

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA HÍBRIDO SOLAR-ELÉCTRICO TIPO BREADBOX

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

CATHERINE ALEXANDRA HERRERA VELA

cathy0112herr@hotmail.com

DIEGO ANDRÉS MONTENEGRO HERRERA

fbpsc-diego119@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MSC. ÁNGEL PORTILLA

angel.portilla@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. MSC. MIGUEL ORTEGA

miguel.ortega@epn.edu.ec

Quito, Enero 2014

DECLARACIÓN

Nosotros, Catherine Alexandra Herrera Vela y Diego Andrés Montenegro Herrera, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, de acuerdo a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional vigente.

Catherine Alexandra Herrera Vela

Diego Andrés Montenegro Herrera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Catherine Alexandra Herrera Vela y Diego Andrés Montenegro Herrera, bajo nuestra supervisión.

Ing. Msc. Ángel Portilla

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Msc. Miguel Ortega

CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A la vida, por darme la salud y el tiempo para alcanzar esta meta.

A mis padres, Wilson y Guadalupe, por todo su apoyo y paciencia.

A mi hermana, Liseth, por confiar siempre en mí.

A los integrantes del equipo Alianza 04-17, por su amistad.

A los ingenieros Ángel Portilla y Miguel Ortega, por el tiempo dedicado a este proyecto y por su ayuda desinteresada.

Diego

A mi mami Blanquita, mi mejor amiga, por su entrega y sacrificio diario.

A mi papi José, por la confianza depositada y su positivismo, por enseñarme que las equivocaciones son parte de la vida.

A mis hermanos Andrea y Andrés, por sus consejos y apoyo.

A mis sobrinas, Alisson, Emily y Camila, por todo su amor y travesuras que llenan mis días.

A mi abuelita Custodia, por acogerme siempre con todo su cariño.

A mi familia, tíos, tías, primos y primas, gracias por su preocupación y cariño.

A los Ingenieros Ángel Portilla y Miguel Ortega, por su acertada dirección y consejo.

Al ingeniero Gabriel Velasteguí y al señor César Arguello, por brindarnos las facilidades para desarrollar las pruebas del equipo.

A mis amigos, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, por ser diferentes y permitirme aprender de ustedes.

Cathy

DEDICATORIA

A la memoria de nuestro amigo Wilson Tapia

A mis padres y hermana.

Diego.

A mis padres, por enseñarme
el valor de la perseverancia.

A mis hermanos, por estar
siempre pendientes de mí.

A mis sobrinas, su alegría
ilumina mi vida.

A toda mi familia y amigos por
su apoyo incondicional.

Cathy.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
ENERGÍA SOLAR.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 RADIACIÓN SOLAR.....	1
1.2.1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR CON LA ATMÓSFERA.....	2
1.2.2 TIPOS DE RADIACIÓN SOLAR.....	3
1.2.2.1 RADIACIÓN DIRECTA.....	3
1.2.2.2 RADIACIÓN DIFUSA.....	3
1.2.2.3 RADIACIÓN SOLAR GLOBAL.....	3
1.2.2.4 RADIACIÓN TERRESTRE.....	4
1.2.2.5 RADIACIÓN NETA.....	4
1.2.3 LA CONSTANTE SOLAR.....	4
1.2.4 VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN EXTRATERRESTRE.....	5
1.2.5 DEFINICIONES.....	5
1.3 GEOMETRÍA SOLAR.....	7
1.4 PROPIEDADES DE LAS SUPERFICIES REFLECTANTES.....	9
1.5 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	11
1.5.1 PIRANÓMETRO.....	12
1.5.2 ALBEDÓMETRO.....	12
1.5.3 PIROHELIÓMETRO.....	13
1.5.4 HELIÓGRAFO.....	14
1.6 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR.....	15
1.6.1 PRINCIPALES APLICACIONES.....	15
1.7 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR.....	15
1.7.1 VENTAJAS.....	15
1.7.2 INCONVENIENTES.....	16
1.8 ENERGÍA SOLAR EN EL ECUADOR.....	16
1.9 RADIACIÓN SOLAR EN QUITO.....	18

CAPÍTULO II.....	20
SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS	20
2.1 INTRODUCCIÓN	20
2.2 HISTORIA	20
2.3 SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS PARA CALENTAMIENTO DE AGUA. DEFINICIÓN	22
2.4 COMPONENTES DE UN SISTEMA SOLAR TÉRMICO	22
2.4.1 SUBSISTEMA DE CAPTACIÓN.....	23
2.4.1.1 COLECTOR SOLAR.....	23
2.4.1.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS COLECTORES SOLARES TÉRMICOS.	23
2.4.1.1.2 PRINCIPALES COMPONENTES DE UN COLECTOR	23
2.4.1.2 CUBIERTA.....	24
2.4.1.2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA CUBIERTA.....	24
2.4.1.2.2 TIPOS DE CUBIERTAS	25
2.4.1.3 ABSORBEDOR	26
2.4.1.3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ABSORBEDOR.....	26
2.4.1.4 AISLAMIENTO TÉRMICO	27
2.4.1.4.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL AISLANTE.....	27
2.4.1.5 CARCASA.....	28
2.4.1.5.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA CAJA.....	28
2.4.1.6 CLASIFICACIÓN DE COLECTORES SOLARES.....	29
2.4.1.6.1 COLECTORES DE BAJA TEMPERATURA.....	29
2.4.1.6.2 COLECTORES DE MEDIA TEMPERATURA.....	31
2.4.1.6.3 COLECTORES DE ALTA TEMPERATURA.....	32
2.4.2 SUBSISTEMA DE ACUMULACIÓN.....	33
2.4.2.1 TIPOS DE ACUMULADOR	34
2.4.2.1.1 ACUMULADORES SIN INTERCAMBIADOR	34
2.4.2.1.2 INTERACUMULADORES DE INTERCAMBIO SIMPLE	34
2.4.2.1.3 INTERACUMULADORES CON DOBLE INTERCAMBIO	34
2.4.3 SUBSISTEMA HIDRÁULICO.....	35
2.4.4 SUBSISTEMA DE ENERGÍA CONVENCIONAL AUXILIAR	36
2.4.5 SUBSISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL.....	37
2.5 TIPOS DE SISTEMAS SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AGUA.....	38
2.5.1 SISTEMAS PASIVOS.....	38

2.5.1.1	SISTEMA INTEGRAL DE ALMACENAMIENTO (ICS).....	38
2.5.1.2	SISTEMA TERMOSIFÓN.....	39
2.5.2	SISTEMAS ACTIVOS.....	40
2.5.2.1	SISTEMAS DE CIRCULACIÓN DIRECTA	40
2.5.2.2	SISTEMAS INDIRECTOS DE CALENTAMIENTO DE AGUA.....	40
2.6	SISTEMAS HÍBRIDOS.....	41
CAPÍTULO III.....		42
DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR TIPO BREAD-BOX.....		42
3.1	INTRODUCCIÓN.....	42
3.2	SISTEMA SOLAR TIPO BREAD-BOX.....	42
3.2.1	ELEMENTOS PRINCIPALES	42
3.2.2	ELEMENTOS AUXILIARES	43
3.3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	44
3.4	ANÁLISIS DE LA DEMANDA.....	44
3.5	MODELO MATEMÁTICO	45
3.6	MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO.....	50
3.7	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS.....	51
3.7.1	ENERGÍA NETA ABSORBIDA (S).....	52
3.7.2	CAPACITANCIA TÉRMICA, (C).....	53
3.7.3	COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR (U).....	53
3.7.3.1	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL TANQUE Y EL AMBIENTE (U_{T-a}).....	53
3.7.3.2	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL TANQUE Y EL AGUA (U_{T-w}).....	56
3.7.3.3	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL AGUA Y EL AMBIENTE (U_{w-a}).....	58
3.8	SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	59
3.9	DATOS PARA LA SIMULACIÓN	61
3.9.1	RADIACIÓN SOLAR.....	62
3.9.2	TEMPERATURA AMBIENTE.....	62
3.9.3	VELOCIDAD DEL VIENTO.....	62
3.9.4	TEMPERATURAS INICIALES.....	62
3.9.5	ÁREA DE CAPTACIÓN.....	62

3.9.6	ÁREA DE LA CUBIERTA.....	63
3.9.7	PROPIEDADES RADIATIVAS	63
3.9.8	ESPESOR DEL MATERIAL AISLANTE	64
3.9.9	ESPACIO CUBIERTA TRANSPARENTE – TANQUE	64
3.9.10	MATERIAL DEL TANQUE	64
3.10	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	65
3.11	DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE.....	69
3.12	DESEMPEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA BREAD – BOX	70
3.13	CÁLCULO DE PRESIONES	71
3.13.1	PRESIÓN INTERNA DEL TANQUE	71
3.13.2	PRESIÓN DE OPERACIÓN (P_o).....	71
3.13.3	PRESIÓN DE DISEÑO (P).....	71
3.13.4	PRESIÓN DE PRUEBA (P_p).....	72
3.14	CÁLCULO DE ESFUERZOS.....	72
3.14.3	ESPESOR DE PARED	72
3.14.4	ESFUERZO TRANSVERSAL	73
3.14.5	ESFUERZO LONGITUDINAL	74
3.14.6	FACTOR DE SEGURIDAD	74
CAPÍTULO IV.....		75
DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL.....		75
4.1	INTRODUCCIÓN.....	75
4.2	SISTEMA ELÉCTRICO	75
4.2.1	RESISTENCIA ELÉCTRICA DE INMERSIÓN.....	76
4.2.2	CÁLCULO DE POTENCIA ELÉCTRICA REQUERIDA.....	76
4.2.2.1	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL AGUA Y EL AMBIENTE ($U_{W-a\uparrow}$).....	79
4.2.2.2	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL AGUA Y EL AMBIENTE ($U_{W-a\downarrow}$).....	79
4.3	SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	81
4.3.1	REQUERIMIENTOS	82
4.3.2	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL.....	83
4.3.2.1	TERMOSTATO DIGITAL	83
4.3.2.2	SENSOR DE TEMPERATURA.....	84
4.3.2.3	CONTACTOR	84

4.3.2.4	TEMPORIZADOR	85
4.3.3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	86
4.4	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HÍBRIDO SOLAR- ELÉCTRICO.....	87
CAPÍTULO V.....		89
CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS.....		89
5.1	INTRODUCCIÓN	89
5.2	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO HÍBRIDO	89
5.2.1	COLECTOR SOLAR TIPO BREAD-BOX	89
5.2.1.1	CILINDRO	89
5.2.1.1.1	CORTADO	89
5.2.1.1.2	ROLADO.....	90
5.2.1.1.3	SOLDADURA	90
5.2.1.1.4	GALVANIZADO.....	91
5.2.1.2	TAPAS	92
5.2.1.2.1	CORTADO	92
5.2.1.2.2	REBORDEADO.....	93
5.2.1.2.3	SOLDADURA	93
5.2.1.2.4	GALVANIZADO.....	94
5.2.1.3	CARCASA.....	94
5.2.1.4	SOPORTES DE MADERA.....	94
5.2.1.5	CUBIERTA.....	95
5.2.1.6	AISLANTE	96
5.2.2	SISTEMA ELÉCTRICO	97
5.2.3	SISTEMA DE CONTROL.....	97
5.3	INSTALACIÓN DEL SISTEMA.....	98
5.3.1	COLECTOR SOLAR.....	98
5.3.2	SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL	98
5.3.3	CONEXIÓN DE ACCESORIOS DE AGUA POTABLE.....	99
5.3.4	ELEMENTOS DE SEGURIDAD.....	100
5.4	PRUEBAS.....	101
5.4.1	PRUEBA HIDROSTÁTICA.....	101
5.4.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	101

5.4.2.1	PRUEBAS CON ENERGÍA SOLAR. MODO ESTÁTICO.....	102
5.4.2.1.1	PROCEDIMIENTO.....	102
5.4.2.1.2	RESULTADOS	102
5.4.2.1.2.1	TEMPERATURAS EXPERIMENTALES	102
5.4.2.1.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	102
5.4.2.1.2.3	TEMPERATURAS EXPERIMENTAL Y SIMULADA.....	103
5.4.2.1.2.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	104
5.4.2.1.2.5	ENERGÍAS DE ENTRADA, ALMACENADA EXPERIMENTAL Y ALMACENADA DEL PROGRAMA.....	104
5.4.2.1.2.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	104
5.4.2.1.2.7	EFICIENCIA HORARIA.....	105
5.4.2.1.2.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	105
5.4.2.2	PRUEBA CON ENERGÍA SOLAR. MODO DINÁMICO.....	105
5.4.2.2.1	PROCEDIMIENTO.....	105
5.4.2.2.2	RESULTADOS	106
5.4.2.2.2.1	TEMPERATURAS EXPERIMENTALES	106
5.4.2.2.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	106
5.4.2.2.2.3	ENERGÍAS DE ENTRADA Y ALMACENADA EXPERIMENTAL.	107
5.4.2.2.2.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	107
5.4.2.2.2.5	EFICIENCIA HORARIA.....	107
5.4.2.2.2.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	107
5.4.2.3	PRUEBA CON ENERGÍA ELÉCTRICA. MODO ESTÁTICO.....	108
5.4.2.3.1	PROCEDIMIENTO.....	108
5.4.2.3.2	RESULTADOS	108
5.4.2.3.2.1	TEMPERATURAS EXPERIMENTALES	109
5.4.2.3.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	109
5.4.2.3.2.3	ENERGÍA ELÉCTRICA	109
5.4.2.3.2.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	109
5.4.2.4	PRUEBA CON ENERGÍA ELÉCTRICA. MODO DINÁMICO.....	110
5.4.2.4.1	PROCEDIMIENTO.....	110
5.4.2.4.2	RESULTADOS	110
5.4.2.4.2.1	TEMPERATURAS EXPERIMENTALES	111
5.4.2.4.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
5.4.2.4.2.3	ENERGÍA ELÉCTRICA.....	111

5.4.2.4.2.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
5.4.2.5	PRUEBA CON ENERGÍA SOLAR-ELÉCTRICA. MODO ESTÁTICO.	112
5.4.2.5.1	PROCEDIMIENTO.....	112
5.4.2.5.2	RESULTADOS	113
5.4.2.5.2.1	TEMPERATURAS EXPERIMENTALES	113
5.4.2.5.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	113
5.4.2.5.2.3	ENERGÍA ELÉCTRICA.....	113
5.4.2.5.2.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	114
5.4.2.5.2.5	ENERGÍA DEL SISTEMA HÍBRIDO	115
5.4.2.5.2.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	115
5.4.2.5.2.7	EFICIENCIA HORARIA.....	115
5.4.2.5.2.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	115
5.4.2.6	PRUEBA CON ENERGÍA SOLAR-ELÉCTRICA. MODO DINÁMICO.....	116
5.4.2.6.1	PROCEDIMIENTO.....	116
5.4.2.6.2	RESULTADOS	116
5.4.2.6.2.1	TEMPERATURAS EXPERIMENTALES	117
5.4.2.6.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	117
5.4.2.6.2.3	ENERGÍA ELÉCTRICA.....	117
5.4.2.6.2.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	118
5.4.2.6.2.5	ENERGÍA DEL SISTEMA HÍBRIDO	118
5.4.2.6.2.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	118
5.4.2.6.2.7	EFICIENCIA HORARIA.....	119
5.4.2.6.2.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	119
5.4.3	RESUMEN DE PRUEBAS.....	119
5.5	MANTENIMIENTO DEL SISTEMA	119
5.5.1	VACIADO DE TANQUES.....	119
5.5.2	LIMPIEZA.....	120
5.5.3	REEMPLAZO DE PARTES	120
5.6	ANÁLISIS DE COSTOS.....	121
5.6.1	PROTOTIPO.....	122
5.6.1.1	COSTOS DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN	122
5.6.1.2	COSTOS DE MATERIALES PARA PRUEBAS	122
5.6.1.3	COSTOS DE FABRICACIÓN	123

5.6.2	BREAD-BOX.....	123
5.6.2.1	VARIANTES DEL EQUIPO BREAD-BOX.....	124
5.6.3	BREAD-BOX VS OTROS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA	124
5.6.3.1	PROYECCIÓN SIMPLIFICADA DE COSTOS DE OPERACIÓN	126
5.6.3.1.1	BREAD-BOX HÍBRIDO VS CALENTADOR ELÉCTRICO	127
5.6.3.1.1.1	GRÁFICAS DE PROYECCIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN	127
5.6.3.1.1.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	127
5.6.3.1.2	BREAD-BOX HÍBRIDO VS TERMOTANQUE ELÉCTRICO	128
5.6.3.1.2.1	GRÁFICAS DE PROYECCIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN	128
5.6.3.1.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	128
5.6.3.1.3	BREAD-BOX HÍBRIDO VS CALEFÓN.....	129
5.6.3.1.3.1	GRÁFICAS DE PROYECCIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN	129
5.6.3.1.3.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	129
CAPITULO VI.....		130
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		130
6.1	CONCLUSIONES	130
6.2	RECOMENDACIONES	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		132
ANEXOS.....		137
ANEXO A: DATOS HORARIOS DE RADIACIÓN SOLAR, TEMPERATURA AMBIENTE Y VELOCIDAD DEL VIENTO PARA VARIOS DIAS DEL AÑO 2012		138
ANEXO B: TEMPERATURAS DEL AGUA CALCULADAS CON EL PROGRAMA MICROSOFT OFFICE EXCEL PARA VARIOS DÍAS DEL AÑO 2012		142
ANEXO C: PRESIÓN HIDRÁULICA MÁXIMA EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO EN EL AÑO 2012		155
ANEXO D: MANUAL DEL USUARIO DEL TERMOSTATO DIGITAL MT-511RI		156
ANEXO E: WPS'S PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TANQUES		157
ANEXO F: FICHA TÉCNICA DE COMPONENTES DE POLIURETANO		158
ANEXO G: PLANOS CONSTRUCTIVOS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO HÍBRIDO BREAD-BOX..		159
ANEXO H: PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....		160
ANEXO I: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO. DATOS OBTENIDOS Y GRÁFICAS.....		161
ANEXO J: PROYECCIÓN DE COSTOS DE VARIOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA DE USO DOMÉSTICO.....		182

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla 2.1. Propiedades de metales usados para absorbedores.....	27
Tabla 2.2. Características de algunos aislantes usualmente utilizados.....	28

CAPÍTULO III

Tabla 3.1. Demanda de referencia a 60°C.....	45
Tabla 3.2. Resumen de los procesos de transferencia de calor.....	47
Tabla 3.3. Temperaturas iniciales.....	62
Tabla 3.4. Propiedades radiativas.....	63
Tabla 3.5. Propiedades típicas del Acero ASTM A36.....	64
Tabla 3.6. Resultados de la simulación.....	67
Tabla 3.6. Resultados de la simulación. Continuación.....	68
Tabla 3.7. Dimensiones del tanque.....	70

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1. Simulación para diferentes potencias de resistencia comerciales.....	81
---	----

CAPÍTULO V

Tabla 5.1. Valores de presión de acuerdo a la norma INEN 1 912:1992.....	101
Tabla 5.2. Equipos de medición.....	101
Tabla 5.3. Pruebas realizadas al sistema bajo determinadas condiciones.....	120
Tabla 5.4. Materiales Base para construcción.....	121
Tabla 5.5. Materiales para pruebas.....	122
Tabla 5.6. Procesos de fabricación.....	123
Tabla 5.7. Dispositivos adicionales.....	124
Tabla 5.8. Costos de operación anual de diferentes sistemas de calentamiento de agua.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1.- Espectro de radiación solar.....	2
Figura 1.2.- Representación esquemática de la interacción radiación-atmósfera	3
Figura 1.3.- Balance de radiación solar	4
Figura 1.4.- Variación de la radiación solar extraterrestre durante el año.....	5
Figura 1.5.-Ecuación de tiempo E en minutos como función de los días del año.....	7
Figura 1.6.-Ángulo de cenit, pendiente, ángulo de la superficie azimut y ángulo solar azimut para una superficie inclinada.....	8
Figura 1.7.-Altura Solar.....	9
Figura 1.8.-Azimut solar	9
Figura 1.9.-Balance de radiación. Reflectancia, absortancia y transmisividad	11
Figura 1.10.- Piranómetro	12
Figura 1.11.- Piranómetro para radiación difusa	13
Figura 1.12.- Albedómetro.	13
Figura 1.13.- Pirheliómetro Ångström.....	14
Figura 1.14.- Heliógrafo.....	14
Figura 1.15.- Insolación Difusa Promedio	17
Figura 1.16.- Insolación Directa Promedio	17
Figura 1.17.- Insolación Global Promedio	18

CAPÍTULO II

Figura 2.1.- Instalación de transferencia directa.....	23
Figura 2.2.- Corte de un colector solar de placa plana.....	24
Figura 2.3.- Clasificación de los colectores solares térmicos en función de su temperatura de trabajo	29
Figura 2.4.- Colector solar de polipropileno.....	30
Figura 2.5.- Colector solar de placa plana	30
Figura 2.6.- Colector solar de tubos de vacío	31
Figura 2.7.- Colector cilindro-parabólico.....	32
Figura 2.8.- Helióstatos	32

Figura 2.9.- Disco parabólico	33
Figura 2.10.- Acumulador sin intercambiador	34
Figura 2.11.- Interacumulador simple serpentín.....	35
Figura 2.12.- Interacumulador de doble serpentín	35
Figura 2.13.- Sistemas de apoyo auxiliar. Eléctrico, gas natural, biomasa.....	37
Figura 2.14.- Sensores, regulador y actuadores.....	37
Figura 2.15.- Sistema Bread-Box	39
Figura 2.16.- Sistema solar de funcionamiento por termosifón	39
Figura 2.17.- Sistema de circulación directa	40
Figura 2.18.- Sistema indirecto de calentamiento de agua	41
Figura 2.19.- Sistema Híbrido	41

CAPÍTULO III

Figura 3.1.- Sistema solar Bread-Box	43
Figura 3.2.- Esquema transversal del sistema solar Bread-Box.	46
Figura 3.3.- Sistema de calentamiento Bread – Box y analogía eléctrica.	52
Figura 3.4.- Transferencia de calor entre el tanque y el ambiente.....	54
Figura 3.5.- Transferencia de calor entre el tanque y el agua.....	56
Figura 3.6.- Transferencia de calor entre el agua y el ambiente.....	58
Figura 3.7.- Radiación solar, 18 de febrero de 2012.	65
Figura 3.8.- Temperatura ambiente, 18 de febrero de 2012	65
Figura 3.9.- Velocidad del viento, 18 de febrero de 2012.....	66
Figura 3.10.- Comparación de las temperaturas del agua, para diferente número de tanque.....	66
Figura 3.11.- Temperatura del agua para 1 tanque de dimensiones 1220x610mm.....	69
Figura 3.12.- Esfuerzos en un recipiente circular cilíndrico en (a) la superficie exterior y (b) la superficie interior.....	73

CAPÍTULO IV

Figura 4.1.- Resistencia eléctrica de inmersión.....	76
Figura 4.2.- Elementos del sistema de calentamiento eléctrico.	77
Figura 4.3.- Analogía eléctrica del sistema de calentamiento.	78
Figura 4.4.- Transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte superior del sistema..	79

Figura 4.5.- Transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte inferior del sistema. ...	80
Figura 4.6.- Termostato digital.....	83
Figura 4.7.- Sensor de temperatura	84
Figura 4.8.- Contactor.....	85
Figura 4.9.- Temporizador.....	85
Figura 4.10.- Diagrama de bloques del sistema de control.....	86
Figura 4.11.- Esquema de conexión del termostato digital	86
Figura 4.12.- Agua calentada con energía eléctrica y solar 18/02/12.....	87
Figura 4.13.- Temperatura del agua simulación sistema híbrido 18/02/12.....	88

CAPÍTULO V

Figura 5.1.- Corte con amoladora de la plancha de acero A36.	90
Figura 5.2.- Proceso de rolado.	90
Figura 5.3.- Tanque rolado.	91
Figura 5.4.- Soldadura longitudinal.	91
Figura 5.5.- Cilindros y tapas galvanizadas.....	92
Figura 5.6.- Corte de las tapas del tanque.	92
Figura 5.7.- Reborde de las tapas.....	93
Figura 5.8.- Uniones soldadas a la tapa del tanque.	93
Figura 5.9.- Tanques contruidos.	94
Figura 5.10.- Caja de acero galvanizado.....	95
Figura 5.11.- Caja con soportes de madera.....	95
Figura 5.12.- Cubierta de vidrio y aluminio anodizado.	96
Figura 5.13.- Poliuretano inyectado.	96
Figura 5.14.- Resistencia eléctrica.....	97
Figura 5.15.- Sistema de control.	97
Figura 5.16.- Orientación del captador.	98
Figura 5.17.- Circuito eléctrico y de control. Instalación.....	99
Figura 5.18.- Diagrama de válvulas.	100
Figura 5.19.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos.15/09/2013	103
Figura 5.20.- Temperatura del agua vs tiempo, 15/09/2013.....	103
Figura 5.21.- Energía acumulada vs tiempo. 15/09/2013.....	104

Figura 5.22.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 15/09/2013.....	105
Figura 5.23.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos.18/09/2013.	106
Figura 5.24.- Energía acumulada vs tiempo. 18/09/2013.....	107
Figura 5.25.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 18/09/2013.....	108
Figura 5.26.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos.19/09/2013.	109
Figura 5.27.- Energía eléctrica vs. tiempo. 19/09/2013.....	110
Figura 5.28.- Temperatura vs. tiempo, datos obtenidos, 21/09/2013	111
Figura 5.29.- Energía eléctrica vs. tiempo. 21/09/2013.....	112
Figura 5.30.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos, 22/09/2013.	113
Figura 5.31.- Energía eléctrica vs. tiempo. 22/09/2013.....	114
Figura 5.32.- Energía acumulada vs. tiempo. 22/09/2013.....	114
Figura 5.33.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 22/09/2013.....	115
Figura 5.34.- Temperatura vs. tiempo, datos obtenidos, 24/09/2013.	116
Figura 5.35.- Energía eléctrica vs. tiempo. 24/09/2013.....	117
Figura 5.36.- Energía acumulada vs. tiempo. 24/09/2013.....	118
Figura 5.37.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 24/09/2013.....	119
Figura 5.38.- Bread-Box Híbrido vs. Calentador Eléctrico (con subsidio).....	126
Figura 5.39.- Bread-Box Híbrido vs. Calentador Eléctrico (sin subsidio)	127
Figura 5.40.- Bread-Box Híbrido vs. Termotanque Eléctrico (con subsidio)	127
Figura 5.41.- Bread-Box Híbrido vs. Termotanque Eléctrico (sin subsidio).....	128
Figura 5.42.- Bread-Box Híbrido vs. Calefón (con subsidio)	128
Figura 5.43.- Bread-Box Híbrido vs. Calefón (sin subsidio)	129

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
A	Área de transferencia de calor	$[m^2]$
A_C	Área de la cubierta transparente	$[m^2]$
A_I	Área de transferencia de calor del aislante	$[m^2]$
A_S	Área de la superficie emisora	$[m^2]$
A_T	Área del tanque	$[m^2]$
A_W	Área del agua	$[m^2]$
ACS	Agua caliente sanitaria	----
b	Distancia entre la cubierta y el tanque	$[m]$
c_p	Calor específico	$[J/kg * K]$
C	Capacitancia térmica	$[J/K]$
dT	Derivada de la temperatura	$[K]$
dt	Derivada del tiempo	$[s]$
E	Tiempo solar	$[min]$
E	Eficiencia de las soldaduras	----
\dot{E}	Energía disipada	$[W]$
\dot{E}_{alm}	Energía almacenada en el sistema	$[W]$
\dot{E}_{ent}	Energía que entra al sistema	$[W]$
\dot{E}_g	Energía generada por una resistencia eléctrica	$[W]$
\dot{E}_{sale}	Energía que sale del sistema	$[W]$
$F.S.$	Factor de Seguridad	----
g	Gravedad	$[m/s^2]$
G	Irradiancia	$[W/m^2]$
G_{on}	Radiación solar extraterrestre	$[W/m^2]$
Gr_b	Número de Grashof para el aire comprendido entre el tanque y la cubierta que se encuentran a una distancia b .	----
Gr_L	Número de Grashof para el agua, de longitud característica L	----
G_{SC}	Constante solar	$1353[W/m^2]$
$G_\lambda(\lambda)$	Irradiación espectral	$[W/m^2 * \mu m]$
h	Altura del cilindro	$[m]$
h_{c3}	Coefficiente de transferencia de calor por convección del aire entre el tanque y la cubierta	$[W/m^2 * K]$
h_{c5}	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el tanque y el agua	$[W/m^2 * K]$
h_{c6}	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y el aislante	$[W/m^2 * K]$
h_{r2}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta transparente y el cielo	$[W/m^2 * K]$
h_{r4}	Coefficiente de transferencia de calor por	$[W/m^2 * K]$

	radiación entre el tanque y la cubierta	
h_v	Coeficiente de transferencia de calor por convección del viento	$[W/m^2 * K]$
I	Intensidad de corriente	$[A]$
I	Radiación solar incidente en cada hora	$[W/m^2]$
I_T	Energía incidente en el colector	$[W/m^2]$
k_a	Conductividad térmica del aire	$[W/m * K]$
k_I	Conductividad térmica del aislante	$[W/m * K]$
k_w	Conductividad térmica del agua	$[W/m * K]$
l	Longitud del tanque	$[m]$
L	Longitud característica del tanque	$[m]$
L_I	Espesor del material aislante	$[m]$
L_{loc}	Longitud de la localización	$[°]$
L_{st}	Meridiano estándar para la zona del tiempo local	$[°]$
m	Masa del elemento	$[kg]$
n	Número de día	$1 \leq n \leq 365$ [día]
Nu_b	Número de Nusselt para el aire comprendido entre el tanque y la cubierta que se encuentran a una distancia b	----
Nu_L	Número de Nusselt para el agua, de longitud característica L.	----
p	Presión interna del tanque	$[MPa]$
P	Presión de diseño o trabajo máxima permitida	$[MPa]$
P_o	Presión de operación	$[MPa]$
P_p	Presión de prueba	$[MPa]$
Pr	Número de Prandtl	----
Pr	Presión de la red de agua potable	$[MPa]$
Q_a	Caudal	$[l/s]$
$Q_{emitida,max}$	Potencia de radiación máxima	$[W]$
Q_u	Calor útil	$[W]$
r	Radio del tanque	$[m]$
R	Resistencia eléctrica	$[\Omega]$
R_{total}	Resistencia térmica total	$[K/W]$
R_{1h}	Resistencia térmica a la convección entre la cubierta transparente y el ambiente	$[K/W]$
R_{2r}	Resistencia térmica a la radiación entre la cubierta transparente y el cielo	$[K/W]$
R_{3h}	Resistencia térmica a la convección entre el tanque y la cubierta transparente	$[K/W]$
R_{4r}	Resistencia térmica a la radiación entre el tanque y la cubierta transparente	$[K/W]$
R_{5h}	Resistencia térmica a la convección entre el tanque y el agua	$[K/W]$
R_{6h}	Resistencia térmica a la convección entre el agua y el aislante	$[W/m * K]$

R_{7k}	Resistencia térmica a la conducción en el aislante	$[W/m * K]$
R_{8h}	Resistencia térmica a la convección entre la base del aislante y el ambiente	$[W/m * K]$
S	Energía neta absorbida por el colector	$[W/m^2]$
S	Esfuerzo máximo permisible a tensión del material	$[MPa]$
S_{ta}	Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura ambiente	$[MPa]$
S_{td}	Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura de diseño	$[MPa]$
S_y	Esfuerzo de fluencia	$[MPa]$
T	Espesor de pared del tanque	$[m]$
t	Tiempo	$[h]$
T_a	Temperatura ambiente	$[^{\circ}C], [K]$
T_c	Temperatura de la cubierta	$[^{\circ}C], [K]$
T_{ci}	Temperatura inicial de cubierta	$[^{\circ}C], [K]$
T_{c1}	Temperatura del cielo	$[^{\circ}C], [K]$
T_e	Temperatura del agua a la entrada del sistema	$[^{\circ}C], [K]$
T_I	Temperatura del aislante	$[^{\circ}C], [K]$
T_{ii}	Temperatura inicial del aislante	$[^{\circ}C], [K]$
T_s	Temperatura del agua a la salida del sistema.	$[^{\circ}C], [K]$
T_S	Temperatura de la superficie emisora	$[^{\circ}C], [K]$
T_T	Temperatura del tanque	$[^{\circ}C], [K]$
T_{ti}	Temperatura inicial del tanque	$[^{\circ}C], [K]$
T_W	Temperatura del agua	$[^{\circ}C], [K]$
T_{Wi}	Temperatura inicial del agua en cada hora	$[^{\circ}C], [K]$
U	Coficiente global de transferencia de calor	$[W/m^2 * K]$
U_{C-a}	Coficiente global de transferencia de calor entre la cubierta transparente y el ambiente	$[W/m^2 * K]$
U_{T-c}	Coficiente global de transferencia de calor entre el tanque y la cubierta transparente	$[W/m^2 * K]$
U_{T-w}	Coficiente global de transferencia de calor entre el tanque y el agua	$[W/m^2 * K]$
U_{I-w}	Coficiente global de transferencia de calor entre el agua y el aislante	$[W/m^2 * K]$
U_{I-a}	Coficiente global de transferencia de calor entre el aislante y el ambiente	$[W/m^2 * K]$
U_{T-a}	Coficiente global de transferencia de calor entre el tanque y el ambiente	$[W/m^2 * K]$
U_{W-a}	Coficiente global de transferencia de calor entre el agua y el ambiente	$[W/m^2 * K]$
$U_{W-a\uparrow}$	Coficiente global de transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte superior del sistema	$[W/m^2 * K]$

U_{W-a_1}	Coeficiente global de transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte inferior del sistema	$[W/m^2 * K]$
v	Velocidad del viento	$[m/s]$
V	Volumen del cilindro	$[m^3]$
V	Diferencia de potencial	$[V]$
$V_{mín}$	Velocidad mínima	$[m/s]$
$V_{máx}$	Velocidad máxima	$[m/s]$
ν_w	Viscosidad cinemática del agua	$[m^2/s]$
α	Absortividad del colector solar.	----
α_T	Absortividad del tanque	----
$\alpha_\lambda(\lambda)$	Absortividad hemisférica espectral	----
β	Pendiente Ángulo entre la superficie del plano en cuestión y la horizontal	$(0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ)$
β_a	Coeficiente de dilatación térmica del aire	$[1/K]$
β_w	Coeficiente de dilatación térmica del agua	$[1/K]$
γ	Ángulo azimut	$(-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ)$
δ	Declinación	$(-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ)$
Δt	Variación del tiempo	$[s]$
ε	Emisividad	----
ε_c	Emisividad de la cubierta transparente.	----
ε_T	Emisividad del tanque	----
η_D	Eficiencia diaria	----
η_h	Eficiencia horaria	----
θ_z	Ángulo de cenit	$[^\circ]$
ρ	Reflectividad	----
ρ	Densidad del elemento	(kg/m^3)
$\rho_\lambda(\lambda)$	Reflectividad hemisférica espectral	----
Σ	Constante de Boltzman	$5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 \cdot K^4)$
σ_L	El esfuerzo longitudinal	$[MPa]$
σ_T	El esfuerzo transversal	$[MPa]$
τ	Transmisividad	----
τ_c	Transmisividad de la cubierta	----
$\tau_\lambda(\lambda)$	Transmitividad hemisférica espectral	----
φ	Latitud	$(-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ)$
ψ	Ángulo de azimut solar	$[^\circ]$
ω	Ángulo horario	$[^\circ]$

RESUMEN

En este proyecto se presenta una metodología de diseño y construcción de un colector híbrido solar-eléctrico para calentamiento de agua de uso doméstico. Es un sistema tipo BREAD-BOX que para su funcionamiento usa principalmente energía solar y cuenta con un suministro de energía eléctrica como respaldo. Se ha incorporado un sistema de control automático que opera el encendido y apagado del sistema eléctrico con el fin de optimizar su consumo energético y asegurar que el agua mantenga una temperatura adecuada.

Inicialmente se realiza un estudio de la radiación solar y condiciones climáticas de la ciudad de Quito, así como también de los componentes y funcionamiento de los diferentes sistemas solares térmicos.

La metodología de diseño propuesta parte de conceptos termodinámicos para el dimensionamiento del equipo, que ayudan a plantear un modelo matemático que permite predecir de una manera muy exacta el comportamiento térmico del equipo para diferentes condiciones ambientales.

El equipo BREAD-BOX, consta básicamente de 3 tanques aislados, los cuales cumplen doble función: coleccionar la radiación solar y almacenar el agua caliente, están ubicados dentro de una caja fabricada en una estructura compuesta (acero-vidrio). Para la fabricación se utilizan materiales existentes en el mercado y procesos de construcción simples.

Se realizan pruebas de funcionamiento con energía solar, eléctrica y solar-eléctrica (híbrido), en modo estático y dinámico cada una, las cuales permiten analizar el rendimiento del sistema. Estos resultados ayudan a plantear un análisis de costos de operación para compararlo con los sistemas convencionales. En el proyecto se incluyen varios anexos como información complementaria.

PRESENTACIÓN

En la actualidad los sistemas convencionales de calentamiento de agua instalados en los hogares requieren en su mayoría del consumo de hidrocarburos para generar energía térmica, tal es el caso de los calefones que utilizan gas de uso doméstico, energía que además de ser costosa, es subsidiada por el estado y provoca un impacto ambiental. Los sistemas eléctricos como los calentadores de paso y los termotanques consumen gran cantidad de electricidad. Por otro lado, los colectores solares existentes en el mercado tienen un costo elevado.

El Plan Nacional para el Buen Vivir del Gobierno Nacional para cambiar la matriz energética del país contempla el incremento del uso de las energías renovables y la obtención de energía eléctrica barata mediante la construcción de centrales hidroeléctricas. Ecuador está ubicado en el centro del globo terrestre, por ello recibe mayor cantidad de radiación solar que otros lugares del mundo, este tipo de energía no tiene costo, es abundante y no contaminante.

En este proyecto se diseña y construye un sistema de calentamiento híbrido que aprovecha ambas energías, solar y eléctrica, el cual permite obtener agua caliente más económica con menor impacto ambiental. El equipo propuesto, un colector solar tipo Bread-Box con un sistema auxiliar de energía eléctrica, por sus características no requiere de materiales especiales ni de tecnología sofisticada para su construcción.

Finalmente, este estudio se presenta como la oportunidad de experimentar con un concepto diferente de sistemas de calentamiento de agua sanitaria y su aplicación a nuestro medio. Se espera que los resultados y experiencia alcanzados constituyan un aporte en el desarrollo y aprovechamiento de las energías renovables, además de sentar las bases e incentivar futuras investigaciones.

CAPÍTULO I

ENERGÍA SOLAR

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta un breve estudio de Energía Solar y un análisis de radiación solar para la ciudad Quito, lugar en el que se ejecutará el proyecto, lo que permitirá definir las variables que intervendrán en el desarrollo del mismo.

1.2 RADIACIÓN SOLAR

La energía solar es aquella que se obtiene del aprovechamiento de la radiación solar. Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol, a través de las cuales se transmite al espacio la energía liberada a causa de las reacciones nucleares que se producen en su interior. El sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro el cual emite energía, siguiendo la ley de Planck, a una temperatura de 6000 K. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, sin embargo, no toda la radiación alcanza la superficie de la tierra debido a que los gases de la atmósfera, principalmente el ozono, absorben las ondas ultravioletas (ondas más cortas) y la luz visible, mientras que el vapor de agua y el dióxido de carbono absorben las ondas infrarrojas. Su unidad de medida es el W/m^2 .

En condiciones óptimas, un día perfectamente claro y con los rayos del Sol cayendo casi perpendiculares, la mayor parte de la energía solar que llega desde el exterior alcanza la superficie terrestre, así¹:

Radiaciones ultravioleta (9%)

Radiaciones visibles (42%)

Radiaciones infrarrojas (49%)

La figura 1.1 representa la variación de la irradiación solar con respecto a la longitud de onda de la luz, el color amarillo corresponde a la luz solar en la parte superior de la atmósfera, la línea de color negro representa a la luz que el sol

¹ http://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_solar#Distribuci.C3.B3n_espectral_de_la_radiaci.C3.B3n_solar

emite con una distribución similar a lo que se esperaría de un cuerpo negro a 5523 K (que es aproximadamente la temperatura de la superficie del sol), y la parte de color naranja indica la radiación solar a nivel del mar.

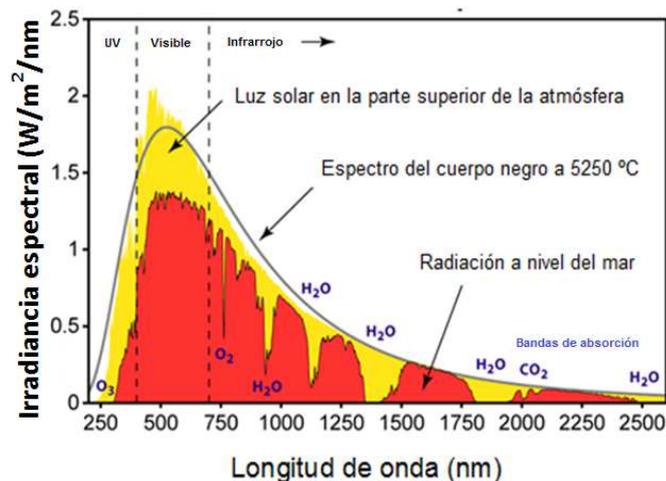


Figura 1.1.- Espectro de radiación solar.²

La radiación ultravioleta tiene menor longitud de onda (360 nm), lleva mucha energía e interfiere con los enlaces moleculares. La radiación correspondiente a la zona visible cuya longitud de onda está entre 360 nm (violeta) y 760 nm (rojo), por la energía que lleva, tiene gran influencia en los seres vivos. La luz visible atraviesa con bastante eficacia la atmósfera limpia, pero cuando hay nubes o masas de polvo parte de ella es absorbida o reflejada. La radiación infrarroja de más de 760 nm, es la que corresponde a longitudes de onda más largas y lleva poca energía asociada. Su efecto aumenta la agitación de las moléculas, provocando el aumento de la temperatura.

1.2.1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR CON LA ATMÓSFERA

Los diferentes procesos que sufre la radiación solar en su interacción con la atmósfera son causados por las partículas de polvo, vapor de agua y el ozono presentes en ella. Estos factores provocan que la radiación solar se descomponga en los distintos tipos. Figura 1.2.

² http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png

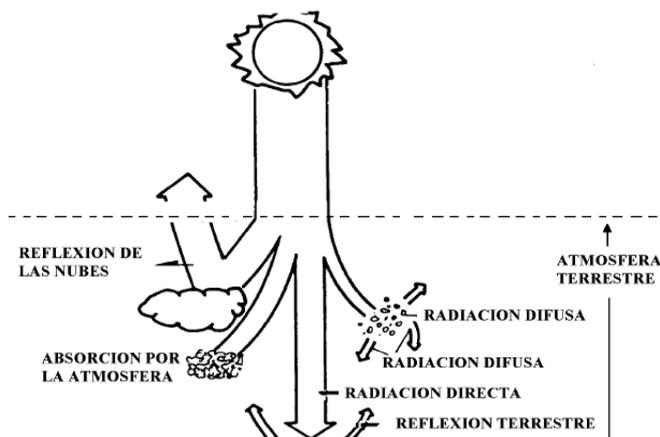


Figura 1.2.- Representación esquemática de la interacción radiación-atmósfera.³

Como resultado de la interacción con la atmósfera, la radiación solar recibida sobre una superficie horizontal terrestre se compone de radiación solar directa y radiación solar difusa.

La figura 1.3 muestra un balance de la descomposición de la radiación solar en la atmósfera en porcentajes.

1.2.2 TIPOS DE RADIACIÓN SOLAR

1.2.2.1 Radiación Directa.

Es la radiación solar interceptada por una superficie, la misma que no sufre ningún cambio de dirección y dispersión en la atmósfera.

1.2.2.2 Radiación Difusa.

Radiación solar que presenta reflexión y dispersión causada por la atmósfera, lo que ocasiona sus múltiples direcciones.

1.2.2.3 Radiación Solar Global.

Es la suma de la radiación solar directa y difusa en una superficie.⁴ Este tipo de radiación es de onda corta.

³ http://www.corpoema.com/CDenergia/FV_Anexo2.PDF

⁴ KREITH F., KREIDER J., Pág. 37

1.2.2.4 Radiación Terrestre.

Radiación solar de onda larga que emite la tierra hacia la atmósfera.

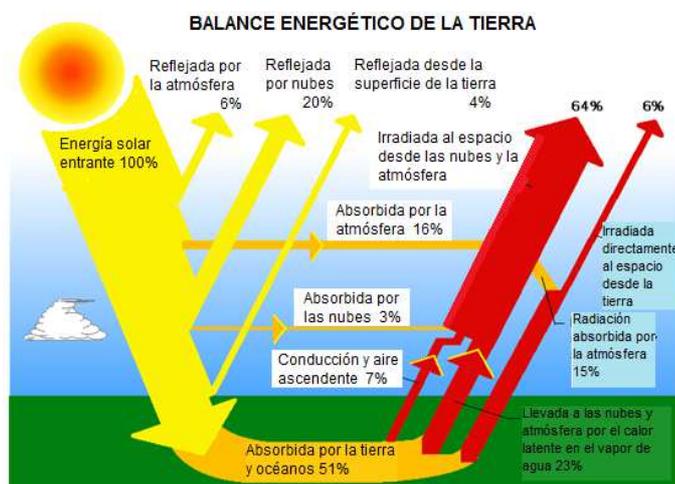


Figura 1.3.- Balance de radiación solar.⁵

1.2.2.5 Radiación Neta.

Es la diferencia entre el flujo de radiación de onda corta entrante y el de onda larga saliente.

En un día despejado, el porcentaje de radiación solar directa es mucho mayor que el de la radiación difusa. En los días nublados la radiación difusa representa el 30% de la recibida de forma directa en un año.

1.2.3 LA CONSTANTE SOLAR

La constante solar, G_{SC} , es la energía del sol por unidad de tiempo, recibida en una unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar más allá de la atmósfera terrestre en el promedio de la distancia tierra-sol.

Para realizar cálculos se considera:⁶

$$G_{SC} = 1353 \frac{W}{m^2} = 1.940 \frac{cal}{cm^2 * min} = 429.2 \frac{Btu}{ft^2 * hr}, (\pm 1.6 \%) \quad (1.1)$$

⁵ <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/components2.gif>

⁶ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 6

1.2.4 VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN EXTRATERRESTRE

Debido a la variación de la actividad solar y a la distancia tierra-sol durante el año, se produce un cambio de la radiación solar extraterrestre como muestra la figura 1.4

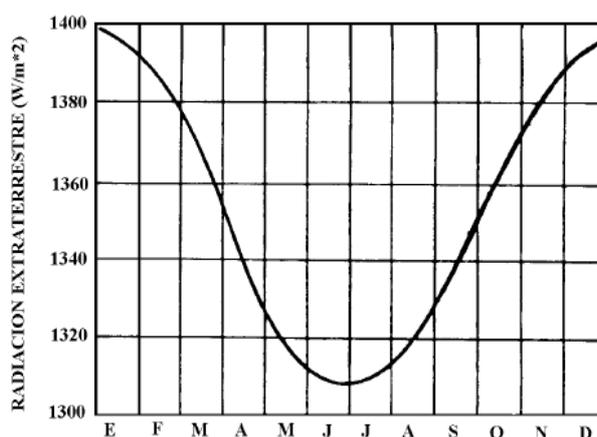


Figura 1.4.- Variación de la radiación solar extraterrestre durante el año.⁷

Analíticamente, la fórmula (1.2), representa la radiación solar extraterrestre medida en el plano normal a la radiación en un día n del año.

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (1.2)^8$$

donde:

$$n = (1 \leq n \leq 365)$$

Esta función tiene una variación de máximo 3.3%, con el máximo de 1399 W/m² el 1 de enero y el mínimo de 1309 W/m² el 1 de julio.

1.2.5 DEFINICIONES⁹

Masa de aire, m .- Representa el espesor estándar de la atmósfera que es atravesado perpendicularmente por el haz de radiación a la superficie terrestre y

⁷ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 7

⁸ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 7

⁹ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 7 y 8

medido a nivel del mar. Para nivel del mar $m=1$ cuando el sol está en el cenit, y $m=2$ para $\theta_z = 60^\circ$. Para ángulos de 0° a 70° al nivel del mar $m = \left(\frac{1}{\cos \theta_z}\right)^{10}$.

Irradiancia, G (W/m^2).- Velocidad a la cual la energía radiante incide en una superficie por unidad de área de la misma. Se utiliza para medir la potencia incidente de todo tipo de radiación.

Irradiación o Exposición Radiante, (J/m^2).- Energía incidente por unidad de área en una superficie, encontrada por la integración de irradiancia en un tiempo específico, usualmente una hora o un día.

Radiosidad o Exitancia Radiante, (W/m^2).- Velocidad a la cual la energía radiante deja una superficie por unidad de área por combinación de la emisión, reflexión y transmisión.

Potencia de Emisión o Exitancia Auto Radiante, (W/m^2).- Velocidad a la cual la energía radiante deja una superficie por unidad de área, solo por emisión.

Tiempo Solar, E.- El tiempo solar difiere del tiempo del reloj local para las diferentes ciudades del globo por lo que es necesario realizar un ajuste para convertir el tiempo estándar en tiempo solar.

La diferencia en minutos entre el tiempo solar y el tiempo local es:

$$\text{Tiempo solar} - \text{tiempo estandar} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (1.3)^{11}$$

donde:

L_{st} = Meridiano estándar para la zona del tiempo local

L_{loc} = Longitud de la localización en cuestión

Las longitudes están expresadas en grados oeste. $0^\circ < L < 360^\circ$

La ecuación de tiempo E está determinada por la figura 1.5 o la ecuación (1.4)

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

(1.4)¹²

¹⁰http://www.enerpoint.es/photovoltaic_technology_1.php

¹¹ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 8

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (1.5)^{13}$$

donde:

n = día del año. Por tanto $1 \leq n \leq 365$

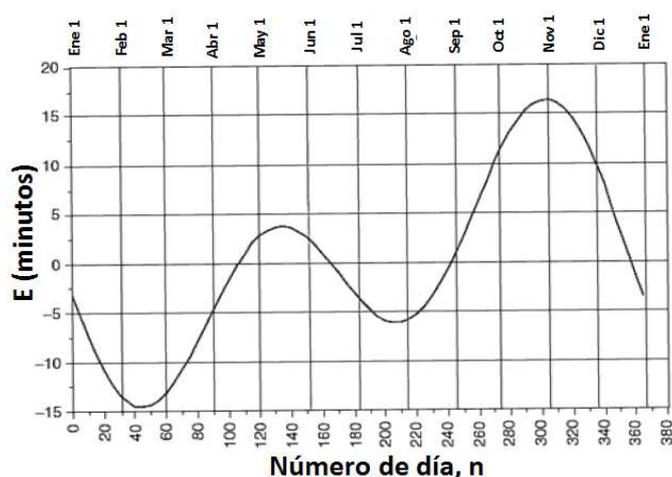


Figura 1.5.-Ecuación de tiempo E en minutos como función de los días del año.¹⁴

1.3 GEOMETRÍA SOLAR¹⁵

Los siguientes ángulos describen las relaciones geométricas entre la posición relativa del sol y un plano con su propia orientación.

Ángulo de cenit, θ_z .- Ángulo que se forma entre una línea vertical situada sobre un punto en la cabeza del observador y la línea de vista hacia el sol.

Latitud φ .- Ubicación angular al norte o sur del ecuador, norte es positivo, $(-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ)$.

Declinación δ .- Posición angular del sol al mediodía con respecto al plano del ecuador, norte positivo, $(-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ)$.

Pendiente β .- Ángulo entre la superficie del plano en cuestión y la horizontal, $(0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ)$.

¹² DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 8

¹³ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 8

¹⁴ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 9

¹⁵ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 10y11

Superficie del ángulo azimut γ .- Desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local. Cero hacia el sur, este negativo y oeste positivo, ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).

Ángulo horario ω .- Desplazamiento angular del sol del este al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra en su eje a 15° por hora, considerándolo negativo en la mañana y positivo en la tarde.

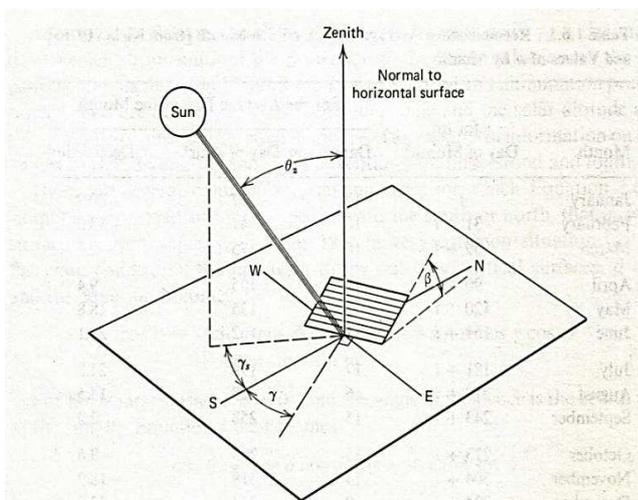


Figura 1.6.-Ángulo de cenit, pendiente, ángulo de la superficie azimut y ángulo solar azimut para una superficie inclinada.¹⁶

Altura Solar.- Es el ángulo formado por la posición aparente del sol en el cielo y la horizontal del lugar. Figura 1.7.

Azimut solar ψ .- Ángulo horizontal formado por la posición del Sol y la dirección del verdadero sur.

La ecuación neta relativa al ángulo de incidencia de la radiación directa, θ , y los otros ángulos es:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

(1.6)¹⁷

¹⁶ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 11



Figura 1.7.-Altura Solar¹⁸

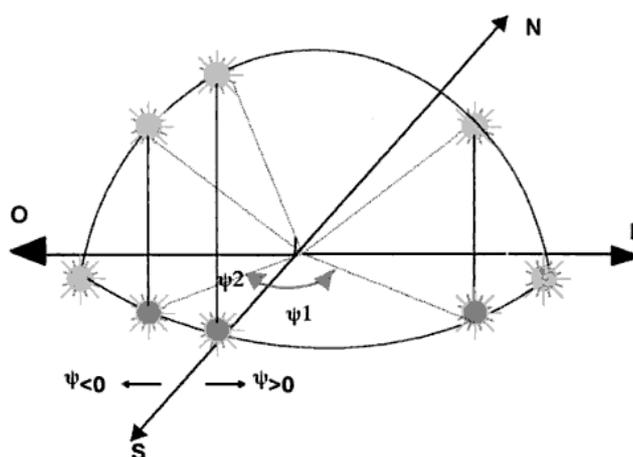


Figura 1.8.-Azimut solar¹⁹

1.4 PROPIEDADES DE LAS SUPERFICIES REFLECTANTES

A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no necesita un medio de transmisión y puede ocurrir en el vacío. La transferencia de calor por radiación es la más rápida, a la velocidad de la luz. No sufre atenuación en el vacío.

Potencia máxima emitida.- La potencia máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura T_s se modela mediante la Ley de Stefan-Boltzmann cuya expresión es:

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (1.7)$$

¹⁷ DUFFIE J., BECKMAN W., Pág. 11

¹⁸ ENERGIA SOLAR TÉRMICA., Pág.37

¹⁹ ENERGÍA SOLAR TÉRMICA, Pág. 37

donde:

$\dot{Q}_{emitida,max}$ = Potencia de radiación máxima. (W).

$\sigma = 5.67 \text{ E-}8 \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$.

A_s = Área de la superficie emisora. (m^2).

T_s = Temperatura de la superficie emisora. (K).

Emisividad (ϵ).- Representa la radiación emitida por una superficie respecto a la que emitiría un cuerpo negro.

$$\epsilon = \frac{\text{radiación emitida por una superficie a una determinada temperatura}}{\text{radiación emitida por una superficie a la misma temperatura si fuera un cuerpo negro}} \quad (1.8)$$

Absortividad (α)²⁰.- Representa la fracción de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Su valor está comprendido en el rango $0 < \alpha < 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él, es un absorbente perfecto ($\alpha=1$).

$$\alpha_s = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (1.9)$$

donde:

$G_{\lambda}(\lambda)$ = Irradiación espectral ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$)

$\alpha_{\lambda}(\lambda)$ = Absortividad hemisférica espectral.

Reflectividad (ρ)²¹.- Es la fracción de irradiación reflejada por una superficie.

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (1.10)$$

donde:

$G_{\lambda}(\lambda)$ = Irradiación espectral ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$)

$\rho_{\lambda}(\lambda)$ = Reflectividad hemisférica espectral.

²⁰ INCROPERA F. Pág. 665

²¹ INCROPERA F. Pág. 666

Transmisividad (τ)²².- Es la fracción de la radiación incidente que se transmite a través de un medio.

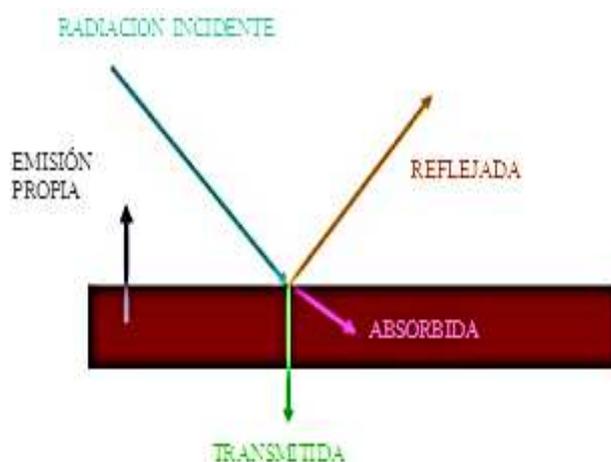
$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (1.11)$$

donde:

$G_{\lambda}(\lambda)$ = Irradiación espectral ($W/m^2 \cdot \mu m$).

$\tau_{\lambda}(\lambda)$ = Transmitividad hemisférica espectral.

La radiación incidente sobre una superficie se descompone en radiación: reflejada, absorbida y transmitida. Figura 1.9



$$G_{\lambda} = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr}$$

Figura 1.9.-Balance de radiación. Reflectancia, absorptancia y transmisividad.²³

1.5 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Con el objeto de predecir el rendimiento de cualquier sistema de conversión solar, los componentes directos y difusos de la radiación solar deben ser conocidos, razón por la cual se han construido diferentes dispositivos para cumplir con este objetivo. En el mercado se encuentran disponibles varios instrumentos para medir la radiación solar, la selección de un instrumento adecuado depende del tipo de radiación a medir.

²² <http://www.scribd.com/doc/93394044/Tema11-Radiacion-2>

²³ <http://www.scribd.com/doc/93394044/Tema11-Radiacion-2>

1.5.1 PIRANÓMETRO

El piranómetro, también conocido como solarímetro o actinómetro, se emplea para medir la radiación solar global (difusa y directa), dicha radiación se recibe en todas las direcciones, pero este instrumento usualmente se lo utiliza para medir la radiación que recibe sobre su superficie horizontal. Los solarímetros utilizan sensores que convierten la radiación en una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente, están protegidos por dos cúpulas semiesféricas de vidrio, que tienen como funciones principales filtrar la radiación infrarroja y permitir el paso de la radiación de onda corta. Figura 1.10.

Con este instrumento se obtienen las medidas de radiación en W/m^2 .



Figura 1.10.- Piranómetro²⁴

También se tienen piranómetros para medir únicamente radiación difusa, que a diferencia de los mencionados anteriormente, poseen una pantalla parasol para impedir el paso de la radiación directa al sensor. Figura 1.11.

1.5.2 ALBEDÓMETRO

Está constituido por dos piranómetros contrapuestos. Uno está orientado hacia arriba para medir la radiación global incidente y el otro se orienta hacia abajo para medir la radiación reflejada por la superficie. Este instrumento es de utilidad para calcular la radiación neta. Figura 1.12.

²⁴ <http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/INSTRUMENTACION/FIG8.htm>



Figura 1.11.- Piranómetro para radiación difusa.²⁵



Figura 1.12.- Albedómetro.²⁶

1.5.3 PIROHELIÓMETRO

El piroheliómetro o pirheliómetro es un instrumento utilizado para medir la radiación solar directa, su superficie receptora se dispone en forma normal a los rayos incidentes, por lo que está dotado de un dispositivo de seguimiento del sol.

Consiste en un tubo largo con una ranura circular por la cual penetra el rayo del sol y se proyecta en el otro extremo donde se encuentra el receptor. El valor de la medición se da en W/m^2 . Figura 1.13.

²⁵ <http://www.eltiempodelosaficionados.com/PARAQUESIRVE.html>

²⁶ <http://www3.uva.es/renova/esp/imagenes/albedometro.jpg>



Figura 1.13.- Piroheliómetro Ångstrom.²⁷

1.5.4 HELIÓGRAFO

El heliógrafo o heliofanógrafo sirve para medir la duración de la radiación solar, que se puede definir como el intervalo de tiempo durante el cual se ve el disco solar, y determina los períodos del día durante los cuales la intensidad de la radiación directa es superior a un cierto umbral, 120 W/m^2 , que está reconocido a nivel mundial.²⁸

Este instrumento consiste en una esfera de cristal que concentra los rayos solares y va quemando una franja, de tal manera que deja una huella sobre una cinta graduada de papel, a medida que el sol se desplaza. Figura 1.14.



Figura 1.14.- Heliógrafo²⁹

²⁷ <http://nestorcruzsastre.blogspot.com/2010/10/el-bolometro-y-el-pirheliometro.html>

²⁸ SÁNCHEZ M., Pág. 238

²⁹ <http://www.rumtor.com/heliografo.html>

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) establece normas de precisión para estos instrumentos de medida.

1.6 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR

Considerando que el tiempo de vida del Sol será de unos 6000 millones de años, se puede decir que éste es una fuente de calor y de energía garantizado por un largo tiempo. Por tanto, es necesario incrementar el aprovechamiento de este tipo de energía y así disminuir el uso de combustibles fósiles. Captando de forma adecuada la radiación solar, se puede obtener calor y electricidad. El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos.

1.6.1 PRINCIPALES APLICACIONES:

- Calentamiento de agua para consumo doméstico o industrial.
- Generación de energía eléctrica.
- Generación de calefacción para hogares, hoteles, colegios, fábricas, etc.
- Climatización de piscinas.
- Refrigeración durante las épocas cálidas.
- Acondicionamiento de aire
- Secado de granos, madera.
- Invernaderos solares.
- Plantas de purificación y de desalinización de aguas.

1.7 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR

1.7.1 VENTAJAS

- La energía solar térmica constituye una fuente de energía limpia, accesible, inagotable y gratuita.
- No contamina ni el aire ni los suelos.
- No provoca ruidos.
- No genera dependencia energética, ya que es de carácter autónomo y descentralizado, lo que permite alcanzar un desarrollo sostenible.

- El uso de energía solar térmica contribuye de forma eficaz a la reducción de emisiones de CO₂.
- La utilización de sistemas solares térmicos conlleva el aprovechamiento de uno de los principales recursos que tiene el Ecuador por su ubicación, y en particular la ciudad de Quito.

1.7.2 INCONVENIENTES

- En el diseño de equipos para utilización de energía solar el principal inconveniente es el flujo energético de baja densidad, lo que hace necesario el empleo de grandes superficies para captar la energía solar, para una utilización a gran escala.
- La energía entregada por el sol se pierde principalmente en la atmósfera y los gases que la componen, y en las nubes.
- La potencia y el calor de la energía solar es intermitente. La energía solar tiene un ciclo regular diario debido a la rotación del sol.
- La inversión inicial elevada es uno de los limitantes para masificar el uso de sistemas solares térmicos, ya que realizar la instalación supone adelantar el pago de la energía futura que se obtendrá del sistema.

1.8 ENERGÍA SOLAR EN EL ECUADOR

El Ecuador es un país que por su ubicación geográfica recibe una mayor cantidad de energía solar que otras partes del mundo, es por esta razón que se ha dado un gran impulso al estudio de la energía solar y sus aplicaciones para reducir el consumo de los combustibles fósiles y aprovechar este recurso renovable.

La radiación solar varía mucho de acuerdo con la duración del día, con el ángulo formado por la tierra y los rayos del sol, con la longitud y tipo de camino recorrido por los mismos a lo largo de la atmósfera y particularmente con la cantidad de nubes. Por lo tanto, la radiación varía con la localización geográfica, la altitud y el clima.³⁰

³⁰ FARRINGTON D., Pág. 27

Se han elaborado mapas de la radiación difusa, directa y global que incide sobre el territorio ecuatoriano, los que se muestran en las figuras 1.15 – 1.17.

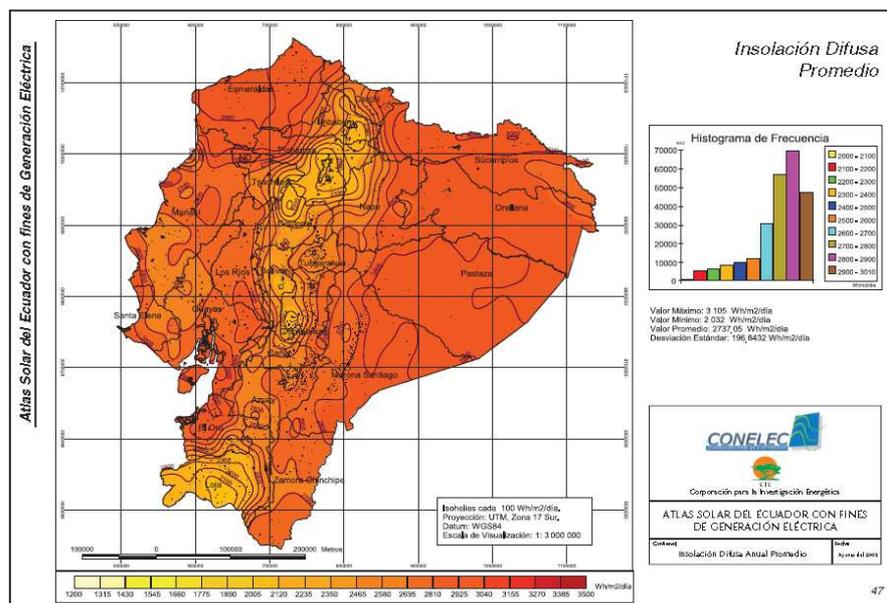


Figura 1.15.-Insolación Difusa Promedio³¹

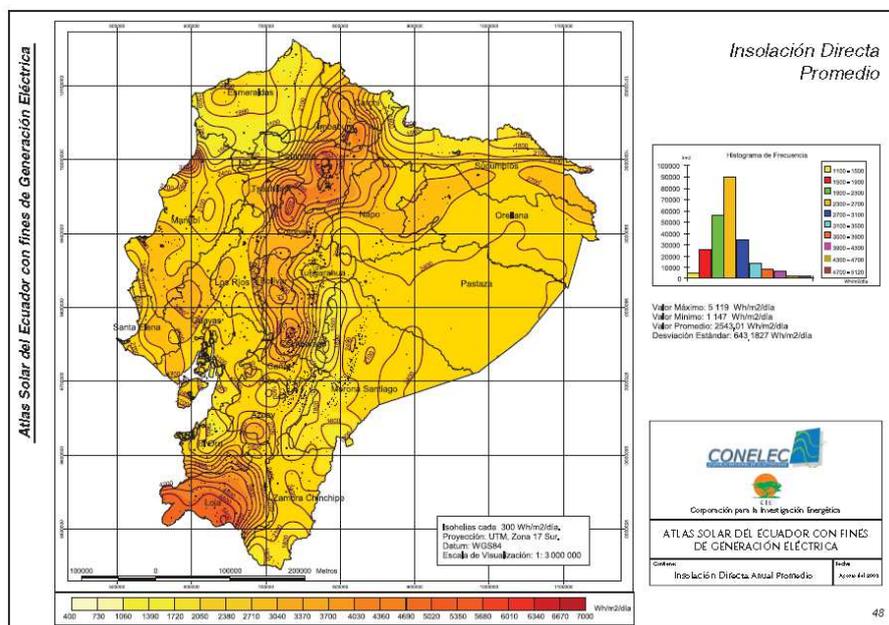


Figura 1.16.-Insolación Directa Promedio³²

³¹http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf

³²http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf

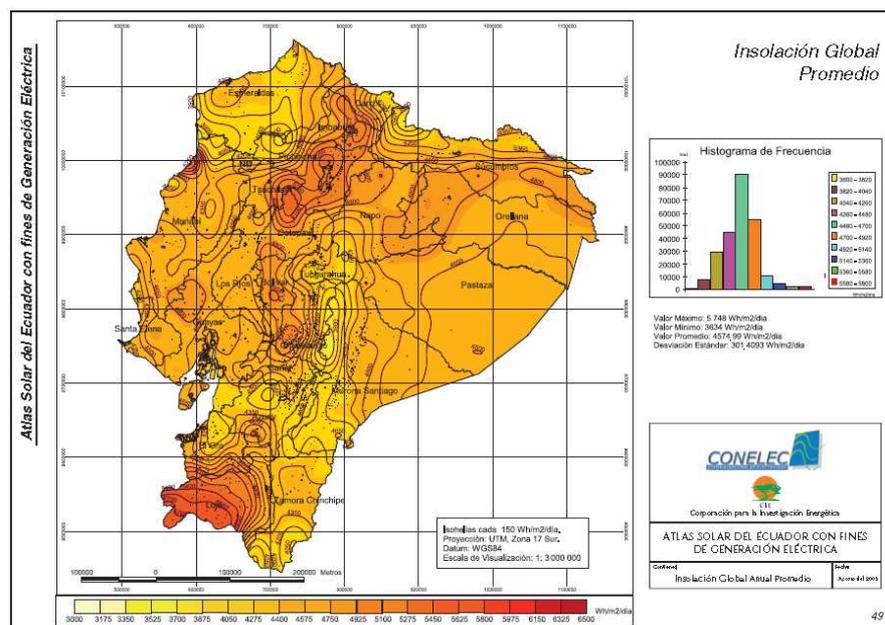


Figura 1.17.-Insolación Global Promedio³³

1.9 RADIACIÓN SOLAR EN QUITO³⁴

El presente proyecto se desarrollará en la ciudad de Quito, por tanto es necesario tomar en cuenta sus aspectos geográfico y meteorológico, para determinar las condiciones a las que estará sometido el sistema de calentamiento de agua sanitaria tipo Bread - Box, con esta información se establecerán los parámetros de diseño.

Ubicación Geográfica.- Quito está ubicada en las coordenadas $0^{\circ}13'23''S$ y $78^{\circ}30'45''O$ ³⁵, prácticamente se encuentra sobre la línea ecuatorial, por tanto recibe una mayor incidencia de radiación solar, la cual inclusive en días nublados disminuye en poca cantidad

Hora solar.- La radiación es mayor al medio día, entre las 12 y 15 horas, esto depende de la hora solar de la región, en Ecuador es 12h45.

Altitud.- Quito se encuentra a 2800 m.s.n.m., por esta razón existe mayor incidencia de radiación solar, que en ciudades localizadas a nivel del mar. Cada 330 m la radiación UV aumenta entre un 6-10 %.

³³http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf

³⁴ ALMEIDA J., CAMACHO P., Pág. 5y6

³⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Quito>

En la tabla 1.1 se pueden observar los parámetros meteorológicos más importantes de la ciudad de Quito. En la misma se indica que la radiación solar promedio en Quito tiene un valor que oscila entre 328.7 W/m² y 468.9 W/m² a lo largo del año. A pesar de que la ciudad tiene dos períodos bien marcados uno de lluvias y otro de estación seca entre los meses de Junio – Septiembre, siempre existe una cantidad considerable de radiación solar, lo cual representa una ventaja en el desarrollo de proyectos de energía solar, ya que se puede predecir de mejor forma su funcionamiento y comportamiento.

Tabla 1.1 Parámetros Meteorológicos de la ciudad de Quito para el año 2009³⁶

Meses	Velocidad del viento [m/s]			Temperatura [°C]			Humedad Relativa [%]			Radiación [W/m ²]			Energía disponible [MJ/ mes*m ²]	Precipitación [mm ³]
	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Total	Total
Enero	0	5,2	0,80	8,5	19,6	12,40	45,9	100,0	87,80	0	1093	338,1	196,52	165,8
Febrero	0	5,1	0,84	6,9	21,0	12,53	39,2	99,7	86,60	0	1216	328,7	400,03	141,5
Marzo	0	6,9	0,96	7,8	21,7	12,79	31,9	99,5	86,23	0	1154	359,8	488,34	0,0
Abril	0	5,4	1,03	8,3	21,1	12,92	33,5	100,0	81,64	0	1250	400,0	699,97	161,3
Mayo	0	5,2	1,06	7,2	21,3	13,12	19,6	99,3	79,39	0	1248	347,1	475,25	0,0
Junio	0	6,8	1,25	7,4	20,6	13,26	36,8	99,3	75,47	0	1063	331,7	434,68	3,05
Julio	0	6,4	1,53	7,6	21,1	13,49	24,5	98,9	64,11	0	1134	432,3	447,46	2,6
Agosto	0	6,1	1,57	7,6	20,7	13,81	27,7	98,9	65,56	0	1136	393,9	534,77	1,0
Septiembre	0	6,6	1,8	6,9	22,4	14,15	16,2	98,6	56,82	0	1227	468,9	616,15	7,4
Octubre	0	6,3	1,19	8	22,2	13,48	12,7	99,6	75,23	0	1236	370,9	517,47	69,4
Noviembre	0	5,0	1,04	6,7	20,4	13,08	12,0	99,4	75,57	0	1108	389,7	575,60	71,3
Diciembre	0	5,3	1,10	12,9	23,5	10,29	57,0	87,0	74,58	0	1278	401,5	415,11	120,0

Fuente: Datos proporcionados por INAMHI de la Estación Meteorológica del sector de Iñaquito

³⁶ ALMEIDA J., CAMACHO P., Pág. 9

CAPÍTULO II

SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

El agua caliente constituye el segundo consumo energético más importante en el hogar, por sus usos tanto en la higiene personal como en la limpieza de la casa, es por esto, que se pretende encontrar alternativas amigables con el ambiente y de bajo costo. En este capítulo se tratará sobre los sistemas solares térmicos para calentamiento de agua sanitaria, sus componentes, características principales y los tipos usados con mayor frecuencia.

2.2 HISTORIA

Durante siglos los seres humanos han aprovechado la energía del sol en diferentes actividades, 500 años A.C. los griegos ya utilizaron la energía solar pasiva en el diseño de sus casas para captar el calor durante el invierno. Del mismo modo los romanos perfeccionaron su arquitectura al construir casas con ventanas orientadas hacia el sur cubiertas con materiales transparentes como la mica, de esta forma se evitaba la disipación del calor captado durante el día.

En el año de 1760, el suizo Horace de Saussure construyó una caja rectangular con una cubierta de vidrio y aislamiento térmico, este invento se considera como el primer colector solar, ya que en su interior alcanzaba una temperatura de 110°C. Saussure hizo varios experimentos con su equipo en diferentes condiciones de altura y temperatura ambiente y notó que la temperatura en el interior de la caja se encontraba siempre alrededor del mismo valor.

Otro aporte importante lo realizó el físico francés Claude Pouillet al inventar el piranómetro también conocido como solarímetro, este instrumento permite medir de manera muy precisa la radiación solar.

Posteriormente, y basándose en las investigaciones de Saussure y Pouillet, Auguste Mouchot contempla el uso de energía solar como alternativa a la energía térmica producida con carbón, es por esto, que en 1866 tras varios experimentos

logró desarrollar el primer colector solar cilindro-parabólico, Mouchot continuó sus investigaciones y en 1869 publicó el libro denominado “El calor solar y sus aplicaciones industriales”.

En 1871, el norteamericano Charles Wilson instaló en Las Salinas, Chile un destilador solar pasivo, que consistía en 4700 m² de superficie acristalada que al día producían 22710 litros de agua. Este destilador se mantuvo en operación durante 40 años.³⁷

En 1885, el francés Charles-Albert Tellier, construyó un motor solar único en varios sentidos. En lugar de usar un colector de foco, como todos sus predecesores, Tellier usó un tipo de “chapa plana”. Sus 20 m² de superficie accionaban un motor por medio del amoníaco y no del vapor, el aire o el agua.³⁸ Tellier pensaba que añadiendo colectores planos su idea podía usarse como un sistema industrial.

En 1907, se patentó por primera vez en Alemania un diseño sobre colectores parabólicos, por el Dr. Wilhelm Maier (en Aalen) y Adolf Remshardt (en Stuttgart).³⁹

A inicios del siglo XX, el ingeniero Frank Shuman en sus investigaciones notó que los sistemas de captación solar de altas temperaturas presentaban pérdidas por conducción y convección, y tenían como inconveniente adicional un elevado costo. Por ello, retomó sus estudios con colectores solares de caja, ya que él aseguraba que con ellos podía obtener temperaturas lo suficientemente altas como para hervir agua.

En 1912, Shuman puso en marcha la construcción de una planta solar a gran escala en Egipto, se instalaron cinco colectores solares con reflector parabólico con lo que se alcanzó 55 caballos de potencia al captar el 40% de la energía solar disponible, lamentablemente el éxito duro poco, ya que en 1915 la planta fue cerrada debido a la Primera Guerra Mundial.

³⁷ HALACY, Daniel. Pág. 49.

³⁸ HALACY, Daniel. Pág. 47.

³⁹ <http://www.slideshare.net/geopaloma/historia-de-la-energa-solar-termica-i>

En 1930, en Japón se empezaron a utilizar equipos de circulación natural con el fin de obtener agua caliente sanitaria. Pero fue a partir del año de 1970 cuando el precio del petróleo se elevó en gran medida que se optó por utilizar una energía más económica como lo es la solar, generando así mayor desarrollo en este campo.

2.3 SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS PARA CALENTAMIENTO DE AGUA. DEFINICIÓN

Un sistema solar térmico es el conjunto de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos que permiten captar la energía del sol y transformarla en calor con el fin de obtener agua caliente sanitaria.⁴⁰

2.4 COMPONENTES DE UN SISTEMA SOLAR TÉRMICO.⁴¹

Una instalación solar térmica está integrada generalmente por los siguientes elementos:

- Subsistema de captación, formado por uno o más colectores que transforman la radiación solar incidente en energía térmica.
- Subsistema de acumulación, integrado por uno o varios depósitos de almacenamiento de agua caliente hasta que ésta sea usada.
- Circuito hidráulico, conformado por tuberías, válvulas, bombas, elementos de seguridad, etc., se encarga de transportar a los puntos de consumo el agua calentada en el subsistema de captación.
- Subsistema de energía convencional auxiliar, entra en funcionamiento para apoyar a los colectores cuando la temperatura del agua a la salida del tanque de almacenamiento es inferior a los requerimientos de la demanda.
- Subsistema de regulación y control, asegura el correcto funcionamiento del equipo, con el fin de proporcionar la cantidad de agua caliente necesaria y de aprovechar la máxima energía solar disponible.

En la figura 2.1 se pueden observar los componentes de una instalación solar térmica.

⁴⁰ MÉNDEZ J., CUERVO R., Pág. 44.

⁴¹ ZABALA, I. ARANDA, A. Pág. 44.

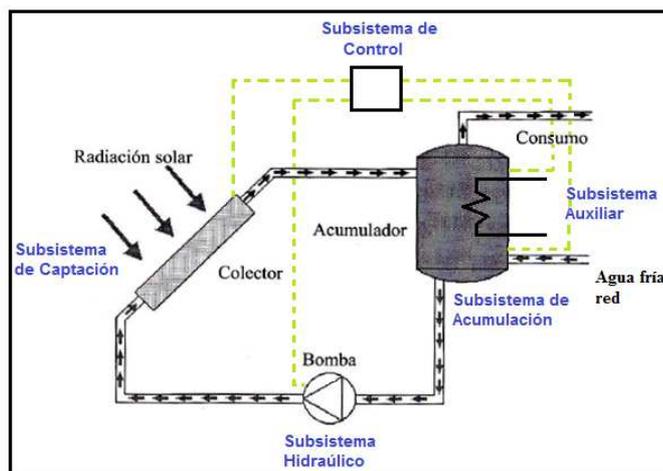


Figura 2.1.- Instalación de transferencia directa.⁴²

2.4.1 SUBSISTEMA DE CAPTACIÓN

2.4.1.1 Colector Solar.

El colector solar para calentamiento de agua es un dispositivo que permite captar y absorber la radiación solar para transformarla en energía térmica, la cual se transfiere al agua para elevar su temperatura.

2.4.1.1.1 Características de los Colectores Solares Térmicos.

- Absortancia (α), emitancia (ϵ) y transmitancia (τ); propias de los materiales del colector.
- Índice de efectividad (α/ϵ), indica la eficiencia del absorbedor.
- Rendimiento, es la fracción de energía que absorbe el captador, tomando en cuenta que no toda la energía es absorbida debido al fenómeno de reflexión o a las pérdidas de calor en el ambiente.

2.4.1.1.2 Principales Componentes de un Colector

Un colector solar consta de varios elementos que permiten su correcto funcionamiento. En la figura 2.2, se muestra un esquema básico de los componentes de un colector solar.

⁴² ZABALA, I. ARANDA, A. Pág. 209.



Figura 2.2.- Corte de un colector solar de placa plana⁴³

2.4.1.2 Cubierta

La cubierta debe ser de un material transparente para permitir la transmisión de la radiación solar incidente de onda corta y opaco para que la radiación de onda larga emitida por el absorbedor no se transmita al exterior, de modo que en el interior del captador solar se produzca el efecto invernadero, al mismo tiempo que las pérdidas por radiación y convección del captador hacia el ambiente sean mínimas.

2.4.1.2.1 Características Principales de la Cubierta

La cubierta de un captador solar debe tener las siguientes cualidades:

- Alto coeficiente de transmisión⁴⁴ para la radiación de onda corta. Este coeficiente debe conservarse a pesar de la incidencia de radiación solar y las condiciones ambientales.
- Bajo coeficiente de transmisión para la radiación de onda larga emitida por el absorbedor.
- Bajo coeficiente de conductividad térmica⁴⁵ para minimizar pérdidas, ya que dificulta el paso del calor desde la cara interior de la cubierta hacia el ambiente.

⁴³ <http://www.masters-energia-solar.com/>

⁴⁴ Coeficiente de transmisión, describe la amplitud de una onda transmitida respecto a la onda incidente.

- Alto coeficiente de reflexión⁴⁶ en la cara interior, para que la radiación de onda larga emitida por el absorbedor se refleje y vuelva nuevamente hacia él.
- Bajo coeficiente de reflexión en la cara exterior, para disminuir las pérdidas por reflexión de la radiación incidente.
- Bajo coeficiente de dilatación⁴⁷ a fin de evitar deformaciones y posibles rupturas.
- Alta resistencia mecánica contra agentes atmosféricos, para tener una larga vida útil.

2.4.1.2.2 Tipos de cubiertas

La mayoría de colectores solares disponibles en el mercado tienen cubierta de vidrio simple, sin embargo, se pueden encontrar colectores con cubiertas de doble vidrio o de materiales plásticos.

- Cubiertas de vidrio simple

Por lo general los vidrios utilizados como cubierta en colectores, son vidrios templados, debido a que sus propiedades ópticas se mantienen invariantes y sus propiedades mecánicas mejoran. El vidrio debe contener el mínimo porcentaje posible de óxidos de hierro para tener una mejor transmisividad de la radiación de onda corta.

- Cubiertas de doble vidrio⁴⁸

Las cubiertas de doble vidrio favorecen al efecto invernadero, ya que se reducen las pérdidas por convección, de esta manera aumenta la temperatura que alcanza el absorbedor. Sin embargo, las pérdidas por reflexión y absorción son mayores, debido a que la energía solar que llega al absorbedor es menor. Por tanto, con una cubierta de doble vidrio se produce un doble efecto: disminuye la energía

⁴⁵ Coeficiente de conductividad térmica, cantidad o flujo de calor que pasa a través de la unidad de superficie de un material cuyo espesor es la unidad, cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas igual a la unidad, en condiciones estacionarias.

⁴⁶ Coeficiente de reflexión, describe la amplitud de una onda reflejada respecto a la onda incidente.

⁴⁷ Coeficiente de dilatación, mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido experimenta un cambio de temperatura.

⁴⁸ ZABALA, I. ARANDA, A. Pág. 67.

recibida por el absorbedor y disminuyen también las pérdidas. Su uso depende de la climatología del lugar.

- Cubiertas de materiales plásticos.

Se utilizan plásticos con propiedades ópticas similares a las del vidrio, éstos suelen estar formados de varias películas flexibles o por placas rígidas. Este tipo de cubiertas frente a las de vidrio ofrecen ventajas como menor peso, menor fragilidad y menor conductividad térmica. Pero, presentan inconvenientes como su poca resistencia a temperaturas elevadas, baja dureza e inestabilidad química.

2.4.1.3 Absorbedor

El absorbedor es el elemento encargado de captar la radiación solar, transformarla en calor y transferirla al fluido de forma eficiente.

2.4.1.3.1 Características principales del absorbedor

El absorbedor debe ser de un material con alta conductividad térmica, una adecuada resistencia a esfuerzos de tracción y compresión, y una buena resistencia a la corrosión. Generalmente, el material más utilizado es el cobre por sus propiedades, pero también se emplean materiales como el aluminio, hierro y algunos termoplásticos. En la tabla 2.1 se muestran algunos de los metales más empleados en la construcción de absorbedores.

La superficie del absorbedor expuesta al sol debe ser cubierta por un revestimiento que optimice la absorción de la radiación solar. Por lo general, se utilizan recubrimientos por pinturas o superficies selectivas. Las pinturas oscuras o negras tienen como ventaja un alto coeficiente de absorción, pero por otra parte, su coeficiente de emisión es también alto, por lo que pierde energía casi tan rápido como la gana, a elevadas temperaturas.

Existen otro tipo de revestimientos que son denominados superficies selectivas por la diferencia que existe entre su alto coeficiente de absorción y su bajo coeficiente de emisión. Este tipo de superficies se logran mediante superposición de varias capas de metal y compuestos metálicos, y por tratamientos especiales de las superficies. Las superficies selectivas garantizan una mayor vida útil y

mejor rendimiento que un revestimiento de pintura, pero su costo es mucho más elevado

Tabla 2.1 Propiedades de metales usados para absorbedores⁴⁹

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kg°C)	Conductividad térmica (W/m°C)
Aluminio	2707	0.996	204
Hierro	7897	0.452	73
Acero	7833	0.465	54
Cobre	8954	0.383	386
Latón (70/30)	8522	0.385	111
Plata	10524	0.234	419
Estaño	7304	0.226	64
Zinc, puro	7144	0.384	12

2.4.1.4 Aislamiento Térmico

Las partes del absorbedor que no necesitan ser transparentes a la radiación deben ser protegidas por una capa de material aislante térmico para reducir las pérdidas de calor al exterior.

2.4.1.4.1 Características principales del aislante.

Se debe tener en cuenta dos características muy importantes en la selección del aislamiento térmico, el coeficiente de conductividad y la temperatura de trabajo máxima. Por ello, debe cumplir con las siguientes cualidades:

- Baja conductividad térmica.
- Resistencia a altas temperaturas sin deteriorarse.
- No emitir vapores que puedan llegar a condensarse en la cara interior de la cubierta.

⁴⁹ GARG. PRAKASH,H. Pág. 50

- No debe disminuir sus propiedades aislantes por absorción de humedad del ambiente.
- No deteriorarse en exceso con el paso de los años a la temperatura normal de funcionamiento.

2.4.1.5 Carcasa

La misión de la caja o carcasa es la de contener todos los elementos que forman el captador solar, y dar rigidez al mismo, permitiendo que el captador sea fijado a una estructura que soporte la acción de los agentes atmosféricos y de la radiación solar, impidiendo su rápido deterioro con el paso del tiempo.⁵⁰

Los materiales más utilizados para la construcción de la caja son aluminio, aluminio anodizado, acero galvanizado y madera debidamente tratada para evitar su rápida degradación.

Tabla 2.2 Características de algunos aislantes usualmente utilizados.⁵¹

MATERIAL	Conductividad térmica a 50°C (W/mK)	Temperatura máxima de utilización (°C)
Lana de vidrio	0,05	150
Lana de roca	0,05	150
Espuma de vidrio	0,057	150
Corcho expandido	0,42	110
Poliestireno	0,42	85
Poliuretano	0,027	110

2.4.1.5.1 Características principales de la caja.

Las cualidades con las que debe contar la carcasa son:

- Elevada rigidez, para resistir la presión del viento.
- Resistencia a cambios de temperatura, ya que éstos provocan irregularidades en la forma debido a la dilatación y contracción.

⁵⁰ FERNÁNDEZ, J. Pág. 69

⁵¹ ZABALA, I. ARANDA, A. Pág. 73.

- Orificios en la parte inferior, que permitan la aireación interior y eviten la condensación del agua.

2.4.1.6 Clasificación de Colectores Solares⁵²

Existen en la actualidad tres grandes grupos de captadores solares térmicos en función de la temperatura a la que son capaces de calentar el fluido. Figura 2.3.

2.4.1.6.1 Colectores de baja temperatura.

Tienen la capacidad de calentar el fluido hasta una temperatura menor al punto de ebullición del agua (100°C a nivel del mar). La captación se realiza de forma directa, sin la concentración de rayos solares.

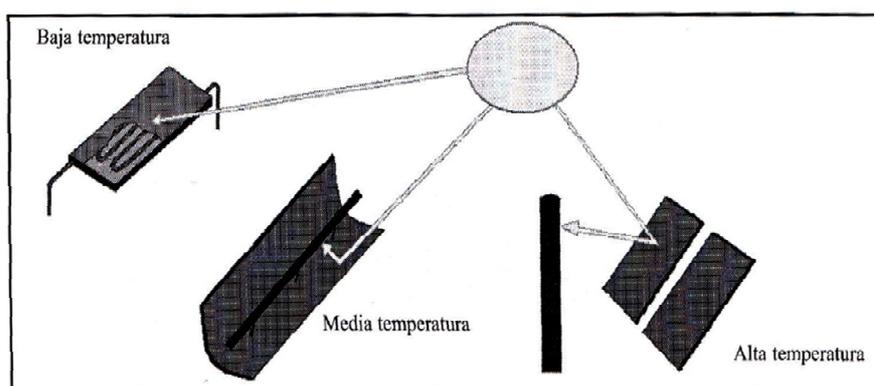


Figura 2.3.- Clasificación de los colectores solares térmicos en función de su temperatura de trabajo.⁵³

Según los materiales y las técnicas de captación empleadas se tienen los siguientes tipos de colectores:

- Colectores de polipropileno

Están compuestos de una gran cantidad de tubos, por los cuales circula el agua que va a ser calentada. Su temperatura de trabajo es del orden de 25 a 35 °C.

El equipo no dispone de cubierta, aislante ni carcasa, por lo que la pérdida de calor es grande.

⁵² ZABALA, I.; ARANDA A., Pág. 33-43

⁵³ ZABALA, I.; ARANDA A., Pág. 33



Figura 2.4.- Colector solar de polipropileno.⁵⁴

- Colectores de placa plana

Son el tipo de colectores de más disponibilidad en el mercado. Su temperatura de funcionamiento oscila entre 50 y 70 °C.

Este equipo dispone de cubierta exterior, absorbedor, aislante térmico y carcasa.



Figura 2.5.- Colector solar de placa plana.⁵⁵

- Colector de tubos de vacío.

En este tipo de colectores se reemplaza el aislamiento tradicional por uno de vacío, que le permite tener un mejor rendimiento y alcanzar temperaturas

⁵⁴ <http://www.instalaciones-solares.com/fotos/colectores-polipropileno.jpg>

⁵⁵ <http://www.solostocks.com/img/termosifon-t150-hs-202-4926823z0.jpg>

superiores a los 70°C. En este equipo la placa de absorción se encuentra encapsulada en un tubo de cristal, que se encuentra en vacío, logrando un aislamiento térmico eficaz.

Su forma tubular obedece a la necesidad de soportar la elevada presión de su interior.

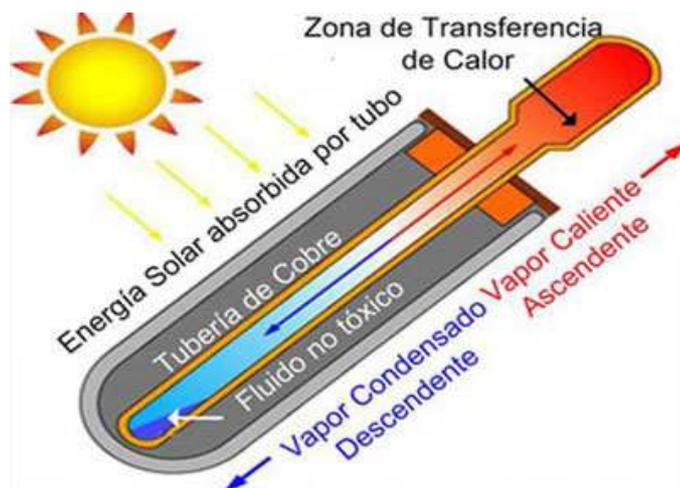


Figura 2.6.- Colector solar de tubos de vacío.⁵⁶

2.4.1.6.2 Colectores de media temperatura.

Este tipo de colectores consiguen aumentar la radiación por unidad de área, debido a que tiene un pequeño índice de concentración de los rayos solares, por esta razón alcanzan temperaturas más elevadas, cuyo rango se sitúa entre 100 y 400 °C.

- Colectores cilindro-parabólicos (CPC).

Estos colectores permiten un gran aprovechamiento de la radiación solar incidente, al ser ésta concentrada de manera óptima mediante una superficie reflectora con forma cilíndrica sobre un receptor lineal (tubo de vidrio) por el que circula el fluido a calentar. El objetivo último es suministrar agua suficiente para un consumo doméstico sostenible, de forma autónoma, sin suministro de corriente eléctrica ni de productos químicos adicionales.

⁵⁶ <http://www.solarfree.cl/nuestra-tecnologia/comparacion-colectores.php>

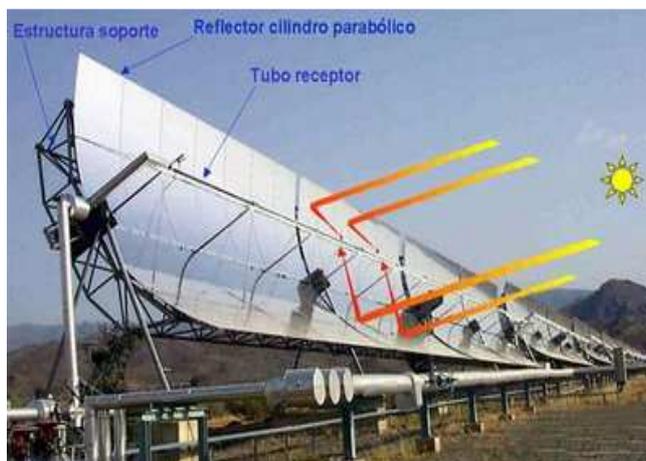


Figura 2.7.- Colector cilindro-parabólico.⁵⁷

2.4.1.6.3 Colectores de alta temperatura.

A diferencia de los colectores de media temperatura, estos colectores tienen un alto índice de concentración de los rayos solares, se alcanzan temperaturas superiores a los 400 °C. Dentro de esta categoría los colectores más representativos son los helióstatos y los discos parabólicos.

- Helióstatos

Los helióstatos son un conjunto de espejos con un mecanismo de seguimiento solar en dos ejes, uno de altura solar y otro azimutal. Tienen por función captar la radiación solar y reflejarla hacia un receptor ubicado en una torre. Figura 2.8.



Figura 2.8.- Helióstatos.⁵⁸

⁵⁷ <http://themorningstarg2.files.wordpress.com/2012/03/cilindro-parabolico12.jpg>

- Discos parabólicos.

Estos concentradores poseen una superficie reflectora en forma de paraboloide que, ya sea de metal, de vidrio o de plástico, concentra la radiación solar directa incidente en una pequeña región llamada foco, o zona focal. Figura 2.9.

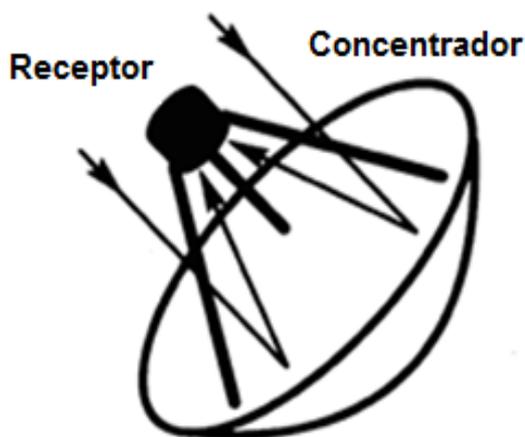


Figura 2.9.- Disco parabólico.⁵⁹

2.4.2 SUBSISTEMA DE ACUMULACIÓN⁶⁰

Este subsistema consiste en uno o varios acumuladores cuya función principal es la de almacenar el agua de consumo una vez calentada, ya que en los sistemas de energía solar térmica es imprescindible disponer del servicio independientemente de las condiciones de radiación en cada instante.

Un acumulador bien dimensionado es capaz de mantener la temperatura durante un período aproximado de tres días, sin que exista aporte alguno de calor como ocurre en época de lluvias, días nublados o por averías del subsistema de captación. Conforme disminuye la temperatura el subsistema de apoyo auxiliar se conecta y calienta el agua hasta alcanzar la temperatura de consumo deseada.⁶¹

⁵⁸ <http://vivirmexico.com/2011/10/unam-inaugura-campo-de-pruebas-de-heliostatos-en-sonora>

⁵⁹ <http://www.energiasolartermica.biz/tag/discos/>

⁶⁰ FERNANDEZ J., Pág. 114.

⁶¹ OLIVARES J., Pág. 90

2.4.2.1 Tipos de acumulador

2.4.2.1.1 Acumuladores sin Intercambiador

Se encargan únicamente de almacenar el agua que es calentada, ya que no disponen de ningún elemento interno con el que se produzca intercambio de calor. Tiene como desventaja que su rendimiento es inferior a los acumuladores con intercambiador, no obstante, su costo de fabricación a partir de cierto tamaño es significativamente menor. Figura 2.10.



Figura 2.10.- Acumulador sin intercambiador.⁶²

2.4.2.1.2 Interacumuladores⁶³ de Intercambio Simple

Estos modelos poseen un serpentín para el intercambio de calor, suelen ser de disposición vertical y se los utiliza comúnmente en equipos termosifón con configuración horizontal. Figura 2.11.

2.4.2.1.3 Interacumuladores con Doble Intercambio

Este tipo de interacumuladores cuentan en su interior con dos elementos de transmisión de calor, que por lo general son dos serpentines, alimentados cada uno por fuentes de calor independientes. Estos equipos suelen ser acumuladores verticales con dos serpentines, el primero es alimentado directamente por el fluido

⁶² <http://www.cleanergysolar.com/wp-content/uploads/2011/07/El-intercambiador-de-calor-17.jpg>

⁶³ Interacumulador. Acumulador que tiene instalado en su interior un dispositivo para intercambio de calor.

del sistema solar y el segundo por un fluido calentado por el subsistema auxiliar.
Figura 2.12.

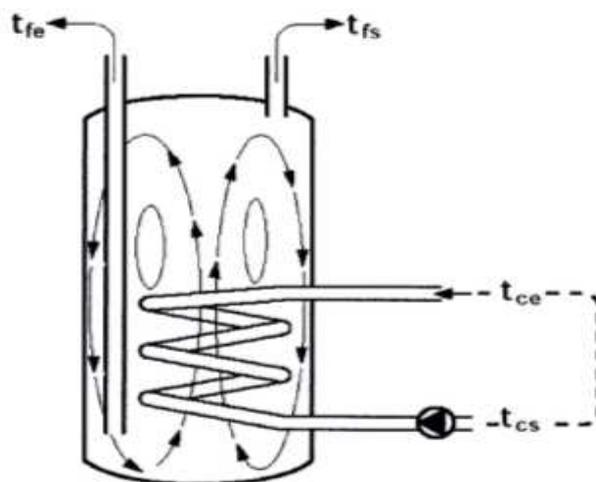


Figura 2.11.- Intercambiador simple serpentín⁶⁴



Figura 2.12.- Intercambiador de doble serpentín.⁶⁵

2.4.3 SUBSISTEMA HIDRÁULICO.⁶⁶

Un diseño sencillo y adecuado del circuito hidráulico, permitirá tener un sistema bien equilibrado. Es decir, los tendidos de tuberías deben ser lo más cortos posible, intercalando únicamente los elementos que sean necesarios y el caudal debe ser repartido de forma homogénea por las tuberías.

⁶⁴ FERNANDEZ J., Pág. 114.

⁶⁵ <http://www.climamania.com/energia-solar-termica-acumulacion-daitsu-daintersol2-160.html>

⁶⁶ OLIVARES J., Pág. 66

Se pueden tener en cuenta los criterios establecidos por el Código Técnico de la Edificación, que son:

- La V_{\min} de circulación en las tuberías es de 0,6 m/s
- La V_{\max} de circulación en las tuberías es de 2,0 a 3,0 m/s
- La presión de trabajo se sitúa entre los 2,0 y 4,5 bares (kg/cm^2)
- Los cambios bruscos de sección, sobre todo las reducciones, introducen importantes pérdidas de carga.
- Los sifones dan lugar a tapones de aire.

En la tabla 2.3 se tienen datos orientativos para elegir el diámetro de la tubería respecto al caudal que circula por la misma.

Tabla 2.3. Relación entre diámetro de tubería y caudal recirculado en ACS. Datos orientativos.⁶⁷

Diámetro (pulg)	Caudal L/h
$\frac{1}{2}$	140
$\frac{3}{4}$	300
1	600
1 $\frac{1}{4}$	1100
1 $\frac{1}{2}$	1800
1 $\frac{3}{4}$	2500
2	3300

2.4.4 SUBSISTEMA DE ENERGÍA CONVENCIONAL AUXILIAR

El sistema solar térmico funciona de forma constante, pero en algunos casos no logra entregar la energía requerida para obtener el agua caliente sanitaria a la temperatura deseada, es por esto que se implementa un sistema de apoyo auxiliar para mantener y elevar la temperatura, unos pocos grados, cuando sea necesario. El equipo auxiliar puede ser eléctrico, de gas, biomasa o cualquier otro combustible. Se lo instala a continuación de la salida de agua caliente sanitaria del acumulador y posee una entrada de agua caliente o fría en función de la

⁶⁷ OLIVARES J., Pág. 66

época del año. En la figura 2.13 se observan los diferentes sistemas de apoyo auxiliar.

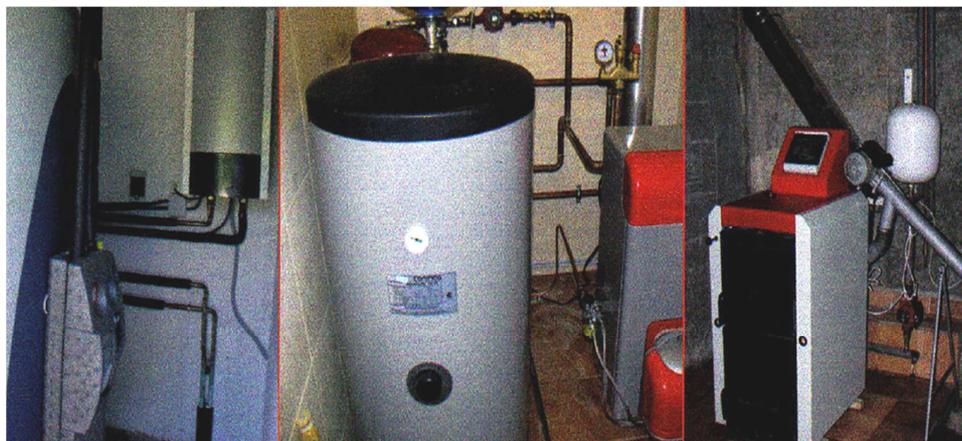


Figura 2.13.- Sistemas de apoyo auxiliar. Eléctrico, gas natural, biomasa.⁶⁸

El sistema auxiliar más usado es el eléctrico, por su fácil instalación y porque no genera emisiones nocivas para la salud.

2.4.5 SUBSISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL

El subsistema de control de una instalación solar se encarga de regular el correcto funcionamiento de la misma, es decir, los flujos de energía entre el colector, el subsistema de acumulación y el consumo, de manera que se tenga un rendimiento óptimo y se eviten las averías.



Figura 2.14.- Sensores, regulador y actuadores.⁶⁹

⁶⁸ OLIVARES J., Pág. 116

Este subsistema mide una serie de parámetros, los interpreta y en función de los valores que obtiene, acciona o detiene automáticamente el funcionamiento de alguno de los componentes de la instalación,⁷⁰ mediante los dispositivos electrohidráulicos por los que está constituido como bombas, electroválvulas, etc. El subsistema de control generalmente consta de sensores, actuadores y reguladores.

2.5 TIPOS DE SISTEMAS SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AGUA.⁷¹

Los sistemas solares de calentamiento de agua pueden ser pasivos o activos, y directos o indirectos.

2.5.1 SISTEMAS PASIVOS

Utilizan la convección natural para hacer circular el agua caliente o el fluido de transferencia de calor, a través del colector y del tanque de almacenamiento. En los sistemas pasivos, el agua caliente se puede almacenar en el propio colector (sistemas de lotes) o se transfiere a un tanque de almacenamiento situado por encima de los colectores por medio de un termosifón. Estos sistemas no utilizan bombas eléctricas para la circulación de agua.

2.5.1.1 Sistema integral de almacenamiento (ICS)

Es el sistema pasivo más simple, se lo conoce también como sistema de proceso por lotes o tipo Bread-Box. En él, el agua doméstica se calienta directamente por el sol, y el acumulador sirve como colector solar. Figura 2.15.

La principal desventaja de estos sistemas es las altas pérdidas térmicas desde el tanque de almacenamiento a los alrededores, debido a que su superficie no puede estar aislada por completo, ya que debe estar expuesta a la radiación solar.

⁶⁹ OLIVARES J., Pág. 108

⁷⁰ OLIVARES J., Pág. 107

⁷¹ http://kysolar.org/ky_solar_energy_guide/chapters/Chapter_8_SWH_SystemTypes.pdf

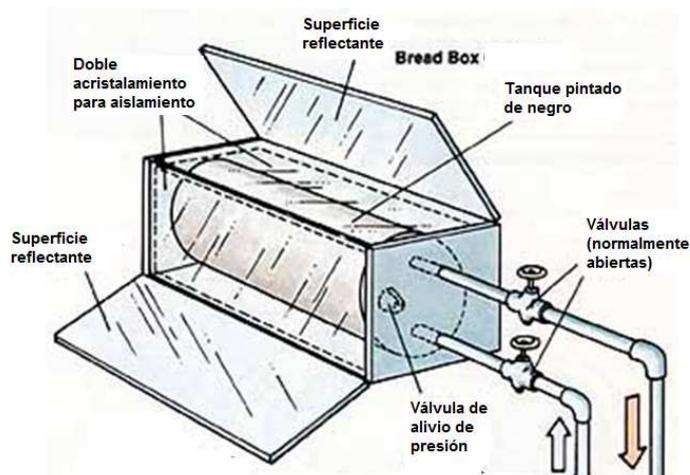


Figura 2.15.- Sistema Bread-Box.⁷²

2.5.1.2 Sistema termosifón

Son sistemas pasivos y directos que utilizan colectores de placa plana para la captación de energía, transportan el agua calentada desde el colector hasta el tanque de almacenamiento por circulación natural. Estos sistemas son confiables y relativamente económicos. En la figura 2.16 se observa un esquema de una instalación termosifón, en la cual el tanque se encuentra ubicado por encima del captador para favorecer la circulación.

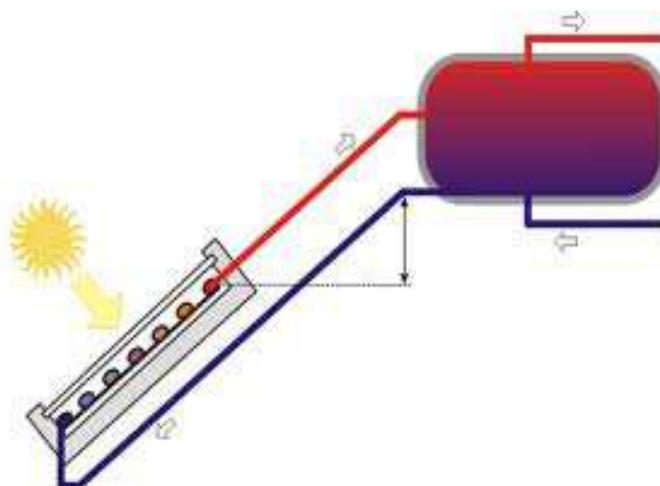


Figura 2.16.- Sistema solar de funcionamiento por termosifón.⁷³

⁷² http://www.faryal.net/energy-saving-projects-home_orth_5-8.html

⁷³ http://t2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRg0kMgdZyaV_OjD5-6x0psEiyffNsipK6p6ik600InhlIzyJC2XGyq9qcW

2.5.2 SISTEMAS ACTIVOS

Los sistemas activos utilizan bombas para producir la circulación forzada de agua u otro líquido de transferencia de calor, y en ocasiones usan válvulas de accionamiento eléctrico para la protección contra el congelamiento. La ventaja que proporciona la mayoría de los sistemas activos es que están diseñados específicamente para operación todo el año en las zonas de bajas temperaturas.

2.5.2.1 Sistemas de circulación directa⁷⁴

Son sistemas activos, en los cuales una bomba es usada para hacer circular agua potable desde el tanque a los colectores donde hay suficiente energía solar disponible para incrementar su temperatura y retornar el agua calentada al tanque de almacenamiento hasta que sea necesitada; ya que la bomba hace circular el agua, el colector puede ser montado sobre o bajo el tanque de almacenamiento. Figura 2.17.

2.5.2.2 Sistemas indirectos de calentamiento de agua

Son sistemas activos, en los cuales se hace circular un fluido a través de un colector en un circuito cerrado hacia un intercambiador de calor, donde su calor es transferido al agua de consumo. Los fluidos de transferencia de calor más usados son agua, aire, soluciones de etileno y refrigerantes. Figura 2.18.

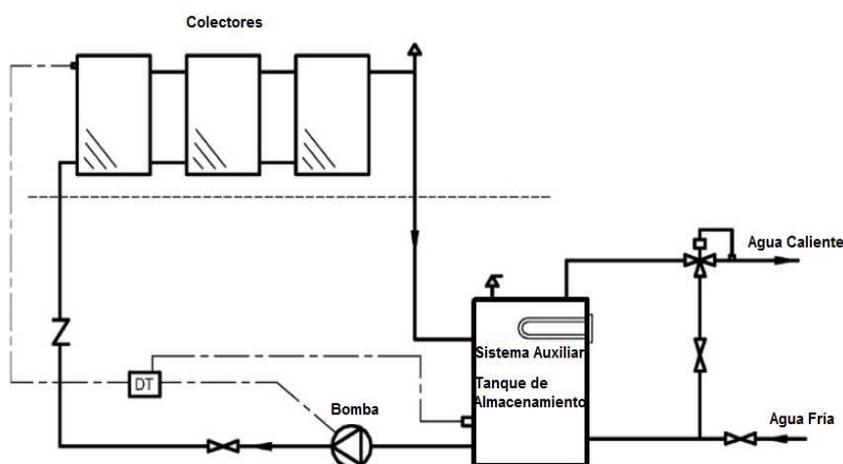


Figura 2.17.- Sistema de circulación directa.⁷⁵

⁷⁴ SORENSEN B., BREEZE P., Pág. 376.

⁷⁵ SORENSEN B., BREEZE P., Pág. 377.

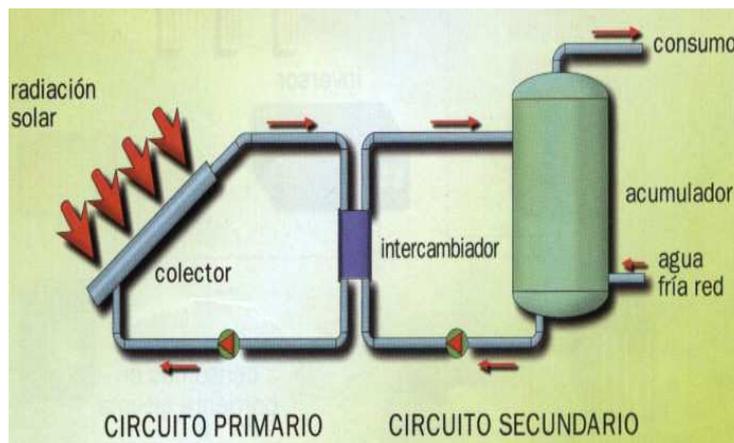


Figura 2.18.- Sistema indirecto de calentamiento de agua.⁷⁶

2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS

Un sistema híbrido se define como la unión de dos o más fuentes de energía con el fin de producir agua caliente sanitaria. Normalmente, se compone por una fuente de energía renovable y por un sistema complementario de energía convencional, como lo es la energía eléctrica, para suministrar un servicio continuo.

La principal ventaja de un sistema híbrido es la posibilidad del aprovechamiento conjunto y optimizado de los recursos locales disponibles, pudiendo garantizar altos niveles de calidad, confiabilidad y rendimiento, con reducción de costos en la instalación y operación del sistema.⁷⁷

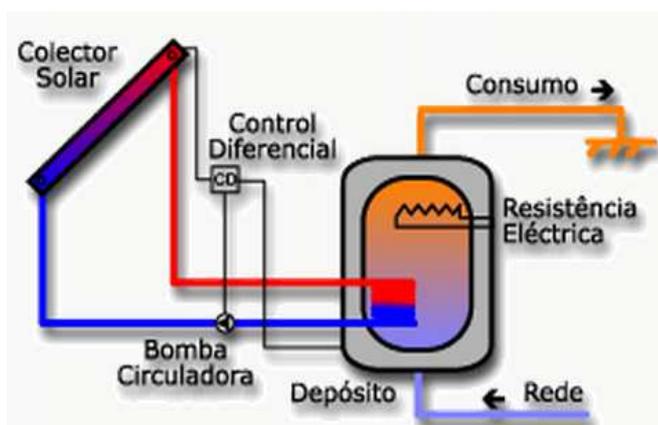


Figura 2.19.- Sistema Híbrido.⁷⁸

⁷⁶ http://html.rincondelvago.com/energia-solar_15.html

⁷⁷ <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/163/1/CD-0184.pdf>

⁷⁸ http://esp.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=42&ID_area=8&ID_sub_area=26

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR TIPO BREAD-BOX

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presentan una descripción del sistema Bread – Box a construirse, y se definen los parámetros con los que se lleva a cabo la simulación para conocer su comportamiento a lo largo del día.

3.2 SISTEMA SOLAR TIPO BREAD-BOX.

Es un colector solar simple que consiste en uno o más tanques de almacenamiento situados en el interior de una caja aislada que tiene una cara transparente frente al sol. Su principal característica es que el tanque de almacenamiento y el captador solar son una misma unidad.⁷⁹

3.2.1 ELEMENTOS PRINCIPALES

Los principales elementos del sistema solar térmico se describen a continuación:

- Cubierta

La cubierta de vidrio permite que los rayos solares incidan en el captador, a la vez que evita la salida de la radiación infrarroja emitida por el mismo. Minimiza las pérdidas en la parte superior del sistema.

- Captador

Compuesto de uno o varios tanques cilíndricos recubiertos con pintura negra mate. Su función es captar la energía solar, transformarla en calor y transmitirla al agua que se encuentra acumulada en su interior.

- Agua

El agua se encarga de almacenar la energía recibida con el propósito de elevar su temperatura.

⁷⁹ http://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/AE_batch_heater.html

- Aislante

Disminuye las pérdidas de calor en la parte lateral e inferior del tanque. Su espesor apropiado debe ser no menor a 3 cm y preferentemente mayor a 5 cm.⁸⁰

- Carcasa

Brinda un soporte efectivo al sistema y lo protege de las condiciones ambientales.

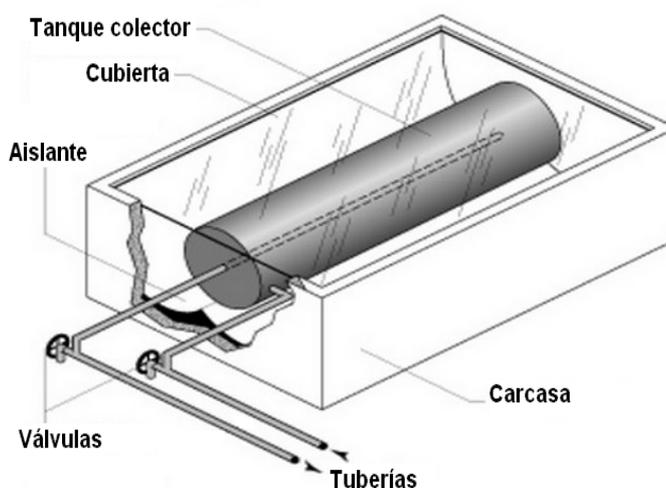


Figura 3.1.- Sistema solar Bread-Box.⁸¹

3.2.2 ELEMENTOS AUXILIARES

Los elementos auxiliares que forman parte del sistema son:

- Tuberías

El sistema solar térmico dispone de una tubería para el ingreso de agua fría proveniente de la red y una tubería para la salida de agua caliente hacia la línea de alimentación de la casa (demanda). En caso de que el sistema esté compuesto por varios tanques, se tendrá una tubería adicional que conecte los tanques.

- Válvulas

Las válvulas colocadas en las tuberías sirven principalmente para regular el paso de agua.

⁸⁰ Norma Ecuatoriana de la Construcción. Parte 14-1. Pág. 26.

⁸¹ http://www.electronicsonline.com/Projects/Science/Physics/Heat_and_Thermodynamics/Solar_Energy/thermo_siphoning_and_simple_batch_heater.shtml

- Válvula de alivio de presión

Se la conoce como válvula de seguridad, ya que evita la explosión o fallo del equipo por exceso de presión. Cuando la presión interna del tanque es superior a la establecida, la válvula se abre para liberar el fluido.

En la figura 3.1, se pueden observar los elementos principales y secundarios del sistema Bread – Box.

3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El sistema de calentamiento solar tipo Bread – Box aprovecha el efecto invernadero que se produce cuando la radiación solar incide sobre la cubierta de vidrio que al ser transparente a la luz visible (onda corta), deja pasar la mayor cantidad de energía, la cual calienta el captador solar que tiene un recubrimiento de pintura negra, para convertirlo en un buen absorbedor, el colector a su vez se convierte en un emisor de radiación infrarroja (onda larga) que no logra atravesar la cubierta de vidrio, ya que es opaco a estas longitudes de onda.⁸² El colector transforma la energía incidente en energía térmica para transmitirla al agua que se encuentra almacenada en su interior y de esta forma esta lista para el consumo.

3.4. ANÁLISIS DE LA DEMANDA

Para calcular la demanda de agua caliente sanitaria en un hogar de cuatro personas, se tomarán en cuenta los valores de la tabla 3.1, se puede observar que el consumo de agua caliente sanitaria diario por persona en una vivienda unifamiliar es de 30 litros a 60 °C, por lo tanto, se requieren al día 120 litros de agua caliente. Considerando que la forma del colector a diseñarse es cilíndrica, se utiliza la ecuación (3.1) del volumen de un cilindro, para dimensionar el tanque.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3.1)$$

donde:

V = Volumen del cilindro, (m³).

⁸² http://es.wikipedia.org/wiki/Colector_solar#Funcionamiento

r = Radio del cilindro, (m).

h = Altura del cilindro, (m).

La selección del radio y la altura del cilindro influirán en el rendimiento del colector solar, ya que, a mayor área la transferencia de calor también es mayor.

Tabla 3.1. Demanda de referencia a 60°C.⁸³

Criterios de demanda	Litros de ACS/día a 60 °C
Viviendas unifamiliares	30 por persona
viviendas multifamiliares	22 por persona
Hospitales y clínicas	55 por cama
Hotel****	70 por cama
Hotel***	55 por cama
Hotel/Hostal**	40 por cama
Camping	40 por emplazamiento
Hostal/Pensión*	35 por cama
Residencia ancianos, estudiantes, etc.	55 por cama
Vestuario, duchas colectivas	15 por servicio
Escuelas	3 por alumno
Cuarteles	20 por persona
Fábricas y talleres	15 por persona
Administrativos	3 por persona
Gimnasios	20 a 25 por usuario
Lavanderías	3 a 5 por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10 por comida
Cafeterías	1 por almuerzo

3.5 MODELO MATEMÁTICO

En el planteamiento del modelo matemático se deben tener en cuenta todos los elementos y factores que intervienen en el funcionamiento del equipo, así como la interacción entre ellos, es decir que, hay que analizar los tipos de transferencia de calor que ocurren en cada parte del sistema.

Consideraciones:

- Flujo de calor unidimensional.
- Se desprecia las pérdidas de calor en los lados del tanque.

⁸³ OLIVARES, Alberto. Pág. 162.

- El espesor de la cubierta es despreciable.
- La cubierta no absorbe energía solar incidente.
- No existe generación de energía interna en ninguno de los elementos.
- Las propiedades térmicas de cada elemento permanecen constantes durante el funcionamiento.
- Las temperaturas de los componentes del sistema son función del tiempo.

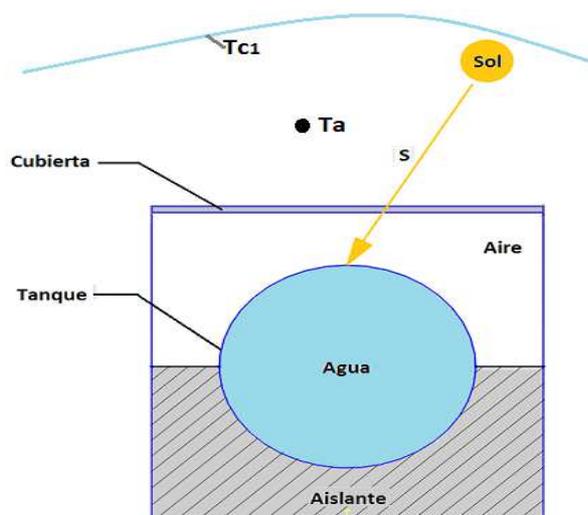


Figura 3.2.- Esquema transversal del sistema solar Bread-Box.

En base al esquema presentado en la figura 3.2, y las consideraciones realizadas, se aplica al sistema Bread - Box la primera ley de la termodinámica, conocida como la ley de la conservación de la energía, y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \quad (3.2)^{84}$$

donde:

\dot{E}_{ent} = Energía que entra al sistema. (W).

\dot{E}_g = Energía generada por una fuente química, eléctrica, etc. (W).

\dot{E}_{sale} = Energía que sale del sistema. (W).

\dot{E}_{alm} = Energía almacenada en el sistema. (W).

⁸⁴ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 13. Ecuación (1.11a).

- Tanto la energía que entra al sistema como la energía que sale de él, son el resultado de uno o más procesos de transferencia de calor que se indican en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resumen de los procesos de transferencia de calor.⁸⁵

Modo	Mecanismo(s)	Ecuación o modelo
Conducción	Difusión de energía debido al movimiento molecular aleatorio	$q_x''(W/m^2) = -k \frac{dT}{dx}$ (3.3)
Convección	Difusión de energía debido al movimiento molecular aleatorio más transferencia de energía debido al movimiento global (advección)	$q''(W/m^2) = h(T_s - T_\infty)$ (3.4)
Radiación	Transferencia de energía por ondas electromagnéticas	$q''(W/m^2) = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{alr}^4)$ (3.5)
		o $q(W) = h_r A(T_s - T_{alr})$ (3.6)

- En el caso de tener una resistencia eléctrica en el sistema, la energía generada por ésta se expresa por medio de la ecuación (3.7).

$$\dot{E}_g = I^2 * R \quad (3.7)^{86}$$

donde:

\dot{E}_g = Energía generada por una resistencia eléctrica, (W).

I = Intensidad de corriente, (A).

R = Resistencia eléctrica, (Ω).

- La energía almacenada en cada elemento se expresa como:

$$\dot{E}_{alm} = \rho * c_p * V * \frac{dT}{dt} = m * c_p * \frac{dT}{dt} \quad (3.8)^{87}$$

donde:

\dot{E}_{alm} = Energía almacenada, (W).

c_p = Calor específico del elemento, (J/kg.K).

⁸⁵ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 28. Tabla 1.5.

⁸⁶ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 100. Ecuación (3.37).

⁸⁷ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 52. Ecuación (2.9).

$\rho =$ Densidad del elemento, (kg/m³).

$V =$ Volumen del elemento, (m³).

$m =$ Masa del elemento, (kg).

El análisis del comportamiento térmico del sistema Bread - Box se lo realiza aplicando la ecuación (3.2) en los elementos principales del sistema. Tomando en cuenta que en ninguno de ellos existe energía generada, el balance de energía para cada componente se determina con la ecuación (3.9) que se da a continuación:

$$\dot{E}_{alm} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sale} \quad (3.9)$$

Por lo tanto, para cada elemento se tiene:

- Cubierta

La cubierta gana energía por la transferencia de calor que se produce debido a la convección del aire encerrado y la radiación del tanque hacia ella, y pierde energía hacia los alrededores por convección del viento. La expresión que describe esos procesos es:

$$(mc_p)_c \frac{dT_c}{dt} = A_c U_{T-c} (T_T - T_C) - A_c U_{C-a} (T_C - T_a) \quad (3.10)$$

- Tanque

La energía que entra en la placa del tanque es por la radiación solar que incide sobre ella, y sale energía debido a que el tanque tiene pérdidas por convección y radiación hacia la parte superior y cede calor al agua para incrementar su temperatura.

Por lo tanto, la ecuación que se obtiene del balance de energía es:

$$(mc_p)_T \frac{dT_T}{dt} = A_T S - A_T U_{T-c} (T_T - T_C) - A_w U_{T-w} (T_T - T_w) \quad (3.11)$$

- Agua

El agua gana energía a través del área de contacto con el tanque y pierde energía por la parte inferior hacia el aislante. La ecuación de la conservación de energía para este elemento es:

$$(mc_p)_W \frac{dT_W}{dt} = A_W U_{T-W} (T_T - T_W) - A_I U_{I-W} (T_W - T_I) \quad (3.12)$$

- Aislante

En el aislante la ganancia de calor se obtiene de la energía que el agua le cede y la pérdida de calor del aislante hacia el ambiente es por convección, como se describe en la siguiente ecuación:

$$(mc_p)_I \frac{dT_I}{dt} = A_I U_{I-W} (T_W - T_I) - A_I U_{I-a} (T_I - T_a) \quad (3.13)$$

Los términos utilizados en la descripción de este modelo matemático se muestran a continuación:

$(mc_p)_C =$ Capacitancia térmica de la cubierta, (J/K).

$(mc_p)_T =$ Capacitancia térmica del tanque, (J/K).

$(mc_p)_W =$ Capacitancia térmica del agua, (J/K).

$(mc_p)_I =$ Capacitancia térmica del aislante, (J/K).

$dT/dt =$ Variación de la temperatura con respecto al tiempo, (K/s).

$T_C =$ Temperatura de la cubierta transparente, (K).

$T_T =$ Temperatura de la superficie absorbidora - tanque, (K).

$T_W =$ Temperatura de la superficie absorbidora - agua, (K).

$T_I =$ Temperatura del aislante térmico, (K).

$S =$ Energía neta absorbida por el colector, (W/m²).

$A_C =$ Área de la cubierta transparente, (m²).

$A_T =$ Área del tanque, (m²).

$A_W =$ Área del agua, (m²).

$A_I =$ Área del aislante térmico, (m²).

U_{C-a} = Coeficiente global de transferencia de calor entre la cubierta transparente y el ambiente, (W/m².K).

U_{T-c} = Coeficiente global de transferencia de calor entre el tanque y la cubierta transparente, (W/m².K).

U_{T-w} = Coeficiente global de transferencia de calor entre el tanque y el agua, (W/m².K).

U_{I-w} = Coeficiente global de transferencia de calor entre el agua y el aislante, (W/m².K).

U_{I-a} = Coeficiente global de transferencia de calor entre el aislante y el ambiente, (W/m².K).

3.6 MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO

El estudio del sistema de calentamiento Bread - Box, se lo puede realizar con la ayuda de un modelo matemático simplificado para facilitar la resolución analítica de las ecuaciones, teniendo en cuenta algunas consideraciones.

Consideraciones:

- Flujo de calor unidimensional.
- Se desprecia las pérdidas de calor en los lados del tanque.
- El espesor de la cubierta es despreciable.
- La cubierta y el aislante almacenan una pequeña cantidad de energía comparado con la que se almacena en el agua.
- La cubierta no absorbe energía solar incidente.
- No existe generación de energía interna en ninguno de los elementos.
- Las propiedades térmicas de cada elemento permanecen constantes durante el funcionamiento.
- La placa absorbedora capta la energía solar incidente.
- Las temperaturas de los componentes del sistema son función del tiempo.

Para reducir el modelo matemático a dos ecuaciones, se analiza la transferencia de calor con respecto al tanque, que es el elemento captador de energía, y al

agua, que es el elemento almacenador de energía. Aplicando la primera ley de la termodinámica se tiene:

- Tanque

La energía almacenada en el tanque es el resultado de la radiación solar captada y las pérdidas de calor debido a que el tanque cede energía al agua y también disipa energía hacia el ambiente por procesos de convección y radiación. La ecuación (3.14) describe el comportamiento del tanque.

$$(mC_p)_T \frac{dT_T}{dt} = A_T S - A_w U_{T-w}(T_T - T_W) - A_T U_{T-a}(T_T - T_a) \quad (3.14)$$

- Agua

La energía almacenada por el agua se debe a que el tanque le cede calor, pero este elemento a su vez, cede energía al ambiente por la parte inferior. Es decir:

$$(mC_p)_W \frac{dT_W}{dt} = A_w U_{T-w}(T_T - T_W) - A_I U_{W-a}(T_W - T_a) \quad (3.15)$$

Los parámetros y variables utilizados en estas ecuaciones fueron descritos en el punto 3.5, a excepción de:

U_{T-a} = Coeficiente global de transferencia de calor entre el tanque y el ambiente, (W/m².K).

U_{W-a} = Coeficiente global de transferencia de calor entre el agua y el ambiente, (W/m².K).

3.7 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

El modelo matemático simplificado, indica el comportamiento del sistema solar térmico Bread – Box, cada parámetro debe ser determinado adecuadamente, para evaluar de manera confiable el desempeño del mismo.

Para analizar los fenómenos de transferencia de calor en el colector solar tipo Bread - Box se realiza una analogía eléctrica, en la cual se tienen resistencias térmicas a la conducción, convección y radiación. Figura 3.3.

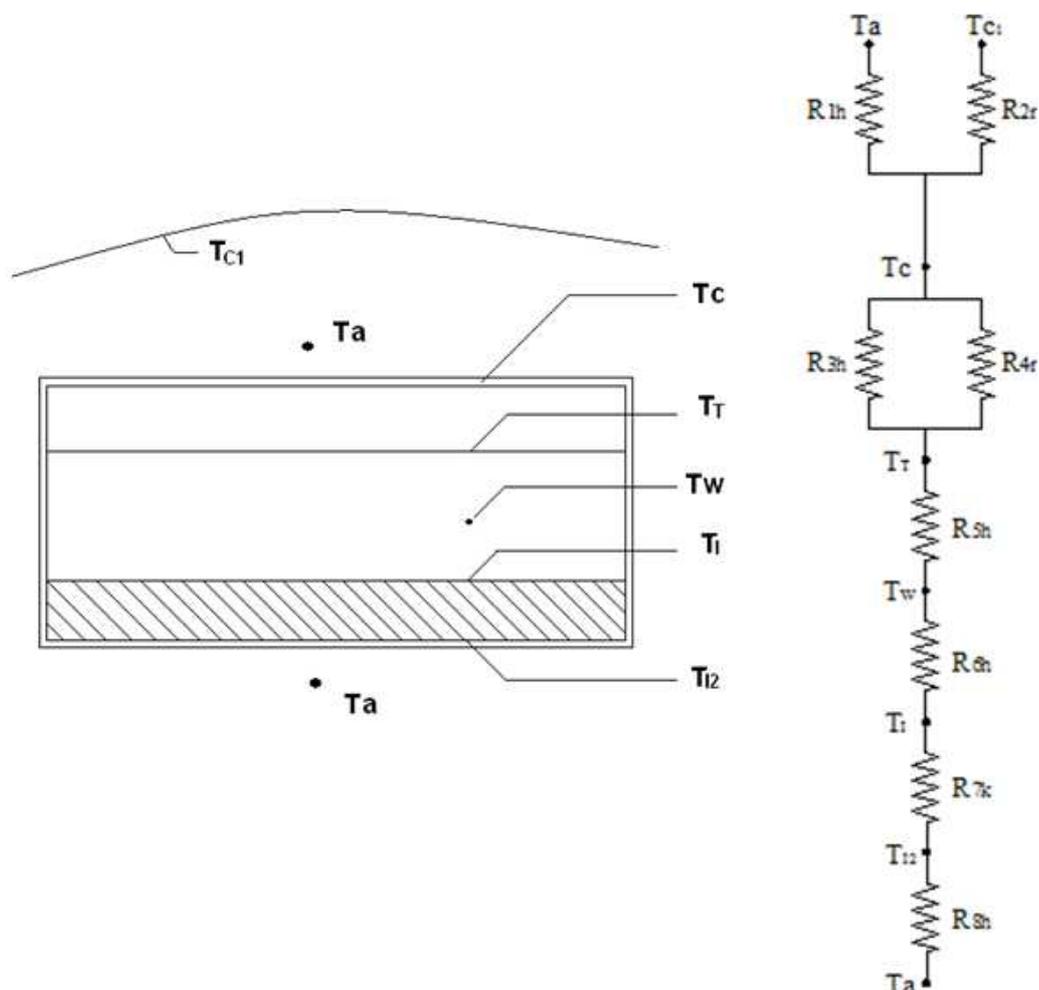


Figura 3.3.- Sistema de calentamiento Bread – Box y analogía eléctrica.

3.7.1 ENERGÍA NETA ABSORBIDA (S).

La energía neta absorbida por el colector es una fracción de la energía solar incidente, y se la puede determinar con la ayuda de la siguiente expresión:

$$S = 1.02 * \tau * \alpha * I_T \quad (3.16)^{88}$$

donde:

S = Energía neta absorbida por el colector solar, (W/m^2).

τ = Transmisividad de la cubierta transparente.

α = Absortividad del colector solar.

⁸⁸ DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 189. Ecuación (5.8.2).

I_T = Energía incidente en el colector, (W/m^2).

3.7.2 CAPACITANCIA TÉRMICA, (C).

La capacitancia térmica mide el cambio de temperatura que experimenta un cuerpo cuando recibe una cantidad de energía calorífica.

$$C = m * c_p = \rho * V * c_p \quad (3.17)^{89}$$

donde:

C = Capacitancia térmica, (J/K).

m = Masa del elemento, (kg).

c_p = Calor específico del elemento, (J/kg.K).

ρ = Densidad del elemento, (kg/m^3).

V = Volumen del elemento, (m^3).

3.7.3 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR (U).

El coeficiente global de transferencia de calor se define en términos de la resistencia equivalente en una parte del circuito y el área de transferencia de calor.

$$U = \frac{1}{R_{total} * A} \quad (3.18)^{90}$$

donde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor, ($W/m^2.K$).

R_{total} = Resistencia térmica total, (K/W).

A = Área de transferencia de calor, (m^2).

3.7.3.1 Coeficiente de transferencia de calor entre el tanque y el ambiente (U_{T-a}).

La transferencia de calor entre el tanque y el ambiente se produce por convección y radiación, se analiza en dos tramos, del tanque hacia la cubierta y de la cubierta hacia el ambiente como se observa en la figura 3.4.

⁸⁹ <http://www.caloryfrio.com/capacidad-termica.html>

⁹⁰ <http://es.scribd.com/doc/47380156/Coeficiente-global-de-transferencia-de-calor>

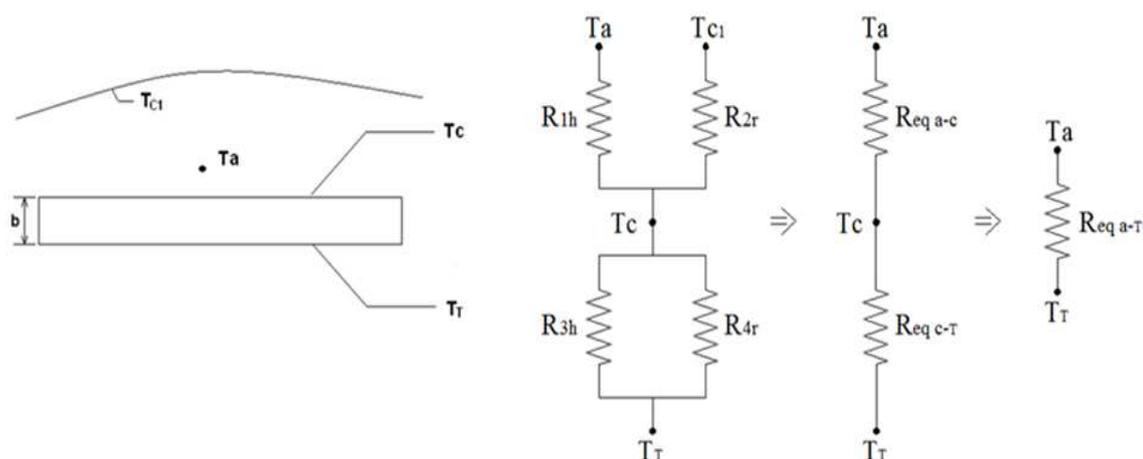


Figura 3.4.- Transferencia de calor entre el tanque y el ambiente.

El coeficiente global de transferencia de calor se puede evaluar con la siguiente expresión:

$$U_{T-a} = \frac{1}{\left(\frac{R_{1h}R_{2r}}{R_{1h}+R_{2r}} + \frac{R_{3h}R_{4r}}{R_{3h}+R_{4r}} \right) * A_T} \quad (3.19)$$

donde:

R_{1h} = Resistencia térmica a la convección entre la cubierta transparente y el ambiente, (K/W).

R_{2r} = Resistencia térmica a la radiación entre la cubierta transparente y el cielo, (K/W).

R_{3h} = Resistencia térmica a la convección entre el tanque y la cubierta transparente, (K/W).

R_{4r} = Resistencia térmica a la radiación entre el tanque y la cubierta transparente, (K/W).

$$R_{1h} = \frac{1}{h_v * A_c} \quad (3.20)$$

$$h_v = 5.7 + 3.8v \quad (3.21)^{91}$$

$$R_{2r} = \frac{1}{h_{r2} * A_c} \quad (3.22)$$

⁹¹ DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 137. Ecuación (3.15.2).

$$h_{r2} = \sigma * \varepsilon_c * \frac{(T_c^4 - T_{c1}^4)}{T_c - T_a} \quad (3.23)^{92}$$

$$T_{c1} = 0.0552 * T_a^{1.5} \quad (3.24)^{93}$$

$$R_{3h} = \frac{1}{h_{c3} * A_T} \quad (3.25)$$

$$Nu_b = 0.195 * [Gr_b]^{1/4} \quad (3.26)^{94}$$

$$Nu_b = \frac{h * b}{k} \quad (3.27)$$

$$Gr_b = b^3 * \frac{\beta_a g}{\nu_a^2} * (T_c - T_T) \quad (3.28)$$

$$h_{c3} = 0.195 * \frac{k_a}{b} * \left[b^3 * \frac{\beta_a g}{\nu_a^2} * (T_T - T_c) \right]^{1/4} \quad (3.29)$$

$$R_{4r} = \frac{1}{h_{r4} * A_T} \quad (3.30)$$

$$h_{r4} = \frac{\sigma * (T_T^2 + T_c^2)(T_T + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_T} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (3.31)^{95}$$

donde:

h_v = Coeficiente de transferencia de calor por convección del viento, (W/m².K).

A_c = Área de la cubierta, (m²).

v = Velocidad del viento (m/s).

h_{r2} = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta transparente y el cielo. (W/m².K)

σ = Constante de Boltzman, 5.67x10⁻⁸ (W/m².K⁴).

ε_c = Emisividad de la cubierta transparente.

ε_T = Emisividad del tanque.

T_c = Temperatura de la cubierta, (K).

T_{c1} = Temperatura del cielo, (K).

T_a = Temperatura ambiente, (K).

⁹² DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 203.

⁹³ DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 122. Ecuación (3.9.2).

⁹⁴ JAKOB, Max. Pág. 535. Ecuación (25-28).

⁹⁵ DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 203.

T_T = Temperatura del tanque, (K).

h_{c3} = Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire entre el tanque y la cubierta, (W/m².K).

Nu_b = Número de Nusselt para el aire comprendido entre el tanque y la cubierta que se encuentran a una distancia b .

Gr_b = Número de Grashof para el aire comprendido entre el tanque y la cubierta que se encuentran a una distancia b .

A_T = Área del tanque, (m²).

k_a = Conductividad térmica del aire, (W/m.K).

b = Distancia entre la cubierta y el tanque, (m).

β_a = Coeficiente de dilatación térmica del aire, (1/K).

g = Gravedad, (m/s²).

ν_a = Viscosidad cinemática del aire, (m²/s).

h_{r4} = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el tanque y la cubierta, (W/m².K).

3.7.3.2 Coeficiente de transferencia de calor entre el tanque y el agua (U_{T-w}).

El calor absorbido por el tanque es transmitido al agua por convección. Figura 3.5.

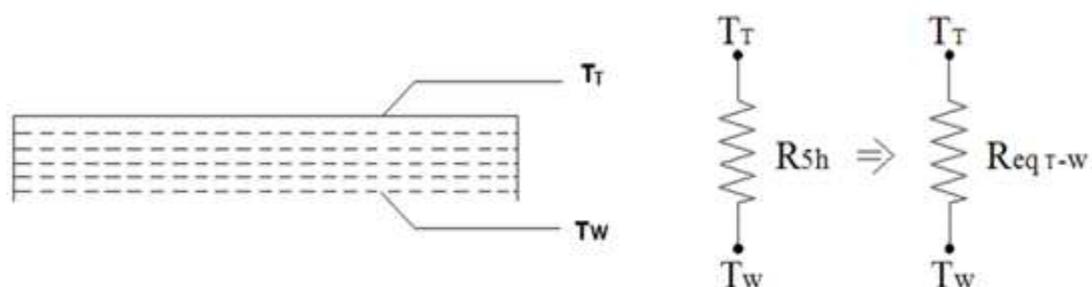


Figura 3.5.- Transferencia de calor entre el tanque y el agua.

El coeficiente global de transferencia de calor en esta zona se puede evaluar con la siguiente expresión.

$$U_{T-w} = \frac{1}{R_{sh} * A_w} \quad (3.32)$$

donde:

R_{5h} = Resistencia térmica a la convección entre el tanque y el agua, (K/W).

A_w = Área del agua, (m²).

$$R_{5h} = \frac{1}{h_{c5} * A_w} \quad (3.33)$$

$$Nu_L = 0.27 * [Gr_L * Pr]^{1/4} \quad (3.34)^{96}$$

$$Nu_L = \frac{h * L}{k} \quad (3.35)$$

$$Gr_L = L^3 * \frac{\beta g}{\nu^2} * (T_T - T_W) \quad (3.36)$$

$$L = \frac{A_s}{P} \quad (3.37)^{97}$$

$$L = \frac{\pi * r * l}{2(\pi * r + l)} \quad (3.38)$$

$$h_{c5} = 0.27 * \frac{k_w}{L} * \left[Pr * L^3 * \frac{\beta_w g}{\nu_w^2} * (T_T - T_W) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.39)$$

donde:

h_{c5} = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el tanque y el agua, (W/m².K).

Nu_L = Número de Nusselt para el agua, de longitud característica L.

Gr_L = Número de Grashof para el agua, de longitud característica L.

k_w = Conductividad térmica del agua, (W/m.K).

β_w = Coeficiente de dilatación térmica del agua, (1/K).

ν_w = Viscosidad cinemática del agua, (m²/s).

L = Longitud característica del tanque, definida como la relación entre el área y el perímetro, (m).

T_W = Temperatura del agua, (K).

Pr = Número de Prandtl.

⁹⁶ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 498. Ecuación (9.32).

⁹⁷ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 498. Ecuación (9.29).

3.7.3.3 Coeficiente de transferencia de calor entre el agua y el ambiente (U_{W-a}).

La transferencia de calor entre el agua y el aislante se produce por convección del agua, considerando el espesor y la conductividad térmica del tanque despreciable. En la parte correspondiente al aislante la transferencia de calor se produce por conducción y finalmente la transferencia de calor al exterior es por convección debido a la velocidad del viento. Figura 3.6.

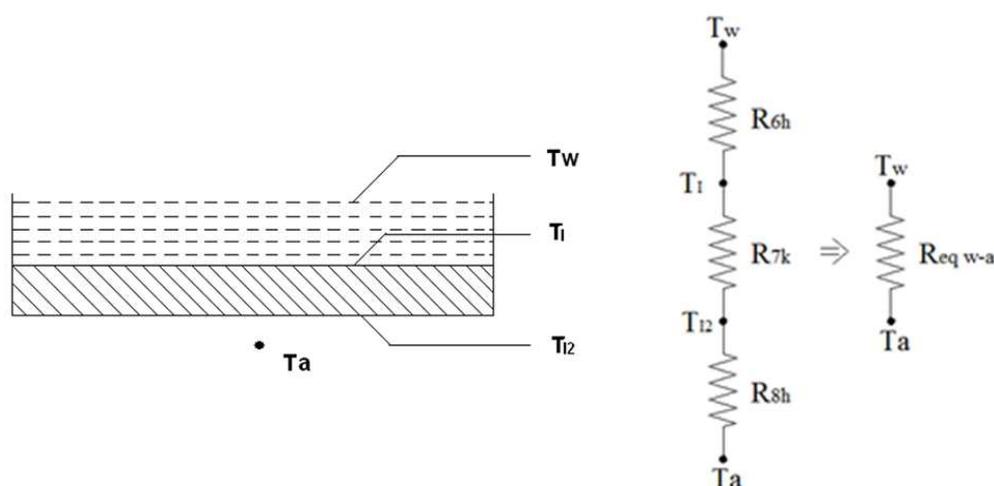


Figura 3.6.- Transferencia de calor entre el agua y el ambiente.

El coeficiente de transferencia de calor se puede evaluar con la siguiente expresión:

$$U_{W-a} = \frac{1}{(R_{6h} + R_{7k} + R_{8h}) * A_I} \quad (3.40)$$

donde:

R_{6h} = Resistencia térmica a la convección entre el agua y el aislante, (W/m.K).

R_{7k} = Resistencia térmica a la conducción en el aislante, (W/m.K).

R_{8h} = Resistencia térmica a la convección entre la base del aislante y el ambiente, (W/m.K).

$$R_{6h} = \frac{1}{h_{c6} * A_I} \quad (3.41)$$

$$Nu_L = 0.27 * [Gr_L * Pr]^{1/4} \quad (3.42)^{98}$$

$$h_{c6} = 0.27 * \frac{k_w}{L} * \left[Pr * L^3 * \frac{\beta_w g}{\nu_w^2} * (T_w - T_I) \right]^{1/4} \quad (3.43)$$

$$R_{7k} = \frac{L_I}{k_I * A_I} \quad (3.44)$$

$$R_{8h} = \frac{1}{h_v * A_I} \quad (3.45)$$

$$h_v = 5.7 + 3.8v \quad (3.46)^{99}$$

donde:

h_{c6} = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y el aislante. (W/m².K).

T_I = Temperatura del aislante, (K).

L_I = Espesor del material aislante, (m).

k_I = Conductividad térmica del aislante, (W/m.K).

A_I = Área de transferencia de calor del aislante, (m²).

3.8 SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Las ecuaciones diferenciales (3.14) y (3.15) describen el comportamiento térmico del sistema Bread-Box. La solución de este modelo matemático permitirá diseñar y dimensionar los elementos que conforman el mismo. Basándose en los datos meteorológicos de radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento,¹⁰⁰ se podrá determinar las temperaturas teóricas que alcanzará el agua en diferentes intervalos de tiempo.

Las ecuaciones mencionadas anteriormente pueden expresarse de la siguiente manera:

$$DT_T = \frac{A_T}{C_T} S + \frac{A_T U_{T-a}}{C_T} T_a + \frac{A_w U_{W-T}}{C_T} T_w - \frac{(A_w U_{W-T} + A_T U_{T-a})}{C_T} T_T \quad (3.47)$$

⁹⁸ INCROPERA. Pág. 498. Ecuación (9.32).

⁹⁹ DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 137. Ecuación (3.15.2).

¹⁰⁰ Datos obtenidos de la página web: <http://190.152.144.75/reportes/ReporteHorariosData.aspx>

$$DT_W = \frac{A_W U_{W-T}}{C_W} T_T + \frac{A_I U_{W-a}}{C_W} T_a - \frac{(A_W U_{W-T} + A_I U_{W-a})}{C_W} T_W \quad (3.48)$$

o también:

$$(D + M_3)T_T - M_2 T_W - M_1 T_a - M_0 S = 0 \quad (3.49)$$

$$(D + N_3)T_W - N_2 T_T - N_1 T_a = 0 \quad (3.50)$$

donde:

$$M_0 = \frac{A_T}{C_T}$$

$$M_1 = \frac{A_T U_{T-a}}{C_T}$$

$$M_2 = \frac{A_W U_{W-T}}{C_T}$$

$$M_3 = \frac{(A_W U_{W-T} + A_T U_{T-a})}{C_T}$$

$$N_1 = \frac{A_I U_{W-a}}{C_W}$$

$$N_2 = \frac{A_W U_{W-T}}{C_W}$$

$$N_3 = \frac{(A_W U_{W-T} + A_I U_{W-a})}{C_W}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones compuesto por (3.47) y (3.48), se tiene:

$$D^2 T_T + (M_3 + N_3) D T_T + (N_3 M_3 - N_2 M_2) T_T - (N_3 M_1 + M_2 N_1) T_a - N_3 M_0 S = 0 \quad (3.51)$$

$$D^2 T_W + (M_3 + N_3) D T_W + (N_3 M_3 - N_2 M_2) T_W - (M_3 N_1 + N_2 M_1) T_a - N_2 M_0 S = 0 \quad (3.52)$$

Reduciendo las ecuaciones (3.51) y (3.52), se tiene:

$$D^2 T_T + A_1 D T_T + B_1 T_T = A_3 T_a + B_3 S \quad (3.53)$$

$$D^2 T_W + A_1 D T_W + B_1 T_W = A_2 T_a + B_2 S \quad (3.54)$$

donde:

$$A_1 = N_3 + M_3$$

$$A_2 = N_1M_3 + N_2M_1$$

$$A_3 = N_3M_1 + N_1M_2$$

$$B_1 = N_3M_3 - N_2M_2$$

$$B_2 = N_2M_0$$

$$B_3 = N_3M_0$$

Las soluciones de las ecuaciones diferenciales (3.53) y (3.54), respectivamente son:

$$T_{W(t)} = \left(T_{W_1} - \frac{A_2T_a + B_2S}{B_1} \right) \left(\frac{1}{r_2 - r_1} \right) (r_2e^{r_1t} - r_1e^{r_2t}) + \frac{A_2T_a + B_2S}{B_1} \quad (3.55)$$

$$T_{T(t)} = \left(T_{T_1} - \frac{A_3T_a + B_3S}{B_1} \right) \left(\frac{1}{r_2 - r_1} \right) (r_2e^{r_1t} - r_1e^{r_2t}) + \frac{A_3T_a + B_3S}{B_1} \quad (3.56)$$

donde:

$$r_1 = \frac{-A_1 + \sqrt{A_1^2 - 4B_1}}{2}$$

$$r_2 = \frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4B_1}}{2}$$

3.9 DATOS PARA LA SIMULACIÓN

Se han desarrollado varias simulaciones en el programa Microsoft Office Excel con las ecuaciones descritas en 3.7 y 3.8, y se han considerado ciertos valores para las variables que intervienen en dicho programa con el propósito de determinar las temperaturas del agua y del tanque, a diferentes horas del día. Los resultados se presentan en el ANEXO B.

3.9.1 RADIACIÓN SOLAR¹⁰¹

Se tienen datos de radiación solar tomados del “Reporte meteorológico de datos horarios” para la estación Cotocollao de la página web de la Secretaría de Ambiente. Dichos valores se exponen en el ANEXO A1.

3.9.2 TEMPERATURA AMBIENTE¹⁰²

Los valores de la temperatura ambiente promedio en cada hora para la estación Cotocollao, se muestran en la Tabla A.2.

3.9.3 VELOCIDAD DEL VIENTO¹⁰³

La velocidad del viento es una variable importante, ya que ayuda a determinar la transferencia de calor por convección del sistema hacia los alrededores. Los valores horarios de este parámetro se indican en la Tabla A.3.

3.9.4 TEMPERATURAS INICIALES

Para el cálculo se asumen temperaturas iniciales de la cubierta, el tanque, el agua y el aislante, considerando que la temperatura ambiente a las 7 a.m. en promedio es 11°C. Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Temperaturas iniciales.

Símbolo	Nombre	Valor	Unidad
Tci	Temperatura inicial de cubierta	285	K
Tti	Temperatura inicial del tanque	288	K
Twi	Temperatura inicial del agua	287	K
Tii	Temperatura inicial del aislante	283	K

3.9.5 ÁREA DE CAPTACIÓN

El área de captación del sistema, se define como la superficie expuesta a la radiación solar, en este caso, se toma la mitad del área total del cilindro y además se la estudia como una placa plana. Se calcula mediante la expresión:

$$A_T = \pi r l \quad (3.57)$$

¹⁰¹ <http://190.152.144.75/reportes/ReporteHorariosData.aspx>

¹⁰² <http://190.152.144.75/reportes/ReporteHorariosData.aspx>

¹⁰³ <http://190.152.144.75/reportes/ReporteHorariosData.aspx>

donde:

A_T = Área del tanque, (m²).

r = Radio del tanque, (m).

l = Longitud del tanque, (m).

3.9.6 ÁREA DE LA CUBIERTA

El área de la cubierta es la parte superior del sistema de calentamiento por la que se perderá calor hacia los alrededores. Se puede evaluar con ayuda de la siguiente expresión:

$$A_C = \frac{A_T}{1.57} \quad (3.58)^{104}$$

donde:

A_C = Área de la cubierta transparente, (m²).

A_T = Área del tanque, (m²).

3.9.7 PROPIEDADES RADIATIVAS

El desempeño térmico de los materiales se ve afectado de manera significativa por las propiedades superficiales de los mismos, es por esto, que al momento de la selección se las debe tomar en cuenta. En la tabla 3.4 se pueden observar las propiedades utilizadas en la simulación tanto del tanque pintado de negro como de la cubierta transparente de vidrio.

Tabla 3.4. Propiedades radiativas.

Símbolo	Nombre	Valor
ε_C	Emisividad de la cubierta	0.90 ¹⁰⁵
ε_T	Emisividad del tanque	0.96 ¹⁰⁶
τ_C	Transmisividad de la cubierta	0.88 ¹⁰⁷
α_T	Absortividad del tanque	0.98 ¹⁰⁸

¹⁰⁴ DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 427.

¹⁰⁵ KREITH, Frank. Pág. 229.

¹⁰⁶ KREITH, Frank. Pág. 229.

¹⁰⁷ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 853.

¹⁰⁸ INCROPERA, Frank; DEWITT, David. Pág. 855.

3.9.8 ESPESOR DEL MATERIAL AISLANTE

El espesor del material aislante debe ser seleccionado adecuadamente para disminuir pérdidas hacia el ambiente por la parte inferior del colector. El aislante debe tener un rango de espesor apropiado (no menor a 3 cm y preferentemente mayor a 5 cm), ya que las pérdidas del colector se reducirán cuando éste sea mayor. Se recomienda el uso de aislantes que tengan coeficientes k que se encuentren entre 0,014 y 0,035 Kcal/hr.m.°C y que sean estables.¹⁰⁹

3.9.9 ESPACIO CUBIERTA TRANSPARENTE – TANQUE

La distancia entre la cubierta y el tanque debe ser de al menos 2 pulgadas¹¹⁰, lo que se pretende es que el aire atrapado en este espacio se mantenga quieto, es decir, que no existan movimientos bruscos del fluido (flujo turbulento). De acuerdo a la ecuación (3.26) para la convección en esta zona y las iteraciones realizadas para conocer a qué distancia el flujo dejaba de ser laminar se concluyó que la distancia máxima entre el tanque y la cubierta a utilizarse en la construcción de este sistema solar térmico es de 50 mm.

3.9.10 MATERIAL DEL TANQUE

El material seleccionado para el tanque es acero estructural ASTM A36, puesto que el sistema solar térmico Bread – Box debe ser económico. En el mercado existen aceros inoxidable como el 304 y el 430 que se podrían usar para la construcción de los tanques, pero su costo es mucho más elevado.

Las propiedades del acero a utilizarse se indican en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Propiedades típicas del Acero ASTM A36.¹¹¹

Peso específico	Resistencia final		Resistencia a la fluencia	
	Tracción	Compresión	Tracción	Fuerza cortante
kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa
7860	400	---	250	145

¹⁰⁹ Norma Ecuatoriana de la Construcción. Parte 14-1. Pág. 26.

¹¹⁰ <http://solarcooking.org/bkerr/swheaterrev-1d.pdf>

¹¹¹ BEER, F.; JOHNSTON R. Pág. 585.

3.10 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Se han realizado varias simulaciones en el programa Microsoft Office Excel, para determinar las dimensiones más convenientes con las que se construirá el sistema solar Bread - Box. Los datos de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento usados en este proceso fueron tomados del día 18 de febrero de 2012, las gráficas del comportamiento horario de esos parámetros se muestran en las figuras 3.7 - 3.9.

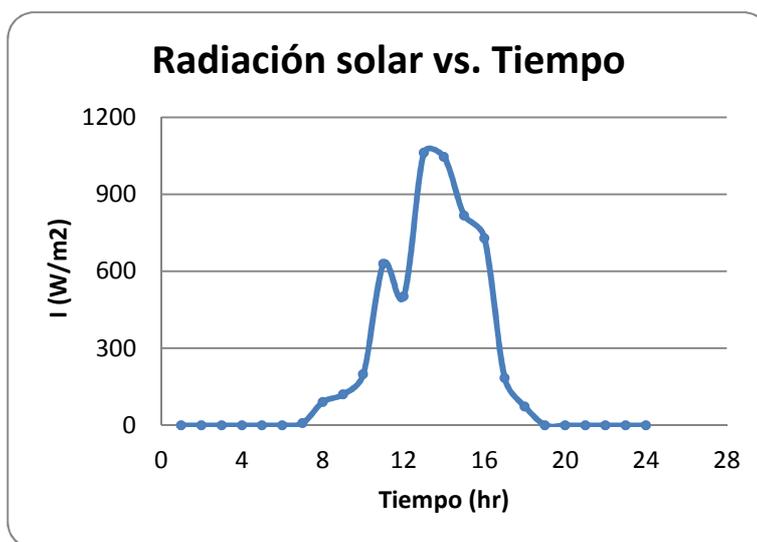


Figura 3.7.- Radiación solar, 18 de febrero de 2012.

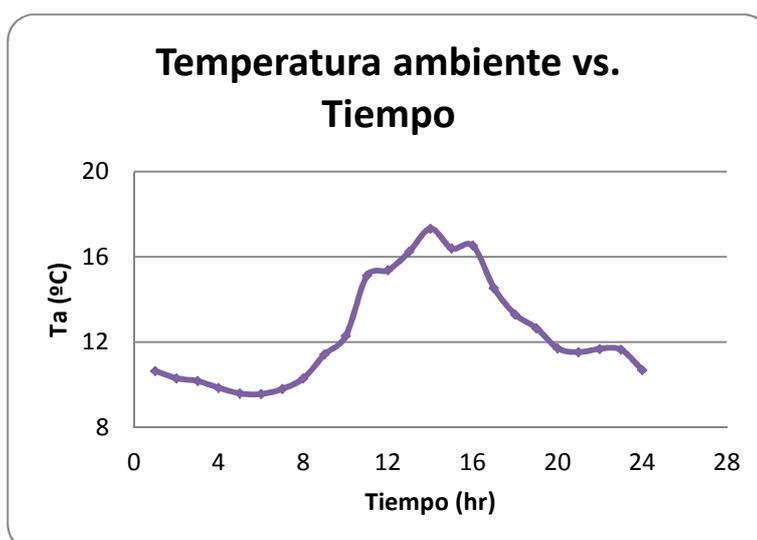


Figura 3.8.- Temperatura ambiente, 18 de febrero de 2012.

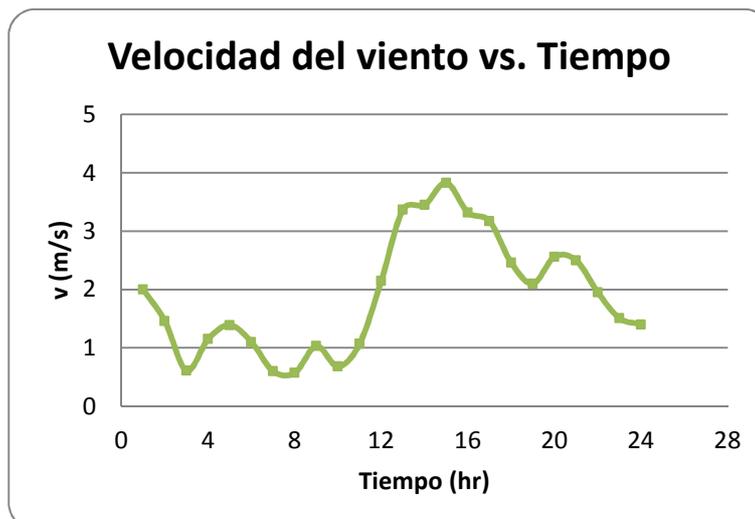


Figura 3.9.- Velocidad del viento, 18 de febrero de 2012.

En las simulaciones para 1, 2, 3, 4 y 5 tanques, se han variado el espesor de pared del tanque (t), el espacio entre la cubierta y el tanque (b), el espesor del aislante (li), la longitud del tanque (l), su volumen (V) y su diámetro (d). En la tabla 3.6, se muestra la temperatura más alta alcanzada en el día y la hora a la que se produjo, adicionalmente y considerando que la plancha de material es de 1220 x 2440 mm, se indica el área sobrante (desperdicio) al fabricar un colector. Los valores resaltados corresponden a las temperaturas máximas más altas, obtenidas de acuerdo al número de tanques utilizados. Se puede apreciar que entre mayor número de tanques, menor es el volumen que cada uno tiene y por ello, el agua alcanza temperaturas más elevadas. Figura 3.10.

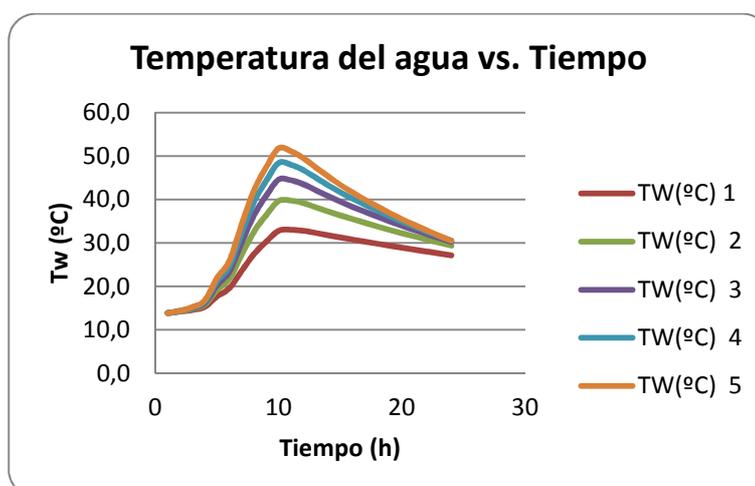


Figura 3.10.- Comparación de las temperaturas del agua, para diferente número de tanques.

Tabla 3.6. Resultados de la simulación.

	b (mm)	t (mm)	li (mm)	V (l)	l (mm)	d (mm)	Tw máx. (°C)	Hora	Área sobrante (mm ²)
1 TANQUE	10	2	30	120	1220	354	32.68	17:00	1.36x10 ⁶
	10	3	30	120	1220	354	32.43	17:00	
	50	2	30	120	1220	354	32.95	17:00	
	50	3	30	120	1220	354	32.69	17:00	
	50	2	50	120	1220	354	33.05	17:00	
	50	3	50	120	1220	354	32.78	17:00	
	50	2	100	120	1220	354	33.13	17:00	
	50	3	100	120	1220	354	32.86	17:00	
1 TANQUE	10	2	30	120	610	500	27.73	17:00	1.41 x10 ⁶
	10	3	30	120	610	500	27.56	17:00	
	50	2	30	120	610	500	27.89	17:00	
	50	3	30	120	610	500	27.71	17:00	
	50	2	50	120	610	500	27.94	17:00	
	50	3	50	120	610	500	27.76	17:00	
	50	2	100	120	610	500	27.98	17:00	
	50	3	100	120	610	500	27.80	17:00	
2 TANQUES	10	2	30	60	1220	250	39.13	17:00	0.81 x10 ⁶
	10	3	30	60	1220	250	38.78	17:00	
	50	2	30	60	1220	250	39.56	17:00	
	50	3	30	60	1220	250	39.20	17:00	
	50	2	50	60	1220	250	39.75	17:00	
	50	3	50	60	1220	250	39.39	17:00	
	50	2	100	60	1220	250	39.90	17:00	
	50	3	100	60	1220	250	39.53	17:00	
2 TANQUES	10	2	30	60	610	354	32.78	17:00	1.06 x10 ⁶
	10	3	30	60	610	354	32.53	17:00	
	50	2	30	60	610	354	33.04	17:00	
	50	3	30	60	610	354	32.79	17:00	
	50	2	50	60	610	354	33.14	17:00	
	50	3	50	60	610	354	32.89	17:00	
	50	2	100	60	610	354	33.22	17:00	
	50	3	100	60	610	354	32.96	17:00	
3 TANQUES	10	2	30	40	1220	204	43.91	16:00	0.38 x10 ⁶
	10	3	30	40	1220	204	43.47	16:00	
	50	2	30	40	1220	204	44.41	16:00	
	50	3	30	40	1220	204	43.95	16:00	
	50	2	50	40	1220	204	44.62	16:00	
	50	3	50	40	1220	204	44.15	16:00	
	50	2	100	40	1220	204	44.78	16:00	
	50	3	100	40	1220	204	44.31	16:00	
3 TANQUES	10	2	30	40	610	288	36.31	17:00	0.78 x10 ⁶
	10	3	30	40	610	288	36.02	17:00	
	50	2	30	40	610	288	36.66	17:00	
	50	3	30	40	610	288	36.36	17:00	
	50	2	50	40	610	288	36.81	17:00	
	50	3	50	40	610	288	36.50	17:00	
	50	2	100	40	610	288	36.93	17:00	
	50	3	100	40	610	288	36.61	17:00	

Tabla 3.6. Resultados de la simulación. Continuación.

	b (mm)	t (mm)	li (mm)	V (l)	l (mm)	d (mm)	Tw máx. (°C)	Hora	Área sobrante (mm ²)
4 TANQUES	10	2	30	30	1220	176	47.56	16:00	* 2.97 x10 ⁶
	10	3	30	30	1220	176	47.06	16:00	
	50	2	30	30	1220	176	48.16	16:00	
	50	3	30	30	1220	176	47.65	16:00	
	50	2	50	30	1220	176	48.43	16:00	
	50	3	50	30	1220	176	47.91	16:00	
	50	2	100	30	1220	176	48.64	16:00	
	50	3	100	30	1220	176	48.11	16:00	
4 TANQUES	10	2	30	30	610	250	39.27	17:00	0.56 x10 ⁶
	10	3	30	30	610	250	38.88	17:00	
	50	2	30	30	610	250	39.65	17:00	
	50	3	30	30	610	250	39.30	17:00	
	50	2	50	30	610	250	39.84	17:00	
	50	3	50	30	610	250	39.49	17:00	
	50	2	100	30	610	250	40.00	17:00	
	50	3	100	30	610	250	39.64	17:00	
5 TANQUES	10	2	30	24	1220	158	50.78	17:00	* 2.70 x10 ⁶
	10	3	30	24	1220	158	50.23	17:00	
	50	2	30	24	1220	158	51.49	17:00	
	50	3	30	24	1220	158	50.91	17:00	
	50	2	50	24	1220	158	51.82	17:00	
	50	3	50	24	1220	158	51.23	17:00	
	50	2	100	24	1220	158	52.07	17:00	
	50	3	100	24	1220	158	51.47	17:00	
5 TANQUES	10	2	30	24	610	224	41.85	17:00	0.29 x10 ⁶
	10	3	30	24	610	224	41.85	17:00	
	50	2	30	24	610	224	41.45	17:00	
	50	3	30	24	610	224	42.28	17:00	
	50	2	50	24	610	224	41.87	17:00	
	50	3	50	24	610	224	42.46	17:00	
	50	2	100	24	610	224	42.01	17:00	
	50	3	100	24	610	224	42.59	17:00	

*Área sobrante de 2 planchas de acero A36, ya que el número de tanques y sus respectivas tapas no alcanzan en una sola plancha.

En la figura 3.11, se realiza una comparación de las temperaturas alcanzadas por el agua al utilizar un tanque de longitud 1220 mm. (curva azul) y un tanque con longitud de 610 mm. (curva roja). Se demuestra que es más conveniente construir tanques largos, ya que se mejora el área de captación del colector, lo que permite conseguir mejores temperaturas.

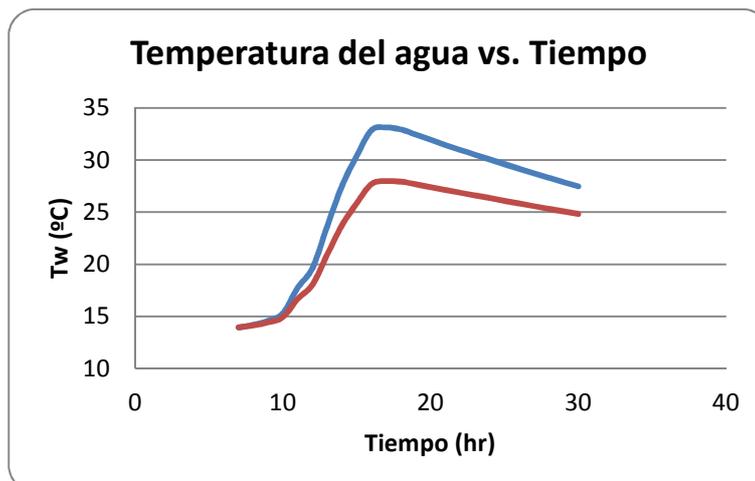


Figura 3.11.- Temperatura del agua para 1 tanque de dimensiones 1220x641mm

3.11 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE

Tomando en consideración que el volumen de agua caliente que se requerirá diariamente es de 120 litros y basándose en los resultados de temperatura, número de planchas y área de desperdicio obtenidos de las simulaciones realizadas, se ha creído conveniente utilizar tres tanques de 40 litros cada uno.

Al construir tres tanques, la temperatura que alcanzará el agua es la que se requiere, existe menor área de desperdicio de la plancha de acero A36 y los costos de producción son menores por el número de cortes y soldaduras en comparación con un modelo de cinco tanques, que aunque ofrece una mayor temperatura de agua, su fabricación es más costosa.

Además, para la implementación del sistema eléctrico es más conveniente tener varios tanques, puesto que la resistencia irá colocada en un sólo tanque lo que implica que el volumen de agua a calentar es menor, mejorando la eficiencia del sistema híbrido.

Las dimensiones de los tanques se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Dimensiones del tanque.

Símbolo	Nombre	Valor	Unidad
r	Radio del tanque	102	mm
l	Longitud del tanque	1220	mm
t	Espesor de la plancha	2	mm
V	Volumen del tanque	40	l

3.12 DESEMPEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA BREAD – BOX

La eficiencia del colector solar de tipo Bread - Box se define como la relación entre la energía aprovechada por el sistema y la energía solar incidente. Se pueden evaluar tanto la eficiencia horaria como la eficiencia diaria del captador.

$$\eta_h = \frac{Q_u}{A_T * I_T} \quad (3.59)^{112}$$

$$\eta_h = \frac{(m * c_p)_W * (T_W - T_{Wi})}{I_T * A_T * \Delta t} \quad (3.60)$$

$$\eta_D = \frac{\Sigma Q_u}{\Sigma I_T * A_T} \quad (3.61)^{113}$$

donde:

η_h = Eficiencia horaria.

Q_u = Calor útil, (W).

$(m * c_p)_W$ = Capacitancia térmica del agua, (J/K).

T_W = Temperatura del agua al final de cada hora, (K).

T_{Wi} = Temperatura inicial del agua en cada hora, (K).

I_T = Radiación solar incidente en cada hora, (W/m²).

A_T = Área del tanque expuesta al sol, (m²).

Δt = Variación del tiempo, (s).

η_D = Eficiencia diaria.

¹¹² DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 226.

¹¹³ DUFFIE J., BECKMAN W. Pág. 226.

3.13 CÁLCULO DE PRESIONES

3.13.1 PRESIÓN INTERNA DEL TANQUE

De acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción, el tanque debe soportar la presión de suministro hidráulico, es decir, la presión de la red. Para el sector Norte de Quito, la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Alcantarillado, indica que su valor máximo es de 120 mca (metros de columna de agua), ver ANEXO C.

Expresado en unidades internacionales la presión es:

$$Pr = 1.177 \text{ MPa}^{114}$$

donde:

Pr = Presión de la red de agua potable, (MPa).

3.13.2 PRESIÓN DE OPERACIÓN (P_o)

El tanque debe soportar la presión interna del agua y un incremento de la presión debido al calentamiento de la misma. Esta presión de trabajo se la conoce como presión de operación (P_o).

Se considera que la presión del agua caliente es 2 veces mayor a la presión de la red. Por lo tanto la presión de operación es:

$$P_o = 3.53 \text{ MPa}$$

3.13.3 PRESIÓN DE DISEÑO (P)¹¹⁵

Es el valor que debe utilizarse en las ecuaciones para el cálculo de las partes constitutivas de los recipientes sometidos a presión, dicho valor será el siguiente:

Si $P_o > 2.068 \text{ MPa}$.

$$P = 1.1 * P_o.$$

Si $P_o \leq 2.068 \text{ MPa}$.

$$P = P_o + 0.206 \text{ MPa}.$$

¹¹⁴ 1 mca = 9806,65 Pa.

¹¹⁵ LEÓN, Juan. Pág. 11.

Por lo tanto:

$$P = 3.88MPa$$

3.13.4 PRESIÓN DE PRUEBA (P_p)¹¹⁶

Se entenderá por presión hidrostática de prueba y se cuantificará por medio de la siguiente ecuación:

$$P_p = 1.5 * P * \frac{S_{ta}}{S_{td}} \quad (3.62)$$

donde:

P = Presión de diseño, (MPa).

S_{ta} = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura ambiente, (MPa).

S_{td} = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura de diseño, (MPa).

$$P_p = 5.83MPa$$

3.14 CÁLCULO DE ESFUERZOS

El cálculo de esfuerzos para un recipiente cilíndrico sometido a presión se lo realiza bajo la consideración de que es un recipiente de pared delgada. Por esto, debe cumplir con la siguiente condición:

$$\frac{r}{t} > 10 \quad (3.63)^{117}$$

3.14.3 ESPESOR DE PARED

El espesor de pared requerido se obtiene mediante la fórmula:¹¹⁸

$$t = \frac{P * r}{S * E - 0.6 * P} \quad (3.64)$$

donde:

t = Espesor de pared del tanque, (m).

¹¹⁶ LEÓN, Juan. Pág. 11.

¹¹⁷ GERE, James. Pág. 542.

¹¹⁸ MEGYESY, Eugene, Pág. 18

P = Presión de diseño o trabajo máxima permitida, (MPa).

E = Eficiencia de las soldaduras, 0.60 para soldadura simple por un solo lado.¹¹⁹

S = Esfuerzo máximo permisible a tensión del material, (MPa).

$$t = \frac{3.88MPa * 0.102m}{400MPa * 0.6 - 0.6 * 3.88MPa}$$

$$t = 0.002m$$

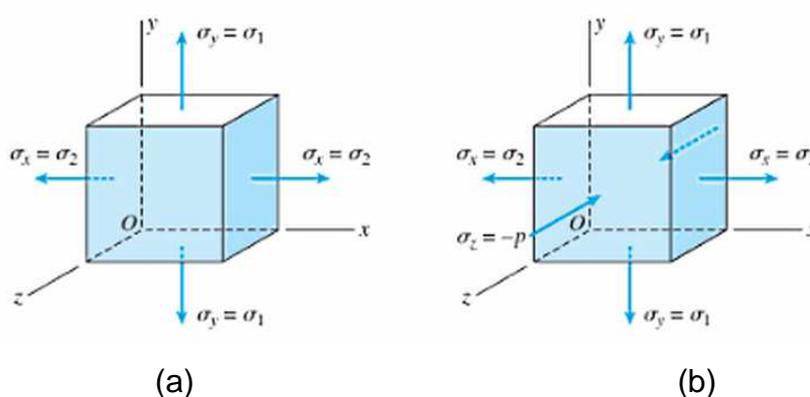


Figura 3.12.- Esfuerzos en un recipiente circular cilíndrico en (a) la superficie exterior y (b) la superficie interior.¹²⁰

3.14.4 ESFUERZO TRANSVERSAL¹²¹

El recipiente de pared delgada a presión está sometido a esfuerzos transversales y longitudinales como se muestra en la figura 3.12.

El esfuerzo transversal se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_T = \frac{pr}{t} \quad (3.65)$$

$$\sigma_T = \frac{3.53MPa * 0.102m}{0.002m}$$

¹¹⁹ LEÓN, Juan. Pág. 14.

¹²⁰ GERE, James. Pág. 630.

¹²¹ GERE, James. Pág. 629.

$$\sigma_T = 180.03MPa$$

3.14.5 ESFUERZO LONGITUDINAL¹²²

El esfuerzo longitudinal se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_L = \frac{pr}{2t} \quad (3.66)$$

$$\sigma_L = \frac{3.53MPa * 0.102m}{2 * 0.002m}$$

$$\sigma_L = 90.015MPa$$

donde:

p = Presión interna del tanque, (MPa).

t = Espesor de pared del tanque, (m).

r = Radio del tanque, (m).

3.14.6 FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad es la relación entre el esfuerzo final y el esfuerzo admisible, se lo calcula para garantizar que el recipiente de presión no falle, su valor debe ser mayor a 1. Se lo obtiene con la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{S_y}{\sigma_T} \quad (3.67)^{123}$$

$$F.S. = \frac{250MPa}{180.03MPa}$$

$$F.S. = 1.39$$

¹²² GERE, James. Pág. 629.

¹²³ <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r68071.PDF>. Ecuación (1-22)

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL

4.1 INTRODUCCIÓN.

La energía solar no se encuentra disponible de manera constante durante todo el día, por lo que se requiere de un sistema de energía adicional para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria. La energía eléctrica es una buena opción, ya que es económica y de fácil acceso en los hogares. En este capítulo se dimensionan los sistemas eléctrico y de control que permitirán mantener el agua dentro de un rango deseado de utilización.

4.2 SISTEMA ELÉCTRICO

Está compuesto principalmente por una resistencia de inmersión que convierte la energía eléctrica en energía calórica, la cual permite elevar la temperatura del agua, debido al efecto Joule. El sistema eléctrico entrará en funcionamiento únicamente cuando la energía solar no sea suficiente para cubrir el consumo previsto, de forma que siempre se tenga prioridad por el suministro solar.

- **EFFECTO JOULE**¹²⁴: Fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Este efecto es utilizado para calcular la energía disipada en un conductor atravesado por una corriente eléctrica de la siguiente manera:

$$\dot{E} = V * I = I^2 * R \quad (4.1)$$

donde:

E = Energía disipada. (W).

V = Diferencia de potencial. (V).

I = Intensidad de corriente. (A).

R = Resistencia eléctrica. (Ω).

¹²⁴ http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule

4.2.1 RESISTENCIA ELÉCTRICA DE INMERSIÓN

La resistencia de inmersión es un elemento diseñado para el calentamiento de un fluido, en este caso agua, por contacto directo. Figura 4.1.



Figura 4.1.- Resistencia eléctrica de inmersión.¹²⁵

La resistencia eléctrica debe ser dimensionada para cubrir la demanda de ACS como si la energía solar no ingresara al sistema. Será colocada en un tanque, es decir, que el elemento eléctrico deberá tener la potencia suficiente para calentar 40 litros de agua.

4.2.2 CÁLCULO DE POTENCIA ELÉCTRICA REQUERIDA

Para el cálculo de la potencia requerida se analiza la transferencia de calor entre los elementos del sistema bajo las siguientes consideraciones:

- Flujo de calor unidimensional.
- No existe energía solar incidente.
- Se desprecia las pérdidas de calor en los lados del tanque.
- El espesor de la cubierta es despreciable.
- El espesor de la pared del tanque es despreciable.
- Las propiedades térmicas de cada elemento permanecen constantes durante el funcionamiento.
- Las temperaturas de los componentes del sistema son función del tiempo.

¹²⁵ <http://www.electricfor.es/es/16523/Resistencias-para-inmersion.htm>



Figura 4.2.- Elementos del sistema de calentamiento eléctrico.

De acuerdo al esquema presentado en la figura 4.2 y las consideraciones realizadas, se aplica al sistema la primera ley de la termodinámica mediante la ecuación (3.2).

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \quad (3.2)$$

donde:

\dot{E}_{ent} = Energía que entra al sistema. (W).

\dot{E}_g = Energía disipada por la resistencia eléctrica. (W).

\dot{E}_{sale} = Energía que sale del sistema. (W).

\dot{E}_{alm} = Energía almacenada en el sistema. (W).

Dicha expresión se analiza para el agua, obteniéndose la ecuación siguiente:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm}$$

La energía almacenada en el agua es el resultado de la energía que le proporciona la resistencia eléctrica y las pérdidas de calor en la parte superior e inferior del sistema debido a mecanismos de conducción y convección. La ecuación 4.2 describe este comportamiento:

$$(m * c_p)_W * \frac{dT_W}{dt} = I^2 * R - A_w * U_{W-a\uparrow} (T_W - T_a) - A_w * U_{W-a\downarrow} (T_W - T_a) \quad (4.2)$$

donde:

$(mc_p)_W$ = Capacitancia térmica del agua, (J/K).

dT/dt = Variación de la temperatura con respecto al tiempo, (K/s).

I = Intensidad de corriente, (A).

R = Resistencia eléctrica, (Ω).

T_W = Temperatura de la superficie absorbidora - agua, (K).

T_a = Temperatura ambiente, (K).

A_w = Área del agua, (m^2).

$U_{W-a\uparrow}$ = Coeficiente global de transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte superior del sistema, ($W/m^2.K$).

$U_{W-a\downarrow}$ = Coeficiente global de transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte inferior del sistema, ($W/m^2.K$).

Para determinar los parámetros presentados en la ecuación 4.2, se analizan los fenómenos de transferencia de calor realizando una analogía eléctrica, en la que se tienen resistencias térmicas por convección y conducción. Figura 4.3.

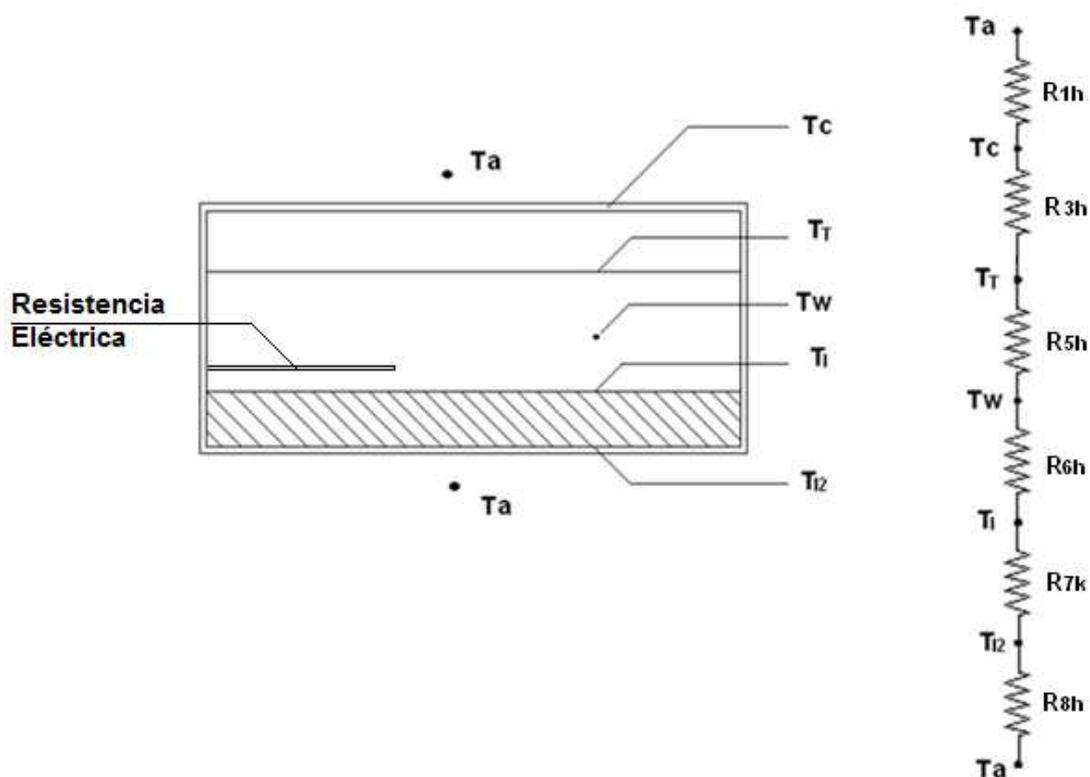


Figura 4.3.- Analogía eléctrica del sistema de calentamiento.

4.2.2.1 Coeficiente de transferencia de calor entre el agua y el ambiente ($U_{W-a\uparrow}$).

La transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte superior se produce por convección del agua hacia la pared del tanque, y convección del aire en dos partes, del tanque hacia la cubierta y de la cubierta hacia el ambiente como se observa en la figura 4.4.

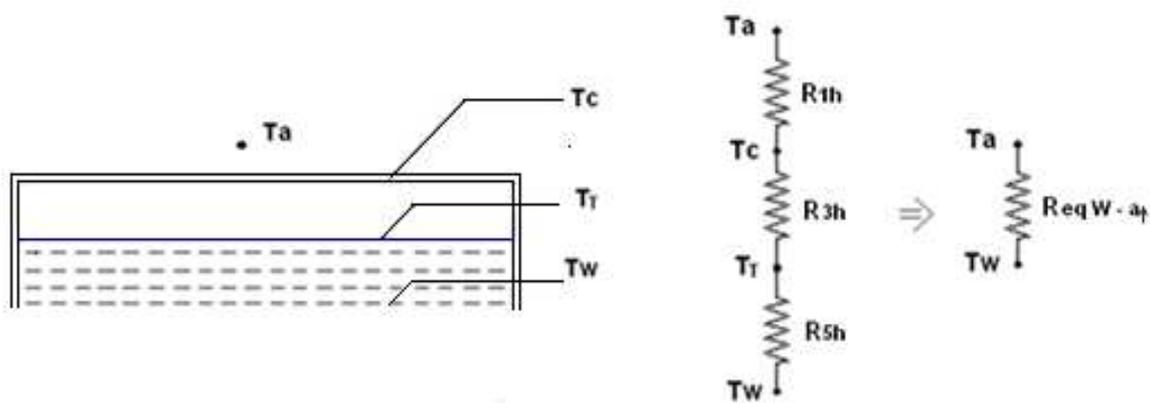


Figura 4.4.- Transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte superior del sistema.

El coeficiente global de transferencia de calor se puede evaluar con la siguiente expresión:

$$U_{W-a\uparrow} = \frac{1}{(R_{1h} + R_{3h} + R_{5h}) * A_W} \quad (4.3)$$

4.2.2.2 Coeficiente de transferencia de calor entre el agua y el ambiente ($U_{W-a\downarrow}$).

La transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte inferior se produce por convección del agua, conducción a través del material aislante y finalmente por convección del aire. Figura 4.5.

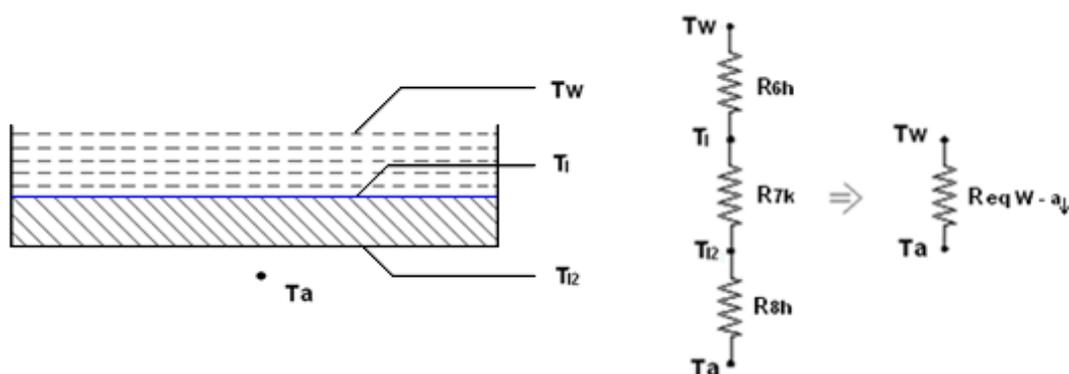


Figura 4.5.- Transferencia de calor entre el agua y el ambiente en la parte inferior del sistema.

El coeficiente global de transferencia de calor se evalúa mediante la ecuación 4.4

$$U_{W-a_l} = \frac{1}{(R_{6h} + R_{7k} + R_{8h}) * A_W} \quad (4.4)$$

Las variables expuestas en las ecuaciones 4.3 y 4.4 fueron detalladas en el Capítulo 3 en el punto 3.7.3.

Considerando que se van a calentar 40 litros de agua en una hora hasta alcanzar 40°C se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la potencia requerida de la resistencia eléctrica.

$$P = I^2 * R = (m * c_p)_W * \frac{\Delta T_W}{\Delta t} + A_w * U_{W-a_l} (T_W - T_{a_l}) + A_w * U_{W-a_l} (T_W - T_{a_l}) \quad (4.5)$$

Reemplazado valores en la ecuación 4.5 se tiene:

$$P = 166190.2 * \frac{(313 - 285)}{3600} + 0.391 * [1.02 * (313 - 287) + 0.52(313 - 287)] [W]$$

y se obtiene como resultado:

$$P = 1310 W$$

En el mercado nacional no se encuentran disponibles resistencias de ese valor nominal, pero se tienen dos alternativas para la adquisición de dicho elemento, la primera es fabricarlo en el material y las especificaciones requeridas y la segunda opción es adquirir una resistencia con un valor nominal de potencia mayor al calculado, cuyas características están estandarizadas, esta última es la mejor opción, ya que al ser fabricada en serie posee un costo inferior, y en caso de deterioro se puede adquirir un repuesto fácilmente.

En la tabla 4.1 se presenta una comparación entre los valores de potencia de diferentes resistencias eléctricas disponibles en el mercado y el tiempo que requieren para calentar el agua a la temperatura deseada, considerando que la temperatura de entrada de agua es de 12°C.

Tabla 4.1. Simulación para diferentes potencias de resistencia comerciales.

Potencia (W)	ΔT_w (°C)	Tiempo (h)
1310*	28	1,00
1500	28	0,87
2000	28	0,65
2500	28	0,52
3000	28	0,43
3500	28	0,37
4000	28	0,32
4500	28	0,29
5000	28	0,26
5500	28	0,24
6000	28	0,22

*Potencia calculada

Se selecciona la resistencia de 1500 W, porque es la más cercana a la potencia calculada, es la más económica y permite trabajar con tensión de 110 voltios que son suministrados en el sector residencial.

4.3 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

El sistema de control de temperatura asegura el correcto funcionamiento del sistema híbrido, ya que permite el aprovechamiento de la energía solar captada y

el uso adecuado de la energía eléctrica a través del control de la resistencia,¹²⁶ manteniendo el agua dentro del rango de temperatura predeterminado para el consumo doméstico (40 – 45°C).

4.3.1 REQUERIMIENTOS

Para poder controlar adecuadamente la resistencia eléctrica, es necesario que el sistema soporte las variables principales de trabajo: potencia, voltaje y corriente.

En el país la Empresa Eléctrica suministra energía de 110 voltios y 60 hz, por esa razón se han seleccionado estos valores como voltaje y frecuencia nominales.

La potencia eléctrica de la resistencia seleccionada para calentar el agua se calculó en el punto 4.2.1.1 de este capítulo, y en el mismo se indicó que la mejor alternativa para suplir la necesidad del elemento es adquirir una resistencia disponible en el mercado cuyo valor nominal es 1500 W, por lo tanto, ésta es la potencia de trabajo del sistema de control.

Para determinar la intensidad de corriente del sistema, se aplica la ley de Ohm, la cual indica que la intensidad de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo¹²⁷.

$$I = \frac{V}{R} \quad (4.6)$$

donde:

I = Intensidad de corriente. (A).

V = Diferencia de potencial. (V)

R = Resistencia. (Ω)

Expresando la ecuación anterior en términos de voltaje y potencia se tiene:

$$I = \frac{P}{V} \quad (4.7)^{128}$$

¹²⁶ Norma Ecuatoriana de la Construcción. Parte 14-1. Pág. 18.

¹²⁷ http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/3esofisicaquimica/3quincena11/3q11_contenidos_5d.htm

¹²⁸ http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule

Por lo tanto, el sistema de control trabajará con los siguientes valores:

- Voltaje nominal: 110 (V)
- Potencia nominal: 1500 (W)
- Corriente: 13.67(A)

4.3.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control consta de los siguientes dispositivos eléctricos y electrónicos:

4.3.2.1 Termostato digital

El termostato digital MT-511Ri de marca Full Gauge es un controlador e indicador de temperatura, que puede ser configurado para controlar tanto refrigeración como calefacción. Figura 4.6.

Especificaciones técnicas¹²⁹:

- Alimentación eléctrica MT-511Ri: 115/230 Vac +- 10 % (50/60 Hz)
MT-511RiL – 12/24 Vac/dc
- Temperatura de control: -50 hasta 105°C / 58 hasta 221°F
- Corriente máxima: NA 16(8)A/250Vac 1HP
NC 8A/250Vac
- Dimensiones: 71 x 28 x 71 mm
- Temperatura de operación: 0 hasta 50 °C / 32 hasta 122°F
- Humedad de operación: 10 hasta 90% HR (no condensante)



Figura 4.6.- Termostato digital.¹³⁰

¹²⁹ <http://www.fullgauge.com/es/public/uploads/files/products/mt-511.pdf-gg4.pdf>

4.3.2.2 Sensor de Temperatura

Es un dispositivo diseñado para detectar los cambios de temperatura, en este caso la del agua contenida en el tanque. El sensor se encarga de transformar la información recibida en una señal eléctrica cuantificable.

Este sensor es de tipo NTC y su rango de operación es de: -50 hasta 105°C.



Figura 4.7.- Sensor de temperatura.

4.3.2.3 Contactor

Es un componente electromecánico que tiene por objetivo establecer o interrumpir el paso de corriente, ya sea en el circuito de potencia o en el circuito de mando, tan pronto se dé tensión a la bobina,¹³¹ es capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito e incluso las de sobrecarga. Un contactor es de constitución parecida a la del relé pero tiene la capacidad de soportar grandes cargas en sus contactos principales, aunque la tensión de alimentación de su bobina sea pequeña.¹³²

Especificaciones técnicas:

- 110V 50/60 Hz
- 7.5 kW – 400 V 10 HP – 460 V

¹³⁰ <http://www.trubadu.de/shop/sartikel.php5?aid=47>

¹³¹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Contactor>

¹³² <http://guindo.pntic.mec.es/rarc0002/all/aut/dat/f.el.contactor.pdf>



Figura 4.8.- Contactor¹³³

4.3.2.4 Temporizador

Es un dispositivo utilizado para conectar o desconectar un circuito eléctrico durante un tiempo determinado. Este aparato nos permitirá programar la hora de encendido y apagado del sistema de control para un uso más eficiente de energía.

Especificaciones técnicas:

- Tipo bnd-60/u36
- 125 V /60 Hz
- 15 A
- Potencia máxima 1875 W
- Intervalos 15 minutos



Figura 4.9.- Temporizador.¹³⁴

¹³³ <http://www-app.etsit.upm.es/departamentos/teat/asignaturas/lab-ingel/practica3.htm>

4.3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El sensor detecta la temperatura a la que se encuentra el agua contenida en el tanque y envía la señal al termostato digital, el cual está programado para activar y desactivar el contactor que a su vez encenderá y apagará la resistencia eléctrica cuando el agua esté por debajo del rango de temperatura deseado (40 – 45°C), o sobre él. Figura 4.10

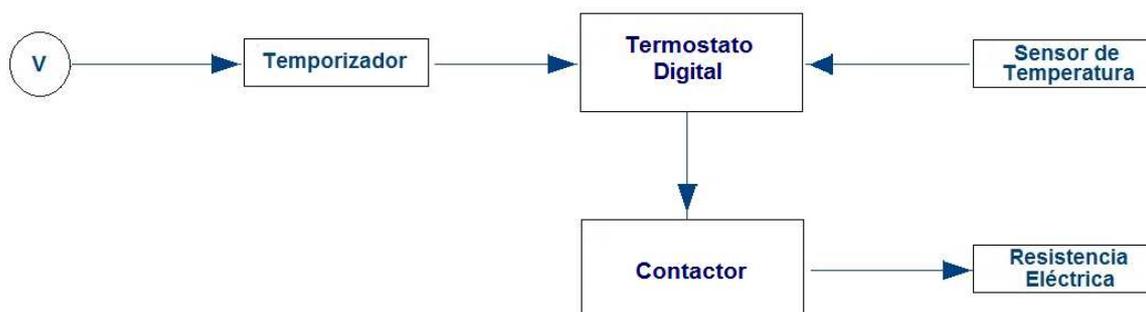


Figura 4.10.- Diagrama de bloques del sistema de control.

En la figura 4.11 se indica el esquema de conexión del termostato digital adscrito en el manual.

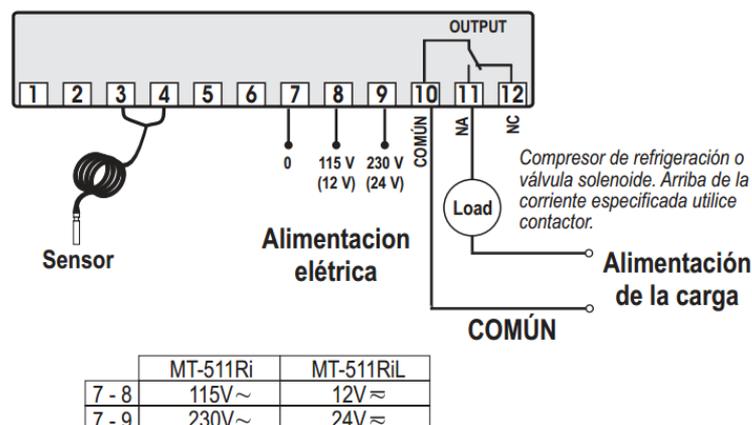


Figura 4.11.- Esquema de conexión del termostato digital

El manual completo se muestra en el Anexo D.

¹³⁴ <http://www.paraquesirve.net/enciclopedia/diccionario/44525-temporizador.html>

4.4 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-ELÉCTRICO.

En promedio el uso de agua caliente sanitaria en los hogares de la ciudad de Quito inicia a las 6 a.m. y finaliza a las 10 p.m., por esta razón el temporizador encenderá la resistencia eléctrica a las 5 a.m. para que caliente los 40 litros de agua dispuestos en un tanque en esa hora, ya que no hay radiación solar sino hasta las 7 de la mañana. El agua estará lista para utilizarse a una temperatura de 40°C, es decir que tendrá la posibilidad de mezclarse con agua fría para alcanzar una temperatura agradable al usuario.

En la figura 4.12, se aprecia en color verde cual sería el comportamiento al utilizar únicamente la resistencia eléctrica para elevar la temperatura del agua, por otra parte en color azul se observa la tendencia de la temperatura del agua al utilizar energía solar para el calentamiento.

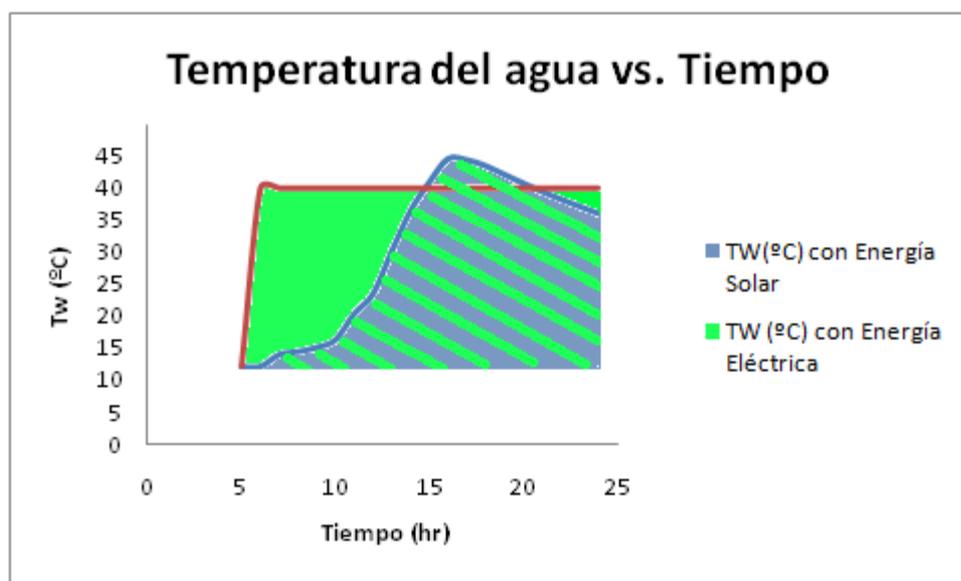


Figura 4.12.- Agua calentada con energía eléctrica y solar 18/02/12

El óptimo desempeño del sistema híbrido consiste en conjugar tanto la parte de generación eléctrica como la de captación solar; lo que se pretende es optimizar el recurso solar, ya que es una energía limpia y gratuita. En la figura 4.13, se muestra en color rojo el calentamiento de agua utilizando la resistencia eléctrica para alcanzar los 40°C, a partir de las 6 a.m. se ha realizado la simulación contando solo con la energía solar, se aprecia que se pueden conseguir

temperaturas elevadas sin necesidad de que la resistencia vuelva a encenderse, pero hay que tomar en cuenta que esta curva es ideal, puesto que no se considera que el agua caliente es usada constantemente y que de igual manera ingresa agua fría al sistema.

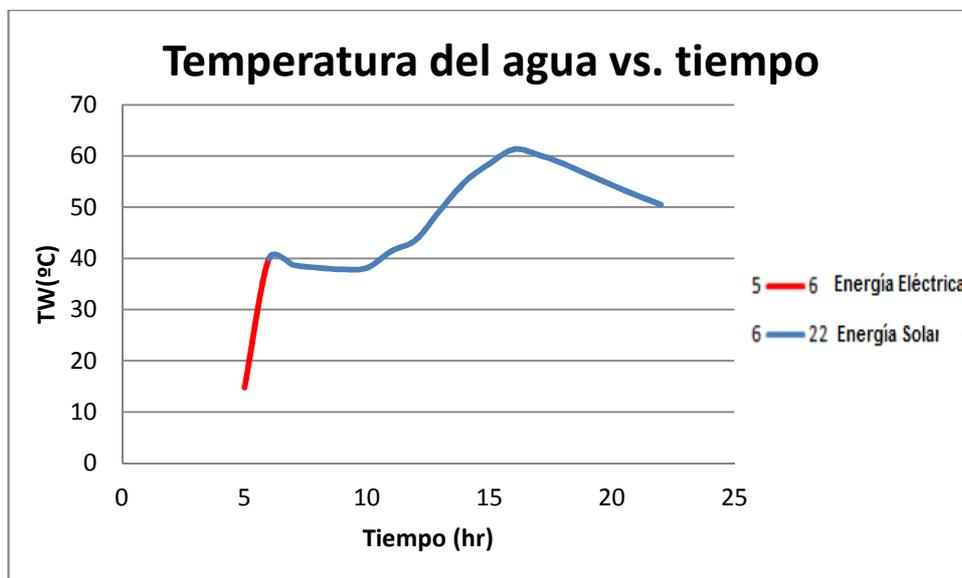


Figura 4.13.- Temperatura del agua simulación sistema híbrido 18/02/12.

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

5.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta la descripción de los materiales y procesos de fabricación para la construcción del sistema Bread-Box Híbrido, se utilizan las normas correspondientes que rigen a este tipo de sistemas para asegurar su calidad y funcionalidad. Además, se muestran los resultados de las diferentes pruebas de funcionamiento: solar, eléctrico y solar-eléctrico (híbrido); de forma estática y dinámica, a las que fue sometido el equipo. Por último, se realiza un análisis de costos donde se incluye tanto la inversión realizada en el prototipo como un posible precio de mercado, y una comparación del equipo con otros sistemas de calentamiento de agua que son comúnmente utilizados en nuestro medio.

5.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO HÍBRIDO

5.2.1 COLECTOR SOLAR TIPO BREAD-BOX

El sistema híbrido Bread-Box consta de 3 tanques de 40 litros cada uno, fabricados de acero A36. Las dimensiones de los tanques han sido obtenidas a partir de un balance entre la eficiencia del sistema y la facilidad de producción, es decir, que se ha optimizado el uso de la plancha de acero de dimensiones 2440x1220mm., para generar el menor desperdicio.

Las dimensiones de cada tanque son las especificadas en la Tabla 3.7.

5.2.1.1 Cilindro

5.2.1.1.1 Cortado

El proceso de corte de la plancha se lo realiza con amoladora, ya que el espesor de la misma es muy pequeño. En la figura 5.1. se muestra el corte del cuerpo de un tanque.



Figura 5.1.- Corte con amoladora de la plancha de acero A36.

5.2.1.1.2 *Rolado*

Las láminas cortadas de 1220x641mm. proceden a ser roladas para darles la forma cilíndrica. Figuras 5.2 y 5.3



Figura 5.2.- Proceso de rolado.

5.2.1.1.3 *Soldadura*

El espesor del material es pequeño (1.9mm), por eso, se utiliza el proceso GMAW (MAG) con electrodo ER70S-6 para el cordón longitudinal de los cilindros. Figura 5.4.



Figura 5.3.- Tanque rolado.



Figura 5.4.- Soldadura longitudinal.

El procedimiento de soldadura utilizado se describe en el WPS del Anexo E.

5.2.1.1.4 Galvanizado

El Galvanizado permite la protección anticorrosiva del acero A36. Este proceso se lo realiza en la empresa Galvanorte por medio de un baño electrolítico en caliente. El espesor del recubrimiento es de 70-90 micras.



Figura 5.5.- Cilindros y tapas galvanizadas.

5.2.1.2 Tapas

5.2.1.2.1 Cortado

Para obtener las tapas de los tanques se utiliza una cortadora intermitente marca Pullmax. Figura 5.6.



Figura 5.6.- Corte de las tapas del tanque.

Para la perforación de los agujeros en las tapas se emplea un sacabocados de $\frac{1}{2}$ " , sobre estos orificios se soldarán las uniones roscadas de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " y $1 \frac{1}{4}$ " para instalar las interconexiones de tubería entre los tanques y la resistencia eléctrica respectivamente.

5.2.1.2.2 Rebordeado

A las tapas se les hace un reborde de 20mm. en la rebordeadora, el cual servirá para evitar que el metal sufra deformación al momento de soldar. Figura 5.7.



Figura 5.7.- Reborde de las tapas.

5.2.1.2.3 Soldadura

El proceso de soldadura utilizado para colocar las uniones de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " y $1 \frac{1}{4}$ " es GTAW (TIG) con electrodo ER308-L. Figura 5.8.

Para unir las tapas al cuerpo cilíndrico del tanque se utiliza el proceso GMAW (MAG) con electrodo ER70S-6. Este proceso se lo realiza después del galvanizado y posterior a una limpieza del recubrimiento en las partes a ser soldadas.



Figura 5.8.- Uniones soldadas a la tapa del tanque.

Los procedimientos de soldadura empleados se describen en los WPS's del Anexo E.

5.2.1.2.4 Galvanizado

El galvanizado de las tapas se lo realiza en el mismo baño que el cilindro mencionado en el punto 5.2.1.1.4.

En la figura 5.9 se observan los tanques construidos bajo los procesos descritos en el apartado 5.2.1.



Figura 5.9.- Tanques construidos.

5.2.1.3 Carcasa

Se usan dos planchas de acero galvanizado de 0.9 mm. Se utiliza una dobladora para hacer los pliegues del acero que dan forma a la caja. Con soldadura se unen las partes mediante punteado. Figura 5.10.

5.2.1.4 Soportes de madera

Se los utiliza para resistir el peso de los tanques y brindar mayor rigidez a la carcasa. En su fabricación se emplea un tablón de madera de 140 mm. de alto y 70 mm. de espesor, en el cual se cortan tres semicircunferencias para dar cabida a los tanques. En la caja se colocan dos soportes con tornillos tanto en las paredes laterales como en el fondo. Figura 5.11.



Figura 5.10.- Caja de acero galvanizado.

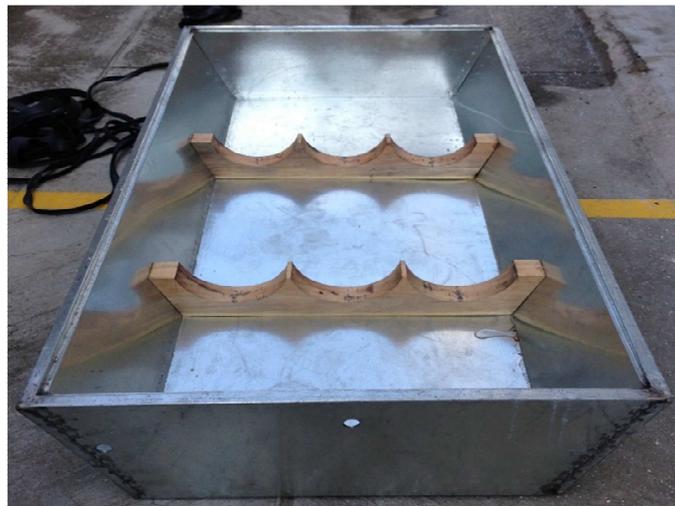


Figura 5.11.- Caja con soportes de madera.

5.2.1.5 Cubierta

Se fabrica en vidrio flotado de 6mm de espesor cuyas dimensiones son 902x1783mm. El cristal está colocado sobre un marco de aluminio anodizado para prevenir la corrosión. Figura 5.12.



Figura 5.12.- Cubierta de vidrio y aluminio anodizado.

5.2.1.6 Aislante

Para proporcionar un aislamiento térmico a los tanques en la parte inferior se emplea poliuretano que es una mezcla de dos componentes poliol e isocianato, y al reaccionar químicamente entre ellos dan como resultado una estructura sólida, uniforme y muy resistente. Figura 5.13.



Figura 5.13.- Poliuretano inyectado.

En el Anexo F se presenta la ficha técnica de los químicos utilizados como aislamiento térmico.

5.2.2 SISTEMA ELÉCTRICO

El sistema de calentamiento utiliza una resistencia eléctrica tubular sumergible de 210mm.de longitud con rosca NPT de 1 ¼ " para ser acoplada en el tanque (figura 5.14), las características de trabajo de dicho elemento se encuentra especificadas en el capítulo IV.



Figura 5.14.- Resistencia eléctrica.

5.2.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control tiene elementos eléctricos y electrónicos descritos en el punto 4.3.2. y que han sido implementados como se muestra en la figura 5.15.



Figura 5.15.- Sistema de control.

5.3 INSTALACIÓN DEL SISTEMA

El sistema híbrido Bread-Box es de fácil instalación, ya que sus partes son construidas por separado facilitando su montaje y desmontaje.

5.3.1 COLECTOR SOLAR

- El colector debe ser colocado con inclinación de 5° a 10° , para evitar la acumulación de impurezas y permitir el flujo de agua lluvia. Su orientación debe ser hacia el sur, la radiación solar incide sobre él de este a oeste.

Figura 5.16.

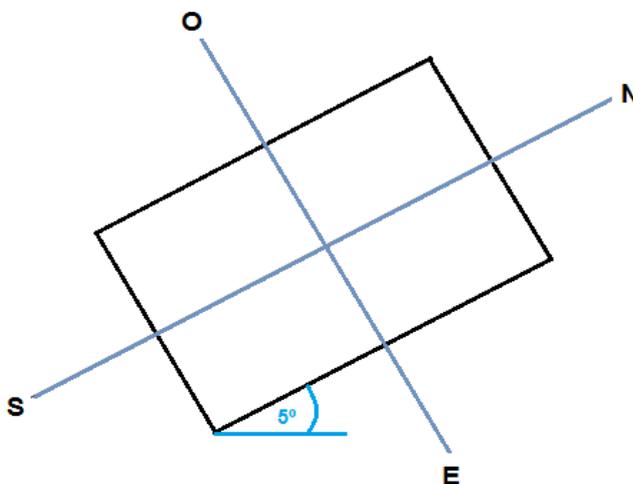


Figura 5.16.- Orientación del captador.

5.3.2 SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL

Los sistemas eléctrico y de control se instalan conjuntamente siguiendo los pasos descritos a continuación:

- Se trabaja con energía eléctrica de 110 V y 60 Hz, es necesario instalar un interruptor automático de 20 amperios para proteger el sistema.
- Se utiliza alambre sólido #12 para realizar las conexiones entre los elementos del circuito.
- El termostato digital y el contactor poseen números y letras que facilitan su instalación, y se conectan como se indica en la figura 5.17, donde C1 es el contactor, MT-511Ri es el termostato digital y F el fusible de 1A.

- El sensor de temperatura y el temporizador o timer se conectan como se indica en la figura 4.11.
- La resistencia eléctrica posee fase y neutro, que son conectados al contactor. Se conecta además, un foco en paralelo a la resistencia que sirve como luz piloto para realizar las pruebas de funcionamiento.
- La resistencia eléctrica se enrosca en el tanque intermedio para calentar el agua.

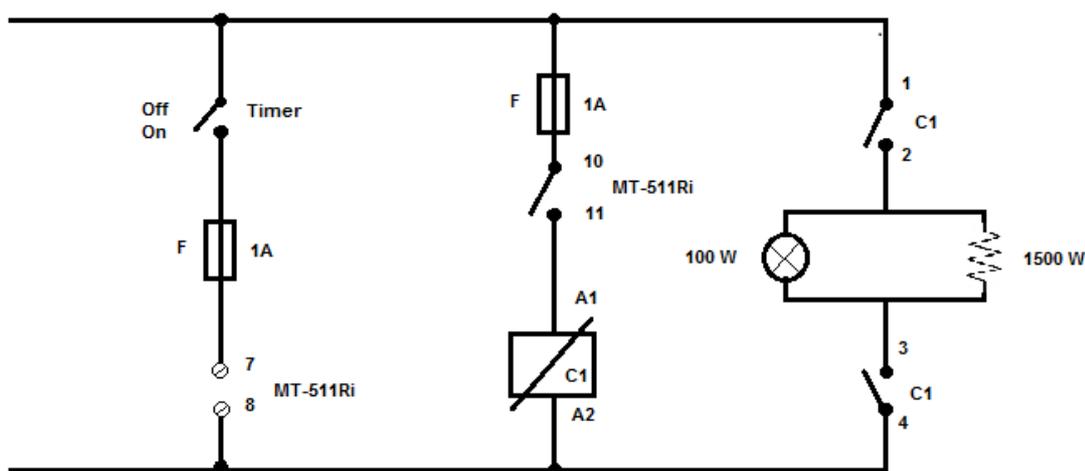


Figura 5.17.- Circuito eléctrico y de control. Instalación.

Para mayor información sobre la instalación de las partes del sistema híbrido Bread-Box revisar los planos constructivos del Anexo G.

5.3.3 CONEXIÓN DE ACCESORIOS DE AGUA POTABLE

El sistema requiere de varios tipos de válvulas para garantizar el flujo de agua de manera adecuada. Figura 5.18

- En la tubería de entrada de agua fría se coloca una válvula check, una válvula de globo y una válvula de bola.
- En la tubería de salida de agua caliente se coloca una válvula de globo y una válvula de bola.
- Se han utilizado mangueras metálicas flexibles para que las conexiones entre los tanques no impliquen ningún problema para el usuario en caso de requerir reemplazarlas.

Para las pruebas de funcionamiento:

- Se han instalado tanto en la tubería de entrada como en la de salida un manómetro y una termocupla tipo K.

Para la operación normal del sistema:

- En la entrada deben estar abiertas la válvula check y la válvula de globo. La llave de bola debe estar cerrada, esta se abrirá únicamente para mantenimiento.
- En la salida debe estar abierta la válvula de bola y la de medio paso debe estar cerrada.

5.3.4 ELEMENTOS DE SEGURIDAD

Para garantizar la seguridad mientras el equipo está en operación normal, se ha instalado una válvula de seguridad de 150 psi en la tubería de entrada de agua fría.

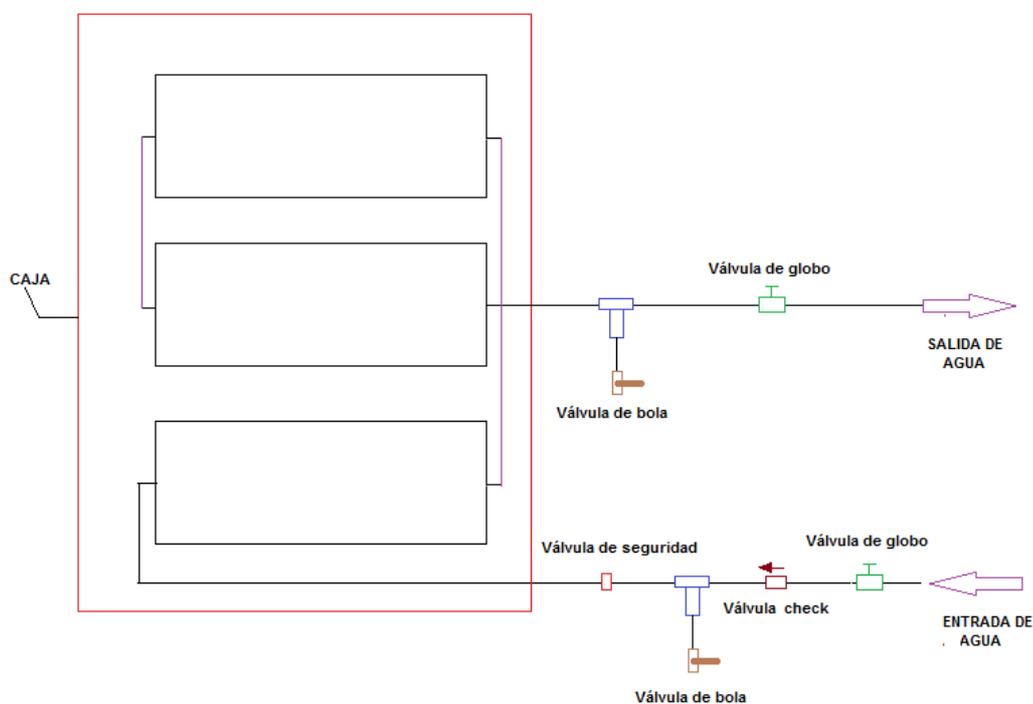


Figura 5.18.- Diagrama de válvulas.

5.4 PRUEBAS

5.4.1 PRUEBA HIDROSTÁTICA

Para garantizar la seguridad del sistema cuando se encuentre en operación, los tanques han sido sometidos a pruebas hidrostáticas como lo exige la norma NTE INEN 1 912:1992 para Calentadores eléctricos de agua para uso doméstico, en la cual se indica los valores de presión a los que deben operar los tanques. Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Valores de presión de acuerdo a la norma INEN 1 912:1992

	MPa (psi)	Tiempo (min)
Presión de ensayo	1.65 (240)	1.00
Presión de diseño	1.10 (160)	NA
Presión de trabajo	0.83 (120)	NA

El informe en el cual se describe el procedimiento y los resultados de las pruebas hidrostáticas realizadas se presenta en el Anexo H.

5.4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO¹³⁵

Para evaluar el comportamiento térmico y el rendimiento del sistema, el equipo es sometido a pruebas de funcionamiento estacionarias y dinámicas, para lo cual se utilizan los instrumentos descritos en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Equipos de medición.

	MARCA	RANGO	UNIDAD
Pirómetro	PCE-890	-50 a1600	°C
Termocupla tipo K (ANSI)	N/A	-150 a1100 ¹³⁶	°C
Manómetro	PAOLO	0 a 200	psi
Cronómetro	CASIO	0 a 30	min

¹³⁵ Los datos completos de todas las pruebas de funcionamiento realizadas al sistema y sus respectivas gráficas se presentan en el Anexo I.

¹³⁶ http://www.tecno-indusil.com/spa/prods/cables/comext_colores.htm

Los datos horarios de Radiación solar y velocidad del viento se toman de la red de monitoreo de la Secretaria de Ambiente.¹³⁷

5.4.2.1 Pruebas con energía solar. Modo estático.

5.4.2.1.1 Procedimiento

El equipo es ensayado en el exterior de la vivienda, se llenan los tanques totalmente de agua y se cierran las válvulas de entrada y de salida. Se toman datos cada hora de las siguientes variables:

- Temperatura del agua a la entrada del sistema. T_e ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura ambiente. T_a ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua a la salida del sistema. T_s ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua en la mitad del tanque. T_w ($^{\circ}\text{C}$).
- Radiación solar. I (W/m^2).
- Velocidad del viento. v (m/s).

5.4.2.1.2 Resultados

Se presentan las gráficas de los resultados obtenidos el día domingo 15 de septiembre de 2013, realizando ensayos únicamente con energía solar. Los datos obtenidos y calculados se muestran en el Anexo I, en las tablas I.1 e I.2.

5.4.2.1.2.1 Temperaturas experimentales

En la figura 5.19, se muestran las curvas de las temperaturas ambiente, de entrada y de salida del sistema, adicionalmente se presenta la temperatura requerida para el uso diario.

5.4.2.1.2.2 Análisis de resultados

La temperatura del agua en el interior del tanque T_w , inicia en 10°C y alcanza su valor máximo de 34°C a las 20:00 horas. Se observa además, que la temperatura alcanzada es inferior a la requerida por los usuarios, sin embargo está por encima de las temperaturas ambiente y de entrada. Figura 5.19.

¹³⁷ <http://190.152.144.75/reportes/ReporteHorariosData.aspx>

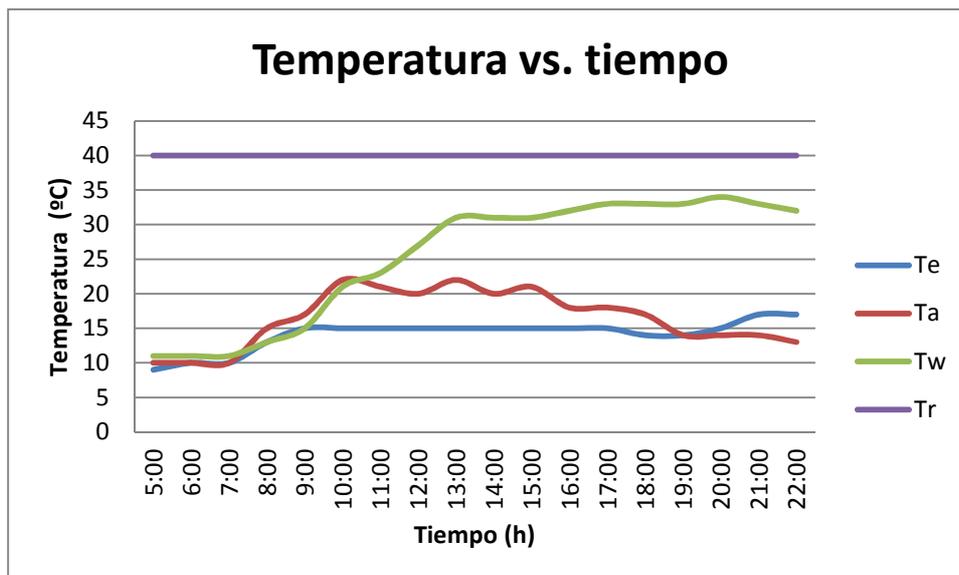


Figura 5.19.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos.15/09/2013

5.4.2.1.2.3 Temperaturas experimental y simulada

En la figura 5.20, se presentan curvas de temperatura del agua de datos experimentales (T_w) y de datos obtenidos en el programa para simulación de calentamiento (T_w prog).

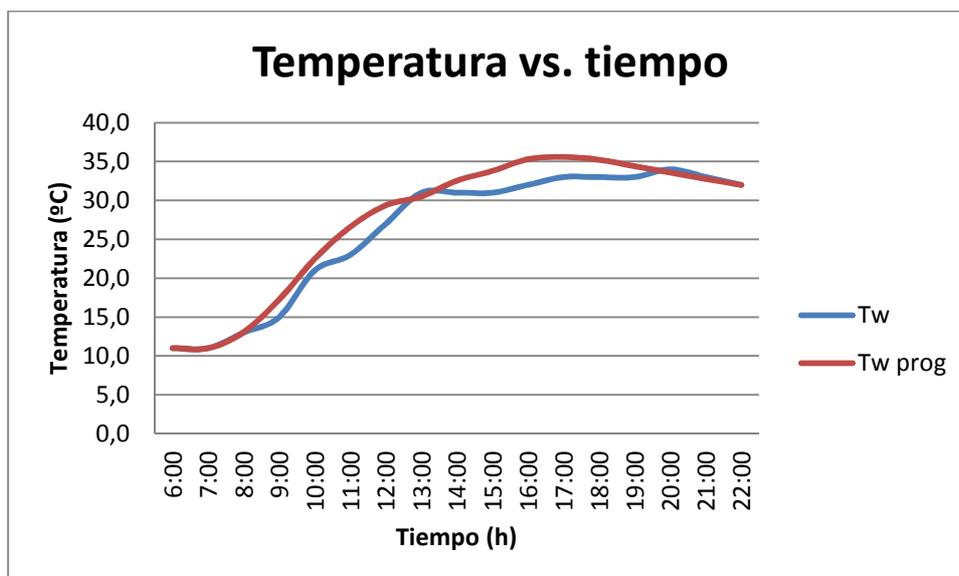


Figura 5.20.- Temperatura del agua vs tiempo, 15/09/2013.

5.4.2.1.2.4 Análisis de resultados

La curva de temperatura experimental coincide en varios puntos con la temperatura calculada en el programa. La variación de temperaturas entre las dos curvas oscila entre 0 y 3°C, y su error promedio es de 4.6%.

5.4.2.1.2.5 Energías de entrada, almacenada experimental y almacenada del programa.

En la figura 5.21 se indican los datos calculados de las energías para objeto de comparación.

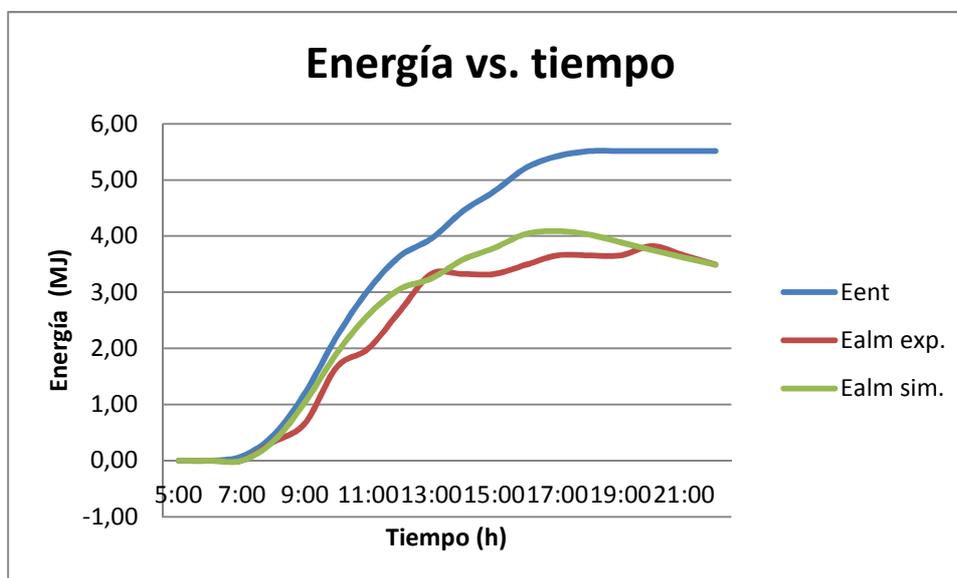


Figura 5.21.- Energía acumulada vs tiempo. 15/09/2013.

5.4.2.1.2.6 Análisis de resultados

En la gráfica 5.21 se observa que la curva de la energía de entrada, calculada a partir de la energía solar incidente, es superior a las curvas de energía almacenada.

La energía almacenada experimental, calculada en base a las temperaturas de entrada y salida del agua, es en algunos puntos inferior a la energía almacenada calculada en el programa "Bread-Box".

5.4.2.1.2.7 Eficiencia horaria

El cálculo de la eficiencia se lo ha realizado hora a hora, mediante la relación de la energía útil y la energía incidente en el sistema. Figura 5.22.

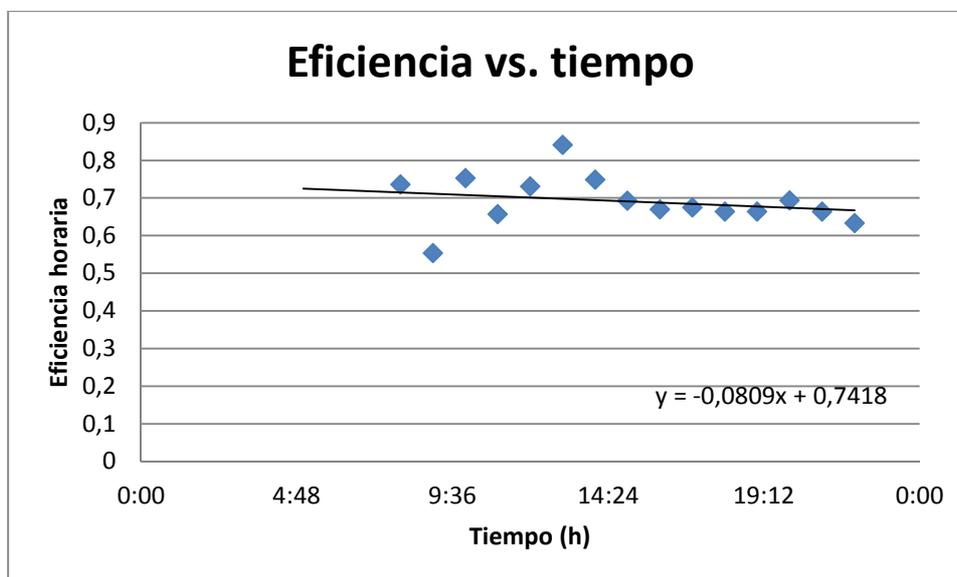


Figura 5.22.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 15/09/2013.

5.4.2.1.2.8 Análisis de resultados

Los datos de eficiencia horaria son dispersos a lo largo del día, por esto se agrega una curva de tendencia. Se aprecia que la eficiencia del colector durante el día varía entre 63 y 84%, teniéndose una eficiencia promedio de 69%.

5.4.2.2 Prueba con energía solar. Modo dinámico.

5.4.2.2.1 Procedimiento

El equipo es probado en el exterior, se llenan los tanques totalmente de agua y se dejan abiertas las válvulas de entrada y de salida para permitir un flujo normal de agua durante el día. Se toman datos cada hora de las siguientes variables:

- Temperatura del agua a la entrada del sistema. T_e (°C).
- Temperatura ambiente. T_a (°C).
- Temperatura del agua a la salida del sistema. T_s (°C).
- Temperatura del agua en la mitad del tanque. T_w (°C).

- Radiación solar. I (W/m^2).
- Velocidad del viento. v (m/s).
- Caudal. Q_a (l/s).

5.4.2.2.2 Resultados

Las gráficas presentadas en este apartado corresponden a los resultados obtenidos el día miércoles 18 de septiembre de 2013, realizando ensayos con energía solar y con consumo normal en un hogar de cuatro personas. Los datos se indican en las tablas I.7 e I.8 del Anexo I.

5.4.2.2.2.1 Temperaturas experimentales

En la figura 5.23 se presentan los datos recolectados cada hora de las temperaturas ambiente, entrada, salida y requerida del sistema.

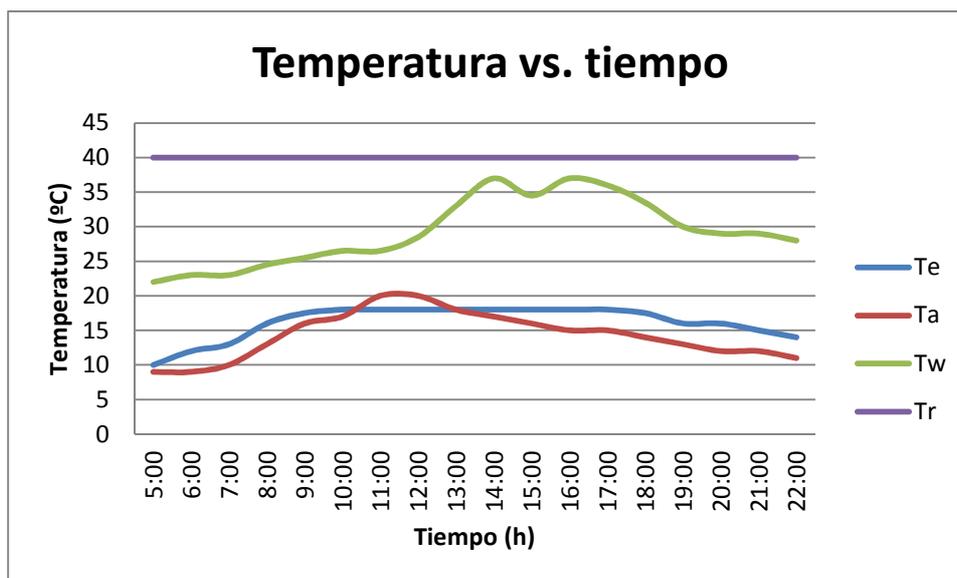


Figura 5.23.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos.18/09/2013.

5.4.2.2.2.2 Análisis de resultados

La curva de la temperatura del agua en el interior del tanque presenta caídas bruscas en las horas de mayor consumo de agua caliente sanitaria, a lo largo del día no supera los $37^{\circ}C$. La temperatura inicial fue de $22^{\circ}C$.

5.4.2.2.2.3 Energías de entrada y almacenada experimental.

Se presentan curvas de energía de entrada y almacenada a partir de datos experimentales.

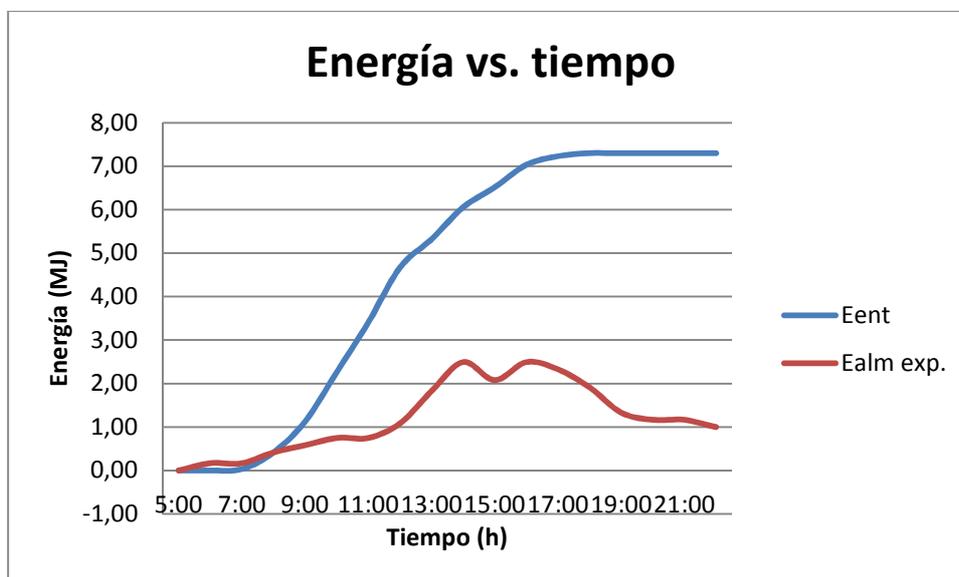


Figura 5.24.- Energía acumulada vs tiempo. 18/09/2013.

5.4.2.2.2.4 Análisis de resultados

La energía de entrada es mucho mayor que la energía almacenada por el sistema, debido al movimiento del fluido que se consume en el día.

5.4.2.2.2.5 Eficiencia horaria

La figura 5.25 de eficiencia horaria se obtiene al agregar una curva de tendencia, debido a la dispersión de los datos.

5.4.2.2.2.6 Análisis de resultados

Se observa que el primer dato de la gráfica indica una eficiencia del 100%, esto se debe a que la temperatura inicial del agua es de 22°C, por la energía remanente del día anterior a esta prueba. Los datos restantes oscilan entre el 15 y el 53 %.
Figura 5.25.

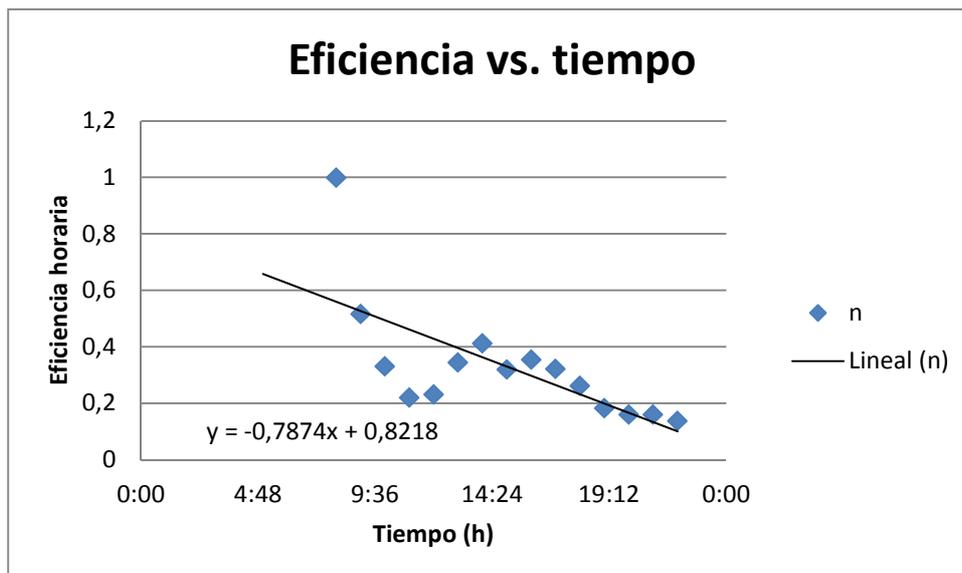


Figura 5.25.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 18/09/2013.

5.4.2.3 Prueba con energía eléctrica. Modo estático.

5.4.2.3.1 Procedimiento

El equipo no recibe radiación solar, el agua almacenada en los tanques se calienta mediante la resistencia eléctrica accionada por el sistema de control. Se cierran las válvulas de entrada y de salida del agua. Se toman datos cada hora de las siguientes variables:

- Temperatura del agua a la entrada del sistema. T_e (°C).
- Temperatura ambiente. T_a (°C).
- Temperatura del agua a la salida del sistema. T_s (°C).
- Temperatura del agua en la mitad del tanque. T_w (°C).
- Tiempo de encendido de la resistencia. t (h).

5.4.2.3.2 Resultados

Los datos obtenidos el día jueves 19 de septiembre de 2013, al realizarse pruebas con energía eléctrica se presentan en las tablas I.9 e I.10.

5.4.2.3.2.1 *Temperaturas experimentales*

Gráfica de las temperaturas de entrada, salida, ambiente y del agua en el interior del tanque.

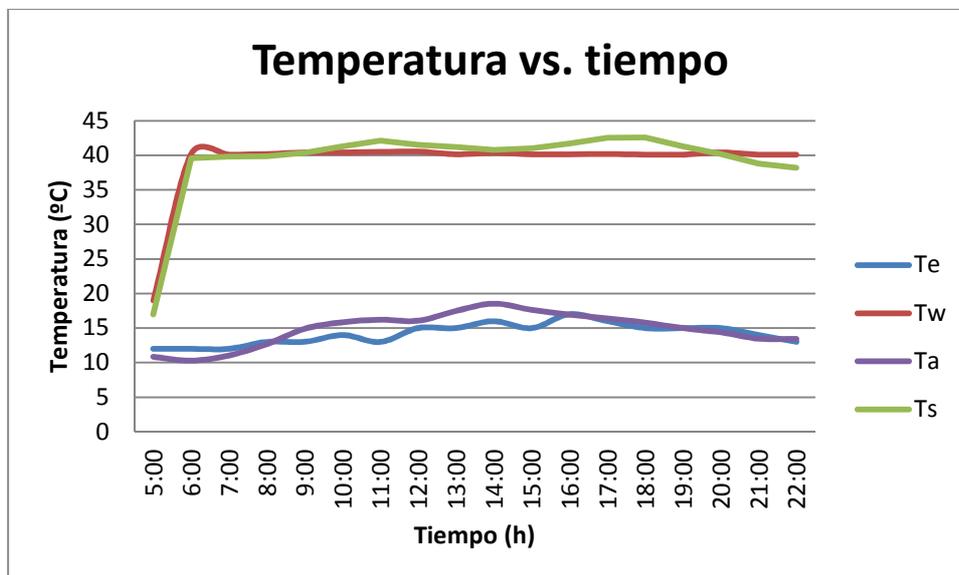


Figura 5.26.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos.19/09/2013.

5.4.2.3.2.2 *Análisis de resultados*

La temperatura inicial del agua en el interior del tanque es 19°C, después de una hora en la cual la resistencia eléctrica se mantiene encendida, alcanza los 40°C, y se estabiliza a lo largo del día. La temperatura de salida varía levemente alrededor de la temperatura deseada.

5.4.2.3.2.3 *Energía eléctrica*

La energía eléctrica requerida por el sistema para mantener la temperatura deseada se muestra en la figura 5.27

5.4.2.3.2.4 *Análisis de resultados*

A las 5:00 am, se requiere la mayor cantidad de energía eléctrica, para alcanzar la temperatura deseada. En el resto del día la resistencia se enciende en cortos períodos de tiempo, haciendo más apreciable el arranque del sistema eléctrico y de control. Figura 5.27.

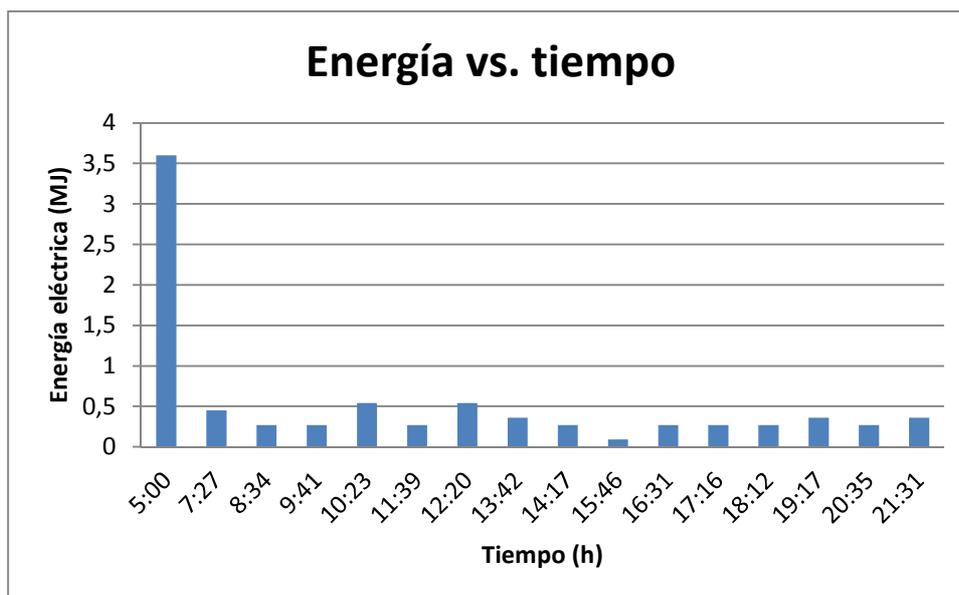


Figura 5.27.- Energía eléctrica vs. tiempo. 19/09/2013.

5.4.2.4 Prueba con energía eléctrica. Modo dinámico.

5.4.2.4.1 Procedimiento

El equipo no recibe energía solar, se conecta la salida de agua caliente del sistema a la tubería de entrada de agua caliente de la casa para permitir un flujo normal del líquido que es calentado mediante la resistencia eléctrica. Se toman datos cada hora de las siguientes variables:

- Temperatura del agua a la entrada del sistema. T_e ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura ambiente. T_a ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua a la salida del sistema. T_s ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua en la mitad del tanque. T_w ($^{\circ}\text{C}$).
- Tiempo de encendido de la resistencia. t (h).
- Caudal. Q_a (l/s).

5.4.2.4.2 Resultados

Pruebas realizadas con consumo normal de agua el día sábado 21 de septiembre de 2013. Los datos obtenidos se presentan en las tablas I.15 e I.16.

5.4.2.4.2.1 *Temperaturas experimentales*

Curvas de temperaturas ambiente, de entrada de la red, de salida del sistema e interna del tanque.

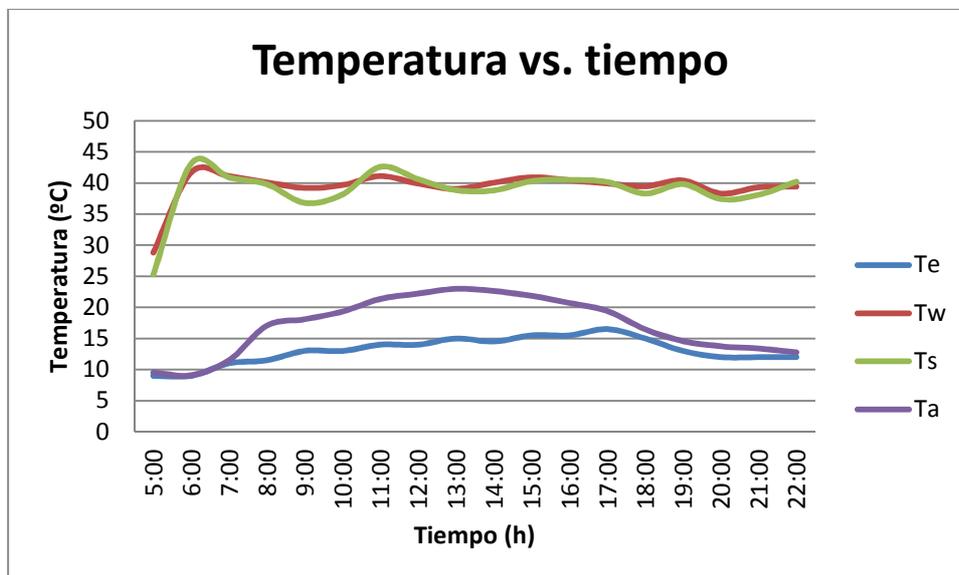


Figura 5.28.- Temperatura vs. tiempo, datos obtenidos, 21/09/2013

5.4.2.4.2.2 *Análisis de resultados*

En la gráfica se aprecia que la temperatura inicial del agua es de 28.8°C, y en una hora es levemente superior a los 40°C que es la temperatura requerida. En el transcurso del día se observan fluctuaciones alrededor de la temperatura deseada para el consumo; mientras la temperatura de la red no supera los 19°C. La temperatura de salida varía con respecto a la temperatura del tanque mostrando fluctuaciones mayores.

5.4.2.4.2.3 *Energía eléctrica*

La energía eléctrica utilizada por el sistema cada hora con un consumo normal de agua se presenta en la figura 5.29.

5.4.2.4.2.4 *Análisis de resultados*

A diferencia de la figura 5.27 en la figura 5.29, al realizarse el ensayo con consumo normal de agua, se observa que el uso de energía durante el día es

mayor, siendo las horas más exigentes en la mañana, ya que se utiliza agua para ducharse, en el medio día y en la noche para lavar la vajilla. En el día se han utilizado 23.4 (MJ).

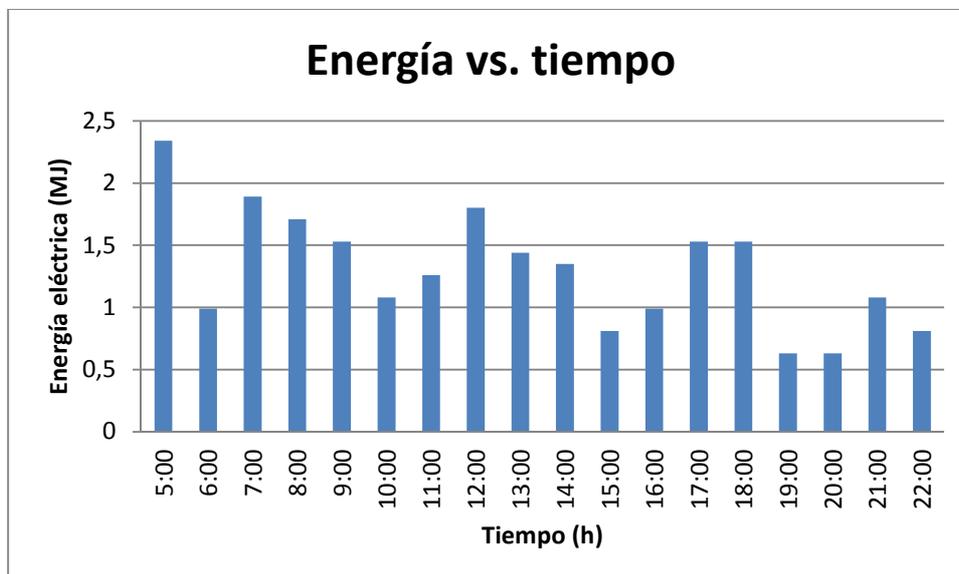


Figura 5.29.- Energía eléctrica vs. tiempo. 21/09/2013.

5.4.2.5 Prueba con energía solar-eléctrica. Modo estático.

5.4.2.5.1 Procedimiento

El equipo es ensayado en el exterior, se llenan los tanques totalmente de agua y se cierran las válvulas de entrada y de salida. El temporizador enciende el sistema de control a las 05:00 a.m. Se toman datos cada hora de las siguientes variables:

- Temperatura del agua a la entrada del sistema. T_e ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura ambiente. T_a ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua a la salida del sistema. T_s ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua en la mitad del tanque. T_w ($^{\circ}\text{C}$).
- Radiación solar. I (W/m^2).
- Velocidad del viento. v (m/s).
- Caudal. Q_a (l/s).

5.4.2.5.2 Resultados

Los datos obtenidos el día domingo 22 de septiembre de 2013 al realizarse pruebas de calentamiento con el sistema híbrido en forma estática, se presentan en las tablas I.21, I.22 e I.23.

5.4.2.5.2.1 Temperaturas experimentales

Curvas de temperaturas ambiente, de entrada, salida y del agua en el interior del tanque.

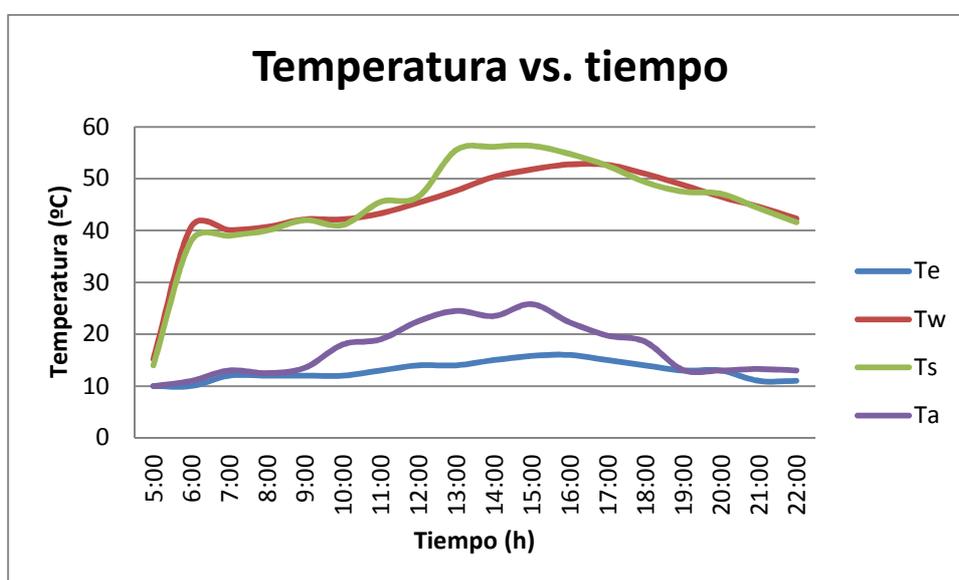


Figura 5.30.- Temperatura vs tiempo, datos obtenidos, 22/09/2013.

5.4.2.5.2.2 Análisis de resultados

La temperatura del agua en el interior del tanque a las 5:00 a.m. es de 15.2°C, y en una hora es de 40.7°C, se aprecia que la curva durante el resto del día no es menor que la temperatura requerida en ningún momento, su temperatura máxima la alcanza a las 16:00 y es de 52.7°C. La temperatura del agua de salida supera a la del interior del tanque de 11:00 a 16:00, y llega hasta los 56.4°C, la temperatura de entrada no supera los 16°C y la máxima ambiente es de 25.4°C.

5.4.2.5.2.3 Energía eléctrica

Tiempo de encendido de la resistencia eléctrica durante el día. Figura 5.31

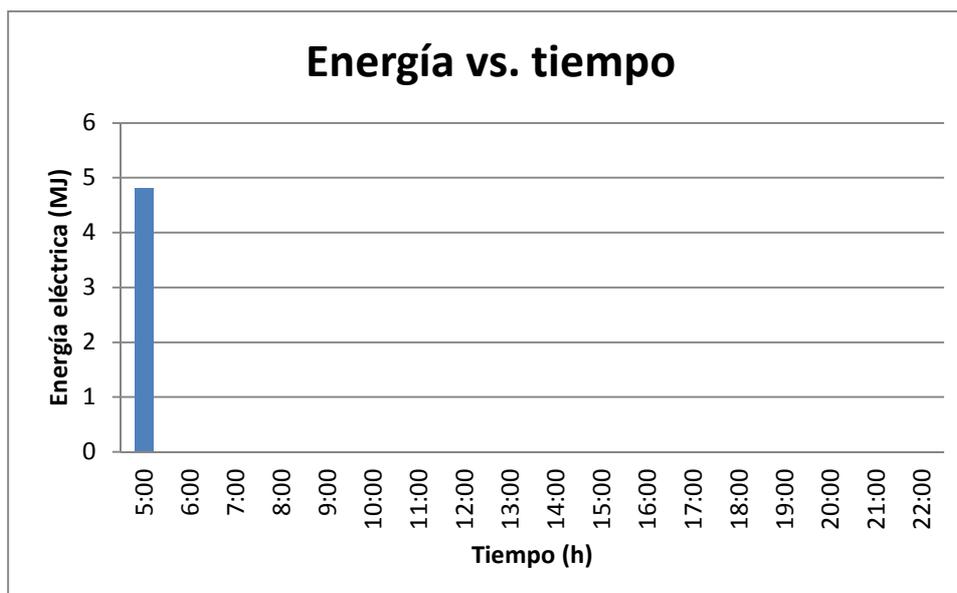


Figura 5.31.- Energía eléctrica vs. tiempo. 22/09/2013.

5.4.2.5.2.4 Análisis de resultados

En la figura 5.31 se observa que la energía requerida por el sistema cuando se realiza la prueba estática híbrida es 4.8 (MJ), la resistencia se enciende una sola vez en el día, el resto de energía que necesita el sistema la recibe del sol. Al compararla con la figura 5.27 (con energía eléctrica estática), el sistema híbrido muestra un consumo menor de energía.

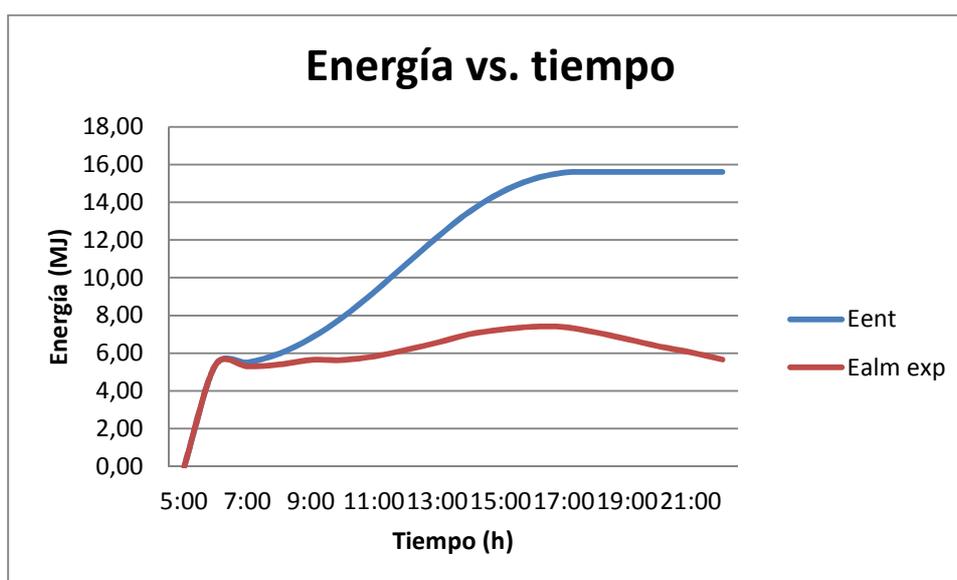


Figura 5.32.- Energía acumulada vs. tiempo. 22/09/2013.

5.4.2.5.2.5 Energía del sistema híbrido

Curvas obtenidas de la energía de entrada al sistema y la almacenada, debido a las energías eléctrica y solar. Figura 5.32.

5.4.2.5.2.6 Análisis de resultados

En la figura 5.32 se aprecia que a las 5:00 a.m. hay un incremento tanto en la energía de entrada al sistema como en la almacenada. A partir de las 6:00 a.m. se observa que la energía solar de entrada es superior a la almacenada, alcanzando los 15.61 (MJ), mientras que el punto en que se almacena mayor energía es a las 16:00 alcanzando 7.40 (MJ), antes de empezar a descender.

5.4.2.5.2.7 Eficiencia horaria.

Datos de eficiencia calculados cada hora al evaluar el sistema híbrido.

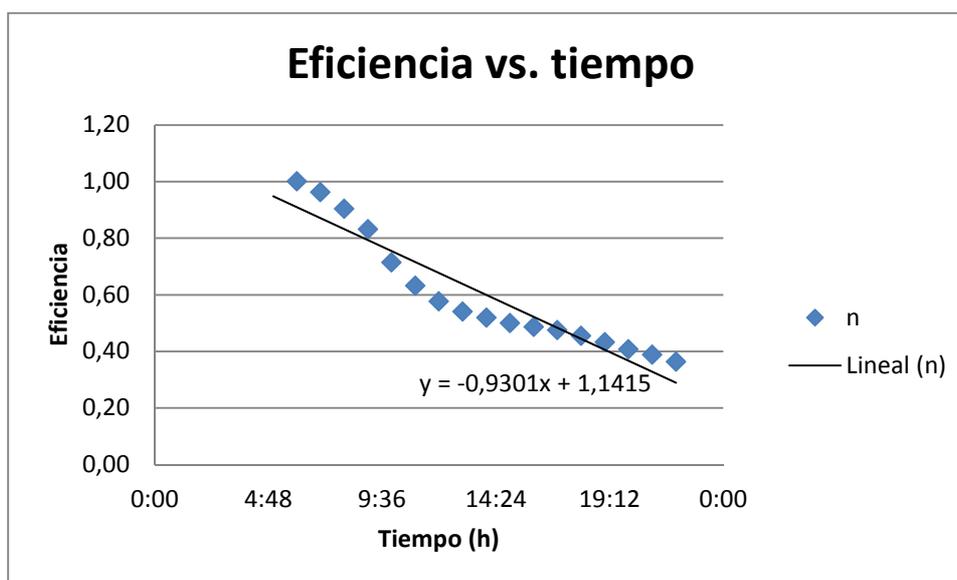


Figura 5.33.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 22/09/2013.

5.4.2.5.2.8 Análisis de resultados

La eficiencia del sistema es cercana al 100% a las 6:00 a.m. porque la energía proporcionada hasta ese momento es únicamente eléctrica. No se observa mucha dispersión, pero la eficiencia desciende rápidamente hasta llegar a un 36% al final del día. La eficiencia promedio diaria es del 53%.

5.4.2.6 Prueba con energía solar-eléctrica. Modo dinámico.

5.4.2.6.1 Procedimiento

El equipo es ensayado en el exterior, se llenan los tanques totalmente de agua, las válvulas de entrada y salida permanecen abiertas para permitir el flujo de agua durante el día. El sistema de control es encendido por el temporizador a las 5:00 a.m. Se toman datos cada hora de las siguientes variables:

- Temperatura del agua a la entrada del sistema. T_e ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura ambiente. T_a ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua a la salida del sistema. T_s ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura del agua en la mitad del tanque. T_w ($^{\circ}\text{C}$).
- Radiación solar. I (W/m^2).
- Velocidad del viento. v (m/s).
- Caudal. Q_a (l/s).

5.4.2.6.2 Resultados

Pruebas realizadas con consumo normal de agua el día martes 24 de septiembre de 2013 con el sistema híbrido. Los datos obtenidos se presentan en el Anexo I, en las tablas I.30, I.31 e I.32.

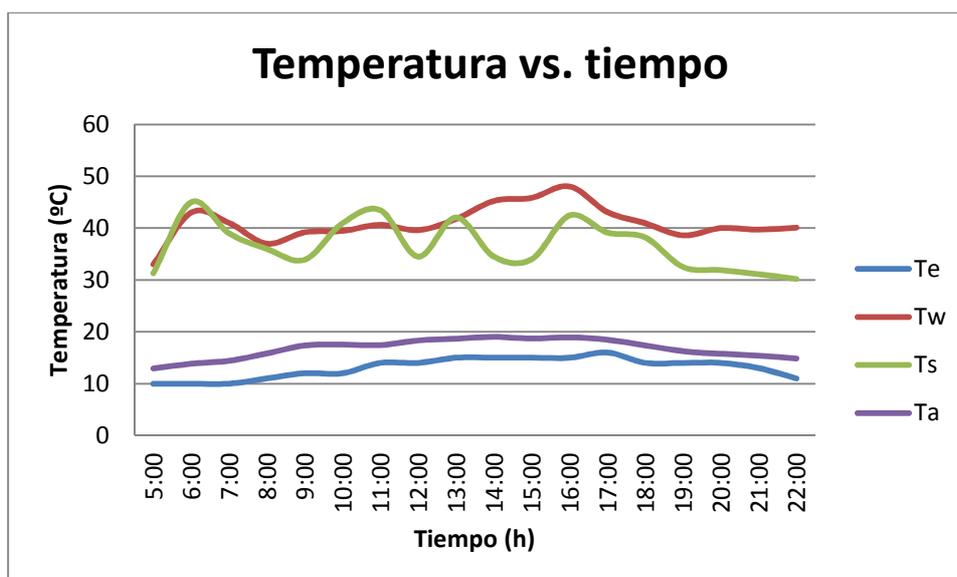


Figura 5.34.- Temperatura vs. tiempo, datos obtenidos, 24/09/2013.

5.4.2.6.2.1 *Temperaturas experimentales*

Curvas de temperaturas de entrada, salida, ambiente y del agua en el interior del tanque. Figura 5.34.

5.4.2.6.2.2 *Análisis de resultados*

La temperatura inicial del agua es 33°C, a las 6:00 a.m. alcanza los 43°C, presenta algunas variaciones e incluso es levemente inferior a la temperatura deseada, pero a partir del medio día alcanza sus mayores valores. La temperatura máxima es 48°C a las 16:00, posterior a esto empieza a descender, pero no es inferior a 40°C.

La temperatura de salida del agua fluctúa a lo largo del día, siendo su punto más bajo 31.9°C y el más alto 43.45°C., esto se debe al consumo del agua y que la parte superior de los tanques pierden mayor cantidad de energía. La temperatura de entrada del agua no supera los 15°C, mientras la ambiente máxima es de 19°C.

5.4.2.6.2.3 *Energía eléctrica*

Energía eléctrica requerida por el sistema cada hora con consumo normal de agua.

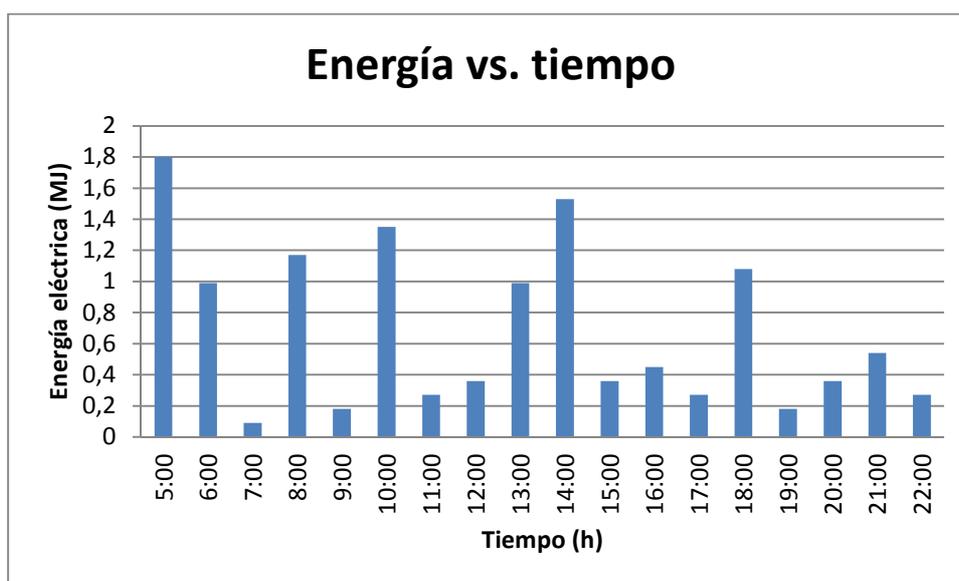


Figura 5.35.- Energía eléctrica vs. tiempo. 24/09/2013.

5.4.2.6.2.4 Análisis de resultados

Al comparar las figuras 5.31 y 5.35, la primera requiere de energía eléctrica una sola vez en el día, mientras que la segunda se enciende cada hora utilizando 12.24 (MJ) durante el día. Las horas de mayor consumo de energía son en la mañana de 5:00 a 6:00, en la tarde a las 14:00 y en la noche a las 18:00.

Al contrastar las figuras 5.29 y 5.35, se observa que el sistema híbrido tiene un requerimiento menor de energía eléctrica.

5.4.2.6.2.5 Energía del sistema híbrido

Curvas de las energías de entrada y almacenada, debido al funcionamiento híbrido del sistema.

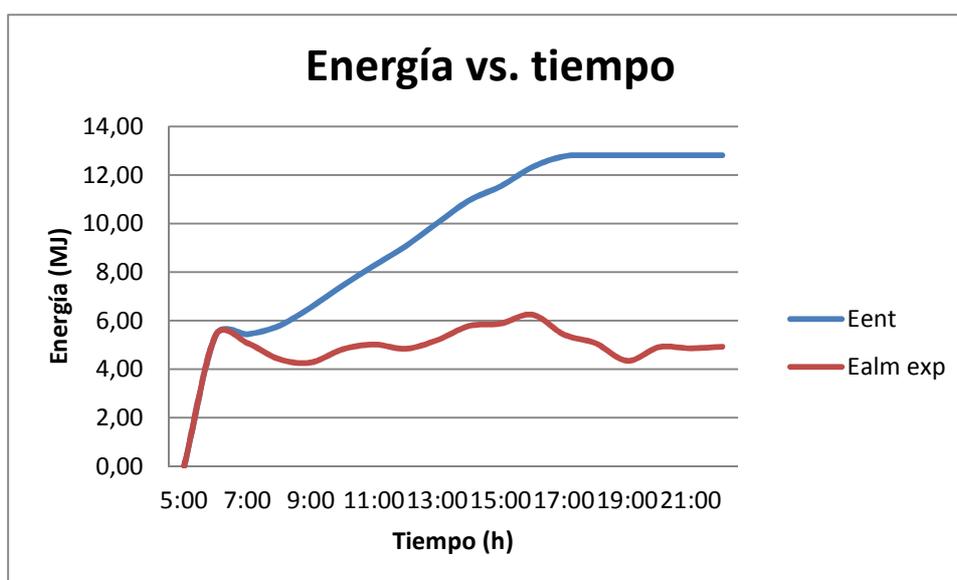


Figura 5.36.- Energía acumulada vs. tiempo. 24/09/2013.

5.4.2.6.2.6 Análisis de resultados

En la figura 5.36 se muestra que las dos curvas tienen la misma tendencia desde las 5:00 hasta las 6:00 a.m., luego se separan siendo la energía de entrada superior a la energía almacenada por el sistema. La curva de almacenamiento presenta variaciones bruscas por la pérdida de energía al salir el agua para el consumo.

5.4.2.6.2.7 Eficiencia horaria

Datos de eficiencia calculados cada hora.

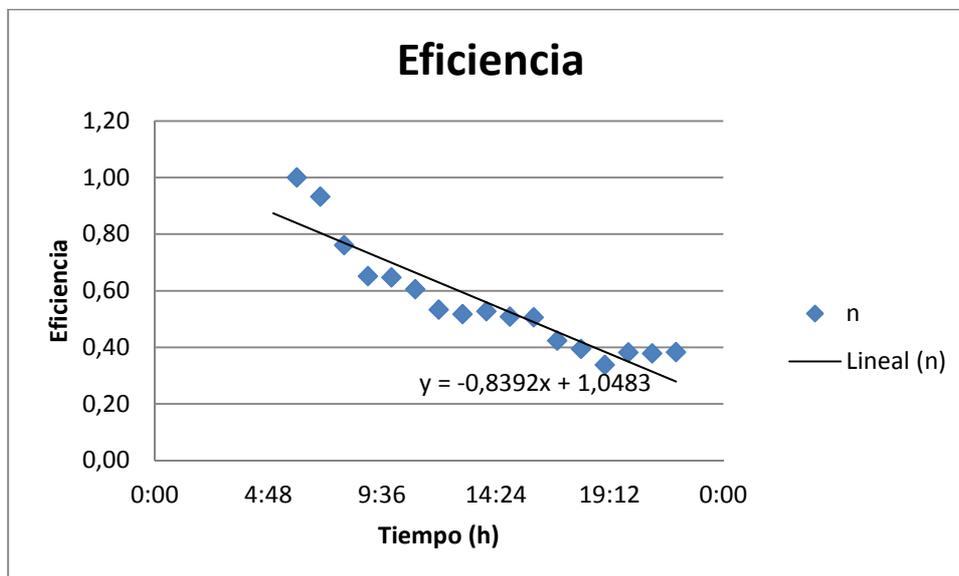


Figura 5.37.- Eficiencia horaria del sistema vs. tiempo. 24/09/2013

5.4.2.6.2.8 Análisis de resultados

La gráfica 5.37 muestra poca dispersión, su eficiencia a las 6:00 a.m. es cercana al 100% porque actúa la resistencia eléctrica en el calentamiento del agua. La eficiencia mínima es de alrededor del 40% y su eficiencia promedio es 50%.

5.4.3 RESUMEN DE PRUEBAS

La tabla 5.3 muestra el resumen de las pruebas realizadas al sistema de calentamiento y la comparación con los costos mensuales del uso de cada energía, considerando la tarifa actual de la energía eléctrica.

5.5 MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

5.5.1 VACIADO DE TANQUES

Para realizar el mantenimiento del sistema es necesario vaciar los tanques. Para esto se ha colocado en la parte inferior de cada tanque una válvula que permite la salida del agua. Adicionalmente se tiene válvulas de medio paso ubicadas en las tuberías de entrada y de salida de agua.

Tabla 5.3. Pruebas realizadas al sistema bajo determinadas condiciones.

		FECHA	TEMP MAX (C)	TEMP INICIAL (C)	ΔT (C)	TIEMPO RESISTENCIA (h)	COSTO DIARIO (\$)	COSTO MENSUAL (\$)	COSTO MENSUAL prom (\$)
SOLAR	ESTATICA	15/09/2013	34	11		NA	0.00	0.00	0.00
		16/09/2013	49	25		NA	0.00	0.00	
		17/09/2013	44	29		NA	0.00	0.00	
	DINAMICA	18/09/2013	37	22		NA	0.00	0.00	0.00
ELECTRICO	ESTATICA	19/09/2013	40	19	21	1.56	0.19	5.62	4.91
		20/09/2013	40	28	12	1.32	0.16	4.75	
		28/09/2013	40	30	10	1.21	0.15	4.36	
	DINAMICA	21/09/2013	40	28.8	11.2	4.34	0.52	15.62	16.56
		29/09/2013	40	18.5	21.5	4.82	0.58	17.35	
		30/09/2013	40	18.8	21.2	4.64	0.56	16.70	
HIBRIDO	ESTATICA	22/09/2013	40.7	15.2	25.5	0.89	0.11	3.20	2.36
		23/09/2013	41.3	32.3	9	0.35	0.04	1.26	
		27/09/2013	41.2	22.3	18.9	0.73	0.09	2.63	
	DINAMICA	24/09/2013	43	33	10	2.27	0.27	8.17	9.50
		25/09/2013	40.8	22	18.8	2.48	0.30	8.93	
		26/09/2013	41.2	15.4	25.8	3.17	0.38	11.41	

5.5.2 LIMPIEZA

Como se indicó anteriormente, cada parte del sistema es de fácil montaje y desmontaje, por lo tanto es factible realizar una buena limpieza de los elementos principales del sistema.

5.5.3 REEMPLAZO DE PARTES

Las partes del sistema que en caso de deterioro deben ser reemplazadas principalmente son las válvulas, tuberías, accesorios y la resistencia eléctrica. La mayoría de estas partes poseen rosca, lo cual las hace de fácil desmontaje y montaje, y se encuentran disponibles en el mercado.

5.6 ANÁLISIS DE COSTOS

Al igual que otros sistemas solares de calentamiento de agua la inversión inicial del equipo Bread-Box Híbrido es elevada. Esta inversión se verá recuperada en el tiempo debido a que su costo de operación es más económico que el de otros equipos disponibles en el mercado. Además, se debe considerar que el equipo presentado en este proyecto es un prototipo, pero al producirlo en serie su costo disminuirá significativamente.

Tabla 5.4. Materiales Base para construcción.

ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR TOTAL (USD)
Acero A36 2 mm	1	Plancha	46.27	46.27
Acero A36 galvanizado 0.9 mm	2	Plancha	25.68	51.36
Unión Acero Inoxidable 3/4"	1	Unidad	2.23	2.23
Unión Acero Inoxidable 1/2"	3	Unidad	1.61	4.83
Químico 1	2	kg	8.40	16.80
Químico 2	2	kg	8.40	16.80
Pintura negro mate	2	1/4 Galón	5.08	10.16
Thinner	1	Litro	1.00	1.00
Tubo PVC 1/2" x 6 m	1	Unidad	9.35	9.35
Manguera 1/2" x 12"	2	Unidad	4.72	9.44
Manguera 1/2" x 70cm	1	Unidad	7.60	7.60
Válvula de alivio de presión 150 psi	1	Unidad	14.07	14.07
Válvula check	1	Unidad	5.48	5.48
Válvula de bola	2	Unidad	4.37	8.74
Llave de paso	2	Unidad	6.75	13.50
Neplo 1/2" x 3"	6	Unidad	0.38	2.28
Codos	6	Unidad	0.50	3.00
Tee 1/2"	2	Unidad	0.50	1.00
Resistencia eléctrica 1500W	1	Unidad	22.50	22.50
Taípe	1	Unidad	0.92	0.92
Caucho	5	Metro	2.00	10.00
Teflón	4	Unidad	0.37	1.48
Pernos	12	Unidad	0.02	0.24
			COSTO MATERIALES BASE	259.05

5.6.1 PROTOTIPO

El costo del prototipo comprende los materiales utilizados en la construcción, aquellos empleados para realizar las pruebas de funcionamiento y recolección de datos, y los servicios contratados.

5.6.1.1 Costos de materiales para la construcción

La tabla 5.4 muestra la lista precios de los materiales base utilizados en la construcción del equipo Bread-Box.

5.6.1.2 Costos de materiales para pruebas

La tabla 5.5 muestra los elementos que fueron adquiridos para la realización de las pruebas de funcionamiento y la obtención de los datos, y por tanto solo formarán parte del costo del prototipo. Algunos de estos equipos fueron prestados por el laboratorio del CCICEV de la EPN.

Tabla 5.5. Materiales para pruebas.

ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR TOTAL (USD)
Temporizador (Timer)	1	Unidad	16.80	16.80
Termostato digital	1	Unidad	90.98	90.98
Contactador	1	Unidad	13.25	13.25
Alambre sólido de cobre AWG 12	20	Metro	1.12	22.40
Interruptor automático (Breaker)	1	Unidad	4.28	4.28
Manómetro	1	Unidad	7.84	7.84
Bushing	1	Unidad	0.33	0.33
Termocupla tipo K	4	Unidad	1.00	4.00
Pirómetro	1	Unidad	N/A	N/A
Foco	1	Unidad	1.00	1.00
Boquilla	1	Unidad	0.75	0.75
Cronómetro	1	Unidad	N/A	N/A
Pasta Térmica	1	Unidad	3.90	3.90
Fusible pequeño 1ª	2	Unidad	0.10	0.20
Porta Fusible	2	Unidad	0.50	1.00
Tapones 1/2"	2	Unidad	0.35	0.70
Tee 1/2"	2	Unidad	0.50	1.00
			COSTO MATERIALES PRUEBAS	168.43

5.6.1.3 Costos de fabricación

La tabla 5.6 muestra los costos de los servicios contratados para la construcción de varias de las partes del equipo. Así por ejemplo, los tanques y la caja fueron construidos en una metalmecánica, el galvanizado fue realizado en Galvanorte, la pintura en un taller automotriz, los soportes de madera en una carpintería, la cubierta en una vidriería, la inyección del aislante en Verton.

Tabla 5.6. Procesos de fabricación.

	VALOR TOTAL
ELEMENTO	USD
Tanques	270
Galvanizado	23.52
Pintado	40
Caja	140
Cubierta	65
Carpintería	40
Aislante	15
COSTO FABRICACIÓN	593.52

$$\text{Costo Prototipo} = \text{Materiales Base} + \text{Materiales Pruebas} + \text{Fabricación}$$

$$\text{Costo Prototipo} = 259.05 + 168.43 + 593.52 \text{ (USD)}$$

$$\text{Costo Prototipo} = 1021.00 \text{ (USD)}$$

5.6.2 BREAD-BOX

El costo base del equipo Bread-Box es la suma de los materiales base más los costos de fabricación. Los costos de los materiales de prueba no se incluyen ya que estos solo eran parte del prototipo.

$$\text{Costo Breadbox Híbrido} = \text{Materiales Base} + \text{Fabricación}$$

$$\text{Costo Breadbox Híbrido} = 259.05 + 593.52$$

$$\text{Costo Breadbox Híbrido} = 852.57 \text{ (USD)}$$

5.6.2.1 Variantes del equipo Bread-Box

El costo final del equipo varía de acuerdo a los dispositivos adicionales que requiera el comprador, los cuales no influyen directamente en la eficiencia del equipo sino en la comodidad de operación. El costo base de los materiales y procesos de fabricación se mantiene, por lo tanto, al costo del equipo Bread-Box híbrido se le debe sumar el precio de accesorios que el usuario requiera y que se encuentran detallados en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Dispositivos adicionales

ELEMENTO ADICIONALES	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR TOTAL (USD)
Termostato digital	1	Unidad	90.98	90.98
Contactador 13 A	1	Unidad	13.25	13.25
Termostato analógico con contactador integrado	1	Unidad	9.50	9.50
Tanque de expansión 5 l	1	Unidad	48.95	48.95
Válvula reductora de presión	1	Unidad	63.20	63.20

5.6.3 BREAD-BOX VS OTROS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA

El equipo Bread-Box Híbrido utiliza menor cantidad de energía para su funcionamiento que otros sistemas de calentamiento de agua por lo tanto su costo de operación será menor. A continuación se muestra las proyecciones que permiten realizar la comparación costo-beneficio entre dichos sistemas.

Ejemplo de cálculo del costo del consumo energético anual de diferentes sistemas de calentamiento de agua. Estos precios no incluyen subsidio.

- Costo anual de energía eléctrica del equipo Bread-Box Híbrido

$$\text{Costo e.e. Breadox Híbrido} = 1.5[kW] \times \frac{2.64[h]}{1[día]} \times \frac{30[días]}{1[mes]} \times \frac{12[meses]}{1[año]} \times 0.1253 \frac{[USD]}{[kWh]}$$

$$\text{Costo e.e. Breadbox Híbrido} = 178.63 \frac{[USD]}{[año]}$$

- Costo anual de energía eléctrica del calentador eléctrico de paso

$$\text{Costo e.e. Calentador Eléctrico} = 11[kW] \times \frac{2[h]}{1[día]} \times \frac{30[días]}{1[mes]} \times \frac{12[meses]}{1[año]} \times 0.1253 \frac{[USD]}{[kWh]}$$

$$\text{Costo e. e. Calentador Eléctrico} = 992.38 \left[\frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

- Costo anual de energía eléctrica del Termotanque Eléctrico

Costo e. e. Termotanque Eléctrico

$$= 1.5[\text{kW}] \times \frac{4[\text{h}]}{1[\text{día}]} \times \frac{30[\text{días}]}{1[\text{mes}]} \times \frac{12[\text{meses}]}{1[\text{año}]} \times 0.1253 \left[\frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \right]$$

$$\text{Costo e. e. Termotanque Eléctrico} = 270.65 \left[\frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

- Costo anual de GLP del calefón.

$$\text{Costo GLP Calefón} = 2 \left[\frac{\text{cilindros}}{\text{mes}} \right] \times \frac{12[\text{meses}]}{1[\text{año}]} \times \frac{15[\text{kg}]}{1[\text{cilindro}]} \times 0.965854 \left[\frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right]$$

$$\text{Costo GLP calefón} = 347.71 \left[\frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

La siguiente tabla muestra el precio inicial, el valor de la energía utilizada para su funcionamiento y el costo de operación anual de los diferentes sistemas de calentamiento de agua sanitaria.

Tabla 5.8.- Costos de operación anual de diferentes sistemas de calentamiento de agua.

	Breadbox Híbrido		Calentador Eléctrico	
	Cap. 120 l		Marca ECOSMART, Cap.0.95 l/min	
Inversión [USD]	852.57		378.67	
	[USD/kWh]		[USD/kWh]	
	con subsidio	sin subsidio	con subsidio	sin subsidio
	0.08	0.1253	0.08	0.1253
Costo anual [USD]	114.05	178.63	633.60	992.38
	Termotanque Eléctrico		Calefón	
	Marca INMETE, Cap. 114 l		Marca BOSH, Cap. 13 l	
Inversión [USD]	343.00		367.92	
	[USD/kWh]		[USD/kg]	
	con subsidio	sin subsidio	con subsidio	sin subsidio
	0.08	0.1253	0.106667	0.965854
Costo anual [USD]	172.80	270.65	38.40	347.71

5.6.3.1 Proyección simplificada de costos de operación

Las siguientes gráficas presentan las proyecciones del costo anual de operación del equipo Bread-Box Híbrido comparado con otros sistemas de calentamiento de agua para uso doméstico. Se toma en cuenta precios de la energía con y sin subsidio para observar la influencia que tiene este rubro. El punto de intersección de las dos rectas muestra el tiempo en el cual los dos proyectos habrán gastado la misma cantidad de dinero y a partir del cual un proyecto será más caro que el otro. La tabla de datos proyectados se presenta en el Anexo J.

Consideraciones:

- Los sistemas seleccionados para estas comparaciones permiten abastecer de agua caliente a un hogar promedio de 4 personas.
- Se han seleccionado equipos existentes en el mercado que se ajustan a los requerimientos y que son de un costo de inversión promedio.
- Los valores que se utilizan para el análisis son: la inversión inicial de cada equipo y el costo del consumo energético necesario para su funcionamiento anual.
- En el método de cálculo empleado, que es válido para obtener valores aproximados, no se actualizan los flujos de caja, es decir, no se tiene en cuenta la variación temporal del dinero¹³⁸.

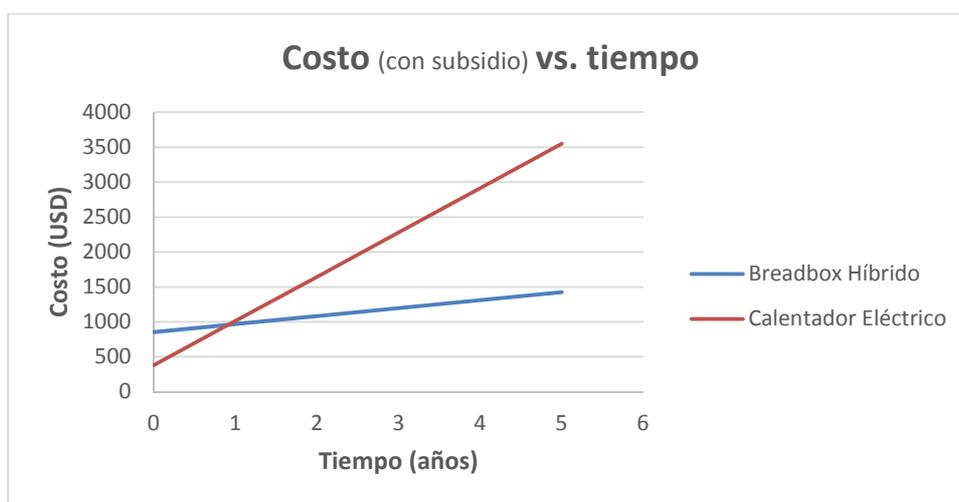


Figura 5.38.- Bread-Box Híbrido vs. Calentador Eléctrico (con subsidio)

¹³⁸ [http://es.wikipedia.org/wiki/Payback_\(econom%C3%ADa\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Payback_(econom%C3%ADa))

5.6.3.1.1 Bread-box Híbrido vs Calentador Eléctrico

5.6.3.1.1.1 Gráficas de proyección de costos de operación

Véase las figuras 5.38 y 5.39

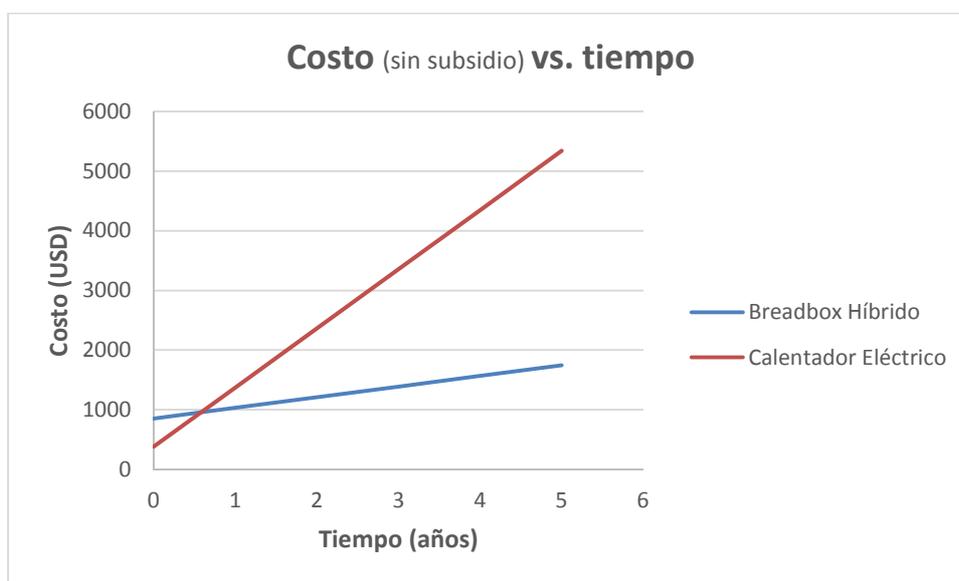


Figura 5.39.- Bread-Box Híbrido vs. Calentador Eléctrico (sin subsidio)

5.6.3.1.1.2 Análisis de Resultados

En la figura 5.38 las dos rectas se cruzan al cabo de un año de operación y en la figura 5.39 luego de siete meses, siendo las segundas las de mayor pendiente. Los costos de operación son mayores para el caso sin subsidio.

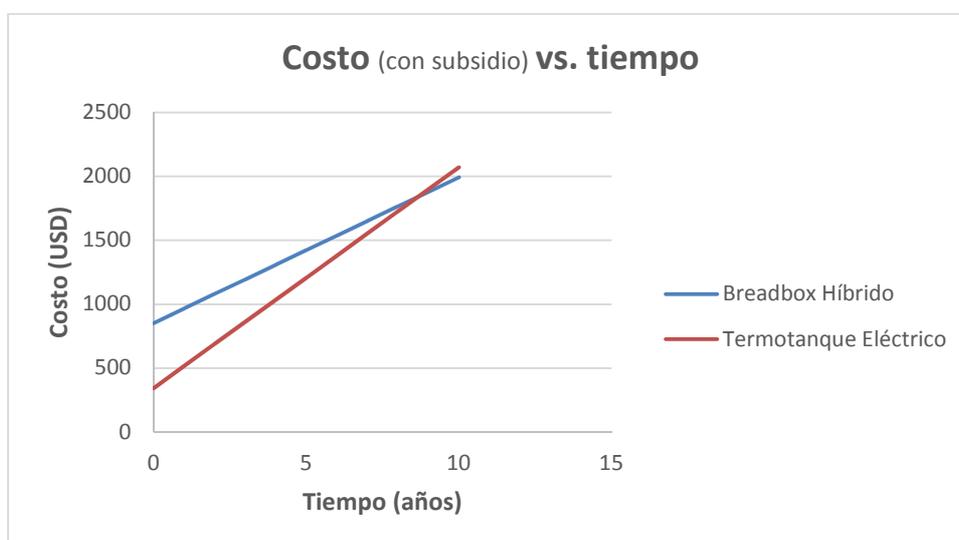


Figura 5.40.- Bread-Box Híbrido vs. Termotanque Eléctrico (con subsidio)

5.6.3.1.2 Bread-box Híbrido vs Termotanque Eléctrico

5.6.3.1.2.1 Gráficas de proyección de costos de operación

La proyección de costos de operación del sistema Híbrido y del Termotanque eléctrico se presentan en las figuras 5.40 y 5.41.

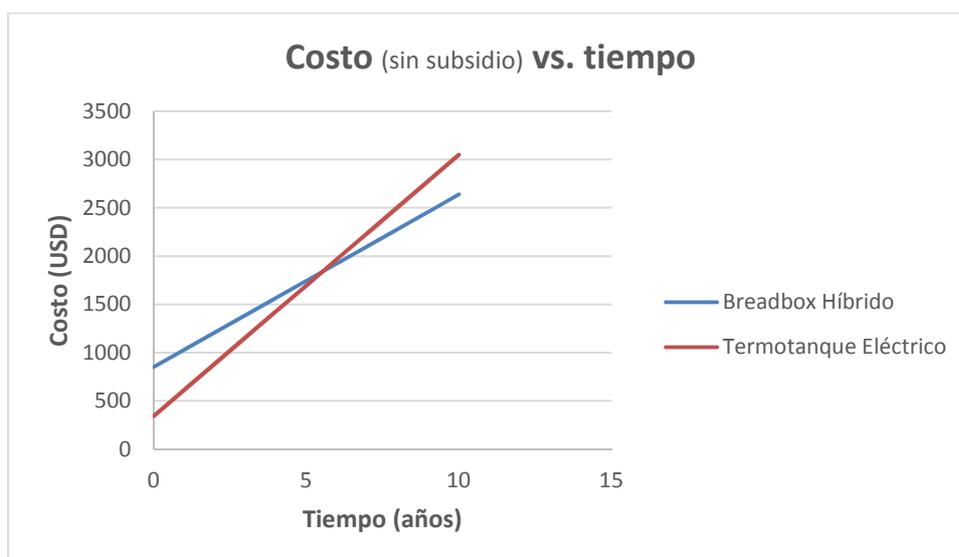


Figura 5.41.- Bread-Box Híbrido vs. Termotanque Eléctrico (sin subsidio)

5.6.3.1.2.2 Análisis de Resultados

En la figura 5.41 las dos rectas se cruzan al cabo de nueve años de operación y en la figura 5.42 luego de 5 años y 6 meses, siendo las primeras las de menor pendiente. Los costos de operación son mayores para el caso sin subsidio.

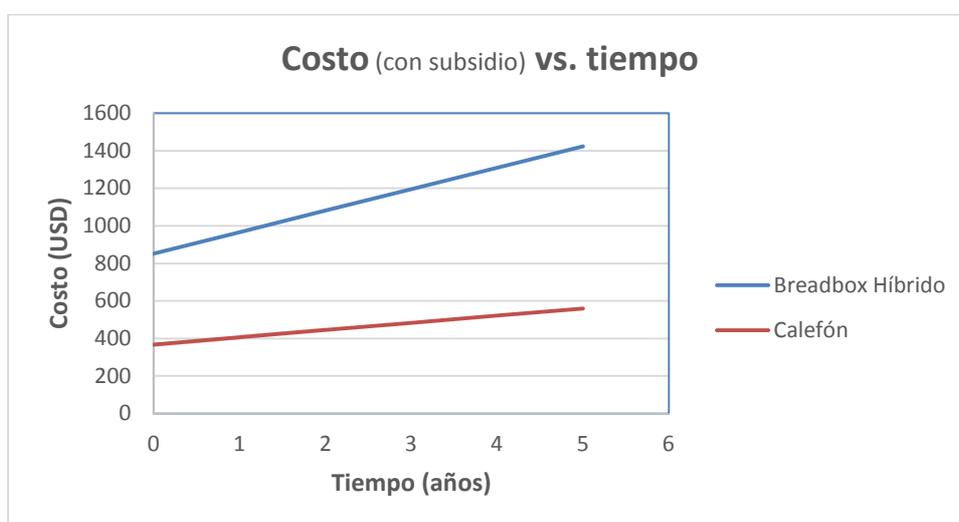


Figura 5.42.- Bread-Box Híbrido vs. Calefón (con subsidio)

5.6.3.1.3 Bread-box Híbrido vs Calefón

5.6.3.1.3.1 Gráficas de proyección de costos de operación

En las figuras 5.42 y 5.43, se observa la proyección de costos entre el sistema Bread-Box y el Calefón.

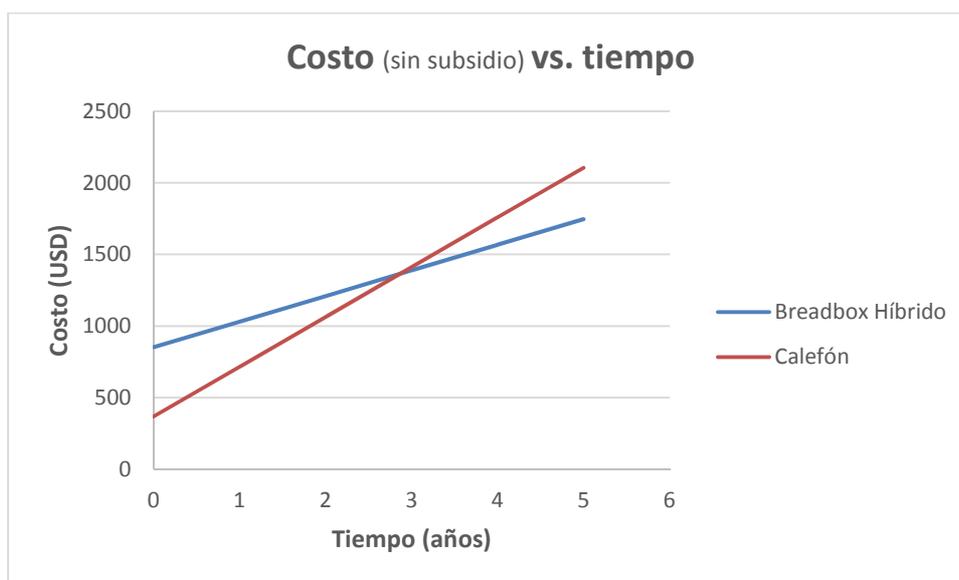


Figura 5.43.- Bread-Box Híbrido vs. Calefón (sin subsidio)

5.6.3.1.3.2 Análisis de Resultados

En la figura 5.42 las rectas nunca se cruzan y en la figura 5.43 se cruzan luego de 3 años, las segundas son las de mayor pendiente. Los costos de operación son mayores para el caso sin subsidio.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se logró diseñar y construir un Sistema de Calentamiento de Agua Híbrido Solar-Eléctrico Tipo Bread-Box. Este equipo permite obtener agua caliente sanitaria a un menor costo e impacto ambiental mediante el aprovechamiento de la energía solar y la optimización del uso de energía eléctrica.
- Se consiguió implementar un sistema de control que permite tener agua caliente a 40°C disponible en las primeras horas de la mañana y mantener esta temperatura durante el resto del día especialmente en aquellos de baja radiación o de uso prolongado.
- El modelo matemático desarrollado en el presente proyecto permite simular el comportamiento térmico del equipo para diferentes condiciones ambientales y de radiación con una buena exactitud.
- Comparando los sistemas tradicionales de calentamiento de agua con el Sistema Bread-Box Híbrido, este tiene un costo de inversión mayor y un costo de operación menor, lo cual lo hace económicamente rentable en el tiempo sobre todo si se eliminan los subsidios al GLP y energía eléctrica.
- El equipo Bread-Box Híbrido presenta una estructura de construcción simple y económica principalmente porque los elementos más importantes que son los tanques cumplen doble función, captar la energía solar y almacenar el agua caliente, esto reduce el número de piezas a ser fabricadas y ensambladas lo que se traduce en una menor inversión de dinero y en ahorro de tiempo.
- La buena eficiencia del Sistema Bread-Box Híbrido permite captar la mayor parte de energía solar disponible a lo largo del día, sin embargo, el calentamiento se realiza en forma lenta y no uniforme. Primeramente se calienta el agua de la parte superior, mientras que aquella de la parte inferior tiende a homogeneizarse pasado el mediodía.

- A pesar de que el Sistema Bread-Box Híbrido siempre utiliza el sistema eléctrico de respaldo, si se tiene un ahorro energético considerable ya que reduce el tiempo de uso de la resistencia.
- En la noche la temperatura del agua almacenada baja un promedio de 10°C, debido a las pérdidas en la parte superior del sistema que no se encuentra aislada, ya que en el día sirve para la captación de energía solar.
- Este proyecto resulta en un sistema de calentamiento de agua para uso doméstico que es totalmente funcional y seguro ya que fue diseñado y probado en base a las normas que rigen este tipo de sistemas.
- Una producción en serie del equipo deriva en una reducción de costos tanto en materiales como en fabricación, lo que permitiría introducir este sistema residencial de calentamiento de agua al mercado para competir con los colectores solares de placa plana y de tubos de vacío.

6.2 RECOMENDACIONES

- Realizar inspecciones anuales del equipo para determinar el grado de deterioro de sus partes.
- Realizar un estudio de implementación de aletas en el interior de los tanques de almacenamiento para incrementar la transferencia de calor hacia el fluido.
- Aislar térmicamente el equipo Bread-Box por las noches con el propósito de disminuir las pérdidas de temperatura del agua almacenada aumentando su eficiencia y reduciendo el consumo de electricidad por las mañanas.
- Utilizar superficies reflectantes orientadas de tal forma que permitan aumentar la incidencia de energía solar sobre los tanques.
- Estudiar la factibilidad de utilizar otros materiales como polímeros en la construcción de los tanques captadores-almacenadores tomando en cuenta el rendimiento térmico y la facilidad de construcción.
- Utilizar el modelo matemático planteado para realizar diseños alternativos con geometrías y materiales diferentes a los presentados en este proyecto para disminuir costos optimizando recursos sin afectar la eficiencia del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros

- BEER, F.; JOHNSTON R. Mecánica de Materiales, Primera Edición; McGraw-Hill Latinoamérica, Colombia, 1982.
- DUFFIE, J., BECKMAN, W.; Solar Engineering of Thermal Processes; Wiley. EE.UU. 1980.
- FARRINGTON, D.; Uso Directo de la Energía Solar; Primera Edición; H. Blume Ediciones, España, 1977.
- FERNÁNDEZ, J.; Guía Completa de la Energía Solar Térmica y Termoeléctrica; A. MADRID VICENTE, EDICIONES, España, 2008.
- GARG, H.; PRAKASH, J. Solar Energy: Fundamentals and Applications; Tata McGraw-Hill, Nueva Delhi, 2006.
- GERE, J., GOODNO, B., Mecánica de Materiales, Séptima Edición; CENGAGE Learning, México, 2009.
- HALACY, D.; La Nueva Era de la Energía Solar; Ediciones Marymar, Argentina, 1975.
- INCROPERA, F., DeWitt, D.; Fundamentos de Transferencia de Calor, Cuarta Edición; PRENTICE HALL, México, 1999.
- JAKOB, Max; Heat Transfer, Volume 1; John Wiley & Sons, Inc., EE.UU. 1962.
- KREITH, F., KREIDER, J.; Principles of Solar Engineering; HEMISPHERE PUBLISHING CORPORATION, E.E.U.U., 1978.
- LEÓN, Juan; Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión; Inglesa, México, 2001.
- MEGYESY, Eugene; Manual de Recipientes a Presión, Diseño y Cálculo; Limusa S.A., Grupo Noriega Editores, México, 1992.
- MÉNDEZ, J., CUERVO, R.; Energía Solar Térmica, Tercera Edición; FUNDACIÓN CONFEMETAL, España, 2010.
- OLIVARES, J.; Manual del instalador de sistemas de energía solar térmica de baja temperatura, Primera Edición; Ediciones Paraninfo, España, 2011.
- SÁNCHEZ M.; Energía Solar Fotovoltaica; Limusa S.A., México, 2010.

- ZABALA, I., ARANDA, A.; Energía Solar Térmica, Primera Edición; Prensas Universitarias de Zaragoza, España, 2009.

NORMAS CONSULTADAS

- **Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-10. Parte 14-1**

Comité Ejecutivo del Código Ecuatoriano de la Construcción. Subcomité 9. ENERGÍA RENOVABLE. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR PARA USO SANITARIO EN EL ECUADOR. Quito-Ecuador.

- **NTE INEN 2507 : 2009**

Instituto Ecuatoriano de Normalización. Subcomité Técnico. RENDIMIENTO TÉRMICO DE COLECTORES SOLARES EN SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA PARA USO SANITARIO. REQUISITOS. Primera edición. 15 de mayo de 2009. Quito-Ecuador.

- **NTE INEN 1912 : 1992**

Instituto Ecuatoriano de Normalización. Subcomité Técnico. CALENTADORES ELÉCTRICOS DE AGUA PARA USO DOMÉSTICO. REQUISITOS. Primera Edición. 18 de octubre de 1991. Quito-Ecuador.

- **MANUAL DE NORMAS UNE**

Publicadas por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid-España. 2007.

UNE-EN 12975-1:2007. Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 1: Requisitos generales.

UNE-EN 12975-2:2007. Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 2: Métodos de ensayo.

UNE-EN 12976-1:2007. Sistemas solares térmicos y sus componentes. Sistemas prefabricados. Parte 1: Requisitos generales, año 2006

UNE-EN 12976-2:2007. Sistemas solares térmicos y componentes. Sistemas prefabricados. Parte 2: Métodos de ensayo.

PROYECTOS DE TITULACIÓN

- ALMEIDA, Juan y CAMACHO Pablo; Diseño, construcción e implementación de un sistema de adquisición de datos con transmisión inalámbrica para evaluar el rendimiento de colectores solares térmicos para el calentamiento de agua de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Julio 2011. Quito-Ecuador.
- PEÑAHERRERA, Fernando y SARZOSA, Hugo; Instalación de colectores solares planos para calentamiento de agua en la Facultad de Ingeniería Mecánica y levantamiento del potencial energético para la instalación a gran escala. Febrero 2012. Quito-Ecuador.

ENLACES WEB

- http://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_solar#Distribuci.C3.B3n_espectral_de_la_radiaci.C3.B3n_solar
- http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png
- http://www.corpoema.com/CDenergia/FV_Anexo2.PDF
- <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/components2.gif>
- http://www.enerpoint.es/photovoltaic_technology_1.php
- <http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/INSTRUMENTACION/FIG8.htm>
- <http://www.eltiempodelosaficionados.com/PARAQUESIRVE.html>
- <http://www3.uva.es/renova/esp/imagenes/albedometro.jpg>
- <http://nestorcruzsastre.blogspot.com/2010/10/el-bolometro-y-el-pirheliometro.html>
- <http://www.rumtor.com/heliografo.html>
- http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Quito>
- <http://www.energiza.org/historiadeloscolectoressolares.html>
- <http://www.slideshare.net/geopaloma/historia-de-la-energa-solar-termica-i>
- <http://www.masters-energia-solar.com/>
- <http://www.instalaciones-solares.com/fotos/colectores-polipropileno.jpg>
- <http://www.solostocks.com/img/termosifon-t150-hs-202-4926823z0.jpg>
- <http://www.solarfree.cl/nuestra-tecnologia/comparacion-colectores.php>

- <http://themorningstarg2.files.wordpress.com/2012/03/cilindro-parabolico12.jpg>
- <http://vivirmexico.com/2011/10/unam-inaugura-campo-de-pruebas-de-heliostatos-en-sonora>
- <http://www.energiasolartermica.biz/tag/discos/>
- <http://www.cleanergysolar.com/wp-content/uploads/2011/07/EI-intercambiador-de-calor-17.jpg>
- <http://www.climamania.com/energia-solar-termica-acumulacion-daitso-daintersol2-160.html>
- http://kysolar.org/ky_solar_energy_guide/chapters/Chapter_8_SWH_SystemTypes.pdf
- http://www.faryal.net/energy-saving-projects-home_orth_5-8.html
- http://t2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRg0kMgdZyaV_OjD5-6x0psEiyffNsipK6p6ik600InhlIzyJC2XGyq9qcW
- http://html.rincondelvago.com/energia-solar_15.html
- <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/163/1/CD-0184.pdf>
- http://esp.energiasrenovaveis.com/DetalleConceitos.asp?ID_conteudo=42&ID_area=8&ID_sub_area=26
- http://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/AE_batch_heater.html
- http://www.electronicsonline.com/Projects/Science/Physics/Heat_and_Thermodynamics/Solar_Energy/thermo_siphoning_and_simple_batch_heater.shtml
- http://es.wikipedia.org/wiki/Colector_solar#Funcionamiento
- <http://www.caloryfrio.com/capacidad-termica.html>
- <http://es.scribd.com/doc/47380156/Coeficiente-global-de-transferencia-de-calor>
- <http://190.152.144.75/reportes/ReporteHorariosData.aspx>
- <http://solarcooking.org/bkerr/swheaterrev-1d.pdf>
- <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r68071.PDF>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule
- <http://www.electricfor.es/es/16523/Resistencias-para-inmersion.htm>

- http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/3esofisicaquimica/3quince na11/3q11_contenidos_5d.htm
- <http://www.fullgauge.com/es/public/uploads/files/products/mt-511.pdf-gg4.pdf>
- <http://www.trubadu.de/shop/sartikel.php5?aid=47>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Contactor>
- <http://guindo.pntic.mec.es/rarc0002/all/aut/dat/f.el.contactor.pdf>
- <http://www-app.etsit.upm.es/departamentos/teat/asignaturas/lab-ingel/practica3.htm>
- <http://www.paraquesirve.net/enciclopedia/diccionario/44525-temporizador.html>
- http://www.tecno-indusil.com/spa/prods/cables/comext_colores.htm

ANEXOS

ANEXO A

**DATOS HORARIOS DE RADIACIÓN SOLAR,
TEMPERATURA AMBIENTE Y VELOCIDAD DEL VIENTO
PARA VARIOS DIAS DEL AÑO 2012**

Tabla A.1. Datos de Radiación solar horaria para varios días del año 2012.

RADIACION SOLAR (W/m2)												
HORA	FECHA											
	17/01/12	16/02/12	16/03/12	15/04/12	15/05/12	11/6/2012	17/07/12	16/08/12	15/09/12	15/10/12	14/11/12	10/12/12
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00	1.47	0.01	3.24	12.89	21.74	35.19	35.2	19.68	74.47	126.97	10.59	15
8:00	58.72	40.35	85.38	158.49	207.23	278.66	268.55	85.82	362.72	389.06	74.69	186.07
9:00	145.5	134.35	405.44	294.03	473.94	524.97	525.69	253.1	651.29	634.44	311.97	277.22
10:00	325.66	81.74	625.52	342.3	545.94	695.88	738.25	507.1	907.23	873.97	790.11	469.38
11:00	407.97	118.97	971.73	338.15	817.52	868.36	923.52	300.04	1112.26	1066.7	426.55	519.02
12:00	452.92	417.1	1187.13	278.81	698.2	526.75	951.93	396.78	1187.59	1181.56	812.02	679.06
13:00	877.56	359.48	241.77	430.93	277.18	261.58	879.72	916.35	1215.38	1218.95	841.43	970.32
14:00	1092.99	475.16	347.81	648.72	329.88	260.21	449.59	258.24	1112.22	1086.14	247.58	498.73
15:00	333.71	796.24	294.3	481.22	191.42	205.88	333.11	245.59	762.53	531.65	40.84	352.86
16:00	480.74	614.58	170.37	553.65	190.75	174.72	401.2	218.85	550.89	562.52	25.11	499.5
17:00	369.68	507.74	114.25	453.11	199.98	270.82	275.83	319.68	353.02	138.3	20.06	250.11
18:00	61.64	156.34	46.84	171.72	64.18	33.47	107.57	167.97	30.56	4.69	26.06	51.66
19:00	0.23	3.15	0.05	0.13	0	0.03	1.06	7.52	0.01	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PROMEDIO	354.52	285.02	345.68	320.32	309.07	318.19	453.17	284.36	640.01	601.15	279.00	366.84

Tabla A.2. Datos de Temperatura ambiente horaria para varios días del año 2012.

TEMPERATURA AMBIENTE (°C)												
HORA	FECHA											
	17/01/12	16/02/12	16/03/12	15/04/12	15/05/12	11/6/2012	17/07/12	16/08/12	15/09/12	15/10/12	14/11/12	10/12/12
1:00	11.33	11.47	12.03	11.3	11.62	11.68	10.49	10.49	13.01	10.69	11.83	11.77
2:00	11.17	11.16	11.17	11.12	11.06	11.16	10.49	10.87	12.87	10.7	11.86	12.07
3:00	11.14	10.77	10.29	11.15	10.62	11.82	10.15	11	12.85	10.68	11.55	12.07
4:00	11.13	10.7	10.71	10.75	10.61	12.76	9.84	11.67	12.63	10.87	11.37	11.86
5:00	10.82	10.86	11.14	10.38	10.79	11.38	9.74	11.41	12.7	10.97	11.28	11.82
6:00	10.56	10.52	10.85	10.62	10.56	10.49	11.6	11.28	12.72	10.78	11.35	12.17
7:00	10.47	10.16	11.12	11.06	10.91	11.27	13.72	11.53	13.56	12.63	11.38	11.84
8:00	10.72	11.00	11.41	13.34	13.88	15.67	15.81	11.9	15.58	14.05	12.00	13.21
9:00	12.18	12.14	14.92	15.07	15.57	17.76	16.9	13.34	16.72	14.59	13.95	14.47
10:00	14.07	12.48	17.14	15.85	17.5	17.95	18.16	16.58	17.81	16.37	16.34	15.31
11:00	13.75	11.91	18.54	16.81	17.88	18.48	19.17	15.34	18.14	18.04	15.8	15.84
12:00	14.83	14.32	19.45	16.81	18.81	19.15	20.24	15.4	18.85	20.11	17.19	17.61
13:00	16.32	15.48	17.96	17.81	18.00	18.75	21.18	16.72	19.7	19.94	18.91	19.69
14:00	18.83	15.12	17.4	19.13	17.67	18.83	20.73	16.44	20.35	18.03	16.58	19.24
15:00	16.03	16.75	17.57	18.67	17.47	18.78	19.89	16.59	19.99	17.1	14.36	16.28
16:00	15.13	16.28	16.27	16.84	16.37	18.00	19.64	16.76	19.6	16.66	12.97	16.52
17:00	15.32	15.97	15.31	17.18	16.6	17.76	19.5	16.13	18.73	14.05	12.48	16.73
18:00	13.64	14.89	15.04	15.53	15.89	16.68	17.5	14.91	16.67	13.52	12.61	15.27
19:00	13.13	12.97	14.32	13.22	14.7	14.92	15.51	13.06	14.98	12.13	12.41	14.36
20:00	12.76	12.88	13.08	12.85	13.69	13.97	14.81	11.39	14.68	11.32	12.24	14.07
21:00	11.78	12.29	12.45	12.28	13.03	13.07	13.77	11.6	14.33	11.16	12.02	13.57
22:00	11.57	11.94	12.4	11.81	12.75	13.5	13.53	12.17	13.81	10.33	11.82	12.46
23:00	11.45	11.64	12.27	11.58	12.12	13.31	13.24	12.14	12.95	9.86	11.77	12.51
0:00	11.5	10.89	11.76	11.78	11.79	13.37	12.91	10.87	11.5	9.87	11.75	12.7
PROMEDIO	12.90	12.69	13.94	13.87	14.16	15.02	15.36	13.32	15.61	13.52	13.16	14.31

Tabla A.3. Datos de Velocidad del viento horaria para varios días del año 2012.

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)												
HORA	FECHA											
	17/01/12	16/02/12	16/03/12	15/04/12	15/05/12	11/6/2012	17/07/12	16/08/12	15/09/12	15/10/12	14/11/12	10/12/12
1:00	1.08	1.11	0.68	0.65	0.71	0.8	1.23	1.57	4.72	0.97	0.38	0.69
2:00	0.87	1.68	0.86	0.34	0.44	0.68	1.07	1.26	3.97	0.79	0.4	1.19
3:00	0.63	1.95	0.69	0.31	0.46	1.85	1.08	1.44	3.52	0.48	0.65	0.92
4:00	0.55	0.88	0.95	0.41	0.59	2.53	1.48	0.76	3.74	0.79	0.63	0.62
5:00	0.82	1.17	0.47	0.43	0.36	1.1	1.21	0.88	3.97	0.49	0.78	0.6
6:00	1.26	1.02	0.87	0.32	0.28	0.98	2.25	0.67	4.18	0.48	0.62	0.89
7:00	1.33	1.15	0.38	0.35	0.33	0.72	4.17	0.94	5.04	0.49	0.69	1.23
8:00	1.28	0.5	0.94	0.37	0.6	1.37	5.51	0.84	6.15	1.31	0.57	0.88
9:00	0.87	0.77	0.86	0.71	1.22	2.27	5.5	0.78	5.64	1.92	0.77	1.32
10:00	1.04	1.01	1.29	0.87	1.28	3.75	4.43	1.22	5.94	1.6	1.62	1.51
11:00	2.48	0.66	2.96	0.95	2.31	4.36	3.91	2.48	6.62	1.94	2.09	2.4
12:00	2.24	0.54	3.95	1.18	2.4	2.34	3.87	2.98	6.96	1.99	2.05	1.77
13:00	3.18	0.88	3.19	1.26	2.25	2.44	3.17	2.78	6.35	3.35	2.76	2.63
14:00	2.04	1.93	1.83	1.45	2.25	2.36	3.39	2.42	4.94	4.07	2.87	2.69
15:00	3.3	2.29	2.5	2.33	2.11	2.63	4.43	3.25	5.14	3.78	2.07	2.9
16:00	3.61	3.3	2.54	2.69	2.01	3	3.43	2.04	4.6	3.72	1.43	2.69
17:00	3.34	3.15	2.26	2.64	2.03	2.48	2.4	2.3	4.56	3.27	0.6	2.08
18:00	3	2.61	1.92	2.88	1.99	1.3	3.08	2.5	4.99	2.42	0.61	1.85
19:00	1.57	1.98	1.43	1.97	1.16	1.42	1.64	2.02	4.52	1.82	0.58	1.69
20:00	1.32	1.06	0.86	0.65	1.09	0.85	1.66	2.06	4.62	1.01	0.83	1.78
21:00	1.36	1.49	1.18	1.03	0.51	0.8	1.28	1.59	3.53	1.05	1.03	1.44
22:00	1.02	1.51	0.74	0.88	0.48	2.14	0.83	0.99	2.11	1.31	0.36	1.06
23:00	1.06	1.73	0.66	1.05	0.81	2.23	0.69	1.07	1.57	0.94	0.51	0.5
0:00	1.86	0.83	0.83	0.85	0.94	2.79	0.64	0.85	1.16	0.66	0.57	0.74
PROMEDIO	1.71	1.47	1.45	1.11	1.19	1.97	2.60	1.65	4.52	1.69	1.06	1.50

ANEXO B

**TEMPERATURAS DEL AGUA CALCULADAS CON EL
PROGRAMA MICROSOFT OFFICE EXCEL PARA VARIOS
DÍAS DEL AÑO 2012.**

TABLA B.1. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Enero de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _τ (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	1.08	11.3	12.0	11.0	11.6	11.2	64.37
2:00	0	0.87	11.2	11.9	11.0	11.6	11.1	
3:00	0	0.63	11.1	11.9	11.0	11.5	11.1	
4:00	0	0.55	11.1	11.9	11.0	11.5	11.1	
5:00	0	0.82	10.8	11.8	11.0	11.3	10.9	
6:00	0	1.26	10.6	11.8	11.0	11.2	10.8	
7:00	1.47	1.33	10.5	11.7	11.0	11.1	10.7	
8:00	58.72	1.28	10.7	12.1	11.4	11.4	11.0	
9:00	145.5	0.87	12.2	13.0	12.4	12.6	12.3	
10:00	325.66	1.04	14.1	15.3	14.6	14.7	14.3	
11:00	407.97	2.48	13.8	17.9	17.3	15.8	15.5	
12:00	452.92	2.24	14.8	20.8	20.1	17.8	17.5	
13:00	877.56	3.18	16.3	26.4	25.7	21.3	21.0	
14:00	1092.99	2.04	18.8	33.2	32.6	26.0	25.7	
15:00	333.71	3.3	16.0	34.7	34.0	25.4	25.0	
16:00	480.74	3.61	15.1	37.0	36.3	26.1	25.7	
17:00	369.68	3.34	15.3	38.4	37.8	26.9	26.6	
18:00	61.64	3	13.6	37.7	37.1	25.7	25.4	
19:00	0.23	1.57	13.1	36.7	36.1	24.9	24.6	
20:00	0	1.32	12.8	35.7	35.2	24.2	24.0	
21:00	0	1.36	11.8	34.7	34.2	23.2	23.0	
22:00	0	1.02	11.6	33.8	33.3	22.7	22.4	
23:00	0	1.06	11.5	32.8	32.4	22.1	21.9	
0:00	0	1.86	11.5	31.9	31.5	21.7	21.5	

TABLA B.2. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Febrero de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _T (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	1.11	11.5	12.0	11.0	11.7	11.2	67.85
2:00	0	1.68	11.2	11.9	11.0	11.6	11.1	
3:00	0	1.95	10.8	11.9	11.0	11.3	10.9	
4:00	0	0.88	10.7	11.8	11.0	11.3	10.9	
5:00	0	1.17	10.9	11.8	11.0	11.3	10.9	
6:00	0	1.02	10.5	11.7	11.0	11.1	10.7	
7:00	0.01	1.15	10.2	11.7	10.9	10.9	10.6	
8:00	40.35	0.5	11.0	11.9	11.2	11.5	11.1	
9:00	134.35	0.77	12.1	12.8	12.1	12.5	12.1	
10:00	81.74	1.01	12.5	13.3	12.7	12.9	12.6	
11:00	118.97	0.66	11.9	14.1	13.4	13.0	12.7	
12:00	417.1	0.54	14.3	16.9	16.2	15.6	15.3	
13:00	359.48	0.88	15.5	19.2	18.6	17.3	17.0	
14:00	475.16	1.93	15.1	22.1	21.5	18.6	18.3	
15:00	796.24	2.29	16.8	27.2	26.6	22.0	21.7	
16:00	614.58	3.3	16.3	30.7	30.1	23.5	23.2	
17:00	507.74	3.15	16.0	33.5	32.9	24.7	24.4	
18:00	156.34	2.61	14.9	33.7	33.1	24.3	24.0	
19:00	3.15	1.98	13.0	32.8	32.3	22.9	22.6	
20:00	0	1.06	12.9	32.0	31.5	22.4	22.2	
21:00	0	1.49	12.3	31.2	30.7	21.7	21.5	
22:00	0	1.51	11.9	30.4	29.9	21.2	20.9	
23:00	0	1.73	11.6	29.6	29.1	20.6	20.4	
0:00	0	0.83	10.9	28.8	28.4	19.9	19.6	

TABLA B.3. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Marzo de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _τ (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	0.68	12.0	12.0	11.0	12.0	11.5	62.78
2:00	0	0.86	11.2	12.0	11.0	11.6	11.1	
3:00	0	0.69	10.3	11.9	11.0	11.1	10.7	
4:00	0	0.95	10.7	11.8	11.0	11.3	10.9	
5:00	0	0.47	11.1	11.8	11.0	11.5	11.1	
6:00	0	0.87	10.9	11.8	11.0	11.3	10.9	
7:00	3.24	0.38	11.1	11.8	11.0	11.4	11.1	
8:00	85.38	0.94	11.4	12.3	11.6	11.9	11.5	
9:00	405.44	0.86	14.9	15.1	14.5	15.0	14.7	
10:00	625.52	1.29	17.1	19.4	18.7	18.3	17.9	
11:00	971.73	2.96	18.5	25.8	25.1	22.2	21.8	
12:00	1187.13	3.95	19.5	33.4	32.7	26.4	26.1	
13:00	241.77	3.19	18.0	34.3	33.6	26.1	25.8	
14:00	347.81	1.83	17.4	35.9	35.2	26.6	26.3	
15:00	294.3	2.5	17.6	37.0	36.4	27.3	27.0	
16:00	170.37	2.54	16.3	37.2	36.6	26.7	26.4	
17:00	114.25	2.26	15.3	37.0	36.4	26.2	25.9	
18:00	46.84	1.92	15.0	36.4	35.8	25.7	25.4	
19:00	0.05	1.43	14.3	35.5	34.9	24.9	24.6	
20:00	0	0.86	13.1	34.5	34.0	23.8	23.5	
21:00	0	1.18	12.5	33.6	33.1	23.0	22.8	
22:00	0	0.74	12.4	32.8	32.3	22.6	22.3	
23:00	0	0.66	12.3	32.0	31.5	22.1	21.9	
0:00	0	0.83	11.8	31.1	30.7	21.5	21.2	

TABLA B.4. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Abril de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	Ta(°C)	T _τ (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	0.65	11.3	12.0	11.0	11.6	11.2	67.55
2:00	0	0.34	11.1	11.9	11.0	11.5	11.1	
3:00	0	0.31	11.2	11.9	11.0	11.5	11.1	
4:00	0	0.41	10.8	11.8	11.0	11.3	10.9	
5:00	0	0.43	10.4	11.8	11.0	11.1	10.7	
6:00	0	0.32	10.6	11.7	11.0	11.2	10.8	
7:00	12.89	0.35	11.1	11.8	11.1	11.4	11.1	
8:00	158.49	0.37	13.3	12.9	12.2	13.1	12.8	
9:00	294.03	0.71	15.1	15.0	14.3	15.0	14.7	
10:00	342.3	0.87	15.9	17.3	16.6	16.6	16.2	
11:00	338.15	0.95	16.8	19.5	18.9	18.2	17.8	
12:00	278.81	1.18	16.8	21.2	20.6	19.0	18.7	
13:00	430.93	1.26	17.8	23.9	23.3	20.9	20.6	
14:00	648.72	1.45	19.1	28.0	27.4	23.6	23.3	
15:00	481.22	2.33	18.7	30.8	30.2	24.7	24.4	
16:00	553.65	2.69	16.8	33.9	33.2	25.3	25.0	
17:00	453.11	2.64	17.2	36.1	35.5	26.6	26.3	
18:00	171.72	2.88	15.5	36.3	35.8	25.9	25.6	
19:00	0.13	1.97	13.2	35.4	34.8	24.3	24.0	
20:00	0	0.65	12.9	34.4	33.9	23.6	23.4	
21:00	0	1.03	12.3	33.5	33.0	22.9	22.7	
22:00	0	0.88	11.8	32.7	32.2	22.2	22.0	
23:00	0	1.05	11.6	31.8	31.3	21.7	21.5	
0:00	0	0.85	11.8	31.0	30.5	21.4	21.2	

TABLA B.5. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Mayo de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _T (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	0.71	11.6	12.0	11.0	11.8	11.3	64.17
2:00	0	0.44	11.1	11.9	11.0	11.5	11.0	
3:00	0	0.46	10.6	11.9	11.0	11.3	10.8	
4:00	0	0.59	10.6	11.8	11.0	11.2	10.8	
5:00	0	0.36	10.8	11.8	11.0	11.3	10.9	
6:00	0	0.28	10.6	11.7	11.0	11.1	10.8	
7:00	21.74	0.33	10.9	11.8	11.1	11.4	11.0	
8:00	207.23	0.6	13.9	13.3	12.6	13.6	13.2	
9:00	473.94	1.22	15.6	16.6	15.9	16.1	15.7	
10:00	545.94	1.28	17.5	20.3	19.6	18.9	18.5	
11:00	817.52	2.31	17.9	25.6	24.9	21.7	21.4	
12:00	698.2	2.4	18.8	29.9	29.2	24.4	24.0	
13:00	277.18	2.25	18.0	31.2	30.6	24.6	24.3	
14:00	329.88	2.25	17.7	32.8	32.2	25.2	24.9	
15:00	191.42	2.11	17.5	33.4	32.8	25.5	25.1	
16:00	190.75	2.01	16.4	34.0	33.3	25.2	24.9	
17:00	199.98	2.03	16.6	34.5	33.9	25.6	25.3	
18:00	64.18	1.99	15.9	34.2	33.6	25.0	24.7	
19:00	0	1.16	14.7	33.4	32.8	24.0	23.8	
20:00	0	1.09	13.7	32.5	32.0	23.1	22.9	
21:00	0	0.51	13.0	31.8	31.3	22.4	22.1	
22:00	0	0.48	12.8	31.0	30.5	21.9	21.6	
23:00	0	0.81	12.1	30.2	29.8	21.2	21.0	
0:00	0	0.94	11.8	29.5	29.1	20.6	20.4	

TABLA B.6. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Junio de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _T (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	0.8	11.7	12.0	11.0	11.8	11.4	64.35
2:00	0	0.68	11.2	12.0	11.0	11.6	11.1	
3:00	0	1.85	11.8	11.9	11.1	11.9	11.4	
4:00	0	2.53	12.8	12.0	11.1	12.4	11.9	
5:00	0	1.1	11.4	12.0	11.1	11.7	11.3	
6:00	0	0.98	10.5	11.9	11.1	11.2	10.8	
7:00	35.19	0.72	11.3	12.1	11.4	11.7	11.3	
8:00	278.66	1.37	15.7	14.1	13.4	14.9	14.5	
9:00	524.97	2.27	17.8	17.8	17.1	17.8	17.4	
10:00	695.88	3.75	18.0	22.4	21.7	20.2	19.8	
11:00	868.36	4.36	18.5	28.0	27.3	23.2	22.9	
12:00	526.75	2.34	19.2	31.1	30.4	25.1	24.8	
13:00	261.58	2.44	18.8	32.3	31.6	25.5	25.2	
14:00	260.21	2.36	18.8	33.4	32.8	26.1	25.8	
15:00	205.88	2.63	18.8	34.1	33.5	26.5	26.1	
16:00	174.72	3	18.0	34.6	34.0	26.3	26.0	
17:00	270.82	2.48	17.8	35.6	35.0	26.7	26.4	
18:00	33.47	1.3	16.7	35.1	34.5	25.9	25.6	
19:00	0.03	1.42	14.9	34.2	33.7	24.6	24.3	
20:00	0	0.85	14.0	33.4	32.9	23.7	23.4	
21:00	0	0.8	13.1	32.6	32.1	22.8	22.6	
22:00	0	2.14	13.5	31.7	31.3	22.6	22.4	
23:00	0	2.23	13.3	31.0	30.5	22.1	21.9	
0:00	0	2.79	13.4	30.2	29.7	21.8	21.6	

TABLA B.7. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Julio de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _τ (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	1.23	10.5	11.9	11.0	11.2	10.7	63.87
2:00	0	1.07	10.5	11.9	11.0	11.2	10.7	
3:00	0	1.08	10.2	11.8	10.9	11.0	10.5	
4:00	0	1.48	9.8	11.7	10.9	10.8	10.4	
5:00	0	1.21	9.7	11.6	10.8	10.7	10.3	
6:00	0	2.25	11.6	11.6	10.9	11.6	11.2	
7:00	35.2	4.17	13.7	11.9	11.2	12.8	12.5	
8:00	268.55	5.51	15.8	13.9	13.2	14.9	14.5	
9:00	525.69	5.5	16.9	17.5	16.8	17.2	16.9	
10:00	738.25	4.43	18.2	22.5	21.8	20.3	20.0	
11:00	923.52	3.91	19.2	28.4	27.7	23.8	23.4	
12:00	951.93	3.87	20.2	34.4	33.6	27.3	26.9	
13:00	879.72	3.17	21.2	39.6	38.9	30.4	30.0	
14:00	449.59	3.39	20.7	41.7	41.0	31.2	30.9	
15:00	333.11	4.43	19.9	42.9	42.2	31.4	31.0	
16:00	401.2	3.43	19.6	44.4	43.8	32.0	31.7	
17:00	275.83	2.4	19.5	45.1	44.5	32.3	32.0	
18:00	107.57	3.08	17.5	44.6	43.9	31.0	30.7	
19:00	1.06	1.64	15.5	43.3	42.7	29.4	29.1	
20:00	0	1.66	14.8	42.1	41.5	28.5	28.2	
21:00	0	1.28	13.8	40.9	40.4	27.3	27.1	
22:00	0	0.83	13.5	39.8	39.3	26.7	26.4	
23:00	0	0.69	13.2	38.7	38.2	26.0	25.7	
0:00	0	0.64	12.9	37.7	37.2	25.3	25.1	

TABLA B.8. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Agosto de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _T (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	1.57	10.5	11.9	11.0	11.2	10.7	65.46
2:00	0	1.26	10.9	11.9	11.0	11.4	10.9	
3:00	0	1.44	11.0	11.8	11.0	11.4	11.0	
4:00	0	0.76	11.7	11.8	11.0	11.8	11.3	
5:00	0	0.88	11.4	11.8	11.0	11.6	11.2	
6:00	0	0.67	11.3	11.8	11.0	11.5	11.2	
7:00	19.68	0.94	11.5	11.9	11.2	11.7	11.4	
8:00	85.82	0.84	11.9	12.5	11.8	12.2	11.8	
9:00	253.1	0.78	13.3	14.2	13.5	13.8	13.4	
10:00	507.1	1.22	16.6	17.7	17.0	17.1	16.8	
11:00	300.04	2.48	15.3	19.6	19.0	17.5	17.1	
12:00	396.78	2.98	15.4	22.1	21.4	18.7	18.4	
13:00	916.35	2.78	16.7	27.9	27.2	22.3	22.0	
14:00	258.24	2.42	16.4	29.1	28.5	22.8	22.5	
15:00	245.59	3.25	16.6	30.2	29.6	23.4	23.1	
16:00	218.85	2.04	16.8	31.0	30.4	23.9	23.6	
17:00	319.68	2.3	16.1	32.5	31.9	24.3	24.0	
18:00	167.97	2.5	14.9	32.9	32.3	23.9	23.6	
19:00	7.52	2.02	13.1	32.1	31.5	22.6	22.3	
20:00	0	2.06	11.4	31.2	30.7	21.3	21.0	
21:00	0	1.59	11.6	30.4	29.9	21.0	20.7	
22:00	0	0.99	12.2	29.6	29.1	20.9	20.7	
23:00	0	1.07	12.1	28.9	28.4	20.5	20.3	
0:00	0	0.85	10.9	28.2	27.7	19.5	19.3	

TABLA B.9. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Septiembre de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _r (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	4.72	13.0	12.0	11.1	12.5	12.0	59.91
2:00	0	3.97	12.9	12.1	11.2	12.5	12.0	
3:00	0	3.52	12.9	12.1	11.2	12.5	12.0	
4:00	0	3.74	12.6	12.1	11.3	12.4	12.0	
5:00	0	3.97	12.7	12.2	11.4	12.4	12.0	
6:00	0	4.18	12.7	12.2	11.4	12.5	12.1	
7:00	74.47	5.04	13.6	12.7	12.0	13.2	12.8	
8:00	362.72	6.15	15.6	15.3	14.6	15.4	15.1	
9:00	651.29	5.64	16.7	19.7	19.0	18.2	17.9	
10:00	907.23	5.94	17.8	25.6	24.9	21.7	21.3	
11:00	1112.26	6.62	18.1	32.6	31.9	25.4	25.0	
12:00	1187.59	6.96	18.9	39.8	39.0	29.3	28.9	
13:00	1215.38	6.35	19.7	46.8	46.0	33.3	32.9	
14:00	1112.22	4.94	20.4	52.8	52.1	36.6	36.2	
15:00	762.53	5.14	20.0	56.2	55.4	38.1	37.7	
16:00	550.89	4.6	19.6	58.0	57.2	38.8	38.4	
17:00	353.02	4.56	18.7	58.3	57.6	38.5	38.2	
18:00	30.56	4.99	16.7	56.4	55.7	36.5	36.2	
19:00	0.01	4.52	15.0	54.3	53.6	34.6	34.3	
20:00	0	4.62	14.7	52.3	51.7	33.5	33.2	
21:00	0	3.53	14.3	50.5	49.9	32.4	32.1	
22:00	0	2.11	13.8	48.8	48.3	31.3	31.1	
23:00	0	1.57	13.0	47.3	46.8	30.1	29.9	
0:00	0	1.16	11.5	45.8	45.3	28.7	28.4	

TABLA B.10. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Octubre de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _T (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	0.97	10.7	11.9	11.0	11.3	10.8	59.73
2:00	0	0.79	10.7	11.9	11.0	11.3	10.8	
3:00	0	0.48	10.7	11.8	11.0	11.3	10.8	
4:00	0	0.79	10.9	11.8	11.0	11.3	10.9	
5:00	0	0.49	11.0	11.8	11.0	11.4	11.0	
6:00	0	0.48	10.8	11.7	10.9	11.2	10.9	
7:00	126.97	0.49	12.6	12.6	11.9	12.6	12.2	
8:00	389.06	1.31	14.1	15.3	14.6	14.7	14.3	
9:00	634.44	1.92	14.6	19.4	18.7	17.0	16.7	
10:00	873.97	1.6	16.4	25.1	24.4	20.7	20.4	
11:00	1066.7	1.94	18.0	31.8	31.1	24.9	24.6	
12:00	1181.56	1.99	20.1	39.2	38.4	29.6	29.3	
13:00	1218.95	3.35	19.9	46.3	45.6	33.1	32.8	
14:00	1086.14	4.07	18.0	52.2	51.4	35.1	34.7	
15:00	531.65	3.78	17.1	54.0	53.2	35.5	35.2	
16:00	562.52	3.72	16.7	55.9	55.2	36.3	35.9	
17:00	138.3	3.27	14.1	54.8	54.1	34.4	34.1	
18:00	4.69	2.42	13.5	52.9	52.3	33.2	32.9	
19:00	0	1.82	12.1	51.1	50.5	31.6	31.3	
20:00	0	1.01	11.3	49.5	48.8	30.4	30.1	
21:00	0	1.05	11.2	47.9	47.3	29.5	29.2	
22:00	0	1.31	10.3	46.3	45.7	28.3	28.0	
23:00	0	0.94	9.9	44.8	44.2	27.3	27.0	
0:00	0	0.66	9.9	43.4	42.9	26.6	26.4	

TABLA B.11. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Noviembre de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _T (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	0.38	11.8	12.0	11.0	11.9	11.4	61.56
2:00	0	0.4	11.9	12.0	11.1	11.9	11.5	
3:00	0	0.65	11.6	12.0	11.1	11.8	11.3	
4:00	0	0.63	11.4	11.9	11.1	11.7	11.2	
5:00	0	0.78	11.3	11.9	11.1	11.6	11.2	
6:00	0	0.62	11.4	11.9	11.1	11.6	11.2	
7:00	10.59	0.69	11.4	11.9	11.2	11.7	11.3	
8:00	74.69	0.57	12.0	12.4	11.7	12.2	11.9	
9:00	311.97	0.77	14.0	14.6	13.9	14.3	13.9	
10:00	790.11	1.62	16.3	20.0	19.3	18.2	17.8	
11:00	426.55	2.09	15.8	22.6	21.9	19.2	18.9	
12:00	812.02	2.05	17.2	27.8	27.1	22.5	22.1	
13:00	841.43	2.76	18.9	32.9	32.2	25.9	25.6	
14:00	247.58	2.87	16.6	33.9	33.2	25.2	24.9	
15:00	40.84	2.07	14.4	33.3	32.7	23.8	23.5	
16:00	25.11	1.43	13.0	32.6	32.0	22.8	22.5	
17:00	20.06	0.6	12.5	31.9	31.3	22.2	21.9	
18:00	26.06	0.61	12.6	31.3	30.8	22.0	21.7	
19:00	0	0.58	12.4	30.6	30.0	21.5	21.2	
20:00	0	0.83	12.2	29.8	29.3	21.0	20.8	
21:00	0	1.03	12.0	29.1	28.6	20.6	20.3	
22:00	0	0.36	11.8	28.4	27.9	20.1	19.9	
23:00	0	0.51	11.8	27.8	27.3	19.8	19.5	
0:00	0	0.57	11.8	27.1	26.7	19.4	19.2	

TABLA B.12. Temperatura del agua calentada en el colector solar Bread-Box y eficiencia térmica del sistema para un día del mes de Diciembre de 2012.

Hora	I(W/m ²)	v(m/s)	T _a (°C)	T _T (°C)	T _w (°C)	T _c (°C)	T _i (°C)	η _D (%)
1:00	0	0.69	11.8	12.0	11.0	11.9	11.4	64.30
2:00	0	1.19	12.1	12.0	11.1	12.0	11.6	
3:00	0	0.92	12.1	12.0	11.1	12.0	11.6	
4:00	0	0.62	11.9	12.0	11.2	11.9	11.5	
5:00	0	0.6	11.8	12.0	11.2	11.9	11.5	
6:00	0	0.89	12.2	12.0	11.2	12.1	11.7	
7:00	15	1.23	11.8	12.1	11.3	12.0	11.6	
8:00	186.07	0.88	13.2	13.4	12.7	13.3	12.9	
9:00	277.22	1.32	14.5	15.3	14.6	14.9	14.5	
10:00	469.38	1.51	15.3	18.4	17.7	16.9	16.5	
11:00	519.02	2.4	15.8	21.7	21.1	18.8	18.4	
12:00	679.06	1.77	17.6	26.0	25.3	21.8	21.5	
13:00	970.32	2.63	19.7	32.1	31.5	25.9	25.6	
14:00	498.73	2.69	19.2	34.9	34.2	27.1	26.7	
15:00	352.86	2.9	16.3	36.4	35.7	26.3	26.0	
16:00	499.5	2.69	16.5	38.8	38.2	27.7	27.3	
17:00	250.11	2.08	16.7	39.5	38.9	28.1	27.8	
18:00	51.66	1.85	15.3	38.8	38.2	27.0	26.7	
19:00	0	1.69	14.4	37.8	37.2	26.1	25.8	
20:00	0	1.78	14.1	36.7	36.2	25.4	25.1	
21:00	0	1.44	13.6	35.8	35.2	24.7	24.4	
22:00	0	1.06	12.5	34.8	34.3	23.6	23.4	
23:00	0	0.5	12.5	33.9	33.4	23.2	23.0	
0:00	0	0.74	12.7	33.1	32.6	22.9	22.7	

ANEXO C

**PRESIÓN HIDRÁULICA MÁXIMA EN EL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO EN EL AÑO 2012**

ANEXO D
MANUAL DEL USUARIO DEL TERMOSTATO DIGITAL
MT-511RI

ANEXO E

WPS'S PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TANQUES

ANEXO F

FICHA TÉCNICA DE COMPONENTES DE POLIURETANO

ANEXO G

**PLANOS CONSTRUCTIVOS DEL SISTEMA DE
CALENTAMIENTO HÍBRIDO BREAD-BOX**

ANEXO H
PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

ANEXO I

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO. DATOS OBTENIDOS Y

GRÁFICAS

ANEXO I. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.

I.1 PRUEBAS CON ENERGÍA SOLAR. MODO ESTÁTICO

Tabla I.1. Datos obtenidos y calculados. Domingo 15/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	Ealm sim. (MJ)	n
5:00	0	9	10	11.0	10.00	0.00	0.00	0.00	-
6:00	0.00	10	10	11.0	10.00	0.00	0.00	0.00	-
7:00	61.79	10	10	11.0	10.00	0.08	0.00	0.00	-
8:00	303.28	13	15	13.0	13.00	0.45	0.33	0.34	0.74
9:00	606.03	15	17	15.0	18.00	1.20	0.66	1.04	0.55
10:00	811.80	15	22	21.0	28.00	2.21	1.66	1.91	0.75
11:00	669.81	15	21	23.0	32.00	3.04	1.99	2.59	0.66
12:00	487.74	15	20	27.0	34.00	3.64	2.66	3.05	0.73
13:00	252.54	15	22	31.0	34.00	3.95	3.32	3.24	0.84
14:00	395.81	15	20	31.0	33.00	4.44	3.32	3.58	0.75
15:00	287.11	15	21	31.0	33.00	4.80	3.32	3.79	0.69
16:00	337.13	15	18	32.0	33.00	5.22	3.49	4.04	0.67
17:00	168.09	15	18	33.0	33.00	5.42	3.66	4.09	0.67
18:00	72.12	14	17	33.0	32.00	5.51	3.66	4.03	0.66
19:00	0.68	14	14	33.0	30.00	5.51	3.66	3.89	0.66
20:00	0.00	15	14	34.0	30.00	5.51	3.82	3.75	0.69
21:00	0.00	17	14	33.0	29.00	5.51	3.66	3.62	0.66
22:00	0.00	17	13	32.0	29.00	5.51	3.49	3.49	0.63
						62.02	42.71	46.44	0.69

Tabla I.2. Temperatura del agua obtenida y calculada en el programa Bread-Box.
Domingo 15/09/13.

Hora	Tw (°C)	Tw prog (°C)
6:00	11.0	11.0
7:00	11.0	11.0
8:00	13.0	13.1
9:00	15.0	17.3
10:00	21.0	22.5
11:00	23.0	26.6
12:00	27.0	29.4
13:00	31.0	30.5
14:00	31.0	32.5
15:00	31.0	33.8
16:00	32.0	35.3
17:00	33.0	35.6
18:00	33.0	35.2
19:00	33.0	34.4
20:00	34.0	33.6
21:00	33.0	32.8
22:00	32.0	32.0

Tabla I.3. Datos obtenidos y calculados. Lunes 16/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	Ealm sim. (MJ)	n
5:00	0	9	9	25.0	21.00	0.00	0.00	0.00	-
6:00	0.00	10	12	24.0	21.00	0.00	0.00	0.00	-
7:00	59.65	13	16	24.0	22.00	0.07	0.00	0.00	-
8:00	366.66	15	17	26.0	26.00	0.53	0.33	0.31	0.63
9:00	614.15	17	15	28.0	29.00	1.29	0.66	0.89	0.52
10:00	531.57	16	17	31.0	33.00	1.95	1.16	1.36	0.60
11:00	683.16	18	20	34.0	35.00	2.79	1.66	1.99	0.60
12:00	380.48	17	22	35.0	39.00	3.26	1.83	2.27	0.56
13:00	1017.69	19	22	38.0	40.00	4.52	2.33	3.21	0.51
14:00	1018.91	17	22	43.0	46.00	5.78	3.16	4.10	0.55
15:00	882.6	19	21	48.0	50.00	6.88	3.99	4.81	0.58
16:00	478.75	19	24	49.0	51.00	7.47	4.15	5.05	0.56
17:00	265.3	18	21	48.0	51.00	7.80	3.99	5.04	0.51
18:00	15.89	17	18	47.0	51.00	7.82	3.82	4.75	0.49
19:00	0	16	13	46.0	45.00	7.82	3.66	4.47	0.47
20:00	0.00	15	12	46.0	40.00	7.82	3.66	4.20	0.47
21:00	0.00	16	12	44.0	40.00	7.82	3.32	3.95	0.43
22:00	0.00	18	13	42.0	39.00	7.82	2.99	3.71	0.38
						81.43	40.72	50.12598	0.50

Tabla I.4. Temperatura del agua obtenida y calculada en el programa Bread-Box.

Lunes 16/09/13.

Hora	Tw (°C)	Tw prog (°C)
6:00	24.0	24.0
7:00	24.0	24.0
8:00	26.0	25.9
9:00	28.0	29.3
10:00	31.0	32.2
11:00	34.0	35.9
12:00	35.0	37.6
13:00	38.0	43.3
14:00	43.0	48.7
15:00	48.0	52.9
16:00	49.0	54.4
17:00	48.0	54.3
18:00	47.0	52.6
19:00	46.0	50.9
20:00	46.0	49.3
21:00	44.0	47.7

Tabla I.5. Datos obtenidos y calculados. Martes 17/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m2)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	Ealm sim. (MJ)	n
5:00	0	14	9	30.0	24.00	0.00	0.00	0.00	-
6:00	0.00	17	10	30.0	23.00	0.00	0.00	0.00	-
7:00	34.09	16	11	29.0	22.00	0.04	-0.17	-0.01	-
8:00	273.31	15	12.5	30.0	25.00	0.38	0.00	0.16	-
9:00	538.38	16.5	15	31.0	33.00	1.05	0.17	0.62	-
10:00	851.15	17.5	19	35.0	37.00	2.10	0.83	1.40	0.40
11:00	947.3	17	19.5	39.0	43.00	3.27	1.50	2.26	0.46
12:00	563.64	17.5	19	43.0	46.00	3.97	2.16	2.69	0.54
13:00	122.26	18.5	19.5	43.0	48.00	4.12	2.16	2.60	0.52
14:00	186.73	15	17.5	43.0	48.00	4.35	2.16	2.59	0.50
15:00	276.5	18	18	44.0	48.00	4.70	2.33	2.67	0.50
16:00	232.73	18	16.5	42.0	45.00	4.98	1.99	2.70	0.40
17:00	149.47	18	16.5	42.0	42.00	5.17	1.99	2.65	0.39
18:00	39.18	17	15.5	42.0	40.00	5.22	1.99	2.47	0.38
19:00	0.38	18	13	42.0	37.00	5.22	1.99	2.25	0.38
20:00	0.00	15	12	41.0	35.00	5.22	1.83	2.04	0.35
21:00	0.00	14	12	39.0	34.00	5.22	1.50	1.84	0.29
22:00	0.00	14	12	37.0	34.00	5.22	1.16	1.65	0.22
						60.23	23.60	30.60354	0.39

Tabla I.6. Temperatura del agua obtenida y calculada en el programa Bread-Box.

Martes 17/09/13.

Hora	Tw (°C)	Tw prog (°C)
6:00	30.0	30.0
7:00	29.0	29.9
8:00	30.0	31.0
9:00	31.0	33.7
10:00	35.0	38.4
11:00	39.0	43.6
12:00	43.0	46.2
13:00	43.0	45.7
14:00	43.0	45.6
15:00	44.0	46.1
16:00	42.0	46.2
17:00	42.0	45.9
18:00	42.0	44.9
19:00	42.0	43.5
20:00	41.0	42.3
21:00	39.0	41.1
22:00	37.0	39.9

I.2 PRUEBA CON ENERGÍA SOLAR. MODO DINÁMICO.**Tabla I.7.** Datos obtenidos y calculados. Miércoles 18/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	Ealm sim. (MJ)	n
5:00	0	10	9	22.0	21.00	0.00	0.00	0.00	-
6:00	0.00	12	9	23.0	19.00	0.00	0.17	0.00	-
7:00	25.23	13	10	23.0	21.00	0.03	0.17	-0.01	-
8:00	310.72	16	13	24.5	23.50	0.42	0.42	0.24	1.00
9:00	574.93	17.5	16	25.5	22.00	1.13	0.58	0.78	0.52
10:00	918.65	18	17	26.5	24.50	2.26	0.75	1.67	0.33
11:00	925.01	18	20	26.5	36.00	3.41	0.75	2.54	0.22
12:00	1017.85	18	20	28.5	41.50	4.67	1.08	3.48	0.23
13:00	526.04	18	18	33.0	31.00	5.32	1.83	3.85	0.34
14:00	594.76	18	17	37.0	25.50	6.06	2.49	4.29	0.41
15:00	369.76	18	16	34.5	29.00	6.52	2.08	4.46	0.32
16:00	418.05	18	15	37.0	32.50	7.03	2.49	4.68	0.35
17:00	158.91	18	15	36.0	27.00	7.23	2.33	4.60	0.32
18:00	55.7	17.5	14	33.5	24.00	7.30	1.91	4.40	0.26
19:00	0.01	16	13	30.0	22.00	7.30	1.33	4.15	0.18
20:00	0.00	16	12	29.0	21.00	7.30	1.16	3.92	0.16
21:00	0.00	15	12	29.0	20.00	7.30	1.16	3.70	0.16
22:00	0.00	14	11	28.0	20.00	7.30	1.00	3.49	0.14
						80.57	21.69	21.68782	0.27

Tabla I.8. Temperatura del agua obtenida y calculada en el programa Bread-Box.

Miércoles 18/09/13.

Hora	Tw (°C)	Tw prog (°C)
6:00	23.0	22.0
7:00	23.0	22.0
8:00	24.5	23.5
9:00	25.5	26.7
10:00	26.5	32.0
11:00	26.5	37.3
12:00	28.5	42.9
13:00	33.0	45.2
14:00	37.0	47.8
15:00	34.5	48.8
16:00	37.0	50.2
17:00	36.0	49.7
18:00	33.5	48.5
19:00	30.0	47.0
20:00	29.0	45.6
21:00	29.0	44.2
22:00	28.0	43.0

I.3 PRUEBA CON ENERGÍA ELÉCTRICA. MODO ESTÁTICO.**Tabla I.9.** Datos de temperatura obtenidos. Jueves 19/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	12	19	17	10.85
6:00	12	40.2	39.6	10.29
7:00	12	40.1	39.8	11.05
8:00	13	40.2	39.85	12.68
9:00	13	40.4	40.35	14.91
10:00	14	40.4	41.3	15.85
11:00	13	40.5	42.1	16.21
12:00	15	40.55	41.5	16.06
13:00	15	40.15	41.2	17.48
14:00	16	40.35	40.8	18.54
15:00	15	40.15	41	17.64
16:00	17	40.15	41.7	16.95
17:00	16	40.2	42.55	16.4
18:00	15	40.1	42.6	15.81
19:00	15	40.1	41.3	15
20:00	15	40.4	40.2	14.39
21:00	14	40.1	38.8	13.47
22:00	13	40.1	38.2	13.44

Tabla I.10. Datos calculados de energía eléctrica. Jueves 19/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	3.6
7:27	0.45
8:34	0.27
9:41	0.27
10:23	0.54
11:39	0.27
12:20	0.54
13:42	0.36
14:17	0.27
15:46	0.09
16:31	0.27
17:16	0.27
18:12	0.27
19:17	0.36
20:35	0.27
21:31	0.36
	8.46

Tabla I.11. Datos de temperatura obtenidos. Viernes 20/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	10	28	25	11.91
6:00	11	40.3	40.6	11.78
7:00	11	40.1	40.2	12.17
8:00	13	40.4	40.35	13.72
9:00	13	40.1	41.05	16.32
10:00	14	40.4	41.2	16.61
11:00	13	40.15	41.4	17.1
12:00	15	40.1	41.35	18.6
13:00	15	40.15	41.75	20.14
14:00	16	40.15	42	20.06
15:00	15	40.2	41.95	20.02
16:00	17	40.35	42.15	19.45
17:00	16	40.15	43.05	18.79
18:00	15	40.1	42.1	17.68
19:00	15	40.6	40.1	16.01
20:00	15	40.3	39.4	14.98
21:00	14	40.1	38.9	14.43
22:00	13	40.1	37	13.97

Tabla I.12. Datos calculados de energía eléctrica. Viernes 20/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	2.25
6:51	0.36
7:33	0.36
8:37	0.27
9:22	0.45
10:46	0.27
11:24	0.36
12:27	0.27
13:23	0.18
14:32	0.36
15:31	0.36
16:34	0.27
17:26	0.27
18:32	0.45
19:41	0.18
20:37	0.27
21:39	0.27
	7.2

Tabla I.13. Datos de temperatura obtenidos. Sábado 28/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	9	30.1	28.3	9.72
6:00	9	40.1	41.6	9.79
7:00	10	40.9	41	11.56
8:00	12	40.25	39.75	15.73
9:00	12	40.35	39.5	16.69
10:00	14	40.45	42.05	16.61
11:00	15	40.1	41.65	17.15
12:00	15	40.15	41.05	19.86
13:00	16	40.15	41.05	19.47
14:00	16	40.25	41.3	19.84
15:00	16	40.2	41.6	19.57
16:00	17	40.2	42.3	18.21
17:00	16	40.1	43.45	17.46
18:00	16	40.1	43.85	14.99
19:00	14	40.35	42.7	13.56
20:00	13	40.1	40	13.32
21:00	12	40.1	39	12.48
22:00	11	40	37	11.49

Tabla I.14. Datos calculados de energía eléctrica. Sábado 28/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	1.89
6:57	0.27
7:45	0.54
8:47	0.36
9:36	0.27
10:33	0.27
11:42	0.36
12:41	0.36
13:32	0.27
14:39	0.27
15:41	0.36
16:27	0.27
17:31	0.45
18:42	0.27
19:40	0.27
20:36	0.54
21:48	0.27
	7.29

I.4 PRUEBA CON ENERGÍA ELÉCTRICA. MODO DINÁMICO.

Tabla I.15. Datos de temperatura obtenidos. Sábado 21/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	9	28.8	25.3	9.52
6:00	9	41.7	43.1	9.08
7:00	11	41.1	40.9	11.49
8:00	11.5	40.1	39.8	17.06
9:00	13	39.2	36.8	18.09
10:00	13	39.65	38.15	19.33
11:00	14	41.1	42.6	21.35
12:00	14	39.9	40.6	22.21
13:00	15	39.05	38.85	22.97
14:00	14.5	40.05	38.8	22.63
15:00	15.5	40.9	40.3	21.84
16:00	15.5	40.45	40.5	20.71
17:00	16.5	39.9	40.15	19.41
18:00	15	39.45	38.3	16.47
19:00	13	40.4	39.8	14.58
20:00	12	38.3	37.4	13.73
21:00	12	39.3	38.1	13.38
22:00	12	39.4	40.2	12.76

Tabla I.16. Datos calculados de energía eléctrica. Sábado 21/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	2.34
6:00	0.99
7:00	1.89
8:00	1.71
9:00	1.53
10:00	1.08
11:00	1.26
12:00	1.8
13:00	1.44
14:00	1.35
15:00	0.81
16:00	0.99
17:00	1.53
18:00	1.53
19:00	0.63
20:00	0.63
21:00	1.08
22:00	0.81
	23.4

Tabla I.17. Datos de temperatura obtenidos. Domingo 29/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	9	18.5	15.4	10.78
6:00	9	40.8	41.5	11.01
7:00	10	40.1	40.7	10.83
8:00	11.5	40.3	39.9	10.46
9:00	13	40.45	42.65	12.16
10:00	13	40	38.15	13.87
11:00	14.5	38.7	31.4	15.54
12:00	15	39.4	35.9	17.65
13:00	15	38.7	40.6	18.65
14:00	14.5	39.8	40.4	18.73
15:00	15.5	40.25	42.7	19.07
16:00	15.5	40.15	41.7	17.61
17:00	16.5	40.3	43.5	16.9
18:00	15	40.3	42.7	15.24
19:00	13	40.1	38.3	14.53
20:00	12	39.4	37.6	13.62
21:00	12	39.5	37.2	13.18
22:00	12	39.5	37.2	11.56

Tabla I.18. Datos calculados de energía eléctrica. Domingo 29/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	3.87
6:00	0.36
7:00	0.54
8:00	0.81
9:00	1.08
10:00	2.7
11:00	2.43
12:00	2.7
13:00	2.25
14:00	1.08
15:00	1.26
16:00	1.71
17:00	1.17
18:00	1.26
19:00	1.26
20:00	0.468
21:00	0.54
22:00	0.54
	26.028

Tabla I.19. Datos de temperatura obtenidos. Lunes 30/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	9	18.8	16.7	10.31
6:00	9	41.4	44.6	10.49
7:00	10	40	43	10.64
8:00	11.5	40	37	11.4
9:00	13	40	37.5	13.83
10:00	13	40	37.5	15.63
11:00	14	38.95	38.55	17.26
12:00	15	40.1	40.2	18.56
13:00	15	39.45	42.75	17.96
14:00	14	40.6	44.65	16.66
15:00	14	40.05	42.85	15.07
16:00	15	40.25	42.8	12.68
17:00	16	40	44.5	12.1
18:00	15	40.45	40.9	11.31
19:00	13	40.1	37.3	11.14
20:00	12	39.8	36.1	11.15
21:00	12	39.9	36.2	11.05
22:00	12	39.9	33.5	10.79

Tabla I.20. Datos calculados de energía eléctrica. Lunes 30/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	3.69
6:00	0.81
7:00	0.63
8:00	2.61
9:00	1.98
10:00	2.07
11:00	1.44
12:00	0.81
13:00	2.43
14:00	0.45
15:00	0.63
16:00	0.54
17:00	1.62
18:00	2.16
19:00	1.62
20:00	0.63
21:00	0.72
22:00	0.27
	25.11

I.5 PRUEBA CON ENERGÍA SOLAR-ELÉCTRICA, HÍBRIDO. MODO ESTÁTICO.

Tabla I.21. Datos de temperatura obtenidos. Domingo 22/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	10	15.2	14	10
6:00	10	40.7	38	11
7:00	12	40.1	39	13
8:00	12	40.7	40	12.5
9:00	12	42.15	42	13.5
10:00	12	42.15	41.05	18
11:00	13	43.3	45.5	19
12:00	14	45.35	46.5	22.5
13:00	14	47.7	55.5	24.5
14:00	15	50.35	56.15	23.5
15:00	15.8	51.8	56.35	25.8
16:00	16	52.75	54.8	22.3
17:00	15	52.65	52.5	19.75
18:00	14	50.95	49.35	18.55
19:00	13	48.8	47.5	13.1
20:00	13	46.5	47.1	13
21:00	11	44.6	44.3	13.3
22:00	11	42.3	41.6	13

Tabla I.22. Datos calculados de energía eléctrica. Domingo 22/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	4.806
6:00	0
7:00	0
8:00	0
9:00	0
10:00	0
11:00	0
12:00	0
13:00	0
14:00	0
15:00	0
16:00	0
17:00	0
18:00	0
19:00	0
20:00	0
21:00	0
22:00	0
	4.806

Tabla I.23. Datos obtenidos y calculados. Domingo 22/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m2)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	n
5:00	0	10	10	15.2	0.00	0.00	-
6:00	0.00	10	11	40.7	5.40	5.40	1.00
7:00	88.06	12	13	40.1	5.51	5.30	0.96
8:00	379.66	12	12.5	40.7	5.98	5.40	0.90
9:00	654.22	12	13.5	42.2	6.79	5.64	0.83
10:00	896.71	12	18	42.2	7.90	5.64	0.71
11:00	1082.81	13	19	43.3	9.24	5.83	0.63
12:00	1187.28	14	22.5	45.4	10.71	6.17	0.58
13:00	1166.08	14	24.5	47.7	12.15	6.56	0.54
14:00	1079.75	15	23.5	50.4	13.49	7.00	0.52
15:00	826.63	15.8	25.8	51.8	14.51	7.24	0.50
16:00	568.37	16	22.3	52.8	15.22	7.40	0.49
17:00	283.21	15	19.75	52.7	15.57	7.39	0.47
18:00	32.55	14	18.55	51.0	15.61	7.10	0.46
19:00	0	13	13.1	48.8	15.61	6.75	0.43
20:00	0.00	13	13	46.5	15.61	6.36	0.41
21:00	0.00	11	13.3	44.6	15.61	6.05	0.39
22:00	0.00	11	13	42.3	15.61	5.67	0.36
					200.50	106.91	0.53

Tabla I.24. Datos de temperatura obtenidos. Lunes 23/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	10	32.3	31.5	9
6:00	11	41.3	43	9.4
7:00	11	41	43	13
8:00	11.5	40.65	42.25	15.5
9:00	12.5	40.75	43.5	18.5
10:00	13	41.4	46.45	21.4
11:00	14	43.5	50.35	25.3
12:00	15	47.5	55.45	27
13:00	16.5	48.35	52.9	26.5
14:00	16	49.25	54.25	26.25
15:00	17	51	56.85	26.15
16:00	16.5	52.65	54.9	24.35
17:00	18	52.85	52.95	21
18:00	17	51.4	50.2	16.05
19:00	15	49	47.8	13.9
20:00	14	46.6	45.6	13.1
21:00	14	45.1	44.1	12
22:00	13	43.6	42.3	11.1

Tabla I.25. Datos calculados de energía eléctrica. Lunes 23/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	1.89
6:00	0
7:00	0
8:00	0
9:00	0
10:00	0
11:00	0
12:00	0
13:00	0
14:00	0
15:00	0
16:00	0
17:00	0
18:00	0
19:00	0
20:00	0
21:00	0
22:00	0
	1.89

Tabla I.26. Datos obtenidos y calculados. Lunes 23/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	n
5:00	0	10	9	32.3	0.00	0.00	
6:00	0.00	11	9.4	41.3	5.40	5.40	1.00
7:00	26.05	11	13	41.0	5.43	5.35	0.98
8:00	197.48	11.5	15.5	40.7	5.68	5.29	0.93
9:00	594.2	12.5	18.5	40.8	6.41	5.31	0.83
10:00	874.86	13	21.4	41.4	7.50	5.42	0.72
11:00	1085.39	14	25.3	43.5	8.84	5.77	0.65
12:00	857.22	15	27	47.5	9.90	6.43	0.65
13:00	572.11	16.5	26.5	48.4	10.61	6.57	0.62
14:00	755.18	16	26.25	49.3	11.54	6.72	0.58
15:00	743.63	17	26.15	51.0	12.46	7.01	0.56
16:00	707.45	16.5	24.35	52.7	13.34	7.29	0.55
17:00	134.88	18	21	52.9	13.51	7.32	0.54
18:00	47.97	17	16.05	51.4	13.57	7.08	0.52
19:00	0	15	13.9	49.0	13.57	6.68	0.49
20:00	0.00	14	13.1	46.6	13.57	6.28	0.46
21:00	0.00	14	12	45.1	13.57	6.03	0.44
22:00	0.00	13	11.1	43.6	13.57	5.78	0.43
					178.45	105.73	0.59

Tabla I.27. Datos de temperatura obtenidos. Viernes 27/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	9	22.3	24.8	9
6:00	11	41.2	39.1	11
7:00	11	40.8	39.6	12
8:00	11.5	40.75	41.2	14.5
9:00	12.5	41.85	45.4	19.45
10:00	12.5	41.95	46.7	24.15
11:00	14.5	43.45	48.4	26.45
12:00	14	44.65	47	29.7
13:00	15.5	45.5	48.35	27.2
14:00	16.5	45.4	46.15	26.75
15:00	16	45.6	46.7	26.25
16:00	17.5	46.9	47.15	22.4
17:00	16	47.25	45.35	15.4
18:00	14	45.9	42	12.65
19:00	12	43.1	39.7	12.2
20:00	13	41.4	39.1	12.6
21:00	13	40.2	38.7	12.3
22:00	12	40.1	39.3	12.6

Tabla I.28. Datos calculados de energía eléctrica. Viernes 27/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	3.942
6:00	0
7:00	0
8:00	0
9:00	0
10:00	0
11:00	0
12:00	0
13:00	0
14:00	0
15:00	0
16:00	0
17:00	0
18:00	0
19:00	0
20:00	0
21:00	0
22:00	0
	3.942

Tabla I.29. Datos obtenidos y calculados. Viernes 27/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	n
5:00	0	14	9	30.0	0.00	0.00	-
6:00	0.00	17	10	30.0	5.40	5.40	1.00
7:00	105.06	16	11	29.9	5.53	5.39	0.97
8:00	338.08	15	12.5	31.0	5.95	5.56	0.94
9:00	609.01	16.5	15	33.7	6.70	6.02	0.90
10:00	820.58	17.5	19	38.4	7.72	6.80	0.88
11:00	569.74	17	19.5	43.6	8.42	7.66	0.91
12:00	532.34	17.5	19	46.2	9.08	8.09	0.89
13:00	333.68	18.5	19.5	45.7	9.50	8.00	0.84
14:00	427.89	15	17.5	45.6	10.03	7.99	0.80
15:00	552.88	18	18	46.1	10.71	8.07	0.75
16:00	427.01	18	16.5	46.2	11.24	8.10	0.72
17:00	271.97	18	16.5	45.9	11.58	8.05	0.70
18:00	23.14	17	15.5	44.9	11.60	7.87	0.68
19:00	0	18	13	43.5	11.60	7.65	0.66
20:00	0.00	15	12	42.3	11.60	7.44	0.64
21:00	0.00	14	12	41.1	11.60	7.24	0.62
22:00	0.00	14	12	39.9	11.60	7.05	0.61
					159.87	122.40	0.77

I.6 PRUEBA CON ENERGÍA SOLAR-ELÉCTRICA, HÍBRIDO. MODO DINÁMICO.

Tabla I.30. Datos de temperatura obtenidos. Martes 24/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	10	33	31.3	12.91
6:00	10	43	45	13.84
7:00	10	41	39	14.41
8:00	11	37	36	15.82
9:00	12	39.2	33.9	17.36
10:00	12	39.45	40.95	17.53
11:00	14	40.65	43.45	17.44
12:00	14	39.6	34.5	18.32
13:00	15	41.75	42.05	18.66
14:00	15	45.25	34.5	19.02
15:00	15	45.85	34	18.7
16:00	15	48.05	42.45	18.93
17:00	16	43.1	39.15	18.46
18:00	14	40.95	38.2	17.38
19:00	14	38.6	32.5	16.26
20:00	14	40	31.9	15.75
21:00	13	39.7	31.1	15.37
22:00	11	40.1	30.2	14.86

Tabla I.31. Datos calculados de energía eléctrica. Martes 24/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	1.8
6:00	0.99
7:00	0.09
8:00	1.17
9:00	0.18
10:00	1.35
11:00	0.27
12:00	0.36
13:00	0.99
14:00	1.53
15:00	0.36
16:00	0.45
17:00	0.27
18:00	1.08
19:00	0.18
20:00	0.36
21:00	0.54
22:00	0.27
	12.24

Tabla I.32. Datos obtenidos y calculados. Martes 24/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	n
5:00	0.00	10	12.91	33.0	0.00	0.00	-
6:00	0.00	10	13.84	43.0	5.40	5.40	1.00
7:00	25.87	10	14.41	41.0	5.43	5.07	0.93
8:00	280.54	11	15.82	37.0	5.78	4.40	0.76
9:00	618.47	12	17.36	36.2	6.55	4.27	0.65
10:00	717.67	12	17.53	39.5	7.43	4.81	0.65
11:00	669.54	14	17.44	40.7	8.26	5.01	0.61
12:00	651.87	14	18.32	39.6	9.07	4.83	0.53
13:00	767.76	15	18.66	41.8	10.02	5.19	0.52
14:00	747.98	15	19.02	45.3	10.95	5.77	0.53
15:00	476.19	15	18.7	45.9	11.54	5.87	0.51
16:00	635.02	15	18.93	48.1	12.32	6.24	0.51
17:00	359.51	16	18.46	43.1	12.77	5.42	0.42
18:00	31.75	14	17.38	41.0	12.81	5.06	0.40
19:00	0	14	16.26	36.6	12.81	4.34	0.34
20:00	0.00	14	15.75	40.0	12.81	4.90	0.38
21:00	0.00	13	15.37	39.7	12.81	4.85	0.38
22:00	0.00	11	14.86	40.1	12.81	4.92	0.38
					169.54	86.36	0.51

Tabla I.33. Datos de temperatura obtenidos. Miércoles 25/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	10	22	20.7	11
6:00	11	40.8	38.4	12
7:00	11	45	45.4	14
8:00	12	42.55	44.35	15.6
9:00	12	40.6	34.4	17.1
10:00	12	47.45	47.5	20.65
11:00	13	43	44	24.2
12:00	14	40.25	43.45	25.5
13:00	15	40.95	45.4	26
14:00	16	45.35	45.3	24
15:00	17	40.6	41.5	21.95
16:00	16	40	37.95	15.05
17:00	16	40.25	40	14.55
18:00	17	40.1	42.05	12.4
19:00	14	40.4	40.2	13.7
20:00	13	40.2	37.3	12.8
21:00	12	40	43	11.8
22:00	12	40.2	39	11.4

Tabla I.34. Datos calculados de energía eléctrica. Miércoles 25/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	3.51
6:00	0.54
7:00	0.81
8:00	1.08
9:00	0.72
10:00	0.45
11:00	0.36
12:00	0.45
13:00	1.08
14:00	0.54
15:00	0.18
16:00	0.45
17:00	0.36
18:00	0.45
19:00	0.81
20:00	1.08
21:00	0.36
22:00	0.18
	13.41

Tabla I.35. Datos obtenidos y calculados. Miércoles 25/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	n
5:00	0	10	11	22.0	0.00	0.00	-
6:00	0.00	11	12	40.8	5.40	5.40	1.00
7:00	88.51	11	14	45.0	5.51	6.10	1.11
8:00	389.29	12	15.6	42.6	5.99	5.69	0.95
9:00	644.88	12	17.1	40.6	6.79	5.37	0.79
10:00	882.33	12	20.65	47.5	7.88	6.51	0.83
11:00	1079.6	13	24.2	43.0	9.22	5.77	0.63
12:00	1186.07	14	25.5	40.3	10.69	5.31	0.50
13:00	1122.57	15	27.45	41.0	12.08	5.42	0.45
14:00	555.49	16	27	45.4	12.76	6.16	0.48
15:00	639.14	17	21.95	40.6	13.56	5.37	0.40
16:00	402.14	16	15.05	40.0	14.05	5.27	0.37
17:00	321.88	16	14.55	40.3	14.45	5.31	0.37
18:00	22.61	17	12.4	40.1	14.48	5.28	0.36
19:00	0	14	13.7	40.4	14.48	5.33	0.37
20:00	0.00	13	12.8	40.2	14.48	5.30	0.37
21:00	0.00	12	11.8	40.0	14.48	5.27	0.36
22:00	0.00	12	11.4	40.2	14.48	5.30	0.37
					190.78	94.14	0.49

Tabla I.36. Datos de temperatura obtenidos. Jueves 26/09/13.

Hora	Te (°C)	Tw (°C)	Ts (°C)	Ta (°C)
5:00	9	15.4	16.4	9.42
6:00	10	41.2	37.7	9.24
7:00	11	40.2	38.3	9.96
8:00	11	41.5	44.1	13.36
9:00	12	40.7	49.15	17.1
10:00	12	39.15	37.35	18.43
11:00	13	40.7	37.5	19.93
12:00	14	42.4	42.65	20.82
13:00	14	42.25	46	18.79
14:00	15	42.9	36.5	18.81
15:00	17	42.3	42	19.36
16:00	18	40	36.6	18.38
17:00	17	39.85	46.45	17
18:00	14	40.9	46.6	15.56
19:00	12	40.1	43.2	12.63
20:00	12	40.5	42.8	12.39
21:00	11	40	42.3	12.53
22:00	9	40.2	39.9	11.59

Tabla I.37. Datos calculados de energía eléctrica. Jueves 26/09/13.

Hora	Ee (MJ)
5:00	4.32
6:00	0.36
7:00	0.72
8:00	0.18
9:00	1.53
10:00	0.27
11:00	0.99
12:00	0.54
13:00	1.17
14:00	1.44
15:00	0.108
16:00	0.9
17:00	0.81
18:00	1.08
19:00	1.35
20:00	0.36
21:00	0.9
22:00	0.18
	0.956

Tabla I.38. Datos obtenidos y calculados. Jueves 26/09/13.

Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Te (°C)	Ta (°C)	Tw (°C)	Eent (MJ)	Ealm exp. (MJ)	n
5:00	0	9	9.42	15.4	0.00	0.00	-
6:00	0.00	10	9.24	41.2	5.40	5.40	1.00
7:00	25.23	11	9.96	40.2	5.43	5.23	0.96
8:00	310.72	11	13.36	41.5	5.82	5.45	0.94
9:00	574.93	12	17.1	40.7	6.53	5.32	0.81
10:00	918.65	12	18.43	39.2	7.66	5.06	0.66
11:00	925.01	13	19.93	40.7	8.81	5.32	0.60
12:00	1017.85	14	20.82	42.4	10.07	5.60	0.56
13:00	526.04	14	18.79	42.3	10.72	5.57	0.52
14:00	594.76	15	18.81	42.9	11.46	5.68	0.50
15:00	369.76	17	19.36	42.3	11.92	5.58	0.47
16:00	418.05	18	18.38	40.0	12.43	5.20	0.42
17:00	158.91	17	17	39.9	12.63	5.18	0.41
18:00	55.7	14	15.56	40.9	12.70	5.35	0.42
19:00	0.01	12	12.63	40.1	12.70	5.22	0.41
20:00	0.00	12	12.39	40.5	12.70	5.28	0.42
21:00	0.00	11	12.53	40.0	12.70	5.20	0.41
22:00	0.00	9	11.59	40.2	12.70	5.23	0.41
					172.37	90.88	0.53

ANEXO J

PROYECCIÓN DE COSTOS DE VARIOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA DE USO DOMÉSTICO

Tabla J.1. Proyecciones de costos de diferentes sistemas de calentamiento en 10 años.

AÑO	Bread-Box Híbrido (con subsidio)	Bread-Box Híbrido (sin subsidio)	Calentador Eléctrico (con subsidio)	Calentador Eléctrico (sin subsidio)	Termotanque Eléctrico (con subsidio)	Termotanque Eléctrico (sin subsidio)	Calefón (con subsidio)	Calefón (sin subsidio)
0	852.57	852.57	378.67	378.67	343.00	343.00	367.92	367.92
1	966.62	1031.20	1012.27	1371.05	515.80	613.65	406.32	715.63
2	1080.67	1209.83	1645.87	2363.42	688.60	884.30	444.72	1063.33
3	1194.71	1388.45	2279.47	3355.80	861.40	1154.94	483.12	1411.04
4	1308.76	1567.08	2913.07	4348.17	1034.20	1425.59	521.52	1758.75
5	1422.81	1745.71	3546.67	5340.55	1207.00	1696.24	559.92	2106.46
6	1536.86	1924.34	4180.27	6332.93	1379.80	1966.89	598.32	2454.16
7	1650.91	2102.96	4813.87	7325.30	1552.60	2237.54	636.72	2801.87
8	1764.95	2281.59	5447.47	8317.68	1725.40	2508.18	675.12	3149.58
9	1879.00	2460.22	6081.07	9310.05	1898.20	2778.83	713.52	3497.29
10	1993.05	2638.85	6714.67	10302.43	2071.00	3049.48	751.92	3844.99