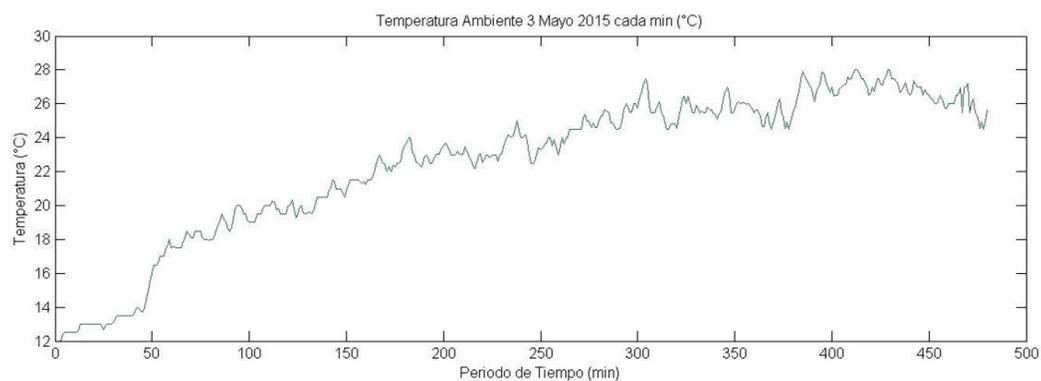


Figura 4.115 Temperatura ambiente: 03 de Mayo 2015.

La Fig. 4.116 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.117 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.118 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

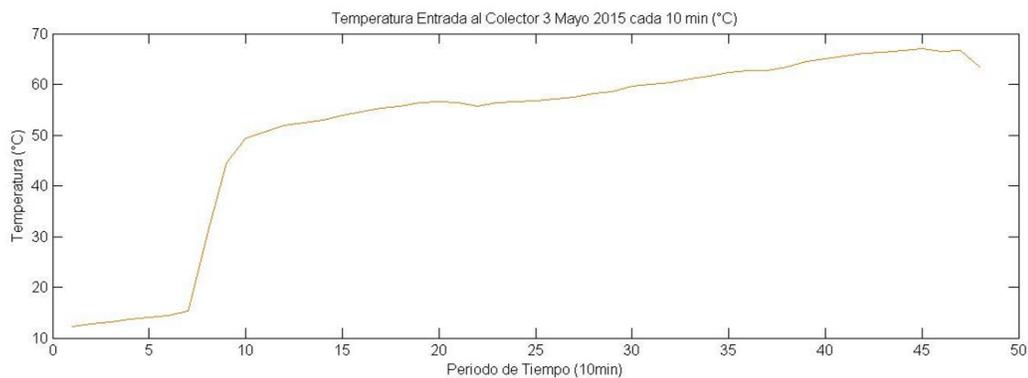


Figura 4.116 Temperatura entrada al colector: 03 de Mayo 2015.



Figura 4.117 Temperatura salida del colector: 03 de Mayo 2015.



Figura 4.118 Temperatura salida servicio del tanque: 03 de Mayo 2015.

La Fig. 4.119 muestra el gradiente de operación del sistema.

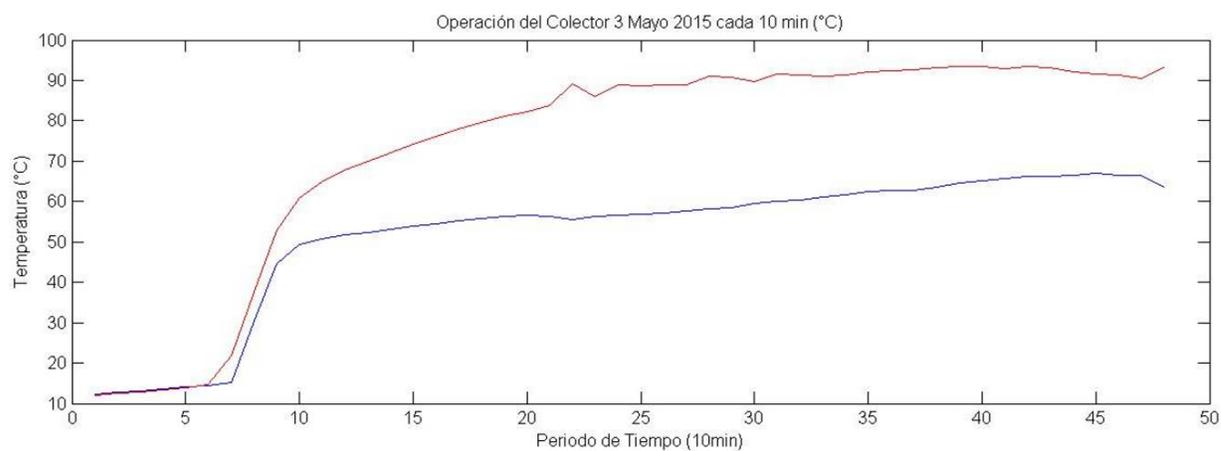


Figura 4.119 Operación del colector: 03 de Mayo 2015.

En la Tabla 4.14 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 03 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
03-05-15 9:00	215.345	17.762	1.647	14.990	19.811	37.482
03-05-15 9:10	245.068	18.239	2.222	26.368	34.315	37.702
03-05-15 9:20	272.321	18.633	1.841	43.128	50.793	36.149
03-05-15 9:30	300.930	19.405	2.2810	48.841	59.480	37.629
03-05-15 9:40	332.946	19.359	1.895	50.342	64.244	37.360
03-05-15 9:50	360.391	19.834	1.425	51.674	67.183	38.264
03-05-15 10:00	387.938	19.777	2.094	52.349	69.642	38.036
03-05-15 10:10	412.833	20.017	1.520	52.910	71.592	37.787
03-05-15 10:20	438.506	20.958	2.945	53.761	73.907	38.903
03-05-15 10:30	462.775	21.302	2.361	54.395	75.803	38.804
03-05-15 10:40	484.610	22.015	1.959	55.227	77.618	40.198
03-05-15 10:50	505.893	22.364	2.220	55.603	79.345	41.777
03-05-15 11:00	529.218	23.157	1.714	56.281	80.813	42.407
03-05-15 11:10	551.068	22.800	2.060	56.466	82.081	42.048
03-05-15 11:20	570.725	23.257	1.897	56.550	83.388	42.440
03-05-15 11:30	587.553	22.864	2.015	55.73	88.080	41.637
03-05-15 11:40	606.153	22.871	1.812	56.207	87.103	41.244
03-05-15 11:50	619.496	23.966	2.284	56.667	87.698	42.725
03-05-15 12:00	630.658	23.358	2.062	56.556	89.871	41.652
03-05-15 12:10	642.971	23.627	2.1	57.100	88.255	42.485
03-05-15 12:20	656.801	24.004	1.681	57.532	88.258	42.633
03-05-15 12:30	667.686	24.815	2.293	58.009	91.576	43.464
03-05-15 12:40	676.510	25.139	2.110	58.674	90.103	43.584
03-05-15 12:50	683.538	25.330	2.824	59.225	89.995	43.240
03-05-15 13:00	688.711	26.349	2.305	59.990	91.315	45.184
03-05-15 13:10	693.676	25.165	2.396	60.218	91.825	44.531
03-05-15 13:20	699.666	25.720	2.245	61.023	90.749	45.132
03-05-15 13:30	692.520	25.622	2.616	61.484	91.263	45.324
03-05-15 13:40	689.713	25.880	2.064	62.211	91.922	51.374
03-05-15 13:50	685.255	25.928	2.149	62.696	92.359	71.179
03-05-15 14:00	682.978	25.240	1.848	62.775	92.673	70.010
03-05-15 14:10	676.996	25.190	2.221	63.216	93.003	69.432
03-05-15 14:20	670.201	26.750	2.250	64.368	93.354	69.996
03-05-15 14:30	664.246	27.040	2.158	64.990	93.492	69.829
03-05-15 14:40	655.703	26.904	2.258	65.432	93.021	69.592
03-05-15 14:50	649.153	27.565	2.293	66.204	93.419	69.212
03-05-15 15:00	633.160	27.145	2.201	66.199	93.241	70.934
03-05-15 15:10	622.356	27.295	2.058	66.786	92.385	71.582
03-05-15 15:20	608.650	26.864	1.856	66.565	91.837	72.272
03-05-15 15:30	591.353	26.196	2.056	66.492	91.009	72.208
03-05-15 15:40	575.660	26.370	2.155	66.990	90.229	73.155
03-05-15 15:50	553.313	27.638	2.258	67.845	90.782	73.943
03-05-15 16:00	532.391	27.830	1.882	67.377	90.424	74.212
03-05-15 16:10	508.060	26.483	1.960	66.992	88.894	74.600
03-05-15 16:20	484.556	27.202	2.384	67.316	85.510	74.771
03-05-15 16:30	460.675	26.489	1.923	66.051	88.525	64.217
03-05-15 16:40	454.990	27.222	1.753	65.436	91.044	60.571
03-05-15 16:50	622.356	27.295	2.058	66.786	92.385	71.582

Tabla 4.14 Variables medidas del sistema: 03 de Mayo 2015.

Resultados del día 04 de Mayo de 2015

La Fig. 4.120 representa la irradiancia, la Fig. 4.121 la velocidad de viento y la Fig. 4.122 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 04 de Mayo 2015.

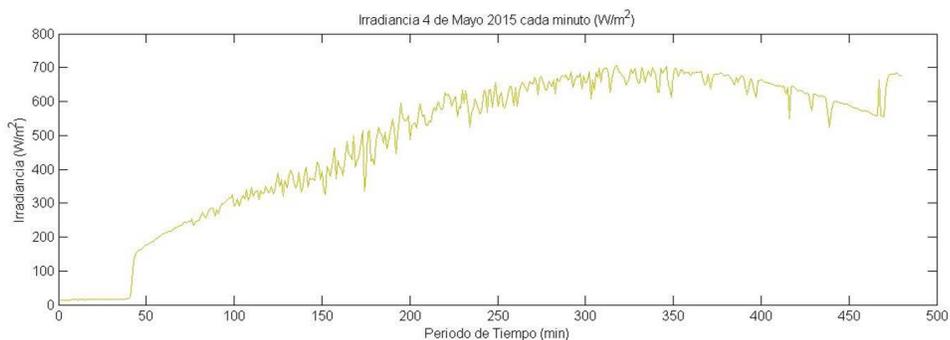


Figura 4.120 Irradiancia: 04 de Mayo 2015.

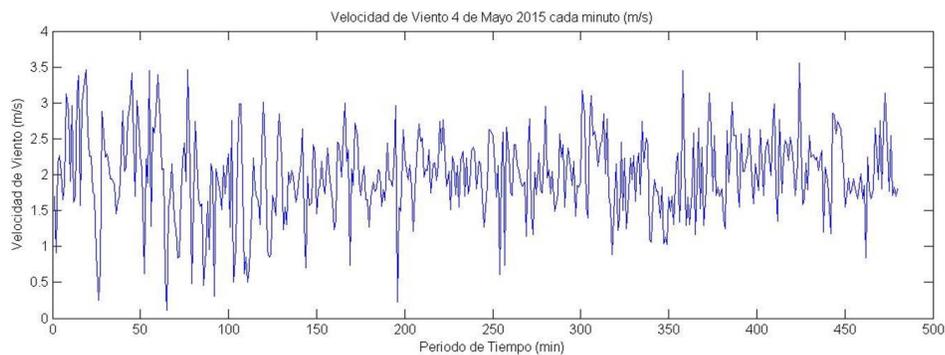


Figura 4.121 Velocidad de viento: 04 de Mayo 2015.

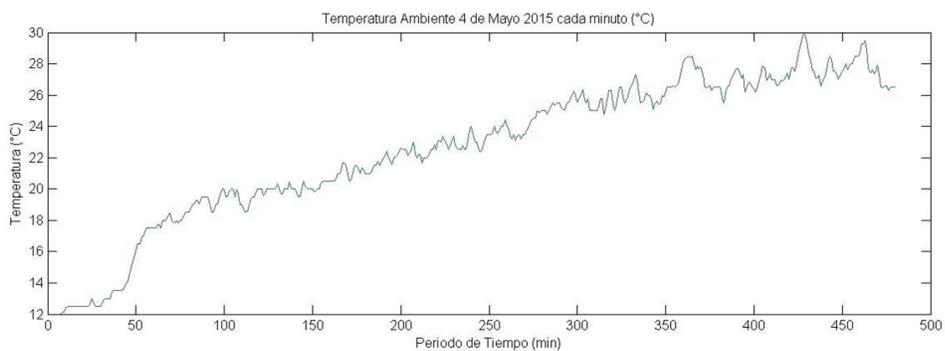


Figura 4.122 Temperatura ambiente: 04 de Mayo 2015.

La Fig. 4.123 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.124 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.125 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

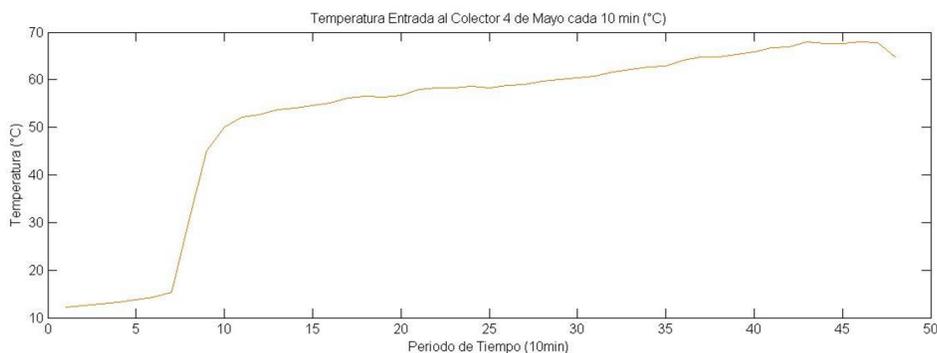


Figura 4.123 Temperatura entrada al colector: 04 de Mayo 2015.

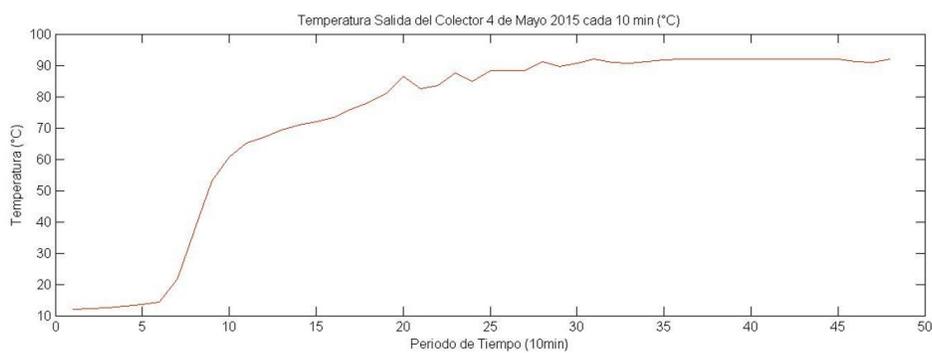


Figura 4.124 Temperatura salida del colector: 04 de Mayo 2015.

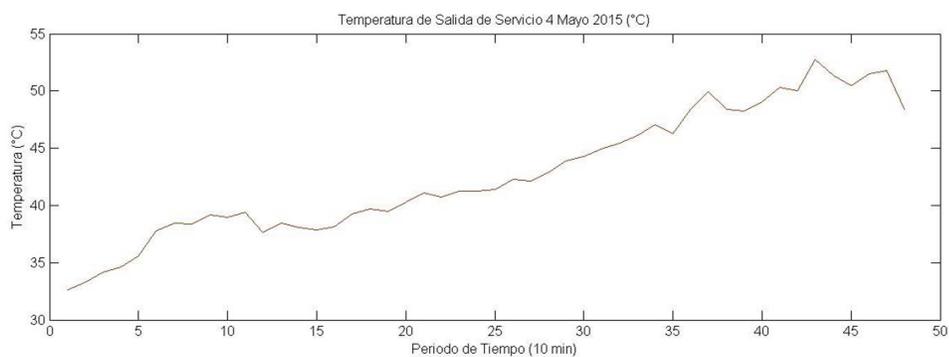


Figura 4.125 Temperatura salida servicio del tanque: 04 de Mayo 2015.

La Fig. 4.126 muestra el gradiente de operación del sistema.



Figura 4.126 Operación del colector: 04 de Mayo 2015.

En la Tabla 4.15 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 04 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
04-05-15 9:00	218.916	17.795	1.915	15.066	19.783	38.438
04-05-15 9:10	242.951	18.076	1.781	26.287	34.355	38.330
04-05-15 9:20	266.970	19.062	1.513	43.770	50.801	39.069
04-05-15 9:30	295.505	19.183	1.669	49.496	59.457	38.968
04-05-15 9:40	311.255	19.771	1.965	51.989	64.631	39.598
04-05-15 9:50	331.218	19.120	1.342	52.445	66.762	37.647
04-05-15 10:00	348.523	19.925	1.739	53.635	68.865	38.455
04-05-15 10:10	366.100	20.020	1.844	54.090	70.724	38.177
04-05-15 10:20	382.183	19.941	1.852	54.445	71.642	37.783
04-05-15 10:30	386.676	20.171	1.915	55.140	73.038	38.131
04-05-15 10:40	434.620	20.930	2.093	55.935	75.458	38.922
04-05-15 10:50	440.543	21.145	1.945	56.538	77.845	39.816
04-05-15 11:00	479.855	21.284	1.752	56.453	80.282	39.405
04-05-15 11:10	533.706	21.995	1.850	56.395	86.267	40.114
04-05-15 11:20	543.053	22.471	2.068	57.954	82.393	41.093
04-05-15 11:30	563.725	22.149	2.133	58.137	83.177	40.718
04-05-15 11:40	601.551	22.904	2.205	58.134	87.414	41.179
04-05-15 11:50	588.603	22.798	1.969	58.601	84.682	41.150
04-05-15 12:00	603.145	23.075	2.002	58.262	88.078	41.428
04-05-15 12:10	616.063	23.733	1.983	58.730	87.723	42.081
04-05-15 12:20	632.343	23.534	2.019	59.146	87.961	42.219
04-05-15 12:30	651.711	24.218	1.862	59.470	91.640	42.630
04-05-15 12:40	660.071	25.145	2.040	60.114	89.227	43.787
04-05-15 12:50	667.363	25.542	1.996	60.205	90.666	44.162
04-05-15 13:00	664.133	25.646	2.394	60.776	91.709	45.009
04-05-15 13:10	682.356	25.404	2.103	61.455	91.020	45.062
04-05-15 13:20	676.763	25.830	1.762	61.843	90.751	46.056
04-05-15 13:30	676.643	26.360	2.162	62.635	91.099	47.085
04-05-15 13:40	668.548	25.682	1.451	62.760	91.639	46.251
04-05-15 13:50	680.905	26.542	1.901	63.873	91.949	47.901
04-05-15 14:00	677.983	28.136	1.789	64.916	91.956	49.895
04-05-15 14:10	672.785	26.785	2.161	64.821	92.001	48.610
04-05-15 14:20	667.808	26.448	2.099	65.223	91.888	48.153
04-05-15 14:30	647.691	27.076	2.072	65.920	92.003	49.072
04-05-15 14:40	654.766	26.954	2.148	66.598	92.039	49.999
04-05-15 14:50	632.565	26.970	2.276	66.822	92.114	50.024
04-05-15 15:00	625.740	28.294	2.211	67.842	91.880	52.129
04-05-15 15:10	607.243	27.870	2.139	67.687	91.915	52.010
04-05-15 15:20	587.448	27.610	2.275	67.581	92.036	50.780
04-05-15 15:30	580.041	27.93	1.808	67.907	91.033	50.807
04-05-15 15:40	563.533	28.344	1.843	68.081	91.594	52.181
04-05-15 15:50	546.081	27.642	1.954	67.605	89.154	50.761
04-05-15 16:00	523.990	28.123	1.834	67.625	91.595	51.733
04-05-15 16:10	475.066	27.942	1.821	68.215	86.463	52.038
04-05-15 16:20	482.681	27.918	2.064	67.957	84.363	51.130
04-05-15 16:30	461.535	28.038	2.017	67.092	84.425	51.809
04-05-15 16:40	417.070	27.870	2.194	64.435	85.452	51.056
04-05-15 16:50	607.246	27.870	2.139	67.687	91.915	52.010

Tabla 4.15 Variables medidas del sistema: 04 de Mayo 2015.

Resultados del día 11 de Mayo de 2015

La Fig. 4.127 representa la irradiancia, la Fig. 4.128 la velocidad de viento y la Fig. 4.129 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 11 de Mayo 2015.

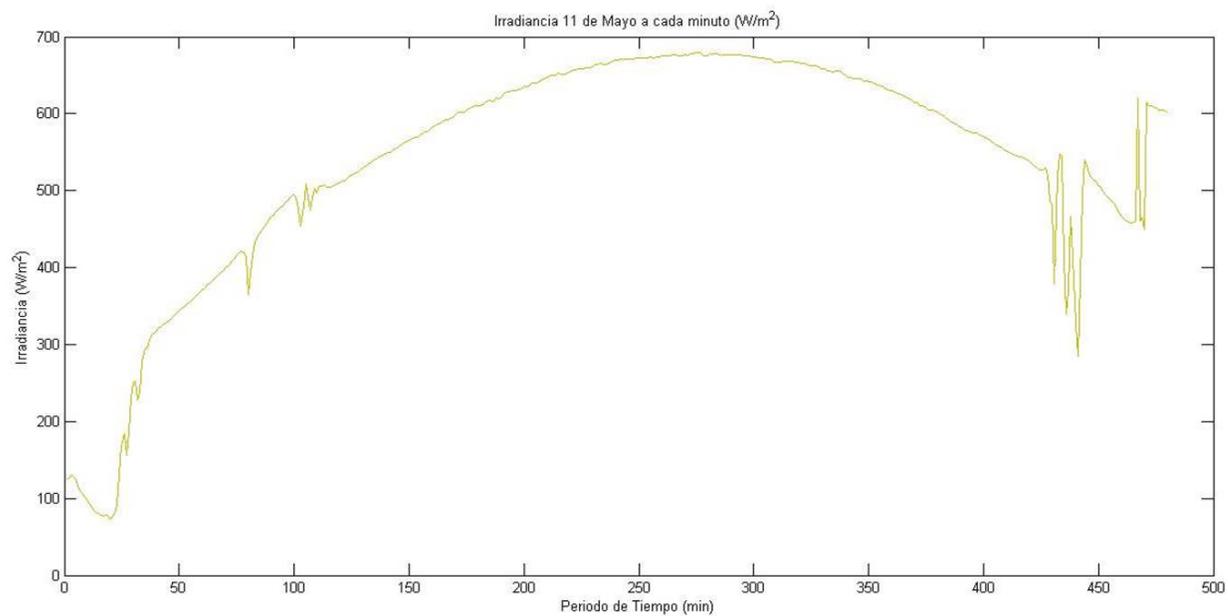


Figura 4.127 Irradiancia: 11 de Mayo 2015.

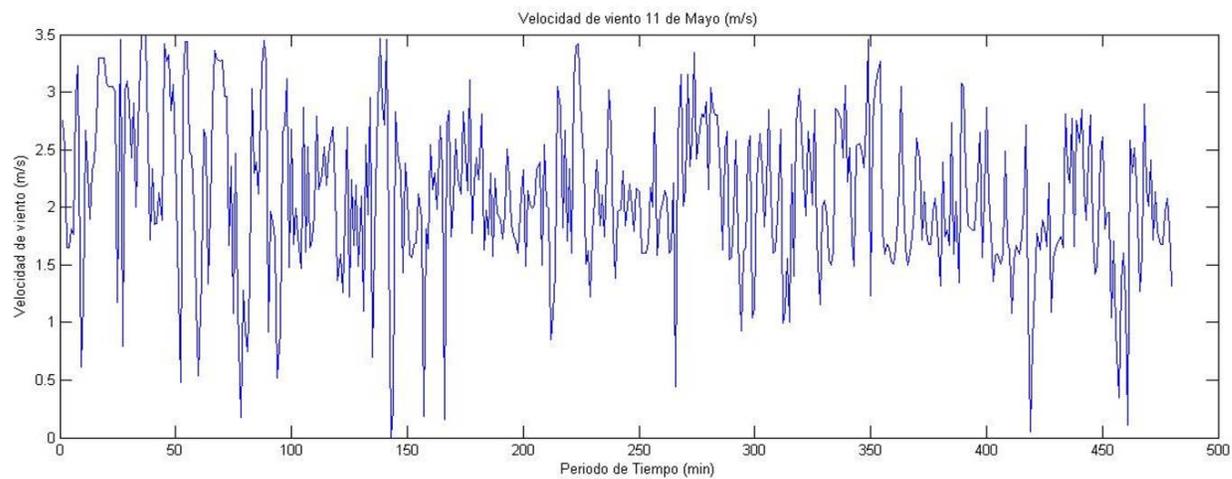


Figura 4.128 Velocidad de viento: 11 de Mayo 2015.

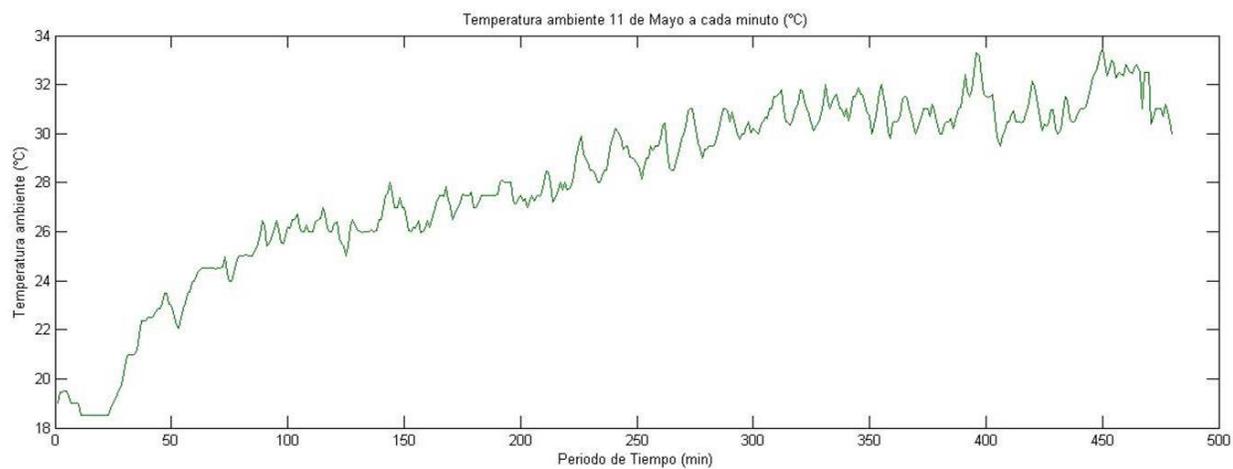


Figura 4.129 Temperatura ambiente: 11 de Mayo 2015.

La Fig. 4.130 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 4.131 la temperatura de salida del colector y la Fig. 4.132 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

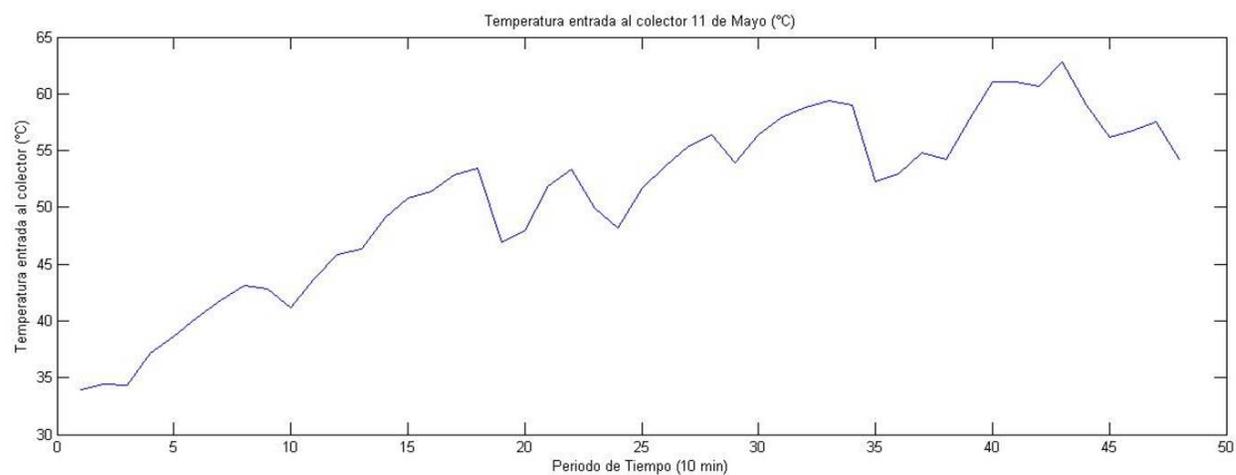


Figura 4.130 Temperatura entrada al colector: 11 de Mayo 2015.

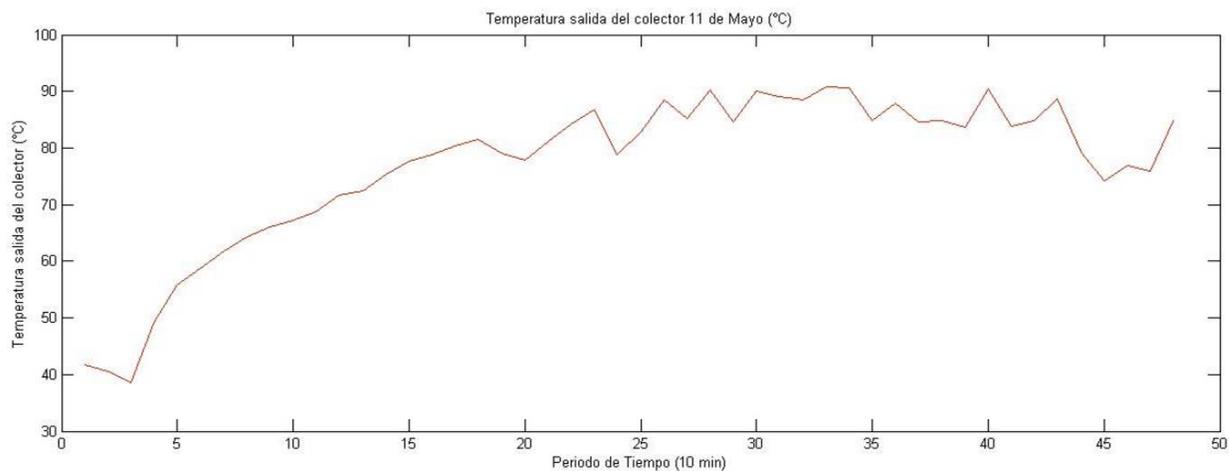


Figura 4.131 Temperatura salida del colector: 11 de Mayo 2015.

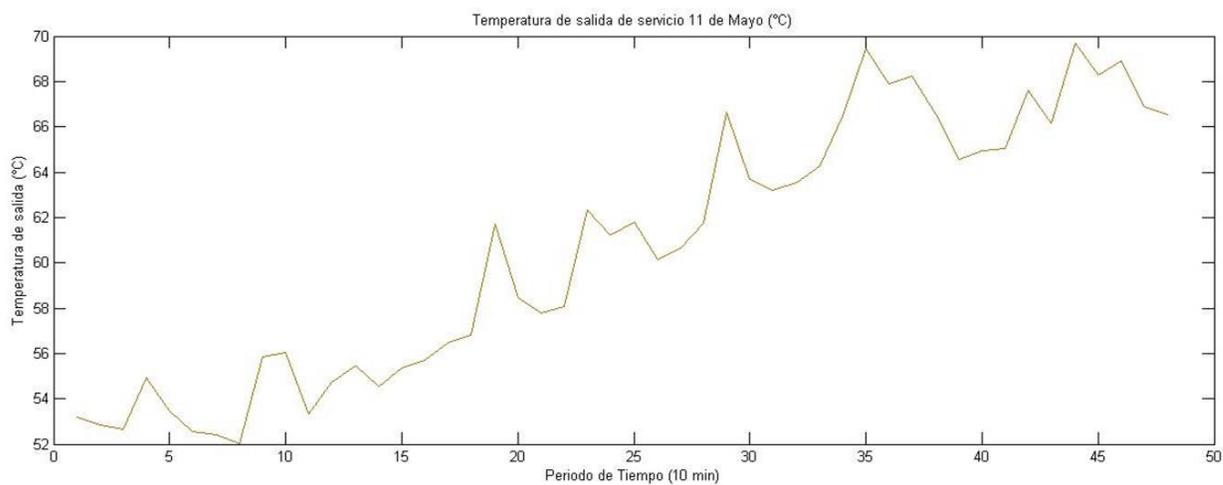


Figura 4.132 Temperatura salida servicio del tanque: 11 de Mayo 2015.

La Fig. 4.133 muestra el gradiente de operación del sistema.

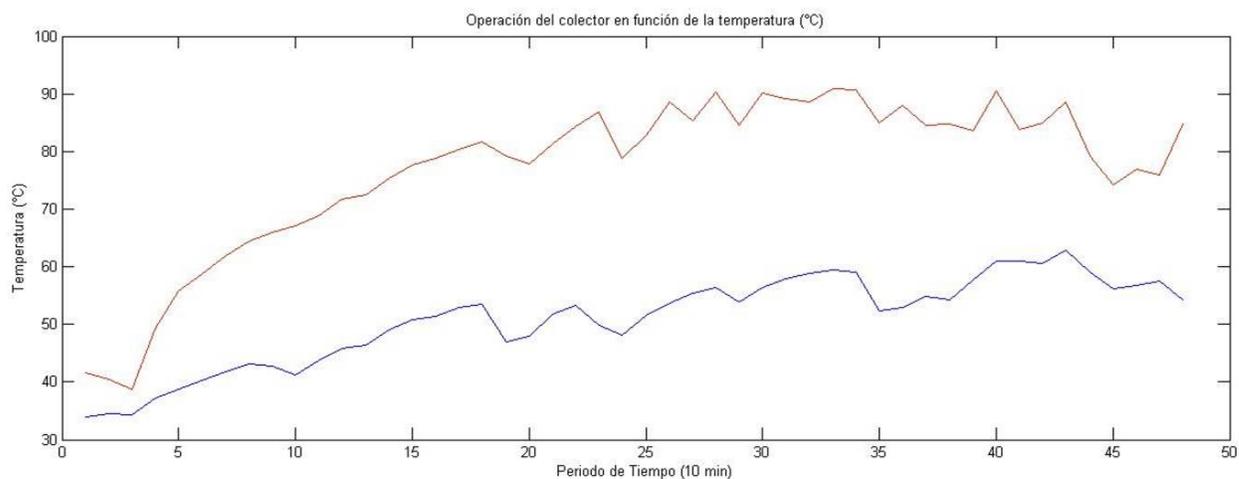


Figura 4.133 Operación del colector: 11 de Mayo 2015.

En la Tabla 4.16 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 11 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
11-05-15 9:00	116.515	19.213	2.012	33.995	41.625	53.187
11-05-15 9:10	81.003	18.501	2.731	34.432	40.497	52.825
11-05-15 9:20	155.660	19.215	2.660	34.320	38.655	52.649
11-05-15 9:30	283.515	21.646	2.720	37.119	49.238	54.922
11-05-15 9:40	331.523	22.950	2.613	38.675	55.825	53.487
11-05-15 9:50	358.018	23.034	2.075	40.268	58.761	52.538
11-05-15 10:00	386.453	24.475	2.606	41.805	61.842	52.423
11-05-15 10:10	408.005	24.560	1.700	43.083	64.372	52.010
11-05-15 10:20	441.575	25.444	2.278	42.786	65.980	55.860
11-05-15 10:30	482.356	25.822	1.965	41.146	67.194	56.060
11-05-15 10:40	486.843	26.226	1.919	43.720	68.856	53.333
11-05-15 10:50	506.583	26.359	2.324	45.830	71.646	54.735
11-05-15 11:00	520.775	25.851	1.837	46.341	72.524	55.463
11-05-15 11:10	540.333	26.111	2.256	49.015	75.412	54.518
11-05-15 11:20	557.121	27.296	1.895	50.795	77.601	55.372
11-05-15 11:30	573.420	26.193	1.672	51.394	78.738	55.710
11-05-15 11:40	590.683	27.140	2.099	52.825	80.420	56.461
11-05-15 11:50	605.418	27.207	2.389	53.427	81.611	56.824
11-05-15 12:00	616.518	27.426	2.036	46.905	79.093	61.681
11-05-15 12:10	630.051	27.745	1.981	47.990	77.799	58.447
11-05-15 12:20	640.880	27.414	2.047	51.843	81.214	57.784
11-05-15 12:30	651.250	27.852	1.978	53.398	84.328	58.067
11-05-15 12:40	658.643	28.786	2.280	49.930	86.820	62.321
11-05-15 12:50	665.370	28.691	2.137	48.161	78.769	61.206
11-05-15 13:00	671.063	29.417	2.041	51.645	82.902	61.819
11-05-15 13:10	673.506	29.098	1.912	53.600	88.536	60.130
11-05-15 13:20	675.693	29.368	2.004	55.424	85.302	60.655
11-05-15 13:30	676.890	30.055	2.719	56.385	90.314	61.771
11-05-15 13:40	677.270	30.241	2.363	53.944	84.544	66.621
11-05-15 13:50	675.596	30.234	1.774	56.409	90.040	63.692
11-04-15 14:00	670.823	30.725	2.135	57.888	89.150	63.211
11-05-15 14:10	667.483	31.022	1.949	58.819	88.497	63.540
11-05-15 14:20	662.438	30.821	2.102	59.415	90.806	64.245
11-05-15 14:30	654.301	31.245	2.277	59.035	90.602	66.477
11-05-15 14:40	644.701	31.221	2.306	52.273	84.895	69.447
11-05-15 14:50	635.323	30.751	2.193	52.963	87.978	67.888
11-05-15 15:00	622.153	30.823	1.981	54.782	84.566	68.235
11-05-15 15:10	607.136	30.741	1.858	54.204	84.830	66.533
11-05-15 15:20	590.783	30.659	2.145	57.725	83.662	64.557
11-05-15 15:30	575.116	32.176	2.083	61.011	90.488	64.946
11-05-15 15:40	559.843	30.562	1.735	61.017	83.869	65.020
11-05-15 15:50	544.055	30.918	1.438	60.650	84.882	67.609
11-05-15 16:00	520.016	30.753	1.657	62.826	88.641	66.151
11-05-15 16:10	431.836	30.720	2.217	58.986	79.137	69.676
11-05-15 16:20	481.020	32.070	2.190	56.131	74.170	68.294
11-05-15 16:30	485.978	32.615	1.388	56.771	76.915	68.937
11-05-15 16:40	475.401	32.418	1.964	57.520	75.999	66.897
11-05-15 16:50	607.136	30.741	1.858	54.204	84.830	66.533

Tabla 4.16 Variables medidas del sistema: 11 de Mayo 2015.

Resultados experimentales post-procesados

Considerando los días de evaluación del sistema termosifónico se procede a presentar la Tabla 4.17, que concentra los resultados alcanzados en la caracterización del calentador solar de placa plana. Todos los valores aquí presentados llevaron un post-procesamiento en MatLab con el objeto de sintetizar el cálculo realizado. Considerando el formato de la Tabla 4.2 se ordenan los valores alcanzados según corresponda el día de evaluación.

Evaluación	H (MJ/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Ti (°C)	Tf (°C)	Qu (MJ)	η (%)
No	Irradiación	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Calor útil	Eficiencia
1 30-03-2015	19.733	23.870	2.306	17.15	60.65	27.313	79.93
2 01-04-2014	21.172	22.169	1.967	26.001	52.702	16.764	45.72
3 02-04-2015	22.957	24.245	1.950	15.001	68.550	33.624	84.58
4 03-04-2015	21.907	26.292	1.888	19.801	57.301	23.546	62.06
5 05-04-2015	14.155	23.224	1.022	12.050	36.101	15.100	61.60
6 07-04-2015	17.942	26.392	1.064	48.750	78.601	18.742	60.32
7 08-04-2015	16.874	25.564	1.049	23.001	53.100	18.899	64.68
8 09-04-2015	14.192	22.274	1.042	19.501	51.850	20.313	82.65
9 01-05-2015	16.252	23.568	1.981	45.001	79.650	21.756	76.15
10 11-05-2015	15.464	27.953	2.094	37.350	69.401	20.124	75.15

Tabla 4.17 Parámetros cuantificados del sistema.

Capítulo 5

Resultados experimentales de la etapa de control

Considerando la robustez del sistema termosifónico, el controlador debe ser de igual forma robusto y con la capacidad necesaria para cubrir la tarea de control, la cual se definió como regular el flujo del fluido en el sistema. Tomando en cuenta la teoría de control clásico el controlador a considerar es el control on-off, este hace la tarea de encender o apagar la bomba centrífuga de forma automática a partir de ciertas condiciones especificadas en la ley de control.

Este controlador llega a generar problemas en algunos dispositivos debido a la frecuencia a la que suele operar. Considerando esto se adiciona al controlador una banda de histéresis la cual reduce ciertas fallas en la operación. El control on-off con histéresis, puede describirse como un controlador de regulación simple y económica. Su respuesta es del tipo todo o nada, esto significa que se conecta cuando la variable regulada se encuentra por debajo de un valor de referencia, caso contrario cuando esta se encuentra por encima del valor de referencia. Este modelo de control depende totalmente del signo del error. Tiene un funcionamiento óptimo en procesos con tiempo de retardo mínimo y velocidad de reacción lenta. En la Fig. 5.1 se observa el diagrama que describe el comportamiento del controlador on-off con histéresis clásico.

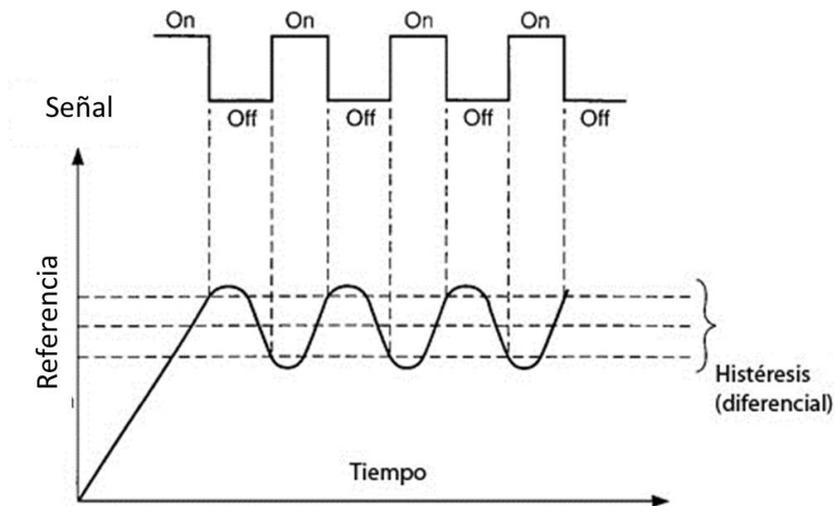


Figura 5.1 Diagrama control on-off con histéresis.

Diseño de la etapa de control

Para el control on-off, la banda de histéresis en el calentador solar se definió a partir de la temperatura del agua en el sistema, ya que es la variable que puede ser monitoreada. Es también importante mencionar que el controlador actúa sobre la velocidad del fluido de trabajo, manteniéndola a un caudal constante. Como referencia se considera la magnitud del gradiente de temperatura el cual es $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta referencia fue determinada con base a la simulación, y está formado por la diferencia existente entre la temperatura de entrada de agua en el tanque como la de salida. Entonces el controlador tendrá un límite superior por encima del gradiente óptimo de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, de la misma manera tendrá un límite inferior de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por debajo del valor de referencia.

Entonces al realizar la operación lógica, el controlador obtiene el error, dependiendo del signo se realizara una tarea. Si el signo es positivo quiere decir que el gradiente del sistema en ese instante de tiempo, se encuentra por debajo de la señal de referencia y si además se encuentra por debajo del límite inferior se deberá actuar para des energizar la bomba en caso de estar encendida. Caso contrario sucede sí el signo del error es negativo, ya que describe que el gradiente del sistema está por encima del valor de referencia, y si además se encuentra por encima del límite superior se deberá accionar la bomba centrífuga. En la Fig. 5.2 se observa el

diagrama que describe el comportamiento del controlador on-off con histéresis, diseñado para el sistema de calentamiento solar de agua.

Entonces la ley de control se rige a partir de la variable de temperatura, donde la referencia queda definida como $\Delta T_{\text{Referencia}}$, teniendo una señal de retroalimentación ΔT_{Sensor} . Considerando esto se logra obtener una señal de comando hacia la planta en este caso considerada la bomba sumergible de agua. La cual es encendida o apagada según el comando enviado por el controlador. Es por eso que al mantener constante el caudal en el sistema termosifónico es posible mejorar la estratificación de temperaturas en el tanque. La ley que rige al controlador on-off con histéresis diseñado se puede observar en el esquema de la Fig. 5.3.

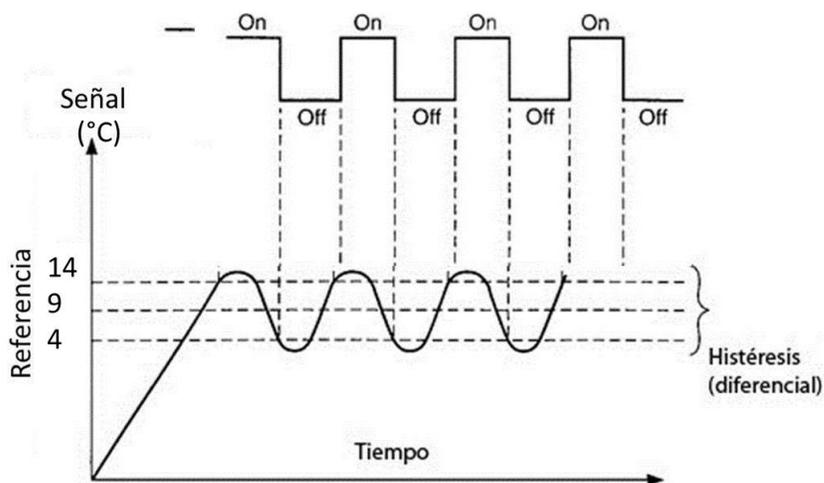


Figura 5.2 Diagrama de control on-off con histéresis del sistema.

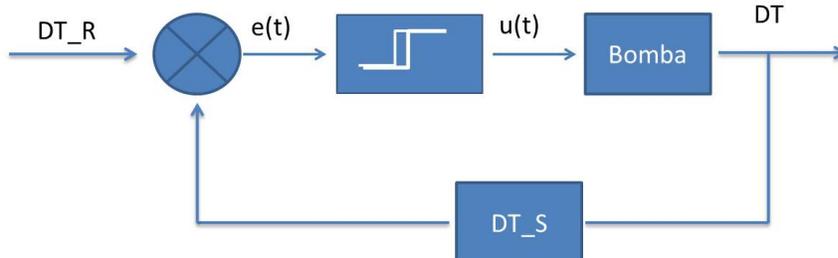


Figura 5.3 Ley de control del controlador On-Off con histéresis.

Implementación de la etapa de control

El controlador es implementado en forma digital utilizando la plataforma Arduino Mega256, acondicionando las señales de entrada y salida en una tarjeta de circuitos impresos, donde se interconecta el comando de control con la planta. En la Fig. 5.4, se observa la tarjeta de circuitos impresos y la tarjeta de adquisición de datos dentro de un gabinete.

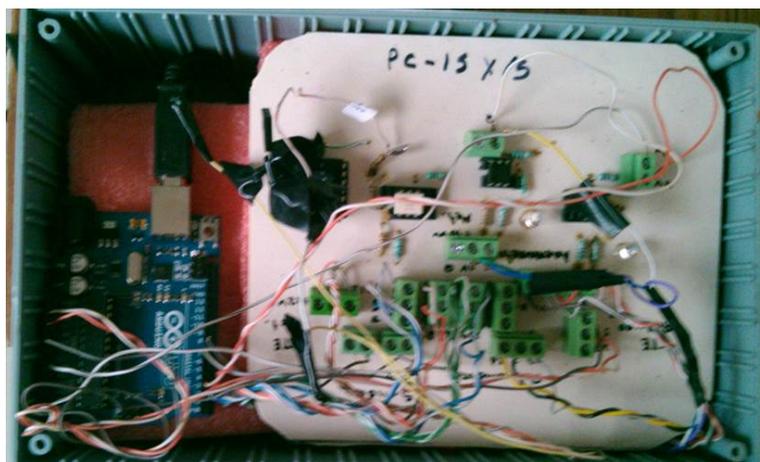


Figura 5.4 Gabinete de control.

Se desarrolló de igual forma un receptáculo para proteger la bomba, así como sus conexiones eléctricas del medio ambiente. Se diseñó un sistema de acople entre la bomba de agua sumergible y la tubería que sale del tanque de almacenamiento y la que ingresa al colector solar, con el objetivo de provocar el incremento en la velocidad del fluido. En la Fig. 5.5 se observa el sistema de bombeo acoplado a las dos tuberías.

En la Fig. 5.6 se observa el sistema de bombeo instalado en el calentador solar de agua. El sistema de bombeo es energizado por el control on-off con histéresis diseñado, se alimenta del agua que proviene de la salida del tanque de almacenamiento y descarga en la tubería que alimenta al colector solar.

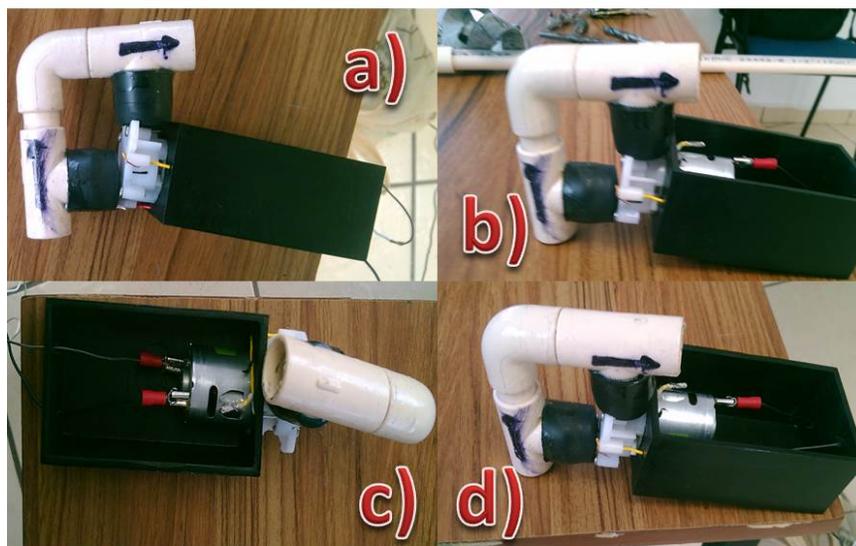


Figura 5.5 a) Receptáculo de la bomba b) Tuberías acopladas c) Bomba sumergible d) Receptáculo completo.



Figura 5.6 Gabinete de control instalado.

5.1 Evaluación térmica con el sistema de control

Operación del sistema con la etapa de control

Los datos que se muestran en esta sección pertenecen a la operación normal del calentador solar modelo Axol. Como fue definido en el Capítulo 4 las variables a medir fueron, irradiancia solar, velocidad de viento, temperatura ambiente, temperatura de entrada del colector, temperatura de salida del colector y temperatura de salida a servicio del sistema. Las variables son adquiridas a una tasa de muestreo de un dato por segundo, posteriormente se realiza un post procesamiento de la información utilizando la media muestral.

Los días considerados para la evaluación del sistema fueron 7, 8, 9, 10 y 26 de Mayo del 2015. Estos días cumplen con los requerimientos para realizar las pruebas con el sistema. Se consideran las Ecuación 3.1, Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3, para determinar la irradiación, velocidad de viento y temperatura ambiente respectivamente.

El cálculo se realiza para poder determinar el rendimiento térmico del sistema, donde se utiliza un sistema de control para mejorar su operación. Posteriormente realizado el cálculo las variables obtenidas son colocadas ordenadamente en una tabla. Los resultados obtenidos de la evaluación, se presentan de forma gráfica considerando las variables obtenidas de la estación meteorológica y las temperaturas de operación del sistema.

5.1.1 Gráficas y tablas de operación del sistema con etapa de control

Resultados del día 07 de Mayo de 2015

La Fig. 5.7 representa la irradiancia, la Fig. 5.8 la velocidad de viento y la Fig. 5.9 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 07 de Mayo 2015.

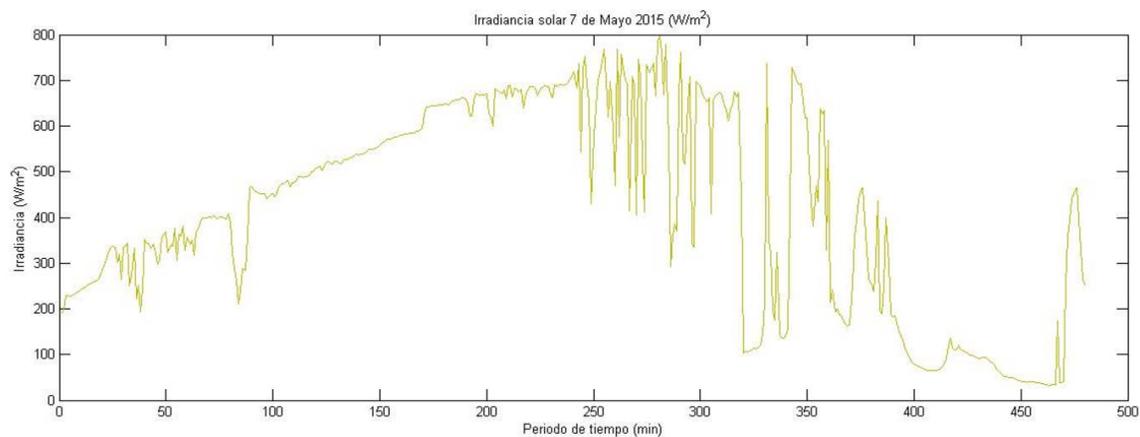


Figura 5.7 Irradiancia: 07 de Mayo 2015.

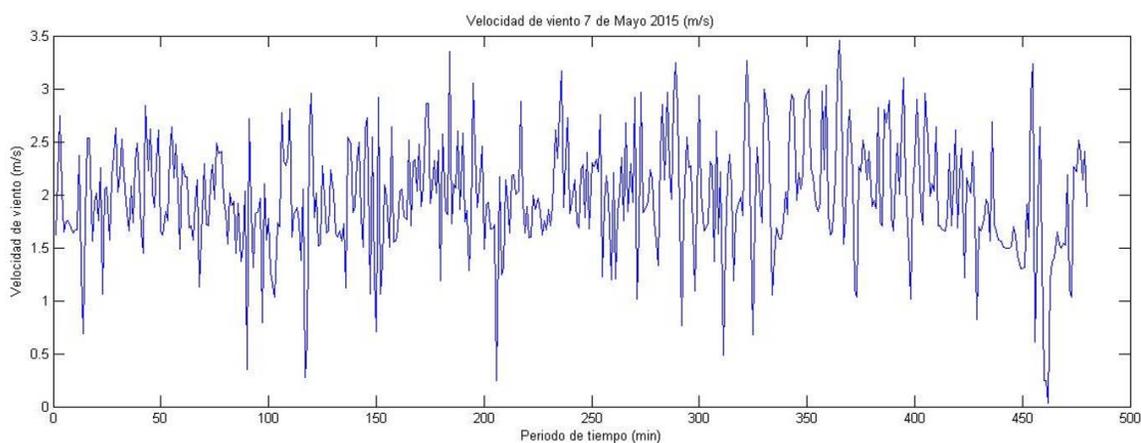


Figura 5.8 Velocidad de viento: 07 de Mayo 2015.

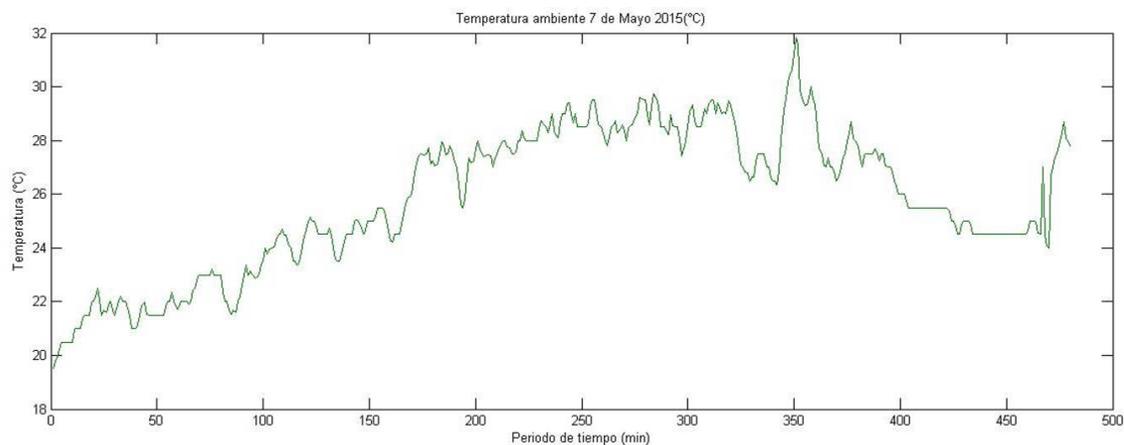


Figura 5.9 Temperatura ambiente: 07 de Mayo 2015.

La Fig. 5.10 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 5.11 la temperatura de salida del colector. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

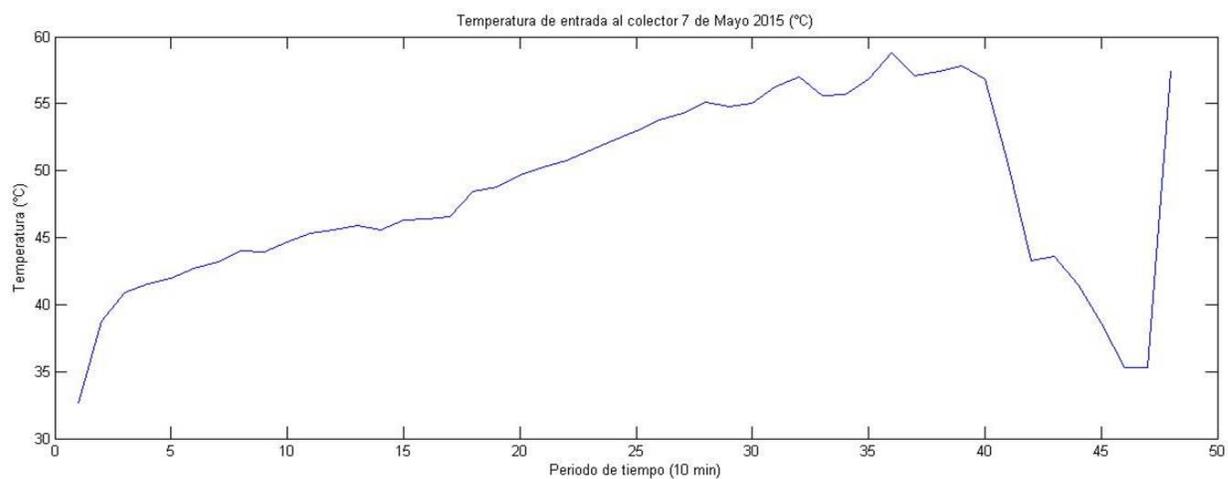


Figura 5.10 Temperatura entrada al colector: 07 de Mayo 2015.

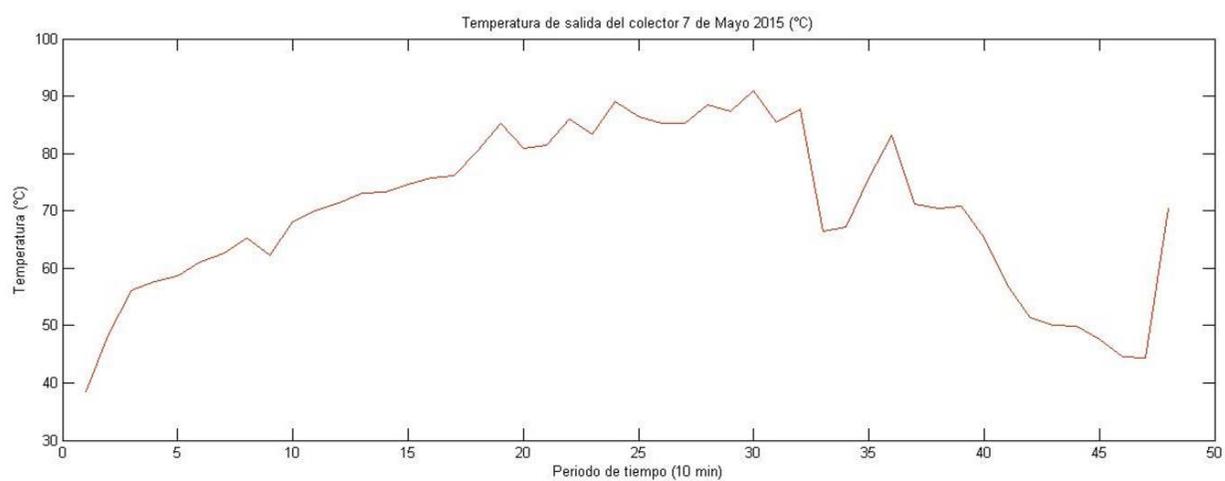


Figura 5.11 Temperatura salida del colector: 07 de Mayo 2015.

La Fig. 5.12 muestra el gradiente de operación del sistema.

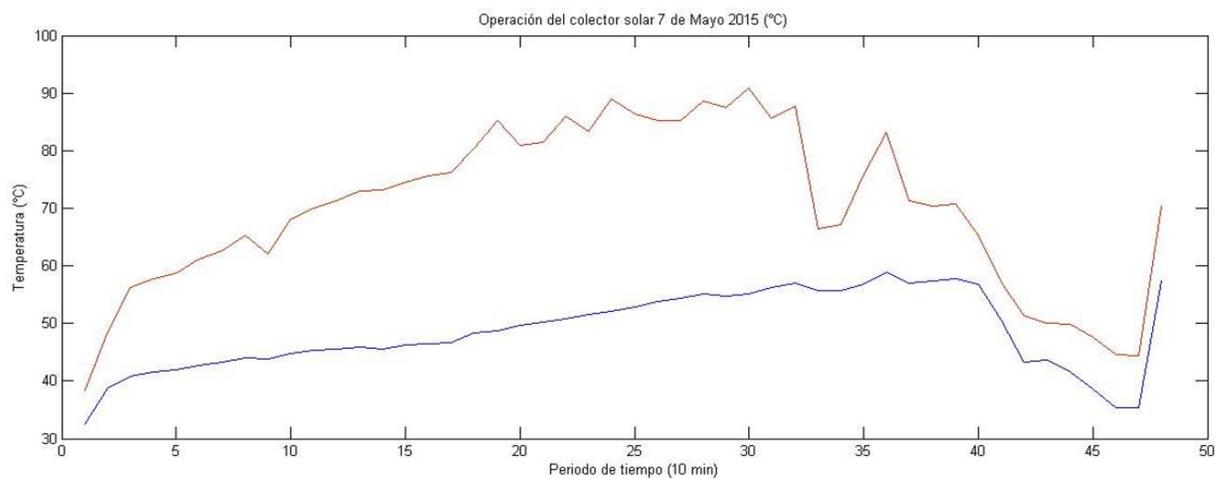


Figura 5.12 Operación del colector: 07 de Mayo 2015.

En la Tabla 5.1 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 07 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
07-05-15 9:00	224.971	20.247	1.874	32.630	38.401	32.054
07-05-15 9:10	258.970	21.381	1.840	38.790	48.509	32.748
07-05-15 9:20	314.421	21.866	1.997	40.855	56.155	33.420
07-05-15 9:30	279.936	21.624	2.120	41.565	57.671	32.960
07-05-15 9:40	337.540	21.553	2.126	41.939	58.666	32.666
07-05-15 9:50	347.241	21.823	2.072	42.725	61.188	33.150
07-05-15 10:00	373.843	22.277	1.864	43.225	62.687	33.429
07-05-15 10:10	399.683	23.020	2.082	43.989	65.294	34.932
07-05-15 10:20	318.825	21.970	1.603	43.917	62.176	33.945
07-05-15 10:30	451.498	23.112	1.777	44.710	68.049	34.598
07-05-15 10:40	469.471	24.216	1.944	45.369	70.016	35.946
07-05-15 10:50	492.345	23.906	1.689	45.580	71.390	36.051
07-05-15 11:00	515.943	24.737	1.865	45.886	73.015	36.726
07-05-15 11:10	528.920	24.086	1.802	45.607	73.264	35.495
07-05-15 11:20	547.016	24.805	1.900	46.334	74.515	36.925
07-05-15 11:30	571.781	25.090	1.836	46.385	75.656	37.220
07-05-15 11:40	586.166	25.125	2.109	46.581	76.158	37.108
07-05-15 11:50	642.696	27.295	2.162	48.416	80.267	39.550
07-05-15 12:00	655.255	27.511	2.252	48.813	85.283	40.217
07-05-15 12:10	656.291	26.645	1.996	49.665	80.956	39.386
07-05-15 12:20	657.570	27.473	1.602	50.267	81.449	40.281
07-05-15 12:30	673.671	27.766	2.034	50.784	85.981	40.680
07-05-15 12:40	681.768	28.089	1.773	51.500	83.272	41.383
07-05-15 12:50	690.411	28.507	2.329	52.200	88.994	42.874
07-05-15 13:00	651.606	28.895	2.017	52.945	86.309	43.572
07-05-15 13:10	664.811	28.834	2.028	53.819	85.266	44.385
07-05-15 13:20	643.563	28.343	2.082	54.320	85.243	43.955
07-05-15 13:30	675.990	28.954	1.895	55.115	88.536	44.957
07-05-15 13:40	565.858	28.925	2.484	54.751	87.409	45.217
07-05-15 13:50	592.103	28.245	1.914	55.065	90.894	44.822
07-05-15 14:00	638.788	28.900	1.951	56.227	85.516	44.993
07-05-15 14:10	572.998	29.248	1.727	57.006	87.738	45.931
07-05-15 14:20	124.786	27.447	2.202	55.591	66.496	45.099
07-05-15 14:30	226.203	27.101	1.860	55.665	67.209	44.106
07-05-15 14:40	599.166	28.896	2.466	56.820	75.781	45.421
07-05-15 14:50	502.366	29.985	2.316	58.829	83.088	46.914
07-05-15 15:00	188.805	27.249	2.366	57.082	71.241	44.305
07-05-15 15:10	361.321	27.747	2.016	57.394	70.444	44.856
07-05-15 15:20	267.696	27.428	2.190	57.842	70.778	44.335
07-05-15 15:30	123.860	26.783	2.131	56.854	65.365	44.472
07-05-15 15:40	68.283	25.624	2.315	50.517	57.200	43.056
07-05-15 15:50	96.786	25.500	1.903	43.250	51.416	41.984
07-05-15 16:00	102.628	25.012	1.885	43.590	50.044	40.909
07-05-15 16:10	82.895	24.639	1.803	41.486	49.795	40.398
07-05-15 16:20	48.680	24.500	1.486	38.591	47.607	40.469
07-05-15 16:30	39.120	24.511	1.784	35.335	44.540	41.662
07-05-15 16:40	49.423	24.857	1.199	35.336	44.372	41.717
07-05-15 16:50	361.321	27.741	2.016	57.394	70.444	44.853

Tabla 5.1 Variables medidas del sistema: 07 de Mayo 2015.

Resultados del día 08 de Mayo de 2015

La Fig. 5.13 representa la irradiancia, la Fig. 5.14 la velocidad de viento y la Fig. 5.15 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 08 de Mayo 2015.

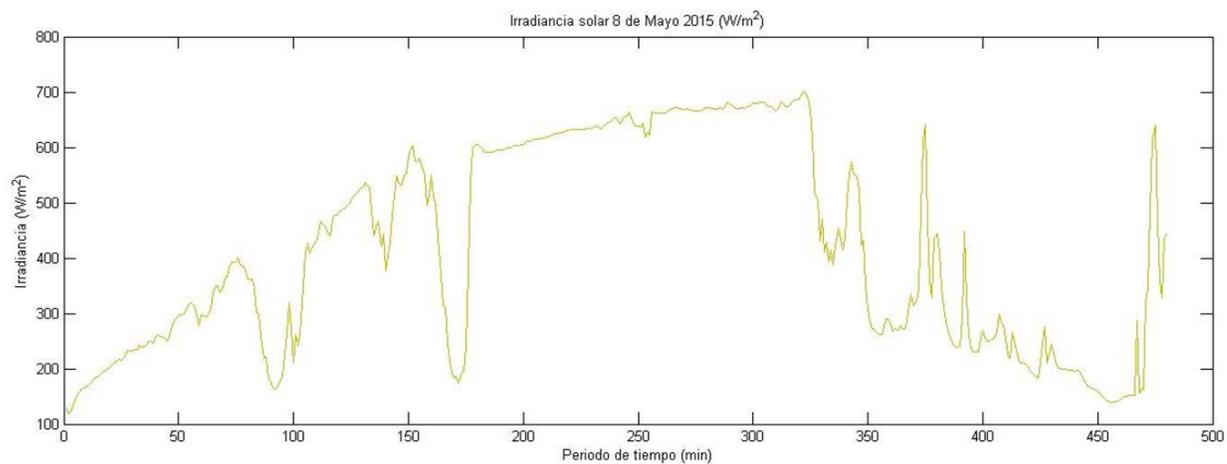


Figura 5.13 Irradiancia: 08 de Mayo 2015.

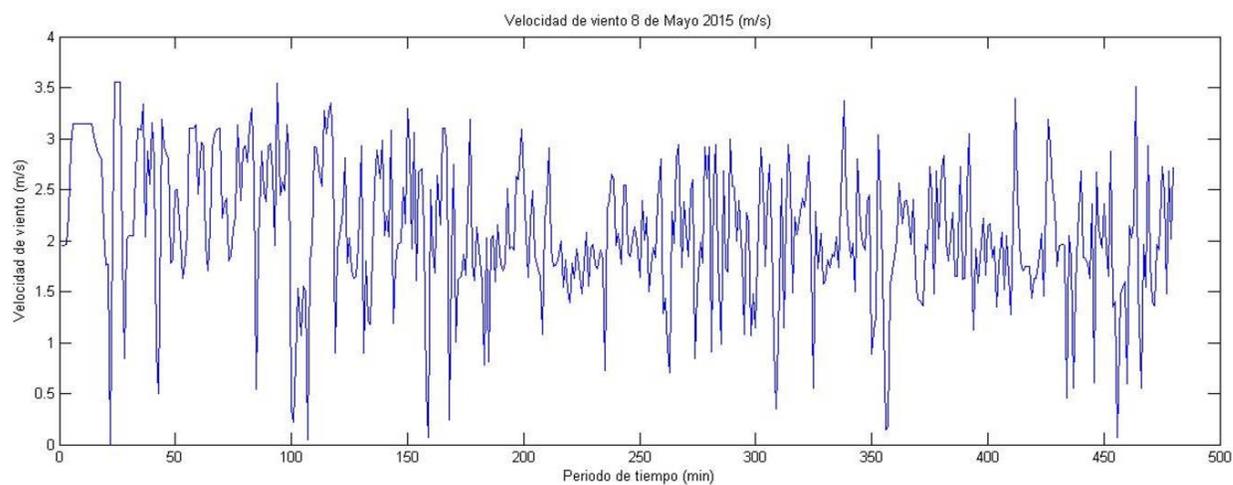


Figura 5.14 Velocidad de viento: 08 de Mayo 2015.

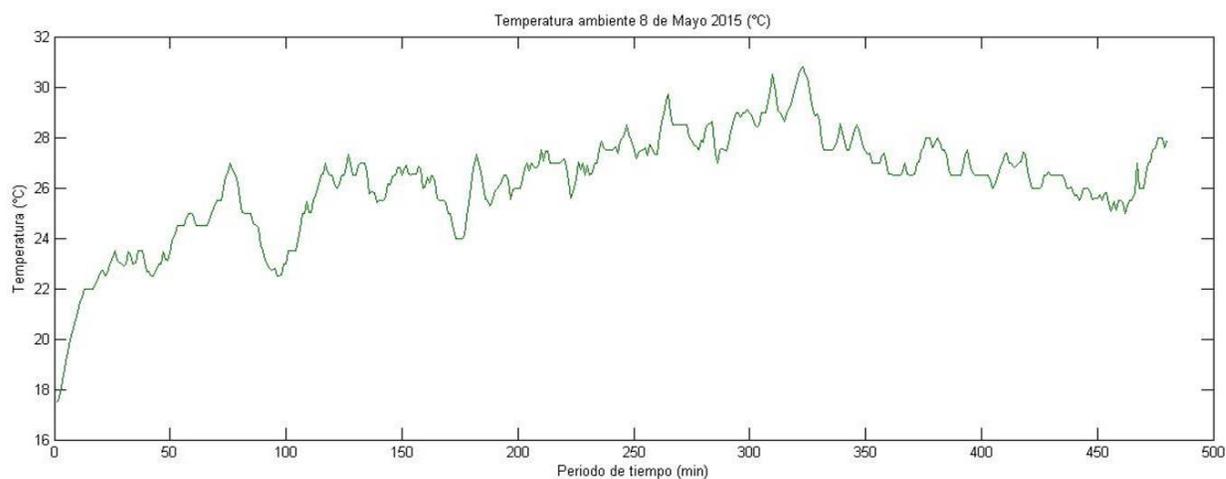


Figura 5.15 Temperatura ambiente: 08 de Mayo 2015.

La Fig. 5.16 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 5.17 la temperatura de salida del colector y la Fig. 5.18 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

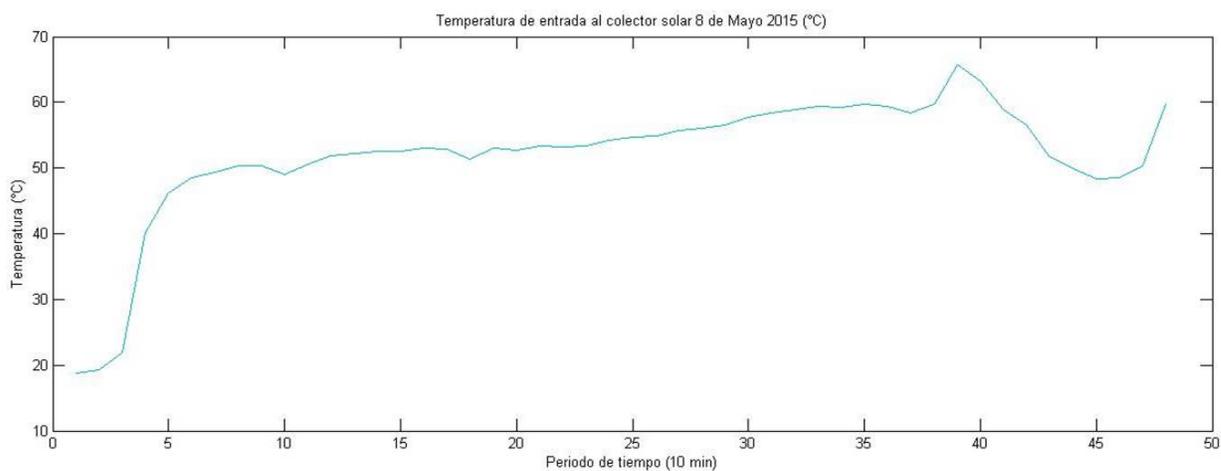


Figura 5.16 Temperatura entrada al colector: 08 de Mayo 2015.

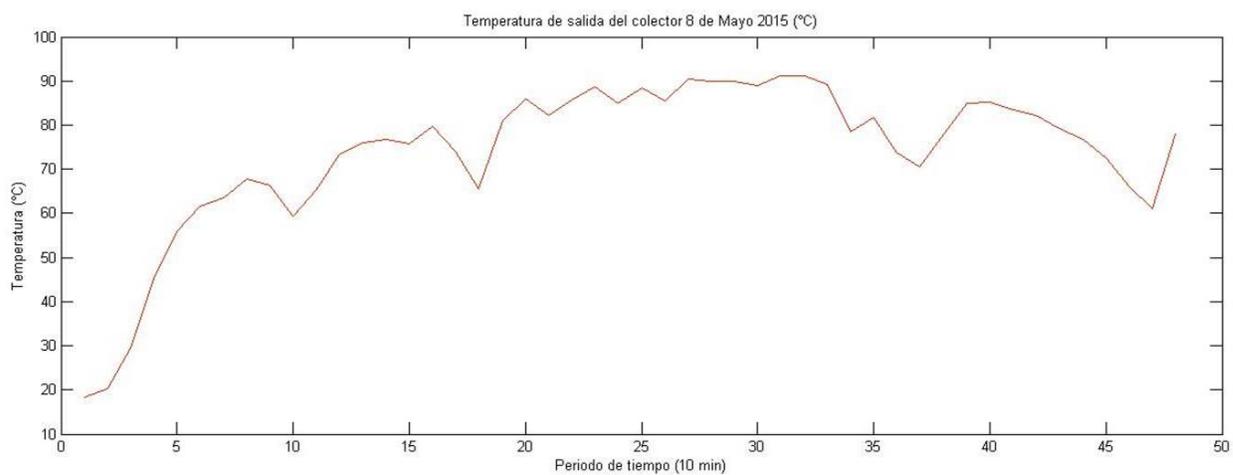


Figura 5.17 Temperatura salida del colector: 08 de Mayo 2015.

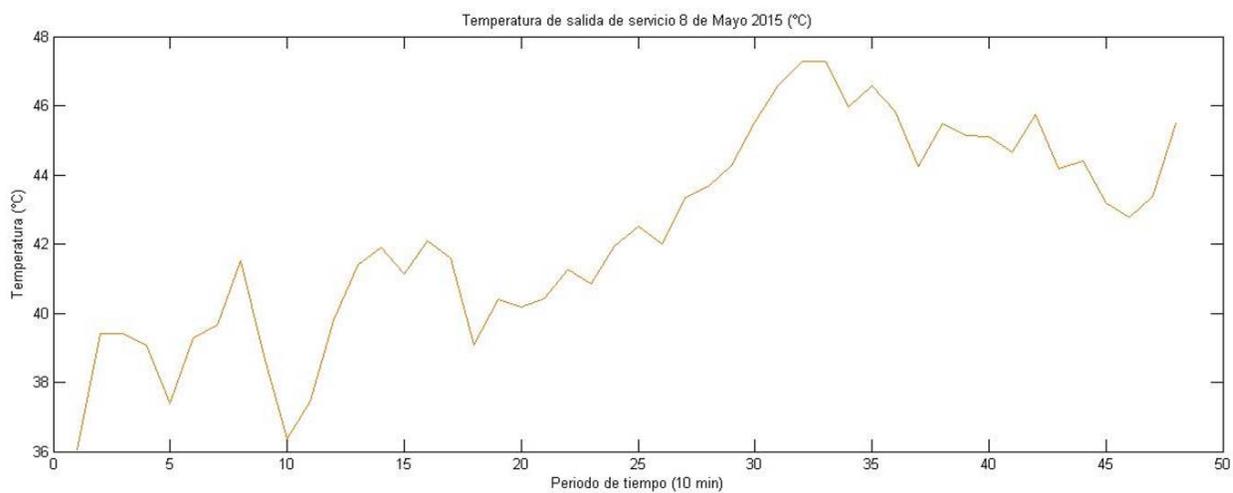


Figura 5.18 Temperatura salida servicio del tanque: 08 de Mayo 2015.

La Fig. 5.19 muestra el gradiente de operación del sistema.

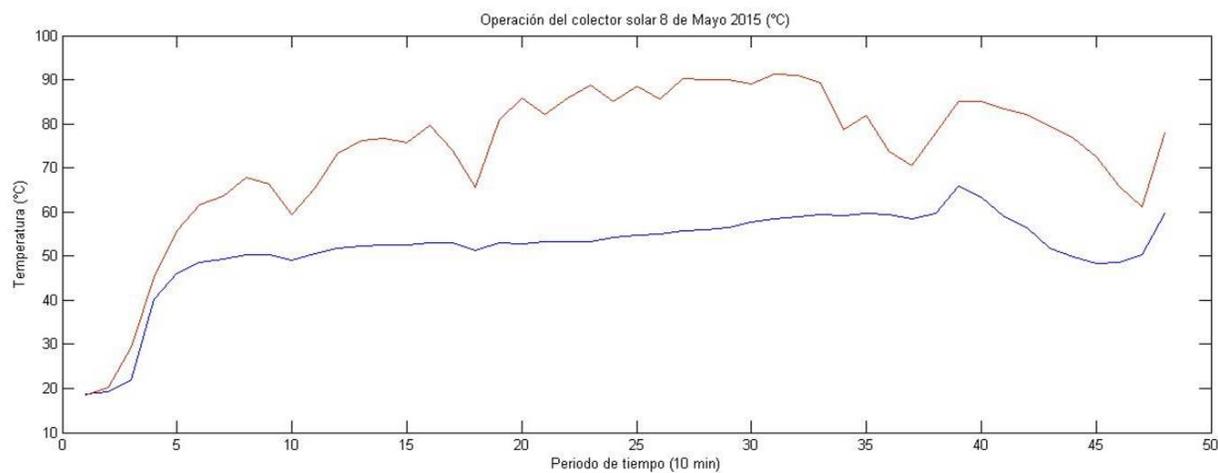


Figura 5.19 Operación del colector: 08 de Mayo 2015.

En la Tabla 5.2 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 08 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
08-05-15 9:00	145.443	19.261	2.678	18.725	18.408	36.036
08-05-15 9:10	187.870	22.055	2.806	19.265	20.211	39.403
08-05-15 9:20	220.773	22.955	2.133	21.880	29.412	39.422
08-05-15 9:30	243.715	23.205	2.692	40.140	45.138	39.052
08-05-15 9:40	268.886	22.958	2.203	46.151	55.775	37.382
08-05-15 9:50	303.723	24.582	2.488	48.468	61.647	39.294
08-05-15 10:00	327.865	24.752	2.606	49.382	63.642	39.666
08-05-15 10:10	383.851	26.202	2.413	50.394	67.764	41.508
08-05-15 10:20	272.275	24.578	2.501	50.287	66.258	38.753
08-05-15 10:30	214.916	22.802	2.491	49.085	59.401	36.376
08-05-15 10:40	363.371	24.272	1.346	50.568	65.353	37.456
08-05-15 10:50	461.775	26.215	2.676	51.870	73.322	39.778
08-05-15 11:00	506.968	26.533	2.085	52.252	76.122	41.378
08-05-15 11:10	468.456	26.274	2.005	52.510	76.639	41.908
08-05-15 11:20	512.270	26.204	2.225	52.571	75.803	41.120
08-05-15 11:30	560.130	26.539	2.002	53.094	79.717	42.092
08-05-15 11:40	327.618	25.793	2.225	52.945	74.066	41.580
08-05-15 11:50	371.063	24.607	1.889	51.396	65.677	39.094
08-05-15 12:00	593.855	26.146	1.672	53.005	80.887	40.404
08-05-15 12:10	600.901	26.115	2.267	52.728	85.904	40.181
08-05-15 12:20	614.001	26.788	1.933	53.386	82.138	40.437
08-05-15 12:30	625.363	27.120	1.838	53.223	85.805	41.254
08-05-15 12:40	632.643	26.501	1.784	53.337	88.729	40.846
08-05-15 12:50	641.795	27.251	1.984	54.255	85.058	41.948
08-05-15 13:00	649.106	27.844	2.041	54.645	88.432	42.502
08-05-15 13:10	645.633	27.437	2.012	54.930	85.573	42.003
08-05-15 13:20	667.186	28.774	1.930	55.641	90.332	43.334
08-05-15 13:30	668.226	27.993	2.150	56.085	90.053	43.653
08-05-15 13:40	672.643	27.838	2.084	56.586	89.981	44.278
08-05-15 13:50	672.883	28.749	1.798	57.674	88.982	45.515
08-04-15 14:00	675.786	29.102	1.866	58.356	91.277	46.574
08-05-15 14:10	679.410	29.279	2.198	58.943	91.088	47.287
08-05-15 14:20	599.566	29.856	1.939	59.381	89.232	47.272
08-05-15 14:30	419.435	27.783	2.159	59.203	78.589	45.973
08-05-15 14:40	476.965	27.878	1.981	59.688	81.815	46.567
08-05-15 14:50	274.953	27.084	1.419	59.330	73.768	45.858
08-05-15 15:00	287.810	26.572	2.117	58.407	70.486	44.252
08-05-15 15:10	443.865	27.513	2.070	59.668	77.917	45.478
08-05-15 15:20	283.970	27.086	2.019	65.730	84.986	45.134
08-05-15 15:30	278.170	26.792	1.998	63.269	85.136	45.112
08-05-15 15:40	264.335	26.570	1.763	58.963	83.360	44.650
08-05-15 15:50	222.048	27.055	1.983	56.582	82.207	45.728
08-05-15 16:00	216.558	26.250	2.203	51.731	79.343	44.185
08-05-15 16:10	202.063	26.250	1.706	49.923	76.704	44.400
08-05-15 16:20	175.400	25.737	1.911	48.396	72.501	43.175
08-05-15 16:30	144.101	25.475	1.448	48.492	65.965	42.764
08-05-15 16:40	167.150	25.745	2.019	50.425	61.212	43.374
08-05-15 16:50	443.865	27.513	2.070	59.668	77.917	45.478

Tabla 5.2 Variables medidas del sistema: 08 de Mayo 2015.

Resultados del día 09 de Mayo de 2015

La Fig. 5.20 representa la irradiancia, la Fig. 5.21 la velocidad de viento y la Fig. 5.22 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 09 de Mayo 2015.

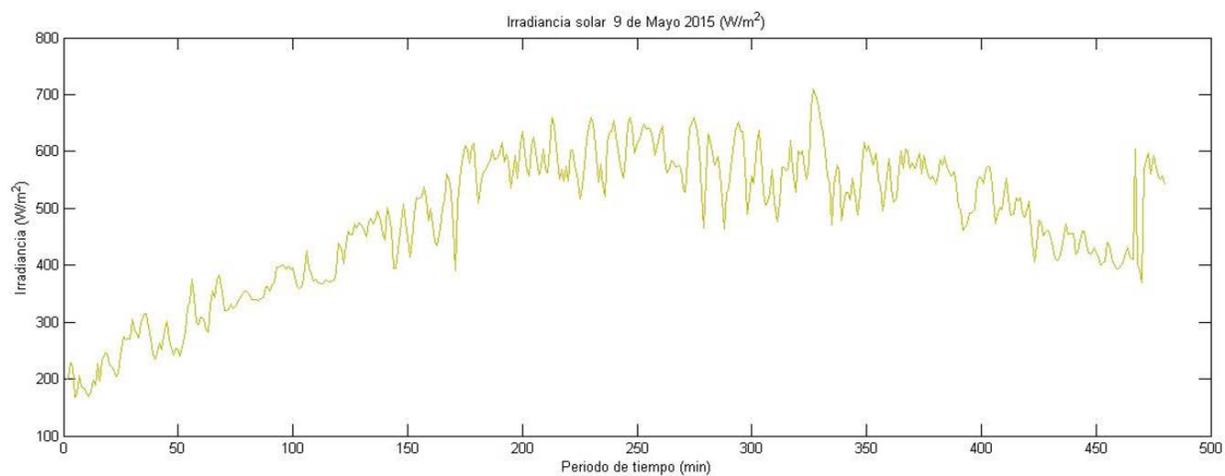


Figura 5.20 Irradiancia: 09 de Mayo 2015.

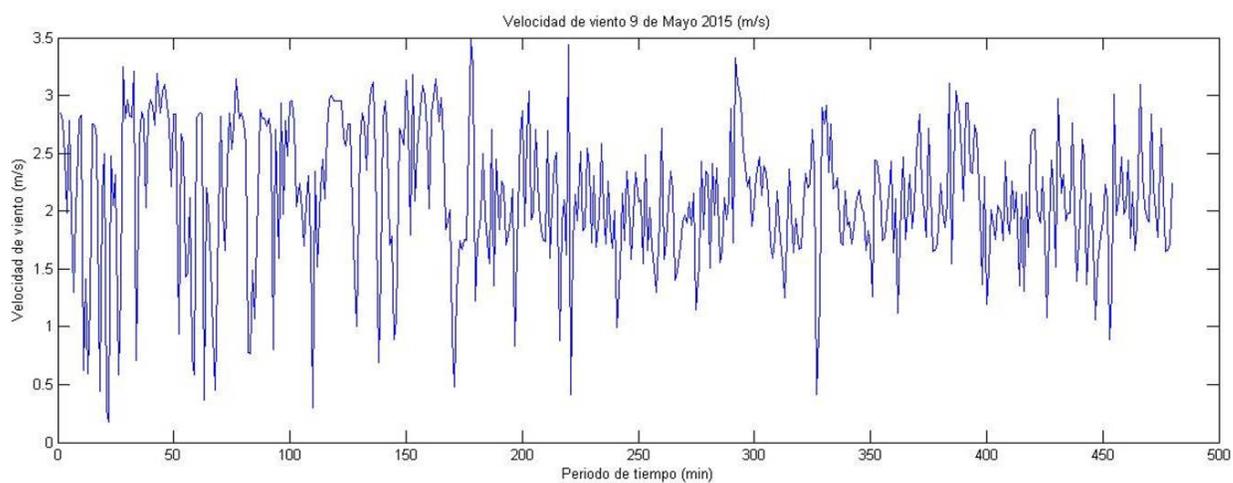


Figura 5.21 Velocidad de viento: 09 de Mayo 2015.

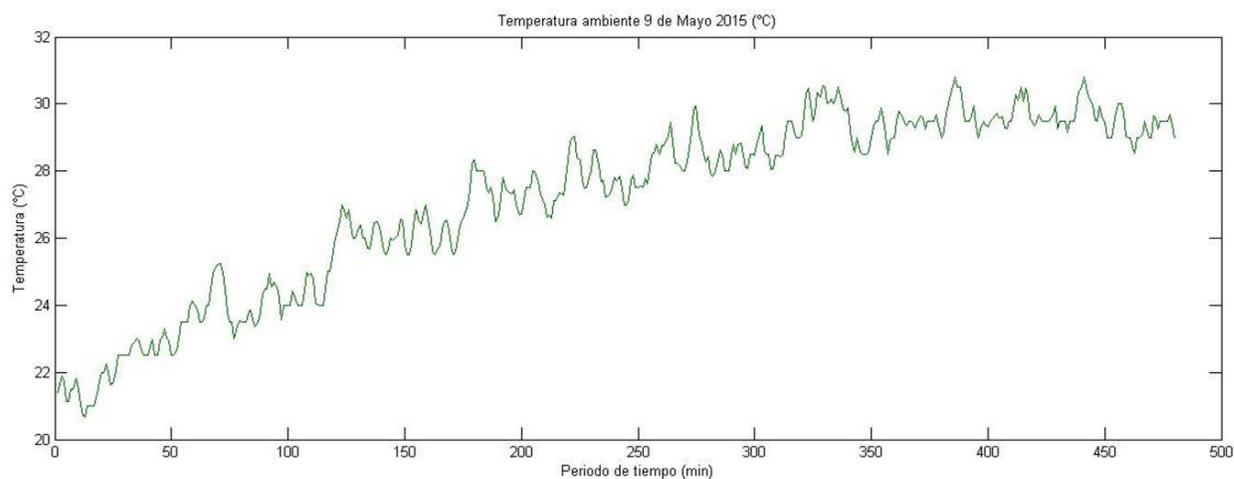


Figura 5.22 Temperatura ambiente: 09 de Mayo 2015.

La Fig. 5.23 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 5.24 la temperatura de salida del colector. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

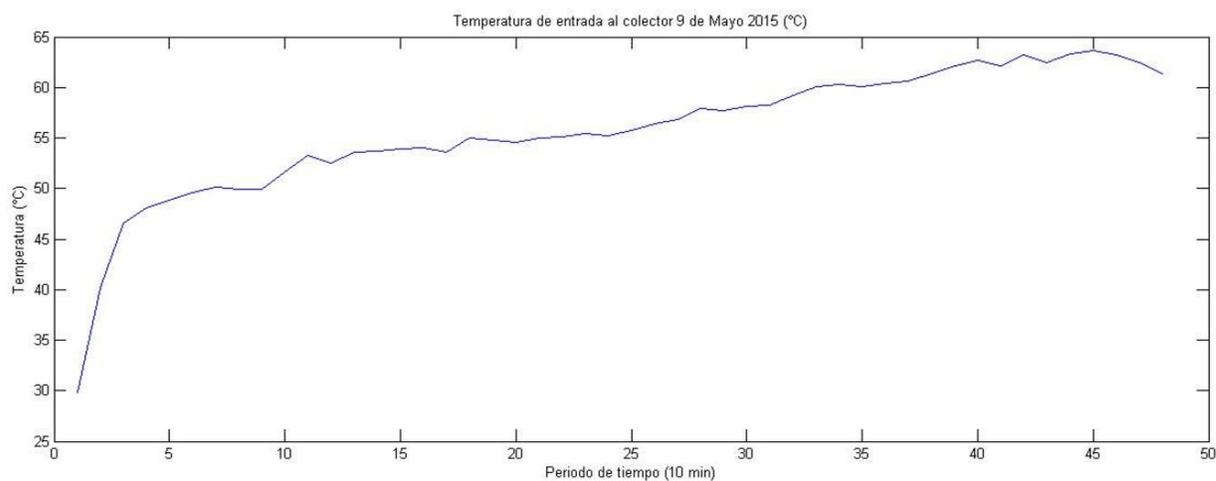


Figura 5.23 Temperatura entrada al colector: 09 de Mayo 2015.

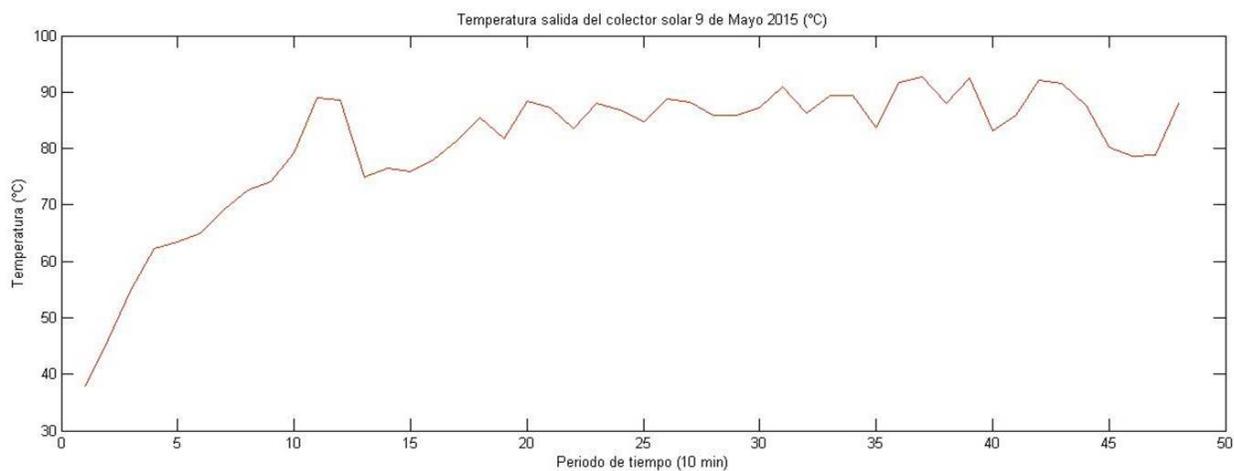


Figura 5.24 Temperatura salida del colector: 09 de Mayo 2015.

La Fig. 5.25 muestra el gradiente de operación del sistema.

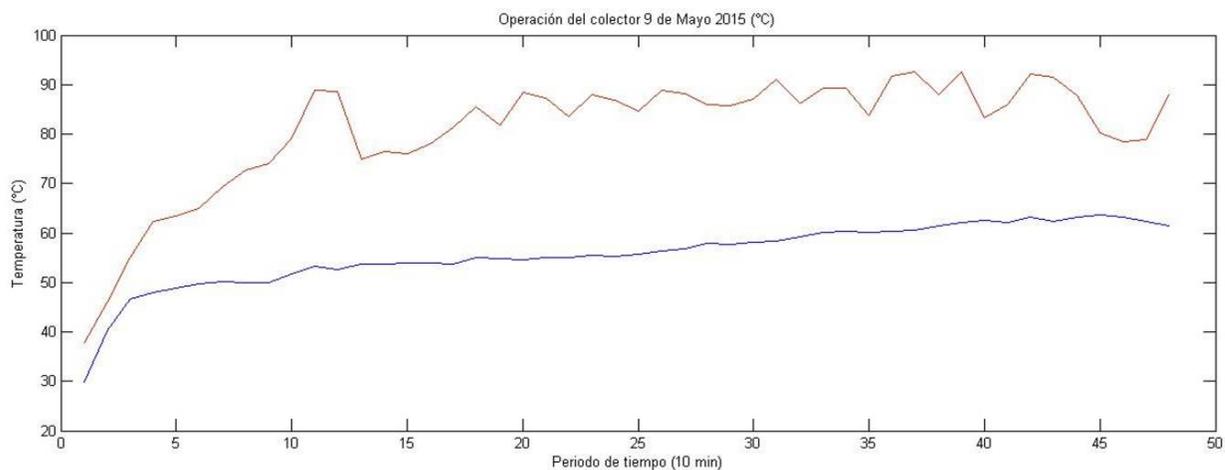


Figura 5.25 Operación del colector: 09 de Mayo 2015.

En la Tabla 5.3 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 09 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
09-05-15 9:00	194.186	21.531	2.374	29.805	37.845	36.766
09-05-15 9:10	210.463	21.152	1.705	40.192	46.075	36.095
09-05-15 9:20	248.278	22.161	1.821	46.605	55.092	37.604
09-05-15 9:30	280.791	22.680	2.566	48.044	62.243	36.866
09-05-15 9:40	262.185	22.848	2.855	48.859	63.498	36.680
09-05-15 9:50	307.590	23.430	1.818	49.641	64.936	37.699
09-05-15 10:00	333.083	24.232	1.793	50.176	69.316	38.768
09-05-15 10:10	336.198	23.894	2.572	49.926	72.615	38.450
09-05-15 10:20	346.761	23.775	1.966	49.873	74.131	37.823
09-05-15 10:30	390.665	24.302	2.365	51.680	79.197	38.853
09-05-15 10:40	381.770	24.390	2.013	53.226	88.925	38.345
09-05-15 10:50	379.181	24.659	2.516	52.540	88.561	39.129
09-05-15 11:00	451.841	26.474	2.366	53.623	74.894	41.859
09-05-15 11:10	469.451	26.106	2.445	53.696	76.424	40.832
09-05-15 11:20	457.293	25.977	2.206	53.913	75.995	40.949
09-05-15 11:30	494.076	26.333	2.607	54.001	78.022	41.171
09-05-15 11:40	494.076	26.014	2.403	53.608	81.335	40.068
09-05-15 11:50	564.035	26.819	1.926	55.001	85.530	41.269
09-05-15 12:00	573.105	27.470	1.981	54.745	81.688	42.597
09-05-15 12:10	586.690	27.250	2.013	54.564	88.337	42.632
09-05-15 12:20	585.921	27.478	2.157	54.987	87.321	42.440
09-05-15 12:30	587.261	27.228	2.122	55.111	83.591	42.822
09-05-15 12:40	589.410	28.218	1.907	55.429	88.066	43.669
09-05-15 12:50	598.350	27.787	2.007	52.253	86.853	42.729
09-05-15 13:00	609.365	27.487	1.874	55.788	84.713	42.368
09-05-15 13:10	629.761	28.161	1.895	56.452	88.783	43.903
09-05-15 13:20	577.646	28.570	1.834	56.824	88.174	45.012
09-05-15 13:30	584.901	28.903	1.962	57.920	85.859	46.254
09-05-15 13:40	561.711	28.146	2.050	57.728	85.822	45.217
09-05-15 13:50	587.161	28.500	2.448	58.081	87.142	45.629
09-04-15 14:00	554.083	28.591	2.101	58.270	90.985	45.979
09-05-15 14:10	558.538	29.075	1.758	59.226	86.171	46.443
09-05-15 14:20	630.486	30.127	2.114	60.070	89.281	54.295
09-05-15 14:30	547.101	30.042	2.217	60.305	89.373	68.568
09-05-15 14:40	544.991	28.721	1.895	60.086	83.689	68.526
09-05-15 14:50	562.823	29.224	2.004	60.379	91.636	68.371
09-05-15 15:00	565.868	29.493	2.027	60.642	92.662	67.412
09-05-15 15:10	568.855	29.450	2.094	61.408	88.029	67.165
09-05-15 15:20	561.236	30.105	2.339	62.179	92.559	67.944
09-05-15 15:30	503.265	29.449	2.276	62.644	83.209	67.160
09-05-15 15:40	528.525	29.514	1.908	62.162	85.887	67.480
09-05-15 15:50	507.063	29.993	2.038	63.216	92.139	68.136
09-05-15 16:00	459.74	29.563	1.972	62.423	91.487	67.548
09-05-15 16:10	438.986	29.691	2.144	63.279	87.650	68.213
09-05-15 16:20	433.885	29.955	1.846	63.657	80.219	68.066
09-05-15 16:30	409.460	29.391	2.012	63.181	78.552	67.164
09-05-15 16:40	425.361	28.999	2.120	62.406	88.850	53.483
09-05-15 16:50	568.855	29.450	2.094	61.408	88.029	67.165

Tabla 5.3 Variables medidas del sistema: 09 de Mayo 2015.

Resultados del día 10 de Mayo de 2015

La Fig. 5.26 representa la irradiancia, la Fig. 5.27 la velocidad de viento y la Fig. 5.28 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 10 de Mayo 2015.

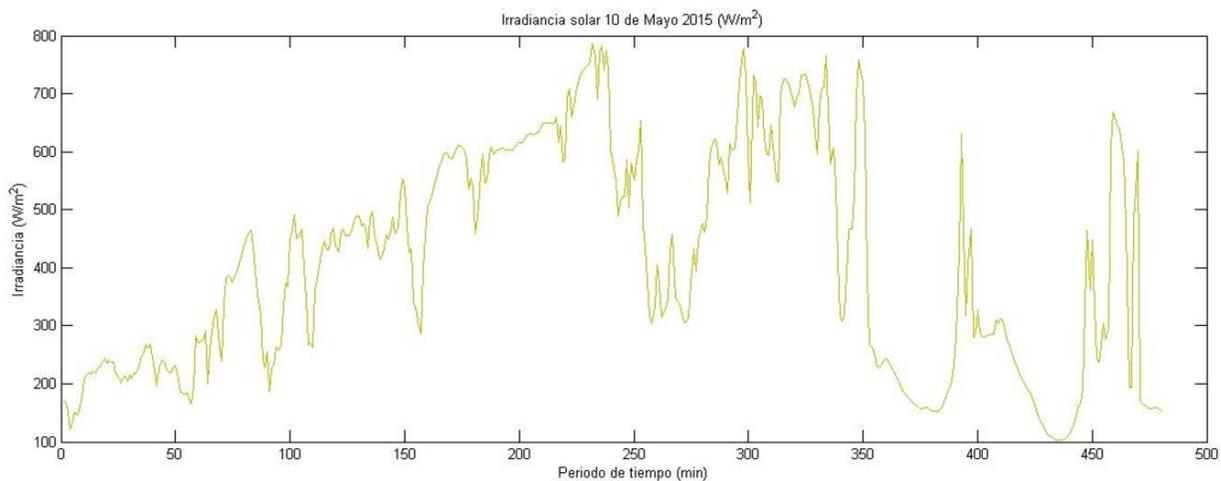


Figura 5.26 Irradiancia: 10 de Mayo 2015.

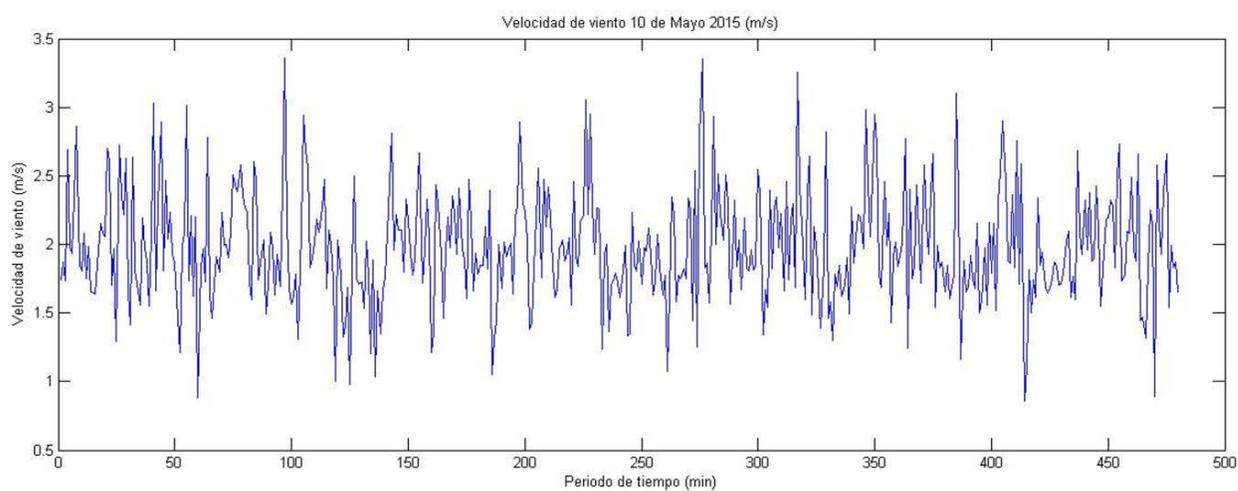


Figura 5.27 Velocidad de viento: 10 de Mayo 2015.

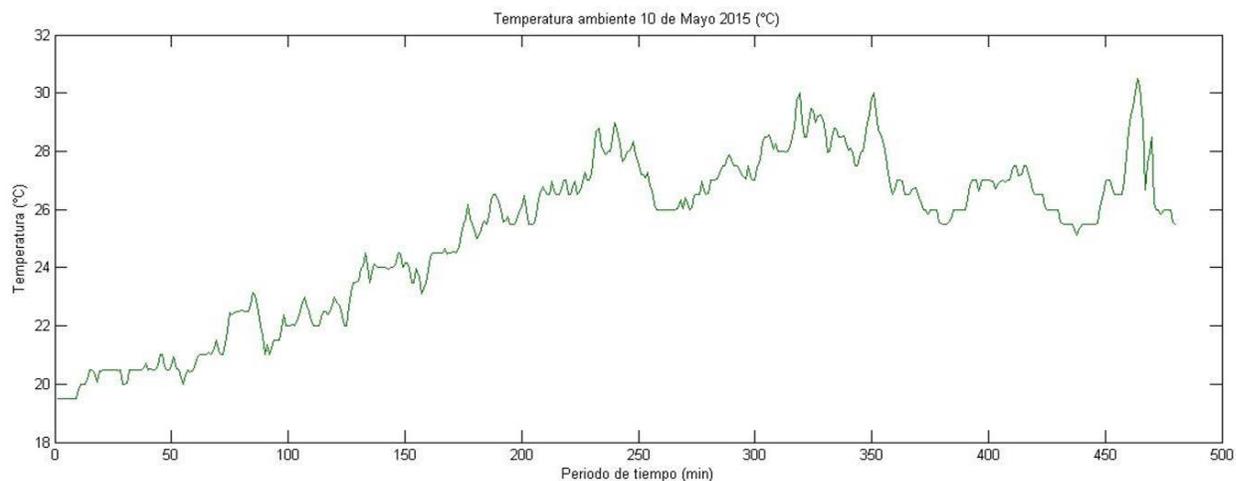


Figura 5.28 Temperatura ambiente: 10 de Mayo 2015.

La Fig. 5.29 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 5.30 la temperatura de salida del colector y la Fig. 5.31 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

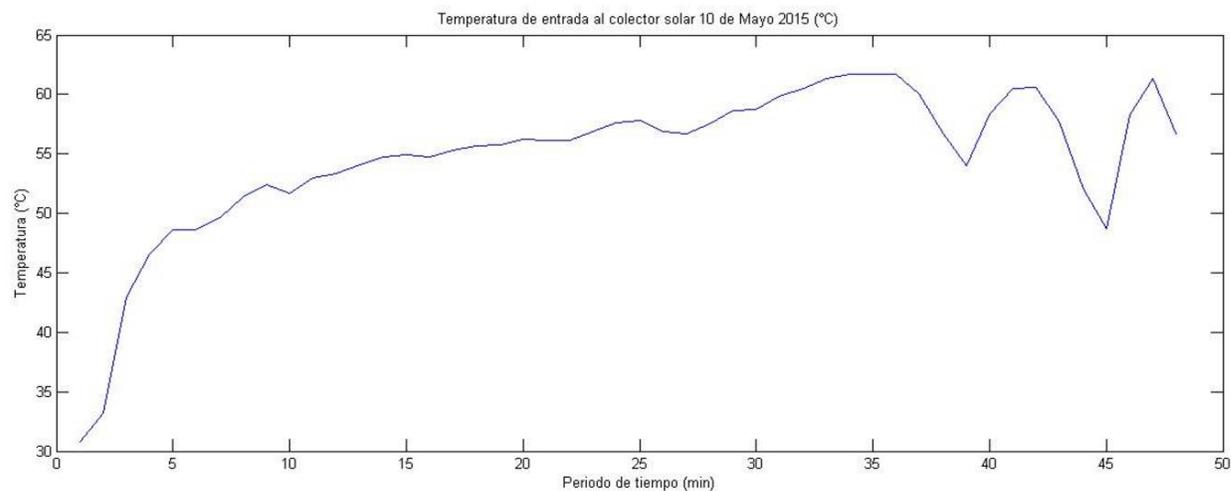


Figura 5.29 Temperatura entrada al colector: 10 de Mayo 2015.

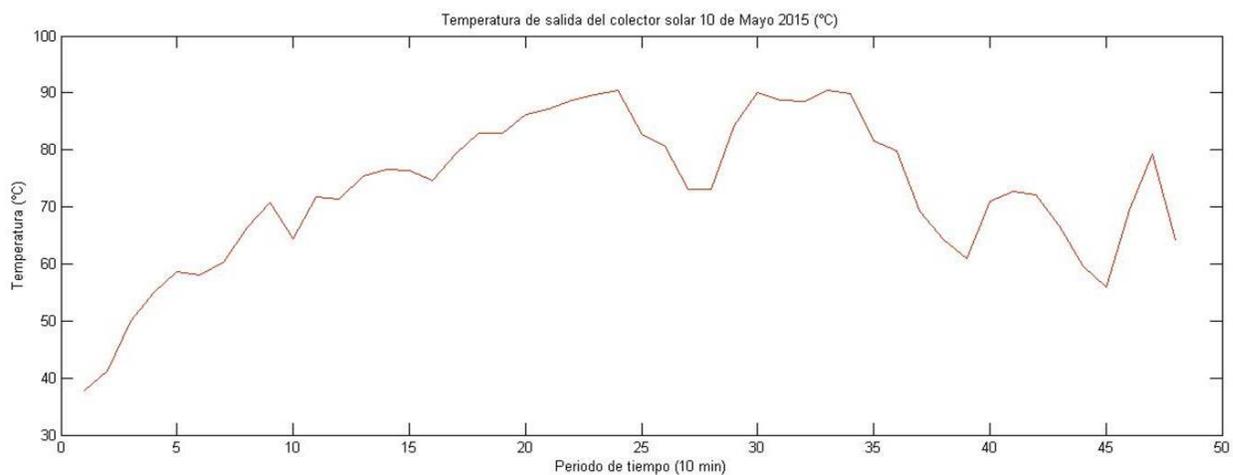


Figura 5.30 Temperatura salida del colector: 10 de Mayo 2015.

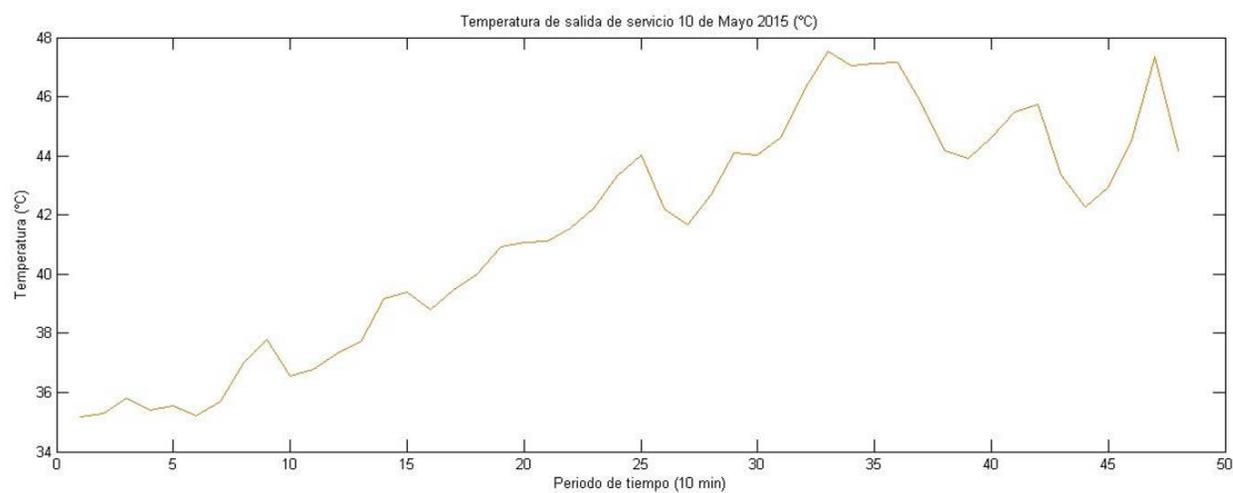


Figura 5.31 Temperatura salida servicio del tanque: 10 de Mayo 2015.

La Fig. 5.32 muestra el gradiente de operación del sistema.

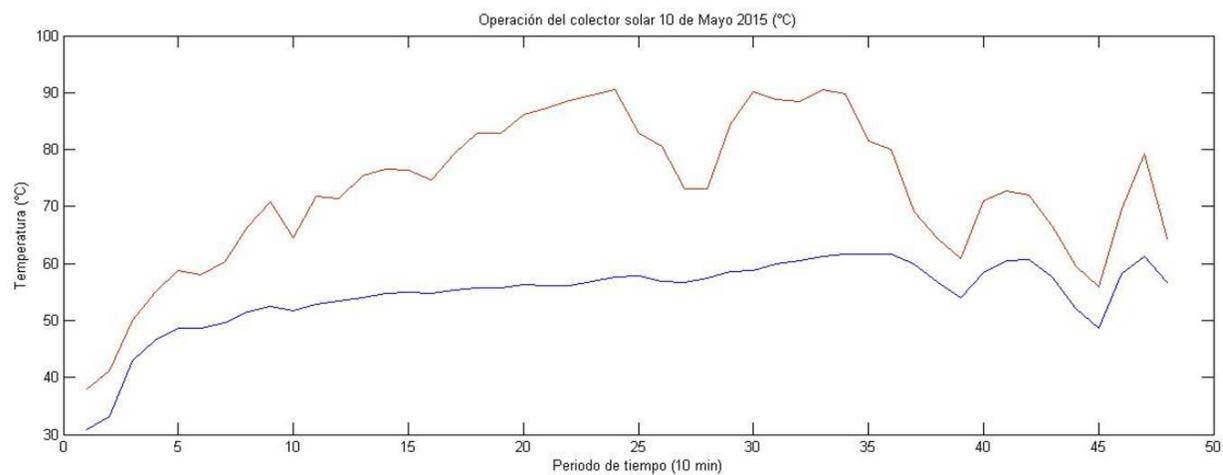


Figura 5.32 Operación del colector: 10 de Mayo 2015.

En la Tabla 5.4 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 10 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
10-05-15 9:00	158.246	19.534	2.082	30.832	37.879	35.170
10-05-15 9:10	225.895	20.253	1.890	33.226	41.247	35.290
10-05-15 9:20	219.061	20.390	2.183	42.940	49.935	35.805
10-05-15 9:30	241.991	20.480	1.880	46.571	54.907	35.382
10-05-15 9:40	224.723	20.634	2.223	48.647	58.702	35.562
10-05-15 9:50	203.983	20.450	1.854	48.587	58.043	35.209
10-05-15 10:00	273.511	21.081	1.906	49.670	60.387	35.704
10-05-15 10:10	392.718	22.001	2.252	51.431	66.398	37.001
10-05-15 10:20	361.135	22.365	1.953	52.382	70.840	37.781
10-05-15 10:30	296.245	21.637	2.051	51.695	64.506	36.560
10-05-15 10:40	387.508	22.401	2.076	52.941	71.833	36.798
10-05-15 10:50	426.420	22.391	1.956	53.377	71.376	37.310
10-05-15 11:00	464.436	22.819	1.669	54.053	75.412	37.698
10-05-15 11:10	455.928	24.011	1.589	54.749	76.577	39.152
10-05-15 11:20	484.185	24.116	2.202	54.932	76.335	39.409
10-05-15 11:30	394.518	23.654	1.988	54.762	74.669	38.790
10-05-15 11:40	567.598	24.505	2.018	55.286	79.329	39.457
10-05-15 11:50	583.445	25.275	1.982	55.665	82.850	39.981
10-05-15 12:00	561.620	25.820	1.752	55.740	82.961	40.936
10-05-15 12:10	606.281	25.710	2.144	56.222	86.116	41.064
10-05-15 12:20	630.240	26.101	2.019	56.155	87.195	41.102
10-05-15 12:30	633.835	26.688	1.874	56.136	88.664	41.545
10-05-15 12:40	714.820	26.889	2.301	56.844	89.662	42.232
10-05-15 12:50	741.496	28.291	1.801	57.580	90.460	43.326
10-05-15 13:00	540.745	28.019	1.773	57.775	82.823	44.039
10-05-15 13:10	448.648	26.635	1.864	56.849	80.621	42.210
10-05-15 13:20	359.836	26.077	1.828	56.714	73.075	41.681
10-05-15 13:30	383.518	26.443	2.101	57.521	73.124	42.683
10-05-15 13:40	566.730	27.378	2.230	58.664	84.372	44.094
10-05-15 13:50	659.575	27.255	1.954	58.726	90.104	44.022
10-04-15 14:00	645.531	28.174	1.994	59.888	88.801	44.608
10-05-15 14:10	664.683	28.622	2.128	60.471	88.448	46.278
10-05-15 14:20	691.783	29.015	1.982	61.342	90.538	47.523
10-05-15 14:30	599.695	28.389	1.720	61.661	89.789	47.064
10-05-15 14:40	538.680	28.357	2.321	61.720	81.533	47.118
10-05-15 14:50	296.766	27.984	2.006	61.709	79.924	47.152
10-05-15 15:00	205.711	26.717	2.019	59.987	69.172	45.835
10-05-15 15:10	159.993	25.910	2.058	56.660	64.303	44.157
10-05-15 15:20	180.696	25.822	1.876	54.025	60.909	43.895
10-05-15 15:30	393.485	26.882	1.807	58.386	70.988	44.603
10-05-15 15:40	291.333	26.974	2.180	60.486	72.771	45.462
10-05-15 15:50	250.403	27.176	1.802	60.615	72.075	45.742
10-05-15 16:00	157.493	26.160	1.769	57.710	66.653	43.357
10-05-15 16:10	106.568	25.433	1.991	52.012	59.581	42.282
10-05-15 16:20	252.790	25.809	2.040	48.735	55.987	42.944
10-05-15 16:30	389.006	27.029	2.184	58.290	69.426	44.549
10-05-15 16:40	495.738	28.920	1.786	61.350	79.199	47.359
10-05-15 16:50	159.993	25.910	2.058	56.660	64.303	44.157

Tabla 5.4 Variables medidas del sistema: 10 de Mayo 2015.

Resultados del día 26 de Mayo de 2015

La Fig. 5.33 representa la irradiancia, la Fig. 5.34 la velocidad de viento y la Fig. 5.35 la temperatura ambiente obtenidas a cada minuto para el día 26 de Mayo 2015.

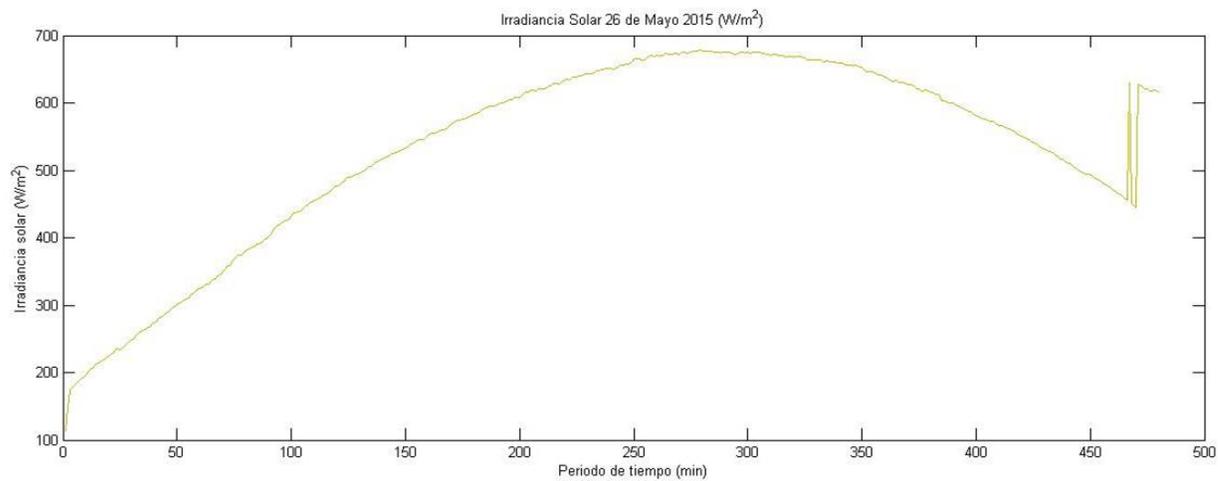


Figura 5.33 Irradiancia: 26 de Mayo 2015.

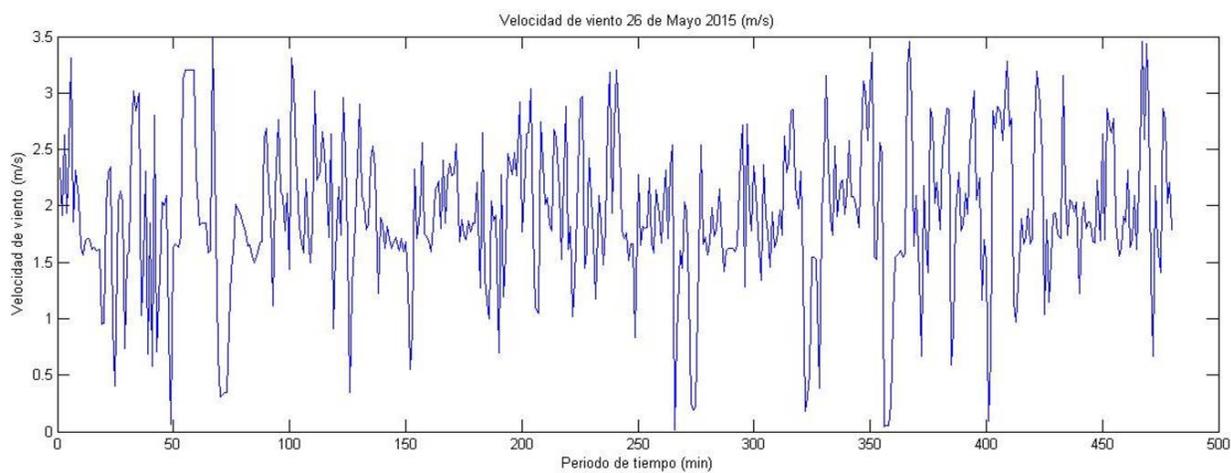


Figura 5.34 Velocidad de viento: 26 de Mayo 2015.

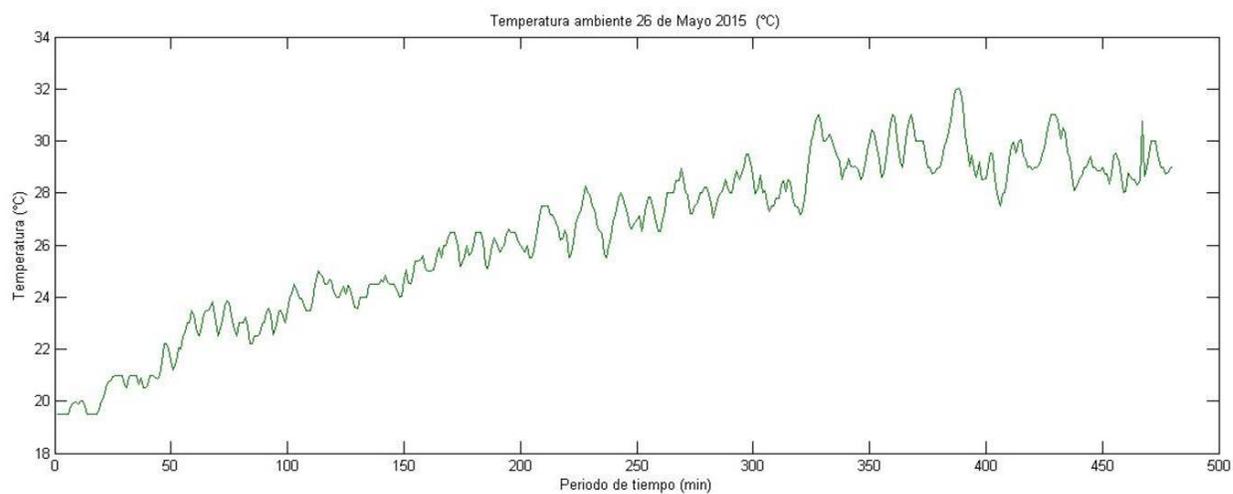


Figura 5.35 Temperatura ambiente: 26 de Mayo 2015.

La Fig. 5.36 representa la temperatura de entrada al colector, la Fig. 5.37 la temperatura de salida del colector y la Fig. 5.38 la temperatura de salida de servicio del tanque. Todas estas variables son graficadas a cada diez minutos.

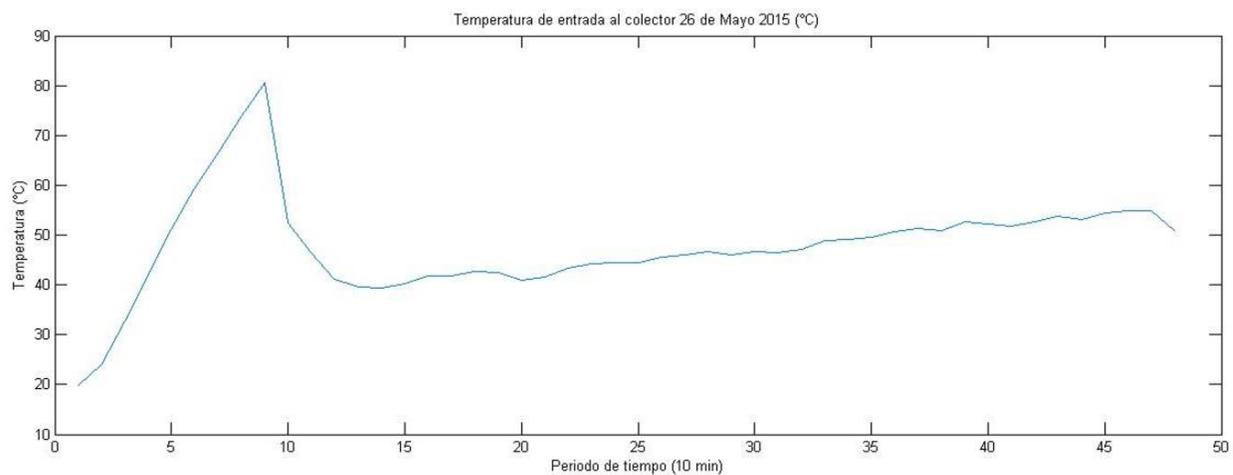


Figura 5.36 Temperatura entrada al colector: 26 de Mayo 2015.

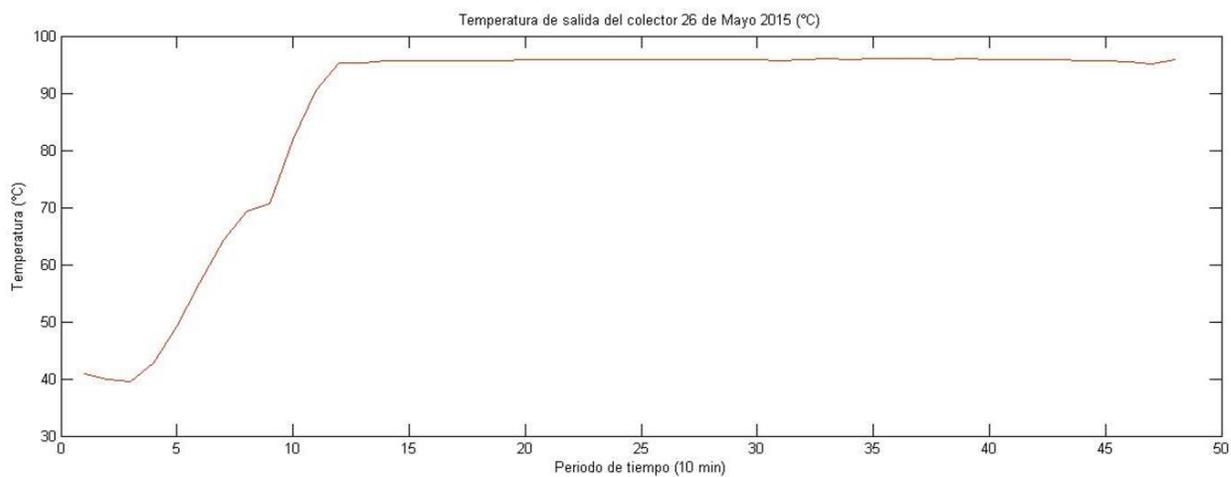


Figura 5.37 Temperatura salida del colector: 26 de Mayo 2015.

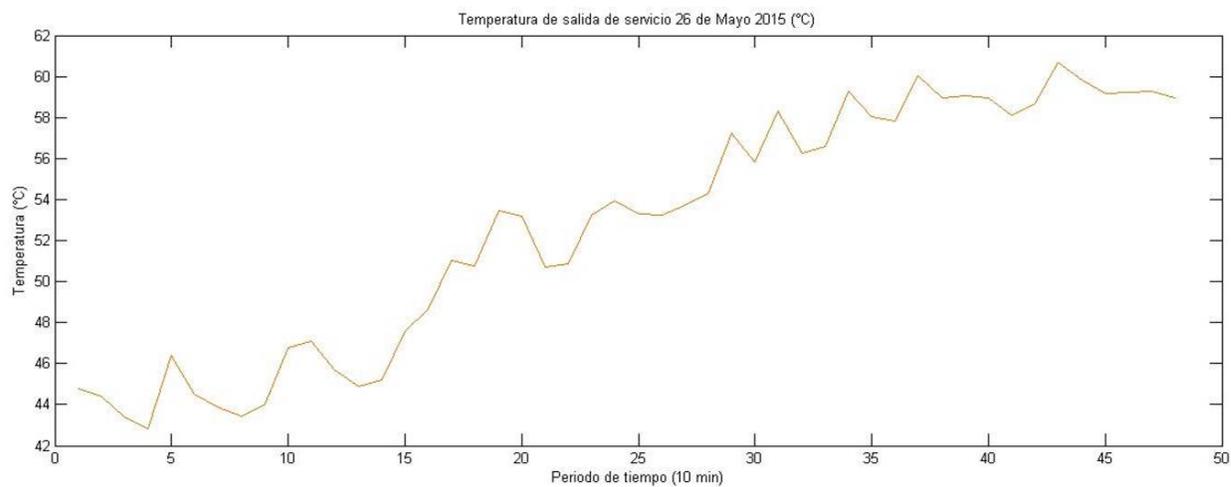


Figura 5.38 Temperatura salida servicio del tanque: 26 de Mayo 2015.

La Fig. 5.39 muestra el gradiente de operación del sistema.

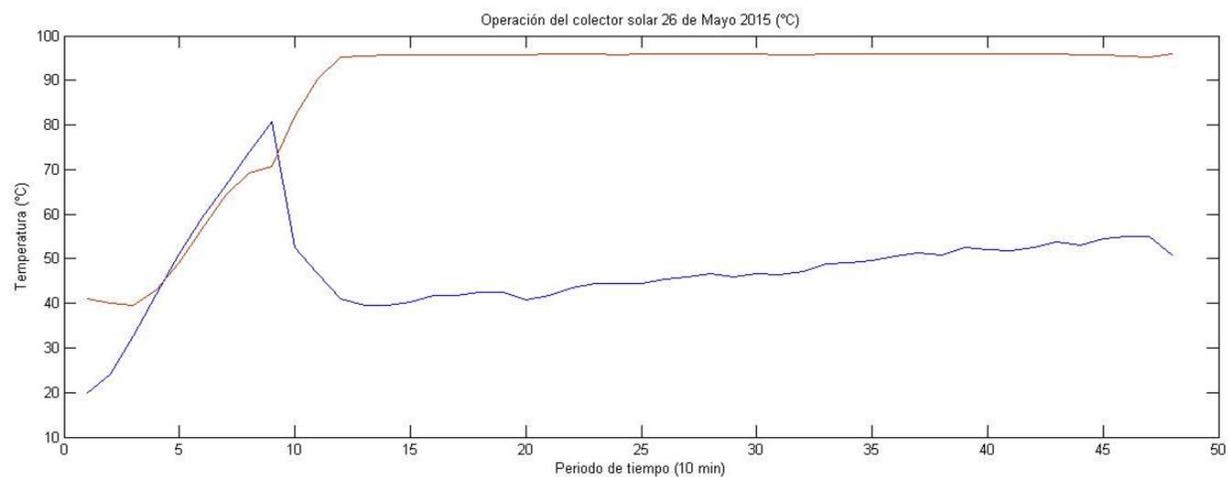


Figura 5.39 Operación del colector: 26 de Mayo 2015.

En la Tabla 5.5 se observan los valores que cuantifican las señales censadas el día 26 de Mayo 2015.

Fecha y Hora	Rd (W/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Tec (°C)	Tsc (°C)	Tss (°C)
DD-MM-AA HH:MM	Irradiancia	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Temperatura
26-05-15 9:00	175.130	19.655	2.247	19.918	40.957	44.783
26-05-15 9:10	213.313	19.707	1.503	24.155	39.975	44.377
26-05-15 9:20	237.321	20.770	1.650	32.724	39.491	43.401
26-05-15 9:30	262.845	20.749	2.041	41.938	42.872	42.832
26-05-15 9:40	288.593	21.430	1.421	51.111	49.172	46.415
26-05-15 9:50	313.585	22.473	2.643	59.220	56.793	44.491
26-05-15 10:00	337.325	23.137	1.742	66.640	64.354	43.867
26-05-15 10:10	367.946	23.192	1.272	73.985	69.254	43.431
26-05-15 10:20	391.181	22.703	1.830	80.655	70.663	44.044
26-05-15 10:30	420.458	23.244	1.960	52.482	81.882	46.754
26-05-15 10:40	444.743	23.890	2.126	46.548	90.421	47.109
26-05-15 10:50	465.858	24.556	2.165	41.073	95.260	45.666
26-05-15 11:00	488.681	24.073	1.926	39.618	95.358	44.866
26-05-15 11:10	507.453	24.314	1.997	39.452	95.625	45.231
26-05-15 11:20	525.685	24.447	1.678	40.329	95.590	47.602
26-05-15 11:30	543.303	25.083	1.647	41.806	95.665	48.653
26-05-15 11:40	559.226	25.688	2.070	41.768	95.722	51.028
26-05-15 11:50	576.296	25.833	1.917	42.606	95.760	50.757
26-05-15 12:00	591.456	25.970	1.616	42.492	95.693	53.451
26-05-15 12:10	603.668	26.231	2.160	40.849	95.823	53.196
26-05-15 12:20	617.293	26.299	2.150	41.638	95.880	50.713
26-05-15 12:30	627.408	26.838	2.139	43.423	95.896	50.873
26-05-15 12:40	639.160	27.076	1.960	44.344	95.915	53.216
26-05-15 12:50	648.103	26.486	2.069	44.433	95.806	53.917
26-05-15 13:00	656.106	27.265	1.892	44.361	95.902	53.289
26-05-15 13:10	666.633	27.151	1.833	45.496	95.849	53.265
26-05-15 13:20	671.466	28.079	1.687	46.002	95.925	53.712
26-05-15 13:30	675.720	27.789	1.288	46.738	95.861	54.306
26-05-15 13:40	675.801	27.876	1.729	45.990	95.850	57.223
26-05-15 13:50	674.303	28.852	2.016	46.776	95.927	55.846
26-04-15 14:00	673.760	27.871	1.783	46.443	95.748	58.281
26-05-15 14:10	669.533	27.965	2.314	47.047	95.815	56.242
26-05-15 14:20	666.013	29.555	1.171	48.900	95.983	56.567
26-05-15 14:30	661.515	29.515	2.211	49.108	95.911	59.279
26-05-15 14:40	655.280	29.118	2.481	49.577	95.977	58.033
26-05-15 14:50	644.021	29.821	1.285	50.628	95.978	57.838
26-05-15 15:00	631.598	30.159	2.111	51.367	95.980	60.035
26-05-15 15:10	620.693	29.294	1.894	50.862	95.896	58.960
26-05-15 15:20	605.791	30.897	2.021	52.647	96.009	59.046
26-05-15 15:30	589.763	29.067	2.105	52.165	95.879	58.972
26-05-15 15:40	573.595	28.591	2.351	51.809	95.849	58.099
26-05-15 15:50	558.573	29.494	1.699	56.623	95.904	58.711
26-05-15 16:00	540.371	30.030	2.070	53.728	95.850	60.705
26-05-15 16:10	520.788	29.426	1.973	53.026	95.768	59.800
26-05-15 16:20	499.735	28.997	1.929	54.404	95.649	59.166
26-05-15 16:30	480.886	28.735	2.152	54.940	95.446	59.243
26-05-15 16:40	475.213	28.905	2.416	54.905	95.166	59.264
26-05-15 16:50	620.693	29.294	1.894	50.862	95.896	58.960

Tabla 5.5 Variables medidas del sistema: 26 de Mayo 2015.

Comparación de los resultados de la etapa de control

Considerando los días de evaluación del sistema termosifónico con el sistema de control se procede a presentarlos en la Tabla 5.6, que concentra los resultados alcanzados. Todos los valores aquí presentados llevaron un post-procesamiento en MatLab con el objeto de sintetizar el cálculo realizado, y se ordenan los valores según corresponda el día de evaluación.

Evaluación	H (MJ/m ²)	Ta (°C)	Vv (m/s)	Ti (°C)	Tf (°C)	Qu (MJ)	η (%)
No	Irradiación	Temperatura	Velocidad viento	Temperatura	Temperatura	Calor útil	Eficiencia
1 07-05-2015	11.979	25.769	1.972	35.3	66.205	19.4	93.54
2 08-05-2014	12.048	26.151	2.080	18.44	68.001	31.118	N/A
3 09-05-2015	13.825	27.08	2.11	31.03	62.50	19.76	82.53
4 10-05-2015	11.813	25.126	1.982	36.62	65.03	17.84	87.21
5 26-05-2015	15.332	26.353	1.922	41.01	76.845	22.507	84.77

Tabla 5.6 Parámetros cuantificados del calentador solar con un sistema de control.

Conclusiones y discusión de los resultados

En esta sección se presenta la discusión de los resultados de la simulación del sistema termosifónico y el calentador solar de placa plana Axol instrumentado, además de presentar las conclusiones de los resultados alcanzados. Por último se concentran las recomendaciones a tomar a cabo para la continuidad del proyecto de investigación.

Resultados de simulación

La simulación del modelo del calentador solar sirvió para identificar las curvas características de operación del sistema, teniendo en cuenta condiciones ideales. Con la simulación se buscó observar la tendencia de crecimiento de las curvas de temperatura en el calentador solar. Estas curvas definen el funcionamiento del tanque y del colector, debido al proceso de transferencia de energía con base a sus ecuaciones características en cada elemento.

Para el modelo A, la temperatura en el tanque creció exponencialmente en función del tiempo alcanzando un valor superior a los 38 °C. Es importante decir que este valor no se alcanzó en el punto máximo de irradiancia, si no hasta que el sistema logró el equilibrio térmico y esto sucedió cuando el flujo de calor en el colector fue mayor que el flujo de calor por irradiancia.

Por otra parte, la temperatura a la entrada del colector creció con la misma tendencia, pero está siempre tuvo una magnitud menor. Esto se originó por la estratificación de temperaturas a lo largo del tanque de almacenamiento, es por eso que en la parte más alta del tanque la temperatura es mayor a diferencia de la parte mas baja. Con base a estas consideraciones se observó que el gradiente de temperatura promedio en el tanque fue de 14 °C, como se observó en la Fig. 4.14.

Conforme a los valores alcanzados en la simulación del modelo A, se logró un valor de eficiencia térmica máxima del 52.3 %, teniendo en cuenta que el flujo másico considerado fue de $0.015 \text{ kg/s} - m^2$. Para el caso del modelo A modificado, se observa la influencia que tiene la irradiancia sobre la temperatura que logró el sistema termosifónico, es por eso que se observó una reducción de al menos un 40 %, comparándolo con el modelo A.

Para el modelo B, se observó una reducción de la temperatura del agua en el tanque, esto se debió al cambio del flujo másico en la simulación e influyo directamente en la reducción del gradiente de temperatura. Entonces el gradiente de temperatura promedio alcanzado para el modelo B fue de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, y esto influyo en la reducción de la estratificación de temperaturas en el tanque. La eficiencia térmica para el modelo B fue de 53

Para el modelo C, se logró reducir en mayor manera el gradiente de temperatura, lo cual también provoco una reducción en la magnitud de la temperatura del agua en el tanque. La magnitud del gradiente de temperatura fue de $8 \text{ }^\circ\text{C}$ y su eficiencia térmica fue de 55.8 %. En la Fig. 4.26 se observa como la temperatura en el tanque de almacenamiento es más homogénea.

Por otra parte, se simulo la operación del calentador solar considerando una temperatura inicial del fluido, con base al modelo termosifón. Con estas modificaciones se logró observar que las temperaturas tanto en el tanque como a la entrada del colector superan los $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Además el gradiente de temperatura se logró reducir a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ en promedio, y la temperatura del agua en el tanque fue más homogénea. La eficiencia que alcanzo este modelo de simulación fue de 58.13 %, considerando que el flujo másico fue de $0.05 \text{ kg/s} - m^2$.

Resultados del sistema termosifónico instrumentado

Para poder evaluar el rendimiento térmico y las curvas de operación del calentador solar Axol, tuvo que ser instrumentado con sensores que monitorearan las variables como temperatura, irradiancia y velocidad de viento. El proceso de evaluación fue de 30 pruebas, de las cuales solo se consideraron 10 debido a que el sistema es dependiente de las condiciones climatológicas, donde la de mayor influencia es la irradiación solar.

En las pruebas realizadas se logró observar que las curvas de irradiancia alcanzaron valores superiores a los 900 W/m^2 , además de eso nos pudimos dar cuenta de la susceptibilidad de esta variable a los cambios de magnitud, por efecto de la nubosidad.

Por otra parte, se observó también la tendencia de la velocidad del viento en cada evaluación, debido a que esta influye directamente en las pérdidas de energía por convección entre el colector y el medio ambiente. Por lo tanto, también fue importante conocer la temperatura ambiente durante la evaluación, pues de igual forma influye en las pérdidas de calor.

Durante las evaluaciones del calentador Axol, la temperatura ambiente promedio alcanzada fue de $24 \text{ }^\circ\text{C}$, y la velocidad promedio de 1.5 m/s . En la Tabla 4.17 se observan los valores promedio alcanzados por las 10 evaluaciones. Considerando esta información se logró identificar la influencia que hay en el decremento de la eficiencia del sistema a causa de las pérdidas convectivas.

Considerando la evaluación del día 30 de Marzo del 2015, se observa que el sistema alcanzó una eficiencia térmica del 79.93 %. Esto nos indica que hubo un alto nivel de irradiación y a pesar de que la velocidad de viento promedio fue alta no tuvo mayor influencia sobre el sistema. Por otra parte, también se observó que la temperatura inicial del agua que entra al calentador solar fue relativamente baja y es por eso que el colector logró absorber la mayor cantidad de energía durante el período de evaluación, viéndose así reflejado en la magnitud de la temperatura en el tanque al final del proceso.

En el caso de la evaluación del día 01 de Abril de 2015, se observó que la eficiencia térmica del sistema fue la más baja, esto se debió a la alta magnitud de la temperatura del agua a la entrada del colector, y a pesar de que la irradiación de ese día fue alta, el calentador solar no logró absorber en su totalidad la energía irradiante del sol.

Por otra parte el mejor resultado obtenido de las 10 evaluaciones, fue el del día 02 de Abril de 2015, donde la eficiencia térmica alcanzada fue de 84.58 %. Esto se logró gracias a que se conjugo una alta magnitud de irradiación solar y que la temperatura del agua al inicio del proceso fue baja, por lo tanto, el colector solar logro absorber la mayor cantidad de energía posible.

Es también importante mencionar que las curvas de tendencia de la temperatura del agua a la entrada y a la salida del colector, son afectadas directamente por la irradiancia y velocidad de viento, es por eso la variabilidad de su magnitud.

Resultados del calentador solar con sistema de control

Para evaluar el rendimiento térmico del calentador solar Axol con el dispositivo de control, se monitorearon las variables como temperatura, irradiancia y velocidad de viento. El proceso de evaluación fue de 10 pruebas, de las cuales solo se consideraron 5 debido a las condiciones climatológicas adversas.

Las curvas de temperatura del agua en el tanque y en el colector se observaron más estables, aun con variabilidad en su magnitud pero en menor proporción, esto se supone que sucede por el efecto que causa el controlador del flujo de fluido. Además se puede observar como el gradiente de temperatura reduce en magnitud durante el periodo de evaluación.

Por otra parte se puede observar que el rendimiento térmico del calentador solar con el sistema de control se encuentra por encima del 80 %, a pesar de que los niveles de irradiación no fueron los más altos. El controlador logro recircular el fluido en el sistema con esto el gradiente generado tuvo un decremento y de esta forma se logró absorber la mayor energía posible en el colector.

Conclusiones

En conclusión el trabajo cumple con el objetivo de evaluar el rendimiento térmico del calentador solar con un dispositivo de control. En la Tabla 4.17 y la Tabla 5.6 se muestran los resultados de la evaluación térmica del sistema, en cada una se muestran los valores alcanzados de irradiación, temperatura del fluido y la eficiencia térmica. Esta información se logró obtener con base al desarrollo del controlador e instrumentación del propio calentador solar. Es importante mencionar también que esta información obtenida sirvió para observar la respuesta del controlador.

Se concluye que mediante el sistema de control fue posible incrementar el rendimiento térmico del sistema. Se llega a esta conclusión, en base a la comparación entre el rendimiento térmico del calentador solar sin control y la eficiencia térmica alcanzada por el sistema con el controlador. Es importante mencionar, que al usar el controlador las condiciones climatológicas no fueron las mejores, a diferencia de las otras evaluaciones sin controlador. A pesar de esto el sistema respondió de la manera esperada, esto se logró observar con las curvas de operación del calentador solar, donde se observa una reducción del gradiente de temperatura y mayor estabilidad en la magnitud de temperatura monitoreada.

Es importante mencionar que la implementación del controlador fue para buscar tener un flujo de agua homogéneo el cual pasa a través del colector, teniendo en cuenta que la eficiencia de los calentadores solares se reduce si el flujo no es uniformemente distribuido a través del colector.

Finalmente se concluye que el controlador de flujo de agua implementado en el calentador solar de placa plana logró el objetivo de incrementar la eficiencia térmica en el sistema, como se había descrito en la hipótesis. El calentador solar de placa plana alcanzó un rendimiento térmico superior al 80 %, durante el uso del controlador, a pesar de las adversidades en las condiciones climatológicas.

Por eso se consideró que el controlador deberá mantener un flujo de fluido uniforme en su paso a través del colector solar, y esto servirá para incrementar el factor de remoción de calor, el cual influye directamente en la eficiencia térmica.

Además se logró observar que si la temperatura del agua al ingreso del colector se mantiene lo más baja posible, el colector solar logra absorber la mayor cantidad de energía, reduciendo así las pérdidas por convección en el colector. Es por eso que al incrementar la estratificación de temperaturas a lo largo del tanque de almacenamiento mejora la operación del sistema termosifónico, debido a que una alta estratificación de temperaturas describe que el fluido caliente se mantendrá en la parte más alta y el fluido frío estará circulando siempre a través del colector.

Recomendaciones

- Es recomendable evaluar el calentador solar por un mayor tiempo, además de considerar evaluar la operación nocturna.
- Se recomienda evaluar el calentador solar durante las cuatro estaciones del año, con el objetivo de observar su comportamiento a diferentes condiciones climatológicas.
- Se recomienda tener dos equipos de evaluación, para poder hacer la experimentación con un sistema sin control y el calentador con control a las mismas condiciones ambientales.
- Se recomienda implementar un circuito de recirculación con el objeto de determinar la constante de absorptividad y el coeficiente de pérdidas del sistema conforme se especifica en la Norma Mexicana NMX-ES-004-NORMEX-2010.
- Se recomienda evaluar el sistema en operación normal, drenando el tanque al menos un tercio de su capacidad por las mañanas.

Trabajos a futuro

- Desarrollar una planta solar de pruebas, con el objeto de evaluar diferentes colectores solares.
- Caracterizar y determinar de los diferentes colectores solares la constante de absorptividad, coeficiente de pérdidas y curva de eficiencia para las condiciones climatológicas del estado de Zacatecas.
- Evaluar el controlador en otros calentadores solares, con el objetivo de verificar su operación.
- Establecer estándares en el controlador para desarrollarlo como producto.

Referencias

- [1] Homola C., “Solar Domestic Hot Water Heating Systems: Design, Installation and Maintenance,” PE, American Society of Sanitary Engineering, USA, 2009.
- [2] Comisión nacional para el ahorro de energía, “Programa para la promoción de calentadores solares de agua en México PROCALSOL”, Ed. Forever Print, México, D.F., 2007.
- [3] Corona Montijo Héctor Manuel, Valdez Lucena Jesús, Ramírez Perea Rafael, “Análisis Experimental del Calentamiento Solar Termosifónico” Tesis de Ingeniería Mecánica , Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería, México, D.F., 1979.
- [4] García González Aragón Gerardo Octavio, “Algoritmo Para el Diseño y Evaluación de Termosifones Solares” Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México, D.F., 2002.
- [5] Ramírez Tenorio Moisés, Mendoza Maya Pedro, Ronquillo Cherres Salvador, “Diseño, Construcción y Evaluación de un Calentador Solar de Plástico en Termosifón” Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México, D.F., 2002.
- [6] Rodríguez Mejía Jeovany Rafael, “Análisis de un calentador solar de agua con el PIV” Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México, D. F., 2012.
- [7] Rincon Mejía Eduardo A, “Estado del arte de la investigación en energía solar en México”, Fundación ICA, Edición Especial Cuadernos de Física, México, 1999
- [8] Furbo Simon, Shah Louise Jivan, “ Optimum Solar Collector Fluid Flow Rates ”, EuroSun 1996 (10) Internationales Sonnenforu Proceedings, Freiburg, Alemania, 16-19 Septiembre 1996, pp. 189-193.
- [9] Cardozo Victor, Fernández Flavio, Duarte Julio, “Diseño y construcción de un calentador solar didáctico ”, Revista Colombiana de Física, Vol. 37, No. 2, 2005, pp. 338-348.
- [10] Bukola O. Bolaji, “Flow design and collector performance of a natural circulation solar water heater”, Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 1, No. 1, 2006, pp. 7-13.

- [11] Hamidi Saad, Fayath Mohamaad, "Prediction of Thermal Characteristics for Solar Water Heater", *Anbar Journal for Engineering Sciences*, Vol. 4, No. 2, 2011, pp. 18-32.
- [12] Hosni Abu-Mulaweh, "Design and development of solar water heating system experimental apparatus", *Global Journal of Engineering Education*, Vol. 14, No. 1, 2012, pp. 99-105.
- [13] Youn Cheol Park, Le Minh Nhut, "Performance prediction of a solar water system with change of circulating pump efficiency in solar collectors", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, No. 11, Bilbao, España, 20-22 Marzo 2013.
- [14] Gutierrez Arias Gabriel, "Sistema de calentamiento solar de agua con control de temperatura", Universidad de Guadalajara Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Departamento de Electrónica, Jalisco, México. [Online] http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/proyectos/Calentador_Solar.pdf
- [15] Thermo Technologies, "Guía de usuario e instalación del controlador diferencial análogo USDT 2005", Maryland, 2005.
- [16] Kreider, J. y Kreith, F., *Solar Energy Handbook*, Ed. New York: McGraw Hill, 1981, pp. 99.
- [17] Manrique, J. A. *Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*, Ed. México, D.F.: Harla, 1984 pp.255.
- [18] Kreider F. y Goswami D., *The CRC HANDBOOK of Mechanical Engineering* 2da ed, Ed. Washington D. C.: CRC Press. 2005, pp. 1900.
- [19] Acedo Sánchez José, *Control Avanzado de Procesos: Teoría y Práctica*, Ed. Madrid: diaz de santos, 2003, pp. 579.
- [20] Eicker Ursula, *Solar technologies for buildings*, 1er ed, Ed. Germany: Wiley, 2003, pp. 319.
- [21] A. Carrillo Andrés, J. M. Cejudo López, "TRNSYS Model of a thermosiphon solar domestic water Heater with a horizontal store and mantle heat exchanger", *Solar Energy*, Vol. 72 No. 2 pp 89-98, 2002.
- [22] Duffie, John. A. y Beckman, William. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3er ed., Ed. New Jersey: Wiley, 2006, pp. 3-134.
- [23] Kalogirou Soteris, *Solar energy engineering: processes and systems*, Ed. San Diego: Elsevier, 2009, pp. 760.
- [24] Hahne E., Chen Y., "Numerical Study of Flow and Heat Transfer Characteristics in Hot Water Stores", *Solar Energy* Vol. 64, No. 1â3, 1998, pp. 9â18.

- [25] Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P., Losche, A., “Influence of the flow rate and the tank stratification degree on the performances of a solar flat-plate collector ”, Centre de recherches énergie et systèmes, Université de Corse, Ajaccio, France.
- [26] Ogata Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, 5ta ed., Ed. Madrid: Pearson, 2010, pp. 894.
- [27] Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S. C., “Norma Mexicana NMX-ES-004-NORMEX-2010, Energía Solar, Evaluación Térmica de Sistemas Solares para Calentamiento de Agua- Método de Prueba ”, México, D. F., 11 de Junio de 2010.
- [28] Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S. C., “Norma Mexicana NMX-ES-002-NORMEX-2007, Energía Solar, Definiciones y Terminología ”, México, D. F., 22 de Junio de 2007.
- [29] Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S. C., “Norma Mexicana NMX-ES-003-NORMEX-2008, Energía Solar, Requerimientos Mínimos para la Instalación de Sistemas Solares Térmicos, para el Calentamiento de Agua ”, México, D. F., 22 de Septiembre de 2008.
- [30] Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S. C., “Norma Mexicana NMX-ES-001-NORMEX-2005, Energía Solar, Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua, Métodos de Prueba y Etiquetado ”, México, D. F., 14 de Octubre 2005.
- [31] Fernandez Daroca Josep, “Ejemplo de aplicación con Arduino: medida de caudal” Tesis de Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial, Universitat Rovira I Virgili, España, 2012.
- [32] Shekar Sadahalli Arjun, “Arduino platform for PMDC Motor Modeling and Control using MATLAB/Simulink” User Guide Department of Electrical and Computer Engineering, Southern Illinois University, USA, 2012.
- [33] De la Horra Kollmer Mario, “Sistemas de adquisición de datos basados en la plataforma Arduino. Aplicaciones a MatLab, Simulink y Android” Tesis de Ingeniería Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2013.
- [34] Norma ASHRAE Standard 41.1-74, “Standard Measurement Guide: Section on Temperature Measurements”, ASHRAE Inc., Tullie Circle NE, Atlanta 1971, GA 30329.
- [35] Norma ASHRAE Standard 90.1-2007, “ASHRAE Standard Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings SI Edition”, ASHRAE Inc., Tullie Circle NE, Atlanta 2007, GA 30329.
- [36] Dayan Mirna, “High performance in low-flow solar domestic hot water systems” Thesis of Master of Science Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, EUA, 1997.