

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR ADSORCIÓN SOLAR

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MARÍA GABRIELA CAMPUZANO PÁEZ

gabycampu19@gmail.com

JUAN VÍCTOR CHIRIBOGA ALBUJA

juangchiri@hotmail.com

DIRECTOR: MSC. CLAUDIO ÁLVAREZ

claudio.alvarez@epn.edu.ec

Quito, julio 2010

DECLARACIÓN

Nosotros, María Gabriela Campuzano Páez y Juan Víctor Chiriboga Albuja, 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 Normatividad Institucional vigente.

María Gabriela Campuzano Páez

Juan Víctor Chiriboga Albuja

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores María Gabriela Campuzano Páez y Juan Víctor Chiriboga Albuja, bajo mi supervisión.

Ing. M.B.A. Claudio Álvarez

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, nuestros padres, hermanos y amigos por habernos ayudado incondicionalmente a culminar este proyecto.

Al Ing. Claudio Álvarez, director de la tesis, por habernos brindado su apoyo incondicional, cariño y dedicación y por haber sido una guía y un ejemplo.

Al Ing. Carlos Lucio Valladares, que participó activamente en la construcción y pruebas de los dos equipos desinteresadamente.

A los Ingenieros Ángel Portilla, Oswaldo Proaño, Miguel Ortega, Fabián Romero, Marcelo Lozada, Orwield Guerrero, Iván Sola, Víctor Guerrero y a los señores Luis Escobar, César Argüello, Nelson Vásquez, Camilo Peñalosa, quienes colaboraron en la fase de construcción y pruebas del equipo.

Gabriela Campuzano y Juan Chiriboga

DEDICATORIA

A mis padres Alberto y Consuelo, a mis hermanos Luis y Carolina que siempre han sabido quererme, comprenderme y permanecido a mi lado toda mi vida estudiantil.

A mi compañero y enamorado Juan Chiriboga, con el que desarrollamos juntos este arduo trabajo por haberme permitido culminar este proyecto y por haber brindado su cariño y apoyo sincero.

A mi abuela Inés Salvador y a mi abuelo Luis Campuzano, que en paz descansen por haberme mostrado con sus vidas un ejemplo a seguir.

Gabriela Campuzano

A Dios por darme la fuerza para alcanzar un triunfo más en mi vida.

A mi madre, Sonia Albuja, por ser la persona más importante en mi vida que me apoya y me aconseja para seguir adelante y no rendirme ante los retos.

A mi tío, Bolívar Alejandro Albuja Cruz, que en paz descansa, por enseñarme que a pesar de que nos encontremos en difíciles circunstancias no hay que rendirse y seguir adelante.

A mi enamorada, Gabriela Campuzano, por acompañarme, ayudarme y ser un ejemplo en mi vida universitaria y ser una persona que logra todos los objetivos que ella se propone.

A mi amigo, Cristian Maldonado, por ser unos de mis mejores amigos que me aconseja y me escucha en los peores momentos de mi vida.

Juan Chiriboga

CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
FENÓMENO DE LA ADSORCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 FUNDAMENTOS DE LA ADSORCIÓN.....	1
1.2.1 DEFINICIÓN	1
1.2.2 TIPOS DE ADSORCIÓN	1
1.2.3 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS ADSORBENTES	3
1.2.4 PRINCIPALES ADSORBENTES	5
1.2.5 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ADSORCIÓN	10
1.3 EQUILIBRIO Y MODELOS DE LA ADSORCIÓN.....	11
1.3.1 DEFINICIÓN Y REPRESENTACIÓN	11
1.3.2 MODELOS DE EQUILIBRIO DE LA ADSORCIÓN	13
1.3.3 CALOR DE ADSORCIÓN.....	15
1.4 DESORCIÓN	17
1.5 HISTÉRESIS	17
2 CAPÍTULO II.....	20
ENFRIAMIENTO POR ADSORCIÓN.....	20
2.1 INTRODUCCIÓN	20
2.2 HISTORIA	20
2.3 PARTES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR ADSORCIÓN SOLAR.....	23
2.3.1 EVAPORADOR	24
2.3.2 CONDENSADOR	25
2.3.3 GENERADOR.....	26
2.4 DESCRIPCIÓN DEL CICLO TERMODINÁMICO DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN IDEAL	28
2.4.1 ETAPA 1 (A → B) CALENTAMIENTO ISOSTÉRICO (CONCENTRACIÓN CONSANTE) + PRESURIZACIÓN.....	30
2.4.2 ETAPA 2 (B → C) CALENTAMIENTO Y DESORCIÓN + CONDENSACIÓN DEL ADSORBATO	30
2.4.3 ETAPA 3 (C → D) ENFRIAMIENTO ISOSTÉRICO + DESPRESURIZACIÓN	31
2.4.4 ETAPA 4 (D → A) ENFRIAMIENTO Y DESORCIÓN + EVAPORACIÓN.....	31
2.5 PARES DE ADSORCIÓN	31
2.5.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL PAR DE ADSORCIÓN.....	31

2.5.2	ZEOLITA - AGUA Y SÍLICA GEL - AGUA	32
2.5.3	CARBÓN ACTIVADO - METANOL, CARBÓN ACTIVADO - AMONÍACO	33
2.6	SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR ADSORCIÓN	35
2.6.1	CHILLER.....	35
2.6.2	CAJA HELADERA (ICEMAKER) O REFRIGERADOR.....	39
2.6.3	VENTILACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO.....	40
2.7	COEFICIENTES DE RENDIMIENTO EN EL CICLO DE REFRIGERACIÓN	42
2.7.1	DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE OPERACIÓN (COP).....	42
2.7.2	DEFINICIÓN DE LA CAPACIDAD ESPECÍFICA DE ENFRIAMIENTO (SPECIFIC COOLING POWER) (SCP)	43
2.7.3	DEFINICIÓN DEL POTENCIAL DE DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO (PDO).....	44
2.7.4	DEFINICIÓN DEL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (PCG).....	45
3	CAPÍTULO III.....	47
	ENERGÍA SOLAR.....	47
3.1	INTRODUCCIÓN	47
3.2	CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR.....	47
3.2.1	RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (G_{on})	47
3.2.2	RADIACIÓN DIRECTA	48
3.2.3	RADIACIÓN DIFUSA.....	48
3.2.4	RADIACIÓN GLOBAL	48
3.2.5	NÚMERO DE HORAS DE SOL	48
3.2.6	INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA 48	
3.2.7	USOS Y APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR	49
3.2.8	CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL.....	49
3.2.9	LAS ESTACIONES.....	50
3.3	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	50
3.3.1	ABSORTIVIDAD (α).....	50
3.3.2	EMITANCIA (ϵ)	51
3.3.3	SUPERFICIES SELECTIVAS.....	51
3.3.4	MATERIALES TRANSPARENTES.....	51
3.4	ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA	51
3.4.1	DECLINACIÓN (δ)	51

3.4.2	LATITUD GEOGRÁFICA (ϕ).....	52
3.4.3	INCLINACIÓN (β)	53
3.4.4	ÁNGULO DE ACIMUT DE LA SUPERFICIE (γ)	53
3.4.5	ÁNGULO HORARIO (ω)	53
3.4.6	ÁNGULO DEL CENIT (θ_z)	54
3.4.7	ÁNGULO DE LA ALTITUD SOLAR (α_s)	54
3.4.8	ÁNGULO DEL ACIMUT SOLAR (γ_s)	54
3.4.9	ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA INCLINADA.....	55
3.4.10	ÁNGULOS PARA SUPERFICIES QUE RASTREAN AL SOL.....	55
3.5	ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN PARA CIELO DESPEJADO.....	57
3.6	ESTIMACIÓN RADICIÓN HORARIA A PARTIR DE DATOS DIARIOS...58	
3.7	COMPONENTES DIRECTA Y DIFUSA DE LA RADIACIÓN DIARIA.....58	
3.8	COLECTOR SOLAR	59
3.8.1	DEFINICIÓN DE COLECTOR	59
3.8.2	CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES.....	59
3.8.3	DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES COLECTORES SIN CONCENTRACIÓN	60
3.8.4	DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES COLECTORES CON CONCENTRACIÓN	61
3.9	RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR	68
3.10	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	70
3.10.1	PIRANÓMETRO	70
3.10.2	PIRHELIÓMETRO	70
3.10.3	HELIÓGRAFO	71
	CAPÍTULO IV	72
4	OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS DE ADSORCIÓN.....	72
4.1	INTRODUCCIÓN	72
4.2	ANTECEDENTES	72
4.3	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.73	
4.3.1	MÉTODO GRAVIMÉTRICO	73
4.3.2	MÉTODO VOLUMÉTRICO.....	74
4.4	EQUIPO SELECCIONADO PARA LA DETERMINACIÓN DE ISÓSTERAS	75
4.4.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	75
4.4.2	MONTAJE DEL EQUIPO Y PRUEBAS DE ESTANQUEIDAD	77
4.4.3	SELECCIÓN DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	78

4.5	OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS.....	81
4.5.1	DESCRIPCIÓN DEL PAR ADSORCIÓN A UTILIZAR.....	81
4.5.2	PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS.....	82
4.5.3	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	83
4.5.4	TRATAMIENTO DE DATOS.....	84
4.5.5	ISÓSTERAS OBTENIDAS PARA EL PAR DE ADSORCIÓN CARBÓN ACTIVADO – METANOL Y CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DUBININ-ASTAKHOV	85
4.5.6	REPRODUCIBILIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL EQUIPO.....	88
4.5.7	COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DUBINI-ASTAKHOV OBTENIDOS CON LOS DE OTROS TRABAJOS..	89
CAPÍTULO V.....		91
5	DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL EQUIPO.....	91
5.1	INTRODUCCIÓN	91
5.2	MODELO MATEMÁTICO.....	91
5.2.1	COLECTOR SOLAR.....	92
5.2.2	CAMA ADSORBEDORA	109
5.2.3	DISEÑO DEL CONDENSADOR.....	117
5.2.4	DISEÑO DEL EVAPORADOR Y DE LA CÁMARA FRÍA.....	120
5.3	SIMULACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO	126
5.3.1	PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	127
5.3.2	OBTENCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN ÓPTIMA DEL COLECTOR SOLAR CPC.....	129
5.3.3	DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DENTRO DEL COLECTOR SOLAR CPC	132
5.3.4	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO.....	133
CAPÍTULO VI.....		143
6	CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	143
6.1	INTRODUCCIÓN	143
6.2	PROCESO DE REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.....	143
6.3	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	143
6.4	CONSTRUCCIÓN.....	145
6.5	PROTOCOLO DE PRUEBAS	149
6.5.1	PRUEBA DE ESTANQUEIDAD.....	149
6.5.2	REGENERACIÓN DE LA CÁMARA ADSORBEDORA Y LLENADO DE REFRIGERANTE.....	150

6.5.3	OPERACIÓN DEL EQUIPO	150
6.6	PRUEBAS REALIZADAS.....	151
6.6.1	ESTANQUEIDAD	151
6.6.2	ENFRIAMIENTO.....	151
6.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	154
CAPÍTULO VII.....		156
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	156
7.1	CONCLUSIONES.....	156
7.2	RECOMENDACIONES	158
BIBLIOGRAFÍA		160
ANEXOS 165		
ANEXO I: CHILLERS CON MÚLTIPLES CAMAS Y EXPERIENCIAS EN OTROS PAÍSES CON EL SISTEMA DE ADSORCIÓN.....		166
ANEXO II: FOTOS Y COSTO DEL EQUIPO CONSTRUIDO PARA LA OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS DE ADSORCIÓN		180
ANEXO III: CATÁLOGOS DE EQUIPOS.....		184
ANEXO IV: SIMULACIÓN EN EL TCB DEL DISIPADOR DE CALOR.....		188
ANEXO V: INFORMACIÓN ACERCA DEL PROGRAMA LABVIEW.....		190
ANEXO VII: CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL COLECTOR PARA CADA FASE DEL CICLO		196
ANEXO VIII: CÁLCULO DEL CALOR DE ADSORCIÓN		197
ANEXO IX: CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....		199
ANEXO X: PROGRAMACIÓN REALIZADA EN MATLAB 7.7		202
ANEXO XI: FOTOS Y COSTOS DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN SOLAR CONSTRUIDO.....		216
ANEXO XII: PRUEBAS REALIZADAS.....		223
ANEXO XIII: PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL METANOL SATURADO ...		227
ANEXO XIV: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN SOLAR		228

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1.1 Diferencias entre la Quimisorción y Fisisorción	3
Tabla 1.2 Propiedades típicas del adsorbente sílica gel	6
Tabla 1.3 Propiedades típicas del adsorbente carbón activado	7
Tabla 1.4 Propiedades típicas del adsorbente zeolita	9

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Ciclos avanzados utilizados en chillers de adsorción	38
--	----

CAPÍTULO IV

Tabla 4. 1 Parámetros de los materiales	79
Tabla 4.2 Propiedades del Carbón activado adquirido	82
Tabla 4.3 Propiedades del metanol adquirido	82
Tabla 4.4 Interacciones realizadas para el cálculo de los valores de D, n, Wo.....	87
Tabla 4.5 Comparación de los parámetros de la ecuación Dubinin-Astakhov obtenidos en el presente trabajo y de la literatura encontrada.....	90

CAPÍTULO V

Tabla 5.1 Comparación de la temperatura alcanzada por los diferentes colectores Rangos de temperatura	93
Tabla 5.2 Valores de Radiación mensual promedio para la ciudad de Quito	98
Tabla 5.3 Variables para la simulación.....	127
Tabla 5.4 Constantes tomadas para la simulación.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 Esquema del proceso de fisisorción	2
Figura 1.2 Esquema del proceso de quimisorción	3
Figura 1.3 Distribución de tamaño de poro de clases comunes de adsorbentes ...	4
Figura 1.4 Gránulos de arcilla activada	5
Figura 1.5 Esferas de sílica gel	6
Figura 1.6 Estructura de carbón activado.....	7
Figura 1.7 Formas comerciales del carbón activado	8
Figura 1.8 Cristal de zeolita	9
Figura 1.9 Tipos de isotermas de adsorción	12
Figura 1.10 Representación gráfica $\ln(P)$ y $-1/T$, ecuación D-A	16
Figura 1.11. Tipo de ciclos de histéresis de adsorción	18

CAPÍTULO II

Figura 2.1 Chiller de adsorción de par de adsorción sílica gel y agua.....	23
Figura 2. 2 Esquema del sistema de enfriamiento por adsorción	23
Figura 2.3 Diseños comunes de serpentines de tubos descubiertos	24
Figura 2.4 Evaporador serpentín estándar de placas	25
Figura 2.5 Condensador de un refrigerador convencional	26
Figura 2.6 Tubo aleteado recubierto con adsorbente consolidado.....	28
Figura 2.7 Adsorbente compuesto consolidado (carbón activado y CaCl_2).....	28
Figura 2.8 Ciclo de refrigeración con los referentes flujos de energía.....	29
Figura 2. 9 Concentración en función de la hora del día	29
Figura 2.10 Esquema de un ciclo completo de adsorción	37
Figura 2.11 Foto de una chiller experimental de 6 camas	38
Figura 2.12 Caja heladera solar sin válvulas.....	39
Figura 2.13 Caja heladera (icemaker) para barcos pesqueros	40
Figura 2.14 Aire acondicionado por adsorción de zeolita-agua. Parte superior equipo construido y parte inferior diagrama esquemático	41
Figura 2.15 Esquema de un refrigerador de Carnot y el diagrama temperatura- entropía del ciclo de Carnot invertido.....	43
Figura 2.16. Reacción química que ocasiona la destrucción de la capa de ozono	44

CAPÍTULO III

Figura 3. 1 Variación de la radiación solar extraterrestre en el año	47
Figura 3.2 Movimiento aparente del Sol en un punto medio de la Tierra	50
Figura 3.3 Ángulo de declinación	52
Figura 3.4 Ángulo de inclinación	53
Figura 3.5 Ángulo de orientación (colector visto desde el aire).....	53
Figura 3. 6 Partes de un concentrador parabólico compuesto CPC.....	62
Figura 3.7 Sección transversal de un CPC simétrico no truncado	62
Figura 3.8 CPCs con diferentes formas de absorbedores. Tiene el mismo perímetro de absorbedor a y semiángulo de aceptación θ_c	63

Figura 3.9 Coordenadas y parámetros para la descripción del CPC para un absorbedor tubular	65
Figura 3.10 Número de reflexiones para CPCs completos y truncados	66
Figura 3.11 Colector cilindro-parabólico	68
Figura 3.12 Mapa del Atlas Solar del Ecuador	69
Figura 3.13 Mapa de la irradiación solar global del Ecuador.....	69
Figura 3.14 Esquema de un piranómetro	70
Figura 3.15 Esquema de un pirheliómetro.....	71
Figura 3.16 Esquema de un heliógrafo	71

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 Esquema del método gravimétrico	73
Figura 4.2 Esquema del método volumétrico	74
Figura 4.3 Diagrama del equipo para la obtención de isósteras.....	76
Figura 4.4 Equipo construido para la obtención de isósteras	77
Figura 4.5 Dimensiones del disipador (medidas en mm).....	79
Figura 4.6 Esquema del balance de energías	81
Figura 4.7 Panel frontal del programa Labview	83
Figura 4.8 Diagrama de bloque en el programa LabView	84
Figura 4.9 Isósteras de Carbón Activado-metanol obtenidas	86
Figura 4.10 Diagrama de Dubinin-Astakhov con $n=1.18$ (más óptimo)	88
Figura 4.11 Reproducibilidad de la isóstera de concentración 115.73g/kg	89

CAPÍTULO V

Figura 5.1 Esquema del equipo de enfriamiento por adsorción solar.....	91
Figura 5.2 Parábola CPC completa y truncada	94
Figura 5.3 Balance de energías del colector	96
Figura 5.4 Circuito de resistencias equivalente para el primer modelo	106
Figura 5.5 Circuito de resistencias equivalente para el segundo modelo.....	107
Figura 5.6 Balance de transferencia de masa y energía a lo largo del colector ..	112
Figura 5.7 Flujo de energías del condensador	117
Figura 5.8 Balance de energías del evaporador.....	120
Figura 5.9 Representación de la cámara a enfriar	123
Figura 5.10 Esquema del evaporador y condensador.....	125
Figura 5.11 Comparación de la radiación con cielo despejado (I) y calculada con datos obtenidos del Atlas Solar (I2).....	129
Figura 5.12 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este- oeste sin rastrear (1) y este-oeste con ajuste diario (2)	130
Figura 5.13 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este oeste sin rastrear (1) y este-oeste con ajuste diario (2)	130
Figura 5.14 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este-oeste sin rastrear (1) y norte-sur sin rastrear (3).....	131
Figura 5.15 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este oeste sin rastrear (1) y norte sur con rastreamiento (4)	131
Figura 5.16 Geometría del reflector, semiángulo de aceptación 13° , inclinación 0° , porcentaje de truncamiento 75%, radio del absorbedor 3"	133

Figura 5.17 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase AB.....	134
Figura 5.18 Presión en función del tiempo de la fase AB.....	134
Figura 5.19 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase BC.....	135
Figura 5.20 Concentración en función del tiempo de la fase BC.....	135
Figura 5.21 Calor de condensación en función del tiempo de la fase BC	136
Figura 5.22 Temperatura de la cama vs longitud de la tubería del condensador	136
Figura 5.23 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase CD.....	137
Figura 5.24 Presión en función del tiempo de la fase CD	137
Figura 5.25 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase DA.....	138
Figura 5.26 Concentración en función del tiempo de la fase DA.....	138
Figura 5.27 Calor de condensación en función del tiempo de la fase DA	139
Figura 5.28 Resultados de la simulación en el programa realizado	141

CAPÍTULO VI

Figura 6.1 Esquema de la localización de los puntos de medición de presión y temperatura.....	145
Figura 6.2 Fotografía del equipo de refrigeración por adsorción solar construido	148
Figura 6.3 Esquema del equipo construido	149
Figura 6.3 Radiación solar y temperatura de la cama vs hora del día.....	152
Figura 6.4 Temperatura y presión de la cama vs hora del día	152
Figura 6.5 Diagrama del ciclo.....	153
Figura 6.6 Temperaturas varias vs hora del día.....	153
Figura 6.7 Temperatura del evaporador y ambiente vs hora del día	154

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
A_a	área del absorbedor	(m^2)
A_{ai}	área del aislante	(m^2)
A_c	área de la cubierta/colector	(m^2)
A_{cond}	área de transferencia del condensador	(m^2)
A_{ev}	área del evaporador	(m^2)
A_{pared}	área de la pared del cuarto a enfriar	(m^2)
A_r	área del reflector	(m^2)
A_t	altitud	(km)
C	índice de concentración	-
C_p	calor específico	(kJ/kgK)
COP	coeficiente de operación	-
COP_{Carnot}	coeficiente de operación del ciclo ideal de Carnot	-
C_{pC-A}	calor específico del carbón	(J/kg-K)
$C_{p_{agua}}$	calor específico del agua	(J/kgK)
$C_{p_{liq}}$	calor específico del líquido	(J/kg-K)
$C_{p_{aire}}$	calor específico del aire	(J/kgK)
$C_{p_{met-liq}}$	calor específico del metanol líquido	(J/kmol.K)
$C_{p_{met-v}}$	calor específico del metanol gaseoso	(J/kmol.K)
C_{sf}	constante empírica	-
D	coeficiente de afinidad	-
D_c	diámetro de la tubería del condensador/evaporador	(m)
$DMLT_{cond}$	diferencia media logarítmica de temperaturas del condensador	(K)
$DTML_{ev}$	diferencia media logarítmica del evaporador	(K)
$D_{tuberiaex}$	diámetro exterior de la tubería del evaporador	(m)
$D_{tuberiain}$	diámetro de la tubería interior	(m)
\dot{E}_{alm}	energía almacenada en el sistema	(W)
\dot{E}_{ent}	energía que entra al volumen de control	(W)
\dot{E}_g	energía generada en el volumen de control	(W)
\dot{E}_{sale}	energía que sale del volumen de control	(W)
G	radiación global	(W/m^2)
G_b	radiación directa	(W/m^2)
G_d	radiación difusa	(W/m^2)
G_g	radiación reflejada por el suelo	(W/m^2)
G_{on}	radiación extraterrestre	(W/m^2)
G_{sc}	constante solar	(W/m^2)
H	altura del reflector medida desde el centro del tubo absorbedor	(m)
H_h	hora del día	(horas)
H_t	altura truncada del reflector	(m)
H_{td}	radiación diaria total	(W/m^2)
H_d	radiación difusa	(W/m^2)
\overline{H}_g	entalpía molar parcial del adsorbente en fase	(kJ/mol)

Símbolo	Descripción	Unidades
	gaseosa	
\overline{H}_a	entalpía molar parcial del absorbente más gas o vapor de adsorbato en una solución sólida	(kJ/mol)
I	radiación horaria total	(W/m ²)
K _T	índice de claridad	-
$L_{colector}$	longitud del colector	(m)
$L_{tuberiacond}$	longitud de la tubería del condensador	(m)
$L_{fusiónagua}$	calor latente de fusión del agua	(J/kg)
L_{fg}	calor latente de evaporación del metanol	(J/kg)
L_{gf}	calor latente de condensación del metanol	(J/kg)
$L_{tuberiaev}$	longitud de la tubería del evaporador	(m)
M _e	masa total de adsorbente	(kg)
N	número de día en el año	-
N_{tubos}	número de tubos del colector	-
P	presión del adsorbente	(bar)
P _c	presión del condensador	(bar)
P _e	presión del evaporador	(bar)
P _r	presión relativa	-
Pr_{liq}	número de Prandtl del metanol líquido	-
P _{sat}	presión de saturación del adsorbato a la temperatura del adsorbente	(bar)
Q _{ad}	calor de adsorción	(J)
Q _{Cal}	calor para calentar la cama adsorbente y regenerar el adsorbente	(J)
Q _{cond}	calor disipado por el condensador	(J)
\dot{Q}_{cond}	flujo de calor del condensador	(W)
Q _{des}	calor de desorción	(J)
Q _{evap}	calor extraído del espacio a enfriar	(J)
\dot{Q}_{ev}	flujo de calor del evaporador	(W)
Q _{enf}	suministro de enfriamiento resultado de la evaporación del refrigerante	(J)
\dot{Q}_{enf}	flujo de calor extraído por el evaporador	(W)
Q _{Fuente}	calor entregado por la fuente para calentar el adsorbente	(J)
$\dot{Q}_{ganancia}$	flujo de calor ganado por las paredes de la cámara a enfriar por el ambiente	(W)
\dot{Q}_{met}	flujo de calor del metanol	W
Q _{producto}	calor extraído del producto	(J)
Q _s	calor disipado por el adsorbente	(J)
R	constante universal de los gases	(kJ/molK)
R1	diámetro de la tubería interior	(m)
R2	diámetro de la tubería exterior	(m)
R _a	número de Rayleigh	-
R _c	resistencia térmica por convección	(K/W)
Req _c	resistencia térmica equivalente del circuito del colector solar	(K/W)

Símbolo	Descripción	Unidades
R_k	resistencia térmica por conducción	(K/W)
R_r	resistencia equivalente	(Ω)
S	radiación absorbida	(W)
SCP	capacidad específica de enfriamiento	(W/kg)
T	temperatura del adsorbente	(K)
T_a	temperatura del absorbedor	(K)
T_{amb}	temperatura ambiente	(K)
T_{ai}	temperatura del aislante	(K)
T_{aguain}	temperatura inicial del agua	($^{\circ}$ C)
$T_{aguafin}$	temperatura final del agua	($^{\circ}$ C)
T_{airein}	temperatura inicial del aire	($^{\circ}$ C)
$T_{airefin}$	temperatura final del aire	($^{\circ}$ C)
T_c	temperatura de la cubierta ó temperatura del condensador	(K)
T_{camara}	temperatura del cuarto a enfriar	($^{\circ}$ C)
T_{C-A}	temperatura del carbón activado	(K)
T_e	temperatura del evaporador	(K)
T_{fc}	temperatura final del carbón activado	($^{\circ}$ C)
T_g	temperatura de regeneración del adsorbente	(K)
T_{ic}	temperatura inicial del carbón activado	($^{\circ}$ C)
T_r	temperatura del reflector	(K)
T_s	temperatura de la superficie	($^{\circ}$ C)
T_p	temperatura del adsorbente próximo a la pared	(K)
T_{sat}	temperatura de saturación a la presión del condensador	(K)
$T_{superficie}$	temperatura de la superficie del evaporador	($^{\circ}$ C)
T_w	temperatura de la tubería exterior	(K)
TEWI	impacto total equivalente de calentamiento	-
U_{cond}	coeficiente global de transferencia de calor del condensador	(W/m ² K)
U_{ev}	coeficiente de global de trasferencia de calor del evaporador	(W/m ² K)
V	velocidad del viento	(m/s)
V_r	voltaje de la fuente	(V)
X	concentración, cantidad de adsorbato que hay en el adsorbente por unidad de masa del adsorbente	(kg/kg)
X_{max}	concentración máxima, cantidad de máxima adsorbato que hay en el adsorbente por unidad de masa del adsorbente	(kg/kg)
X_{min}	concentración mínima, cantidad de mínima adsorbato que hay en el adsorbente por unidad de masa del adsorbente	(kg/kg)
X_{sat}	cantidad de adsorbato que hay en el adsorbente en el límite de saturación, por unidad de masa del adsorbente	(kg/kg)
W	ancho del reflector	(m)

Símbolo	Descripción	Unidades
W_o	máxima capacidad de adsorción	(m ³ /kg)
W_t	ancho truncado del reflector	(m)
a_{pared}	largo de la pared del cuarto a enfriar	(m)
b	constante de equilibrio de adsorción para el par de adsorbente-adsorbato	-
b_{pared}	ancho de la pared del cuarto a enfriar	(m)
c_{pared}	altura de la pared del cuarto a enfriar	(m)
$e_{aislante/paredext/paredin}$	espesor del aislante, pared exterior y pared interior	(m)
e_e	espesor equivalente del aislante	(m)
g	variable	-
g_r	gravedad	(m/s ²)
h	conductancia térmica	(W/m ² K)
h_{airee}	coeficiente de convección del aire circundante al evaporador	(W/m ² K)
$h_{aireext}$	coeficiente de convección de los alrededores de la cámara fría	(W/m ² K)
h_{airein}	coeficiente de convección del aire interior de la cama a enfriar	(W/m ² K)
hc	coeficiente de transferencia de calor por convección	(W/m ² K)
$hcai$	coeficiente de convección entre el aislante y el ambiente	(W/m ² K)
$hcaia$	coeficiente de convección entre el aislante y el ambiente	(W/m ² K)
hcc	coeficiente de convección entre la cubierta y el ambiente	(W/m ² K)
$hcra$	coeficiente de convección entre el reflector y el ambiente	(W/m ² K)
hrc	coeficiente de radiación entre la cubierta y el ambiente	(W/m ² K)
$hrac$	coeficiente de radiación entre el absorbedor y la cubierta	(W/m ² K)
$hrai$	coeficiente de radiación entre el aislante y el ambiente	(W/m ² K)
$hraia$	coeficiente de radiación entre el aislante y el ambiente	(W/m ² K)
$hrrar$	coeficiente de radiación entre el absorbedor y la cubierta	(W/m ² K)
$hrra$	coeficiente de radiación entre el reflector y el ambiente	(W/m ² K)
$hrrc$	coeficiente de radiación entre el reflector y la cubierta	(W/m ² K)
$h'_{fg=}$	calor latente modificado	(kJ/kg)
h_{airec}	coeficiente de convección del aire circundante al condensador	(W/m ² K)
h_{met}	coeficiente de convección del metanol	(W/m ² K)

Símbolo	Descripción	Unidades
k_{ai}	conductividad térmica del aislante	(W/mK)
k	conductividad térmica	(W/mK)
k_C	conductividad térmica del carbón en $r=R_2$	(W/mK)
k_{liq}	conductividad térmica del metanol líquido	(W/m.K)
k_m	conductividad térmica del material	(W/m ² K)
$k_{paredext/aislante/paredin}$	conductividad térmica pared exterior, aislante, y pared interior	(W/mK)
m_{aire}	masa de aire	(kg)
m_{ad}	masa de carbón activado en el disipador	(kg)
$\dot{m}_{ad/des}$	flujo másico adsorbido o desorbido	(kg/s)
m_{agua}	masa de agua	(kg)
\dot{m}_{cond}	flujo másico hacia el condensador	(kg/s)
\dot{m}_{ev}	flujo másico proveniente del evaporador	(kg/s)
n	exponente obtenido experimentalmente	-
n_r	número promedio de reflexiones	-
q	entalpía de desorción o calor de adsorción	(kJ/mol)
q''	flujo calórico real	(W/mw ² K)
q''_{max}	flujo calórico máximo	(W/mw ² K)
r	radio de la cama adsorbedora	(m)
r_a	radio del tubo absorbedor	(m)
r_d	relación entre radiación horaria total y la radiación diaria total	-
t	tiempo	(seg)
t_{ea}	tiempo que transcurre para enfriar el agua	(seg)
x	coordenada x del punto B que describe a la parábola	(m)
y	coordenada y del punto B que describe a la parábola	(m)
$\#h$	número de horas de sol en el día	(horas)
$\Delta H(X)$	entalpía de adsorción	(kJ/mol)
$\Delta H_{ad/des}$	calor de adsorción o desorción	(kJ/kg _{met})
$\Delta H_{f,g}$	entalpía de evaporación y/o condensación	(kJ/kg)
ρ_{liq}	densidad del adsorbato/metanol en estado líquido	(kg/m ³)
α	absortividad	-
α	coeficiente de dilatación cúbica	(m ³ /K)
α_a	absortividad del receptor	
α_b	absortividad del receptor de radiación directa	-
α_d	absortividad del receptor de radiación difusa	-
α_g	absortividad del receptor de radiación reflejada por el suelo	-
α_s	ángulo de la altitud solar	(°)
β	inclinación	(°)
δ	declinación	(°)
ϵ	emitancia	-
η	eficiencia de transferencia de calor	(%)

Símbolo	Descripción	Unidades
θ	ángulo incidencia radiación solar sobre un plano inclinado	($^{\circ}$)
θ_a	semiángulo de aceptación	($^{\circ}$)
θ_{at}	semiángulo de aceptación truncado	($^{\circ}$)
θ_p	ángulo de la parábola	($^{\circ}$)
θ_z	ángulo del zenit	($^{\circ}$)
ϕ	latitud	($^{\circ}$)
ρ	densidad	(kg/m ³)
ρ_{liq}	densidad del líquido	(kg/m ³)
ρ_p	distancia entre el punto B y C de la parábola	(m)
ρ_r	reflectividad de la parábola	-
ρ_v	densidad del gas	(kg/m ³)
τ	transmitancia	-
τ_b	transmitancia atmosférica para la radiación directa	-
τ_c	transmisividad de la cubierta	
$\tau_{c,b}$	transmisividad de la cubierta a radiación directa	-
$\tau_{c,d}$	transmisividad de la cubierta a radiación difusa	-
$\tau_{c,g}$	transmisividad de la cubierta a radiación reflejada por el suelo	-
τ_{cpc}	transmisividad del CPC	-
$\tau_{cpc,b}$	transmisividad del CPC a radiación directa	-
$\tau_{cpc,d}$	transmisividad del CPC a radiación difusa	-
$\tau_{cpc,g}$	transmisividad del CPC a radiación reflejada por el suelo	-
τ_d	transmitancia atmosférica para la radiación difusa	-
μ_{liq}	viscosidad del metanol líquido	(kg/m.s)
ω	ángulo horario	($^{\circ}$)
ω_s	ángulo horario del ocaso	($^{\circ}$)
γ	acimut de la superficie	($^{\circ}$)
γ_s	ángulo del acimut solar	($^{\circ}$)
σ	constante de Steffan Boltzman	W/m ² K ⁴
σ_{liq}	tensión superficial del metanol de la interface liquida-vapor	(N/m)

Subíndices:

C-A= carbón activado

Cad = cama de adsorción

met-liq = metanol líquido

met-v = metanol gaseoso

RESUMEN

El presente estudio trata dos aspectos, la construcción de un equipo para la obtención de las isósteras del par de adsorción y el diseño, construcción y pruebas de un sistema de enfriamiento por adsorción solar.

Cada par de adsorción presenta diferentes constantes de la ecuación de equilibrio Dubinin Astakhov (D-A) por lo que se construyó un equipo de obtención de isósteras que permiten calcular dichas constantes. Cabe resaltar que en el país no existe laboratorio alguno que brinde este servicio. Después de realizar algunas pruebas con este equipo se calcularon las constantes del par carbón activado ECOK-70-metanol, $n=1.18$, $W_0=0.138$ L/kg y $D=3.48E-4$, las cuales son utilizadas en el diseño del sistema de enfriamiento.

Para el diseño del equipo de refrigeración primero se planteó el modelo matemático, por medio de un programa realizado en MATLAB 7.7 se simuló su comportamiento y se obtuvieron las dimensiones del refrigerador que se construyó utilizando los materiales existentes en el país. El sistema de enfriamiento está constituido principalmente por: un colector solar parabólico compuesto (CPC) donde se encuentra la cama adsorbedora, un condensador, y un recinto a enfriar donde está localizado el evaporador.

Se realizaron pruebas con el sistema de enfriamiento cuya área de colección solar es de 0.98m^2 en días nublados y soleados. La diferencia de temperaturas en el cámara fría fue de 10°C , mientras que la simulación contemplaba una diferencia de 30°C . Los resultados experimentales muestran una discrepancia sustancial entre el ciclo teórico utilizado en el diseño y el ciclo real obtenido en la práctica.

PRESENTACIÓN

Los sistemas de enfriamiento comúnmente son a base de compresión mecánica. En las últimas décadas no han existido mejoras sustanciales de su eficiencia debido a que han llegado a un límite de innovación; por el contrario existe una gran preocupación por el daño al medio ambiente causado por estos sistemas. Los refrigerantes hidrofluorocarbonos (HFC) son los más utilizados actualmente en nuestro país pero estos tienen un potencial de calentamiento global (PCG) de 1300, mientras que el CO₂ emitido por motores de combustión tiene un PCG de 1. Además debido a que el Ecuador es un país en vías de desarrollo aún cuantifica equipos de refrigeración que utilizan refrigerantes causantes de la destrucción de la capa de ozono. Estos hechos y la crisis energética que se ha presentado en los últimos años han generado la necesidad de buscar alternativas para el sistema tradicional de refrigeración. Una opción que en los últimos años ha tomado gran interés es la refrigeración por adsorción ya que los refrigerantes utilizados tienen un potencial de calentamiento global PCG =0 y un potencial de destrucción de la capa de ozono PDO=0.

Alrededor del 10 al 20% de la electricidad producida en el mundo es consumida en aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado. Esto implica que cualquier esfuerzo por mejorar la eficiencia de estos o por producir sistemas alternativos es válido. El ciclo convencional de refrigeración por compresión de vapor demanda una entrada de trabajo mecánico, el cual normalmente es proveído por un motor eléctrico. El uso de energía solar en los sistemas de enfriamiento permitirá disminuir el consumo y gasto en energía eléctrica, lo cual reducirá las emisiones de CO₂ relacionadas con la generación de electricidad, evitará la importación de energía, y ayudará al sistema interconectado de electricidad a sobrellevar de mejor manera los picos de sobredemanda. La energía solar es abundante, limpia, amigable con el ambiente y no tiene consumo de combustibles fósiles. Es importante resaltar que cuando sucede un pico en la energía solar ahí tiene el pico la carga de enfriamiento.

Los sistemas de refrigeración solar están siendo utilizados en países en aplicación de conservación de vacunas y alimentos (especialmente pescado), producción de medicinas, aire acondicionado, refrigeradoras, chillers, etc. Estos tienen bajos costos de funcionamiento, su operación está libre de ruido, son independientes de la energía eléctrica pero presentan bajas eficiencias. Aún queda mucho que estudiar de la refrigeración por adsorción y como futuros ingenieros nos sentimos muy orgullosos de haber iniciado este estudio en el Ecuador.

El estudio realizado involucra el diseño y construcción de un refrigerador que funciona con el principio de adsorción solar. Este trabajo es pionero en el país puesto que ninguna universidad ni unidad investigativa ecuatoriana tiene publicaciones al respecto. Cabe resaltar que se utilizó un concentrador solar parabólico compuesto, el cual no se ha estudiado antes en la Escuela Politécnica Nacional.

El proyecto está estructurado en siete capítulos descritos a continuación:

En el Capítulo I se presentan los fundamentos y las ecuaciones que rigen el fenómeno de la adsorción y se describen los principales pares de adsorción.

En el Capítulo II se estudian el ciclo de enfriamiento por adsorción, sus componentes y los parámetros que permiten evaluar su eficiencia.

En el Capítulo III se describen los conceptos básicos de la radiación solar, sus principales ecuaciones y los principales tipos de colectores.

En el Capítulo IV se obtienen las isósteras de adsorción que permiten caracterizar al par carbón activado-metanol a través de la construcción de un equipo para dicho propósito.

En el Capítulo V se presentan el diseño y simulación del sistema de enfriamiento. Una vez construido el modelo matemático se lo simula en MATLAB 7.7 y se dimensiona el equipo de refrigeración.

En el Capítulo VI se describen la construcción y pruebas del refrigerador solar. El funcionamiento que demuestra el equipo construido es satisfactorio.

En el Capítulo VII se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

CAPÍTULO I

FENÓMENO DE LA ADSORCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la adsorción tiene diversas aplicaciones en la industria como limpieza de agua, extracción de humedad del aire comprimido, separación, etc. Es conveniente conocer muy bien los fundamentos de la adsorción para poder aplicarla al enfriamiento. En el presente capítulo se describen los principios y características de la adsorción y se presentan las semejanzas y diferencias entre los dos tipos de adsorción (física y química). Se describen los principales adsorbentes que se pueden encontrar en el mercado, los parámetros de caracterización de los mismos, el equilibrio de adsorción y la desorción.

1.2 FUNDAMENTOS DE LA ADSORCIÓN

1.2.1 DEFINICIÓN

La adsorción consiste en una retención selectiva de uno o más componentes de un gas o un líquido (adsorbato) en la superficie de un sólido microporoso (adsorbente). Durante el presente trabajo se hablará sobre la adsorción en fase gaseosa, a menos que se explique lo contrario. La adsorción es un fenómeno dinámico por lo que las moléculas de adsorbato están continuamente chocando con las superficies del sólido adsorbente, adsorbiendo parte de ella. La definición que propone la “International Union of Pure Applied Chemistry” es el enriquecimiento, en uno o más componentes, de una superficie interfacial. El proceso inverso se lo conoce como desorción o regeneración, el cual consiste en la separación del adsorbato y del adsorbente.¹

1.2.2 TIPOS DE ADSORCIÓN

Según las diferentes naturalezas de las fuerzas de atracción adsorbato-adsorbente, pueden distinguirse dos tipos de adsorción: fisisorción (adsorción física) y quimisorción (adsorción química).

¹ GAMARRA P., PARDO C., Equilibrio de Adsorción de Mezclas Gaseosas en Tamices Moleculares, Universidad Complutense de Madrid, 2005, pg. 6

1.2.2.1 Fisisorción

Es un proceso fácilmente reversible en el cual las moléculas adsorbidas se fijan en la superficie del adsorbente debido a fuerzas intermoleculares de atracción conocidas como fuerzas de Van der Waals. La sustancia adsorbida (fisisorbida) conserva su naturaleza química. Cuando las fuerzas de atracción intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre moléculas del gas mismo, el gas se condensa sobre la superficie del sólido desprendiendo calor, aunque su presión sea menor que la presión de vapor que corresponde a la temperatura predominante. La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella sino que permanece totalmente sobre la superficie. En la figura 1.1 se observa el proceso de la fisisorción.

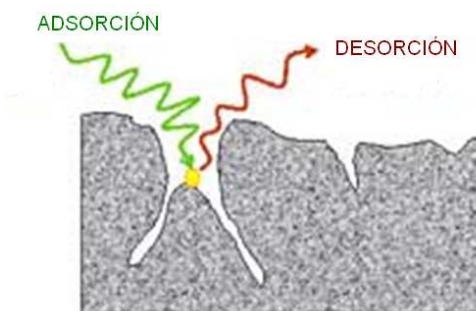


Figura 1.1 Esquema del proceso de fisisorción ²

1.2.2.2 Quimisorción

Es el resultado de la interacción química entre sólido y una sustancia adsorbida. Las fuerzas intermoleculares que intervienen son de unión química, estas pueden variar considerablemente y puede suceder que no se formen compuestos químicos en el sentido usual; pero las fuerzas de adhesión son generalmente mayores que las observadas en la fisisorción. La sustancia adsorbida (quimisorbida) sufre una transformación para dar lugar a una especie distinta. El calor liberado durante la quimisorción es comúnmente grande. Es un proceso frecuentemente irreversible. En la figura 1.2 se observa el proceso de la quimisorción. ³

² http://www.camfilfarr.com/cou_espana/filtertechnology/proffilt/adsorption.cfm

³ TREYBAL R., Operaciones de Transferencia de Masa, Mc-GrawHill, México, 1990, pg. 626-627

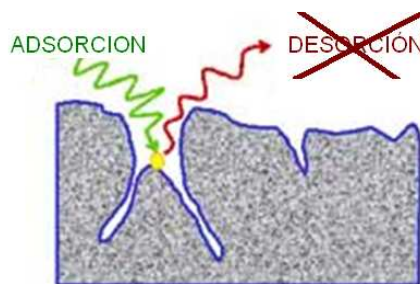


Figura 1.2 Esquema del proceso de quimisorción ⁴

En la tabla 1.1 se puede observar las diferencias principales entre los procesos de adsorción química y física.

Tabla 1.1 Diferencias entre la Quimisorción y Fisorción

ADSORCIÓN FÍSICA	ADSORCIÓN QUÍMICA
Bajo calor de adsorción (dos a tres veces el calor latente de vaporización)	Alto calor de adsorción (del orden del calor de una reacción química)
Significativa a temperaturas relativamente bajas	Posible en un amplio intervalo de temperaturas
No activada	Activada
Reversible	Irreversible
No hay transferencia de electrones pero puede producir la polarización del adsorbato	Hay transferencia de electrones en formación de enlace entre el adsorbente y el adsorbato

A continuación al referirse a la adsorción se entenderá explícitamente que se habla sobre la fisorción, mientras no se especifique lo contrario.

1.2.3 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS ADSORBENTES

Entre los parámetros que caracterizan a los adsorbentes se definen los siguientes:

1.2.3.1 Tamaño de poro

Distancia entre dos paredes opuestas del poro.

⁴ http://www.camfilfarr.com/cou_espana/filtertechnology/proffilt/adsorption.cfm

1.2.3.2 Volumen de poro

Suma del volumen de los micro (3-50 Å), meso (50-1000 Å) y macroporos (1000-5000 Å). Se expresa generalmente en cm^3/g .

1.2.3.3 Distribución de tamaño poro

Es una propiedad que indica la fracción de espacio dentro de una partícula ocupada por micro, meso y macroporos.

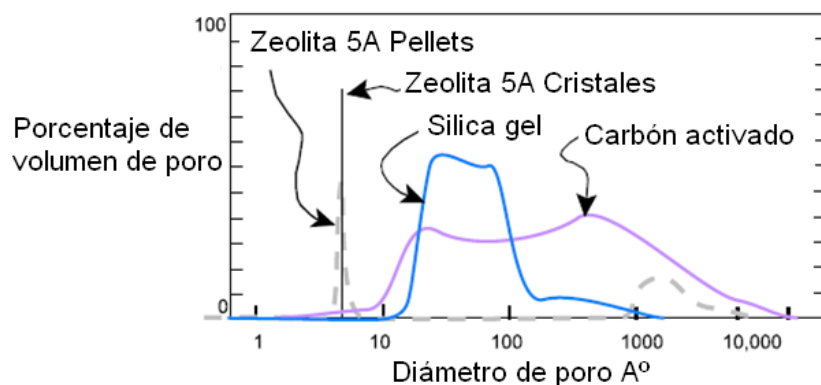


Figura 1.3 Distribución de tamaño de poro de clases comunes de adsorbentes ⁵

1.2.3.4 Área de superficie

Es el área disponible para la adsorción. En general mientras mayor es el área mayor es la capacidad de adsorción, aunque este parámetro por sí solo no es una base para escoger un buen adsorbente. Se expresa en m^2/g . ⁶

1.2.3.5 Densidad aparente

Es igual al peso de la cantidad de material dividido por el volumen que ocupa (ajustados por el contenido de humedad).

1.2.3.6 Índice de yodo (del carbón activado)

Se refiere a los miligramos de solución de yodo a 0.02 normal adsorbidos durante el ensayo descrito en la norma ASTM D4607 "Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon". El número de yodo es un

⁵ KENT S., Adsorbent Selection, Adsorption Research, E.E.U.U, pg.4

⁶ Departamento de la Armada Americana, Adsorption Design Guide, 2001, pg. 23

indicador relativo de la porosidad en un carbón activado, pero no necesariamente da una medida de la habilidad del carbón de adsorber otras especies.

1.2.3.7 Índice de abrasión (del carbón activado)

Es la medida de la resistencia de las partículas de carbón a una acción mecánica abrasiva obtenida mediante esferas de acero en un molino de tambor rotante.

1.2.3.8 Índice de azul de metileno (del carbón activado)

Se lo define como el número de mililitros de una solución estándar (0,15%) de azul de metileno, decolorados por 0,1 gramos de carbón activado.⁷

1.2.4 PRINCIPALES ADSORBENTES

Las formas de presentación de los materiales comerciales son: pellets, gránulos, bloques y polvos. Entre los materiales adsorbentes más comunes se encuentra:

1.2.4.1 Arcillas Naturales

Principalmente son silicatos de aluminio y magnesio, bajo la forma de atapulguita y montmorillonita. Los tamaños comerciales van desde grandes gránulos hasta polvos finos.

1.2.4.2 Arcillas Activadas

La arcilla más común es la bentonita, estas arcillas no muestran ningún poder de adsorción hasta que se activan mediante un tratamiento con ácido sulfúrico o clorhídrico. Posterior al tratamiento la arcilla se lava, se seca y se reduce a un polvo fino.



Figura 1.4 Gránulos de arcilla activada⁸

⁷ Departamento de la Armada Americana, Adsorption Design Guide, 2001, pg. 24

⁸ <http://www.mariopilato.com/bentonita-sodica.htm>

1.2.4.3 Sílica Gel

Los adsorbentes de sílica gel están compuestos de una red tridimensional rígida de partículas esféricas de sílice (SiO_2) coloidal amorfa. Se prepara mezclando silicato de sodio con ácido sulfúrico, resultando en un precipitado de gel, el cual es secado. La sílica gel generalmente es clara o levemente tinturada, y transparente o translúcida (figura 1.5).

Tabla 1.2 Propiedades típicas del adsorbente sílica gel ⁹

PROPIEDADES DE LA SÍLICA GEL	
Área superficial (m^2/g)	830
Densidad (kg/m^3)	720
Temperatura de reactivación ($^{\circ}\text{C}$)	130-280
Volumen de poros (% del total)	50-55
Tamaño de poro (nm)	1-740
Volumen de poro (cm^3/g)	0.42



Figura 1.5 Esferas de sílica gel ¹⁰

1.2.4.4 Carbón Activado

Es un carbón muy poroso que se obtiene por descomposición térmica de la materia prima de origen vegetal (madera, cáscara de coco, almendra, etc.) o de origen animal (huesos) y posterior activación con aire, vapor de agua o dióxido de carbono a elevada temperatura ($700\text{-}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), o mediante tratamientos químicos, con lo que se desarrolla una elevada superficie específica. Existen cientos de tipos de carbones activados, cada uno con propiedades diferentes. Los carbones activados pueden dividirse en dos grandes grupos: los empleados en adsorción en fase gaseosa y los utilizados en fase líquida. La principal diferencia entre

⁹ ROUSSEAU R., Handbook of Separation Process Technology, John Wiley & Sons, Canada, 1987, pg. 652

¹⁰ http://es.wikipedia.org/wiki/Silica_gel

ambos consiste en la distribución de tamaño de poros. En los primeros, la mayor parte son microporos (3 a 50 Å) y macroporos (1000 a 5000 Å), con un volumen pequeño de mesoporos (50 a 1000 Å). Los segundos presentan una cantidad importante de mesoporos, permitiendo el acceso de los líquidos a la estructura microporosa del adsorbente.

La estructura del carbón activado se considera como una disposición irregular de microcristales bidimensionales dispuestos en planos paralelos. Cada microcristal está formado por átomos de carbono dispuestos hexagonalmente (figura 1.6). Los espacios que quedan entre estos planos constituyen la estructura porosa del carbón, en la que quedan retenidas las moléculas.

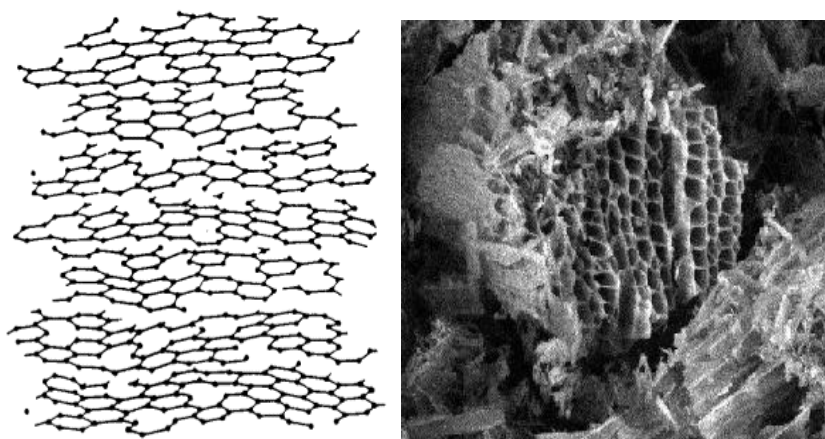


Figura 1.6 Estructura de carbón activado¹¹

Tabla 1.3 Propiedades típicas del adsorbente carbón activado¹²

PROPIEDADES DEL CARBÓN ACTIVADO				
	Carbón fase líquida		Carbón fase gaseosa	
Propiedades físicas	Base madera	Base carbón	Carbón Granular	Carbón Granular
Tamaño de red (Tyler)	-100	-8 +30	-4 +10	-6 +14
Número de iodo	700	950	1000	1000
Densidad (kg/m ³)	250	500	500	530
Ceniza (%)	7	8	8	4

Entre algunos tipos de carbón activado encontramos:

¹¹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Activated-carbon.jpg>

¹² ROUSSEAU R., pg. 654

- a) Carbón activado en polvo (*Powdered Activated Carbon*): Está hecho de partículas de triturados o pulverizados carbono.
- b) Carbón activado granular (*Granular Activated Carbon*): Se lo puede encontrar en forma granular o de extruidos.
- c) Tamiz molecular de carbón activado: Presenta una distribución de tamaños de poro muy estrecha, posee la característica de diferenciar las moléculas en base a sus diferentes dimensiones moleculares.¹³



Figura 1.7 Formas comerciales del carbón activado¹⁴

1.2.4.5 Zeolita

Las zeolitas son un grupo de minerales de una clase de aluminosilicatos cristalinos basados en un esqueleto estructural aniónico rígido, con canales y cavidades bien definidas. La fórmula general de la composición de las zeolitas por celda unitaria es: $M_x/n[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot (mH_2O)$, donde los cationes M de valencia n neutralizan las cargas negativas del esqueleto estructural del aluminosilicato. Aunque existen más de 35 zeolitas naturales y alrededor de 100 sintéticas, sólo algunas tienen aplicación práctica. Gracias a que tiene un tamaño de poro entre 0.3 a 0.8 nm., las zeolitas pueden adsorber selectivamente moléculas

¹³ Departamento de la Armada Americana, Adsorption Design Guide, 2001, pg. 21

¹⁴ <http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm>

dependiendo de su tamaño. Las zeolitas son distintas a otros adsorbentes debido a que la adsorción toma lugar dentro de los cristales.

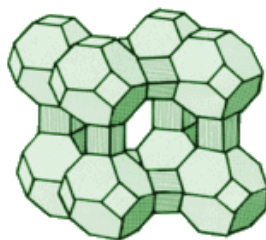


Figura 1.8 Cristal de zeolita ¹⁵

Tabla 1.4 Propiedades típicas del adsorbente zeolita¹⁶

Tipo de Zeolita	Designación	Catión	Tamaño de Poro (nm)	Densidad (kg/m ³)
A	3A	K	0.3	670-740
	4A	Na	0.4	660-720
	5A	Ca	0.5	670-720
X	13X	Na	0.8	610-710
Modernita	AW-300 Zeolon-300	Na + mezcla de cationes	0.3-0.4	720-800
Chabazita	AW-300	Mezcla de cationes	0.4-0.5	640-720

1.2.4.6 Adsorbentes poliméricos

Estos adsorbentes están formados generalmente por una matriz aromática o alifática. Las principales características de estos adsorbentes son:

- Facilidad de regeneración mediante disolvente apropiados
- No se producen adsorciones irreversibles
- Buena homogeneidad de su superficie adsorbente
- Gran estabilidad térmica, pudiendo utilizarse incluso a temperaturas de 250°C¹⁷

¹⁵ HORN M., RAMOS M., Diseño de un Prototipo Experimental de Refrigeración por Adsorción

¹⁶ ROUSSEAU R., pg. 649

¹⁷ Departamento de la Armada Americana, Adsorption Design Guide, 2001, pg. 21

1.2.5 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ADSORCIÓN

- La adsorción es un proceso exotérmico (libera energía), mientras que la desorción es un proceso endotérmico. Las energías típicas implicadas en el proceso están entre 8.38 a 41.87 kJ/mol, estas son del mismo orden de magnitud que los calores latentes de vaporización de los adsorbatos puros.
- Es un fenómeno reversible en la mayor parte de los casos.
- No trae consigo cambios de volumen en el sólido adsorbente.
- El equilibrio de la adsorción entre la fase adsorbida y la fase gaseosa de un adsorbato (asumiendo que no hay otras especies presentes) requiere de dos variables de estado, la presión y la temperatura usualmente, para definir el estado del sistema.
- Por regla general, a igual presión, la cantidad de gas adsorbido sobre un lecho de sólido adsorbente decrece al aumentar la temperatura, mientras que a igual temperatura, incrementos de presión conducen a incrementos en la masa adsorbida.
- La adsorción es selectiva. Algunos gases son adsorbidos extensamente, otros los son ligeramente y otros no lo son.
- La adsorción es muy rápida. Sin embargo, la velocidad de adsorción depende del grado de saturación del adsorbente; es más rápida cuando solamente una pequeña fracción del adsorbente está saturada.
- La extensión de la adsorción depende de la temperatura. Mientras mayor sea la temperatura sobre la temperatura crítica¹⁸ del gas, menos será este adsorbido. Depende también de la superficie del adsorbente, de aquí que, permaneciendo los otros factores constantes, mientras más poroso sea el adsorbente, mayor será su poder de adsorción.
- La extensión de la adsorción por unidad de peso de adsorbente, depende de la presión parcial del gas adsorbido. Sin embargo, el sólido al fin y al cabo se satura y, naturalmente, una vez que se haya alcanzado esta

¹⁸ Temperatura crítica es la temperatura límite por encima de la cual un gas no puede ser licuado por compresión. Por encima de esta temperatura no es posible condensar un gas aumentando la presión. Las sustancias a temperaturas superiores de la crítica tienen un comportamiento muy parecido al de un gas ideal.

condición, un aumento ulterior en la presión no tendrá ningún efecto en la cantidad adsorbida.¹⁹

1.3 EQUILIBRIO Y MODELOS DE LA ADSORCIÓN

1.3.1 DEFINICIÓN Y REPRESENTACIÓN

El concepto de equilibrio de adsorción involucra la medida y correlación de la capacidad de adsorción, selectividad, y datos de regeneración. Generalmente, equilibrio es la restricción que limita a cada uno de estos factores vitales en la aplicación de la adsorción. La capacidad de adsorción es la cantidad de adsorbato que hay en el adsorbente por unidad de masa del adsorbente. La siguiente ecuación expresa una función arbitraria de la presión y temperatura.²⁰

$$X=f(P,T)|_T \quad (1. 1)$$

Donde:

X= cantidad de adsorbato que hay en el adsorbente por unidad de masa del adsorbente (kg/kg)

P = presión del adsorbato (bar)

T = temperatura del adsorbente (K)

Las tres formas fundamentales de representar el equilibrio de adsorción en función de las variables que dependen del mismo son las siguientes:

- Presión constante (isobaras de adsorción).
- Concentración de adsorbato en el adsorbente constante (isósteras de adsorción).
- Temperatura constante (Isotermas de adsorción)

La última es la más utilizada para representar datos de equilibrio. Los diferentes tipos de isotermas se representan en la figura 1.9.

¹⁹ GONZÁLEZ M., GONZÁLEZ M., Refrigeración Solar por Adsorción con Sistema de Captación CPC: Experimentos y Modelo, Tesis previa a la obtención de grado de Doctor en Ciencias Físicas, Departamento de Física Universidad de Burgos, 2006, pg. 3

²⁰ KENT S., Adsorbent Selection, Adsorption Research, E.E.U.U, pg.9

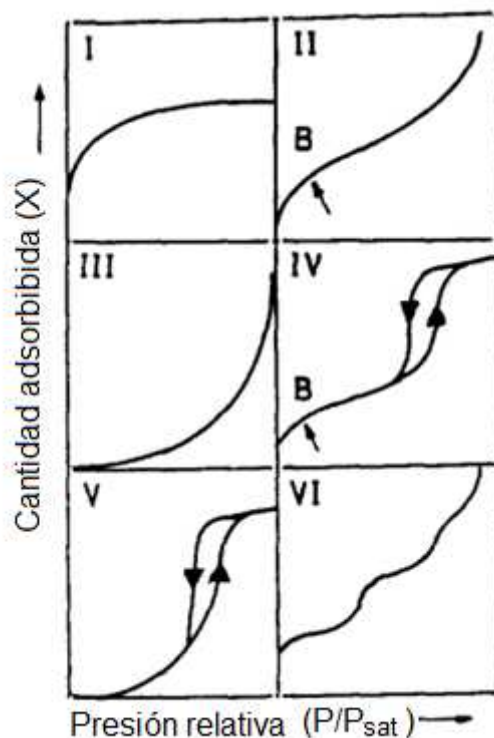


Figura 1.9 Tipos de isothermas de adsorción ²¹

La isoterma reversible del tipo I es cóncava hacia el eje de la presión y la cantidad adsorbida se aproxima a un valor límite cuando " P/P_{sat} "²² tiende a la unidad. Las isothermas del tipo I se presentan en un sólido microporoso con superficies externas relativamente pequeñas como por ejemplo carbón activado, zeolita y ciertos óxidos porosos. El límite de adsorción está determinado por el volumen accesible de microporos, más que por el área superficial interna. La isoterma reversible del tipo II es la forma normal que se obtiene con un adsorbente no poroso o macroporoso, esta representa una adsorción en monocapa-multicapa sin restricciones. Se admite frecuentemente que el punto "B", el principio de la parte central casi lineal de la isoterma, señala el momento en que el recubrimiento de la monocapa está completo, indicando el comienzo de la adsorción en multicapa.

La isoterma de adsorción tipo III es convexa hacia el eje de la presión en todo su curso y, por tanto, no presenta un punto B. Las isothermas de este tipo no son

²¹ GAMARRA P., PARDO C., pg. 25-26

²² P_{sat} es la presión de saturación del adsorbato a la temperatura del adsorbente (bar)

corrientes, pero hay un cierto número de sistemas que dan isotermas con una curvatura gradual y un punto B indiscernible. Rasgos característicos de las isotermas tipo IV son su ciclo de histéresis, que se asocia con la condensación capilar en mesoporos, y el límite de la cantidad adsorbida en un intervalo de presión alta. La parte inicial de la isoterma del tipo IV se atribuye a la adsorción en monocapa-multicapa, ya que sigue el mismo camino que la parte correspondiente de una isoterma del tipo II. Se encuentran isotermas del tipo IV en muchos adsorbentes meso porosos industriales. La isoterma de tipo V se obtiene con ciertos adsorbentes porosos con una distribución irregular de tamaño de poros, presenta también ciclo de histéresis y es muy poco frecuente. La isoterma de tipo VI, donde la mejor o peor definición de los escalones dependen del sistema y de la temperatura, representa la adsorción escalonada en multicapa sobre una superficie uniforme no porosa. La altura del escalón representa la capacidad de adsorción para cada capa adsorbida y, en el caso más simple permanece casi constante en dos o tres capas.

1.3.2 MODELOS DE EQUILIBRIO DE LA ADSORCIÓN

1.3.2.1 Modelo de Lagmuir

El modelo propuesto por Lagmuir se basa en que la adsorción sucede sobre una superficie de adsorbente idealizada como un conjunto de sitios regularmente dispuestos que pueden aceptar una única molécula de adsorbato o bien quedar vacíos. La ecuación que resulta de este modelo es la siguiente:

$$X = X_{\text{sat}} \left(\frac{bP}{1+bP} \right) \quad (1. 2)$$

Donde:

X = concentración, cantidad de adsorbato que hay en el adsorbente por unidad de masa del adsorbente (kg/kg)

X_{sat} = cantidad de adsorbato que hay en el adsorbente en el límite de saturación, por unidad de masa del adsorbente (kg/kg)

b = constante de equilibrio de adsorción para el par adsorbente-adsorbato, es una función de la temperatura del adsorbato

P = presión del adsorbato (bar)

El modelo de Lagmuir mejor se adapta a la adsorción en monocapa, mientras que la fisisorción usualmente involucra multicapas, por lo que esta ecuación no es frecuentemente aplicable a la adsorción física.²³

1.3.2.2 Modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Modifica el modelo de Lagmuir, que asume que la cobertura del adsorbente es exclusivamente de monocapa, considerando en cambio que en la superficie externa y sobre los poros de adsorbente, pueden depositarse varias capas de moléculas de adsorbato. A continuación se presenta esta ecuación:²⁴

$$X = X_{\text{sat}} \left\{ \frac{bP_r}{[1+(b-1)P_r](1-P_r)} \right\} \quad (1.3)$$

Donde:

P_r = presión relativa (P/P_{sat})

P_{sat} = presión de saturación del adsorbato a la temperatura del adsorbente (bar)

1.3.2.3 Modelos de Dubinin-Radushkevich (D-R) y Dubinin-Astakhov (D-A)

Estos modelos se aplican a adsorbentes microporosos con tamaño de poros menores a 20 \AA , como carbón activado, zeolita, y algunos tipos de sílica gel. Los modelos de Lagmuir y BET, descritos anteriormente, asumen que la adsorción ocurre en la superficie con la formación de una o más capas sucesivas. Por otro lado, la teoría de Dubinin caracteriza a la adsorción en adsorbentes microporosos como un llenado de volumen del espacio destinado a la adsorción. La ecuación que resumen el modelo original, Dubinin-Radushkevich (D-R), se acostumbra escribir de la siguiente manera:

$$X(P, T) = W_0 \rho_{\text{liq}} \exp \left[-D \left[T \ln \left(\frac{P_{\text{sat}}}{P} \right) \right] \right] \quad (1.4)$$

Donde:

²³ ASUMPINPONG K., Development of a Microchannel Device for Adsorption Cooling Application, Tesis previa a la obtención del grado de doctor en ciencias, Universidad Estatal de Oregon, 2009, pg. 29-31

²⁴ KENT S., Adsorbent Selection, Adsorption Research, E.E.U.U, pg. 12-13

W_o = máxima capacidad de adsorción (m^3/kg)

ρ_{liq} = densidad del adsorbato en estado líquido (kg/m^3)

D = coeficiente de afinidad, que depende de las características del adsorbato y adsorbente.

W_o y D suelen considerarse como parámetros y sus valores se pueden obtener mediante ajuste a partir de medidas experimentales de adsorción. Un refinamiento de la ecuación D-R contribuye a la ecuación Dubinin-Astakhov (D-A) presentada a continuación.

$$X(P, T) = W_o \rho_{liq} \exp \left[-D \left[T \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right] \quad (1.5)$$

Donde:

n = exponente obtenido experimentalmente

El exponente n se adapta mejor a los resultados experimentales para adsorción sobre sólidos microporosos. Por este motivo la ecuación D-A es la más utilizada para modelar sistemas adsorbente-adsorbato en aplicaciones de refrigeración.²⁵

1.3.3 CALOR DE ADSORCIÓN

El calor de adsorción, a cualquier concentración “X” de adsorbato sobre el sólido, se define como la entalpía de la combinación adsorbato-adsorbente menos la suma de las entalpías del peso unitario del adsorbente sólido puro y suficiente sustancia adsorbida pura (antes de la adsorción) para obtener la concentración requerida X, todo a la misma temperatura. La temperatura depende del equilibrio de la presión de vapor y es gobernada por la ecuación de Clausius-Clapeyron.

$$\left(\frac{d \ln (P)}{dT} \right)_X = \frac{\overline{H}_g - \overline{H}_a}{RT^2} \quad (1.6)$$

Donde:

\overline{H}_g = entalpía de la combinación adsorbato-adsorbente en fase gaseosa (kJ/mol)

\overline{H}_a = entalpía molar parcial del adsorbente más entalpía molar parcial del adsorbato en una solución sólida (kJ/mol)

²⁵ GONZÁLEZ M., pg. 5

R = constante universal de los gases (kJ/molK)

Ahora es posible definir la entalpía de adsorción como:

$$\Delta H(X) = -(\overline{H}_g - \overline{H}_a) = -q \quad (1.7)$$

Donde:

$\Delta H(X)$ = entalpía de adsorción (kJ/mol)

q = entalpía de desorción o calor de adsorción (kJ/mol)

El calor de adsorción es calculado con la ayuda de la isoterma de adsorción integrando la correlación de Clapeyron en la suposición que el calor de adsorción es dependiente de la temperatura. El objeto de esta aproximación, es obtener las líneas de concentración constante llamadas isósteras que se expresan en un gráfico logaritmo natural de la presión ($\ln P$) versus la temperatura (T) que se muestra la figura 1.10.²⁶

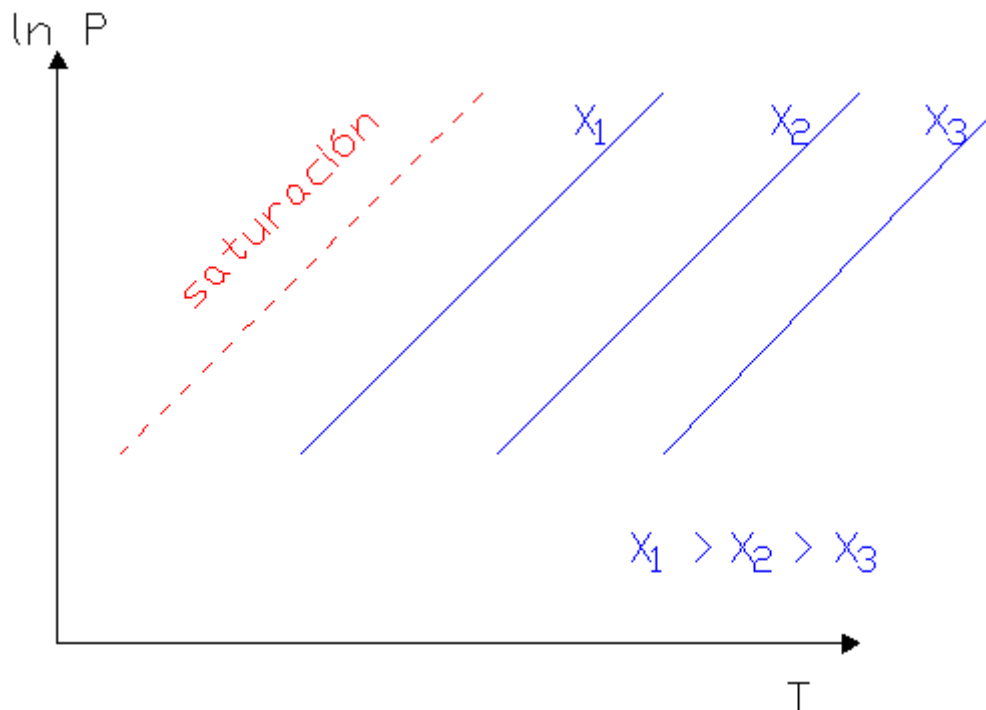


Figura 1.10 Representación gráfica $\ln(P)$ y T , ecuación D-A ²⁷

²⁶ KARGE H., WEITKAMP J., Adsorption and Diffusion, Springer, Alemania, 2008, pg. 16

²⁷ Elaboración propia

1.4 DESORCIÓN

La palabra desorción denota el proceso opuesto a la adsorción, en el que la cantidad adsorbida por el adsorbente disminuye. Adsorción y desorción se usan frecuentemente a modo de objetivos para indicar la dirección desde la que se han alcanzado las cantidades adsorbidas. Se han desarrollado diversas técnicas para conseguir la desorción de un adsorbato del sólido en el que esté retenido. Estas técnicas se basan en las propiedades del fenómeno de la adsorción, como la disminución de la cantidad adsorbida al disminuir la concentración en la fase fluida y al aumentar la temperatura. Así las técnicas para lograr la desorción son:

- Aumento de la temperatura.
- Disminución de la presión total.
- Desplazamiento con otro adsorbato.²⁸

1.5 HISTÉRESIS

La histéresis de adsorción aparece cuando la curva de desorción no coincide con la curva de adsorción. Los ciclos de histéresis pueden presentar una amplia variedad de formas. Dos tipos extremos se designan en la figura 1.11 como H1 y H4. En el primero, las dos ramas son casi verticales y aproximadamente paralelas en el intervalo apreciable de cantidades adsorbidas, mientras que en el último son aproximadamente horizontales y paralelas en un amplio rango de " P/P_{sat} ". En ciertos aspectos, los tipos H2 y H3 pueden considerarse entre los dos extremos. Un rasgo común en muchos ciclos de histéresis es que la zona pendiente de la rama de desorción que conduce al punto inferior de cierre del ciclo, se presenta, para un adsorbato dado, a una determinada temperatura, a una presión casi independiente de la naturaleza del adsorbente poroso, pero que depende principalmente de la naturaleza del adsorbato.

²⁸ GAMARRA P., PARDO C., pg.27

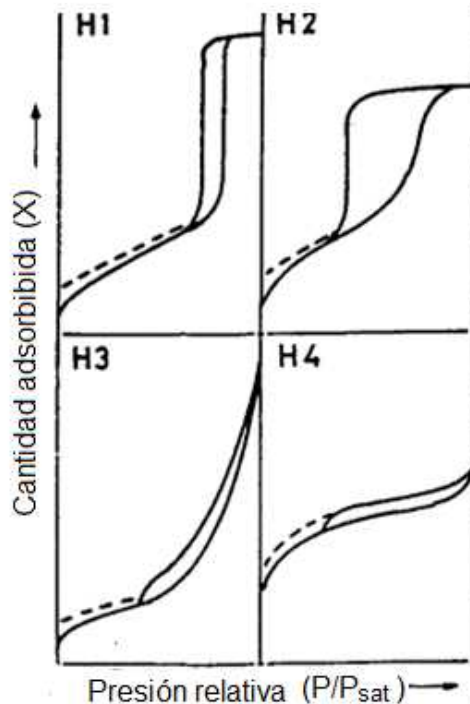


Figura 1.11. Tipo de ciclos de histéresis de adsorción²⁹

Las formas de los ciclos de histéresis se han identificado frecuentemente con estructuras específicas de poros. El tipo H1 se asocia habitualmente con materiales porosos de los que se sabe por otros medios, que consiste en aglomerados o empaquetamientos compactos de esferas aproximadamente uniformes dispuestas de manera bastante regular y que, por tanto, tienen distribuciones estrechas de tamaño de poro.

Muchos materiales porosos por ejemplo geles de óxido inorgánicos y vidrios porosos tienden a dar ciclos del tipo H2, pero en tales sistemas, la distribución de tamaños y formas de poro no están bien definidas. Ciertamente, el ciclo del tipo H2 es especialmente difícil de interpretar; en el pasado se atribuyó a una diferencia en el mecanismo de los procesos de condensación y evaporación que tienen lugar en poros con cuellos estrechos y cuerpo ancho, conocidos frecuentemente como poros en cuello de botella, pero se reconoce que esta es una visión demasiado simplificada y que han de tenerse en cuenta los efectos de interconexión en la red porosa.

²⁹ GAMARRA P., PARDO C., pg.28

El ciclo del tipo H3, que no presenta una adsorción límite a p/p_0 alta, se encuentra en agregados de partículas en forma de placas, que dan a lugar a poros en forma de rendijas.

De modo similar, el ciclo H4 se asocia frecuentemente con poros estrechos en forma de rendijas, pero, en este caso, el carácter tipo 1 de la isoterma indica la existencia de micro porosidad.³⁰

³⁰ GAMARRA P., PARDO C., pg. 27-28

CAPÍTULO II

ENFRIAMIENTO POR ADSORCIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

En los años veintes se construyó el primer refrigerador que funcionaba con el fenómeno de la adsorción. En la actualidad se comercializan chillers de adsorción y se han producido prototipos de refrigeradores que son accionados con energía de desecho o con energía solar.

En el presente capítulo se presenta el ciclo de enfriamiento por adsorción, sus componentes y los parámetros que permiten evaluar su eficiencia. Se hace referencia a estudios en otros países respecto al tema y se compara el ciclo de adsorción con el de absorción y el de compresión de vapor.

2.2 HISTORIA

El fenómeno de adsorción fue descubierto y utilizado hace muchos años, históricamente los egipcios fueron los pioneros y exploradores en el uso del fenómeno de la adsorción. Alrededor de 3700 A.C. los egipcios utilizaron carbón para la reducción de los metales cobre, zinc, estaño para la manufactura del bronce. Después de los 1500 A.C. los egipcios emplearon el carbón para propósitos medicinales. El fenómeno de la adsorción ha sido utilizado para una gran variedad de aplicaciones desde entonces, estas incluyen secado de gases, agente desecante en almacenamiento, control del punto de rocío del gas natural, purificación de agua, procesos de separación, control de contaminación, refinamiento de aceites minerales, refrigeración, bombas de calor, etc.³¹

El primer registro del uso del fenómeno de refrigeración por adsorción es la adsorción de amoníaco en cloruro de plata, realizado por Faraday en 1848. En los años veintes Hulse construyó un refrigerador para almacenar comida en un tren, el cual utilizó sílica gel y dióxido de azufre (SO₂), como par de trabajo y alcanzó

³¹ AHMED M., ABDULMAJEED A., " Current Technologies and Future Perspectives in Solar Powered Adsorption Systems", 2004, Canadá, "Canadian Solar Buildings Conference of Montreal"

temperaturas en el evaporador de -12°C . En este sistema se quemaba propano para producir el calor necesario para regenerar el adsorbente. En 1927, la firma Copeland y la corporación americana Sílica-Gel presentaron una máquina de refrigeración por adsorción con sílica gel. Esta tecnología fue luego introducida por la firmas *Safety Car Heating y Lighting Co.* en el enfriamiento de vagones ferroviarios. Después de numerosas pruebas bajo las distintas condiciones, el sistema desarrollado convenció tanto que se comenzó a realizar su producción en serie y se construyeron 50 vagones ferroviarios con dicha tecnología de enfriamiento para el transporte de pescado. En este sistema fue utilizado dióxido de azufre (SO_2) como refrigerante. Este tipo de equipo no pudo mantenerse por mucho tiempo en operación porque la sílica gel disminuía su capacidad de adsorción con el tiempo, lo cual repercutía directamente en la disminución del rendimiento.

En aquel entonces el agua fue utilizada en muy pocas ocasiones como medio refrigerante; tal es el caso de la firma *Carrier Co.*, que construyó sistemas de aire acondicionado en los cuales se utilizó la combinación sílica gel-agua como medio de trabajo en el sistema. Tchernev fue el primero en introducir el par de trabajo zeolita-agua en sistemas cerrados de refrigeración por adsorción. Este sistema tenía la peculiaridad de ser funcionalmente discontinuo, porque de día se utilizaban las radiaciones solares para el secado de la zeolita y de noche se producía el deseado efecto frigorífico condicionado por la adsorción de los vapores de agua por la zeolita. En 1929 Plank y Kuprianoff desarrollaron un refrigerador por adsorción de carbón-metanol. Desde 1940 a 1945 se utilizó en un tren desde Londres a Liverpool un refrigerador por adsorción con cloruro de calcio y amoníaco como par de trabajo de adsorción y vapor de agua a 100°C como fuente de calor.

Desde 1930, el desarrollo de la tecnología de la refrigeración fue acelerada por la innovación tecnológica de la utilización de los CFCs como refrigerantes y la utilización del compresor sellado completamente. Así, la tecnología de la refrigeración de compresión mecánica de vapor tuvo un rápido crecimiento y la refrigeración por adsorción no pudo más competir con estos sistemas, debido a

que los sistemas de adsorción tenían menores eficiencias que los sistemas de compresión mecánica. En todo el mundo la crisis de los años 1970s intensificó la exploración de nuevos recursos energéticos y la búsqueda de nuevas tecnologías de ahorro energético, atrayendo la atención a los sistemas de sorción. En los años 1990s la destrucción de la Capa de Ozono causada por los CFCs y HCFCs y el efecto invernadero fueron reconocidos como uno de los mayores problemas ambientales que podrían influir en las condiciones de vida del hombre, desde entonces, se ha prestado más atención a un desarrollo sustentable, el cual se convirtió en una buena oportunidad para el avance de la adsorción en la refrigeración. Las investigaciones en la refrigeración por adsorción fueron aceleradas después de la primera Conferencia de Refrigeración por sorción sólida en París en 1992. Las subsecuentes conferencias ahora llamadas Conferencias Internacionales de Bombas de Calor por sorción (ISHPC) han ayudado mucho al desarrollo tecnológico de la refrigeración por adsorción.

El uso de calor de desecho en los ciclos de refrigeración por adsorción comenzó en los años 1980s, y desde entonces se han realizado grandes esfuerzos respecto al tema. Con el desarrollo rápido de la tecnología del enfriamiento por adsorción, chillers basados en este principio aparecieron en el mercado. Nishiyodo Kuchouki Co. desarrolló un chiller de adsorción de sílica gel-agua como par de trabajo en 1986. La Compañía JIJC en Estados Unidos actualmente está vendiendo estos chillers de adsorción. Este equipo es conducido por agua caliente entre 50-90°C, y la temperatura del agua enfriada es de 3°C. La compañía Qianchuan en Canadá también empezó a construir chillers de adsorción de sílica gel-agua en el 2003. La compañía Tokai Optical en Nagoya, Japón, desarrolló un sistema accionado por calor de desecho utilizando un chiller de adsorción en abril en 2003.³²

³² WANG R., WANG L., "Adsorption refrigeration green cooling driven by low grade thermal energy", 2005, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Chinese Science Bulletin 2005 Vol. 50 No. 3 pg. 193—204

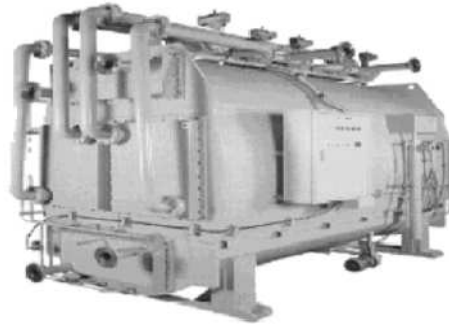


Figura 2.1 Chiller de adsorción de par de adsorción sílica gel y agua
(Nishiyodo Kuchouki Co.)³³

2.3 PARTES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR ADSORCIÓN SOLAR

Un sistema de refrigeración por adsorción básico esencialmente consiste de: un evaporador, un condensador, y colector solar o generador como se muestra en la figura 2.2. Muchos sistemas incluyen otros elementos como el recolector de condensado, válvulas, etc.

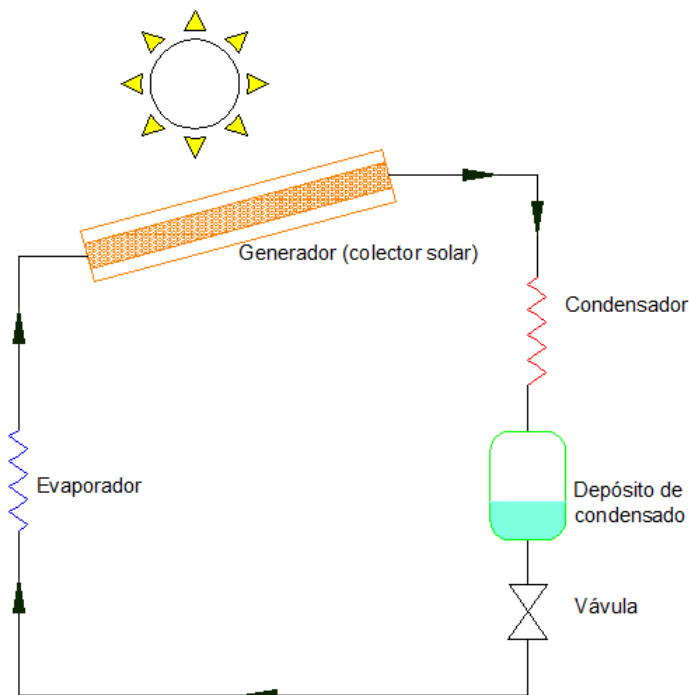


Figura 2. 2 Esquema del sistema de enfriamiento por adsorción³⁴

³³ WANG R., WANG L.

³⁴ Elaboración propia

2.3.1 EVAPORADOR

Es cualquier superficie de transferencia de calor en la cual se vaporiza un líquido para eliminar calor de un espacio o producto refrigerado. Los evaporadores según su tipo de construcción se clasifican en:

2.3.1.1 Tubos descubiertos

Se construye de tubos de acero para evaporadores grandes con amoníaco, mientras que los evaporadores con tubos de cobre se utilizan para evaporadores pequeños y se utilizan para otros refrigerantes que no sean amoníaco.

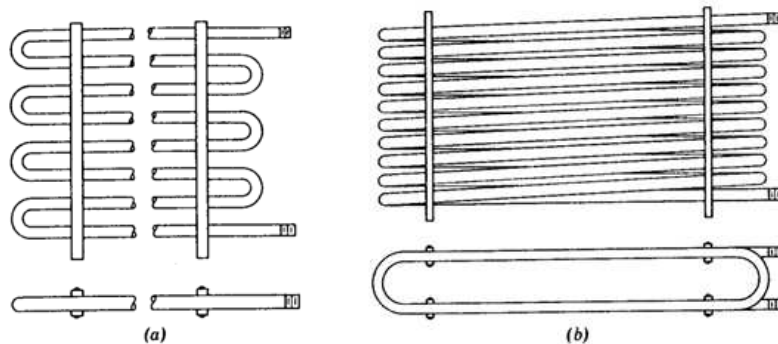


Figura 2.3 Diseños comunes de serpentines de tubos descubiertos

a) serpentín plano zigzag b) serpentín trombón ovalado³⁵

2.3.1.2 De superficie de placa

Puede ser construido con dos placas planas de metal realizadas y soldadas una con otra de tal modo que el refrigerante pueda fluir entre las dos placas, es muy usado en refrigeradores y congeladores caseros, debido a que su limpieza es muy fácil, su fabricación es económica y puede fácilmente construirse en cualquiera de las formas requeridas. Otra forma de construcción consiste en doblar tubería entre dos placas metálicas las cuales son soldadas por las orillas.

³⁵ DOSSAT R., Principios de Refrigeración, Continental, México, 1986, pg. 228

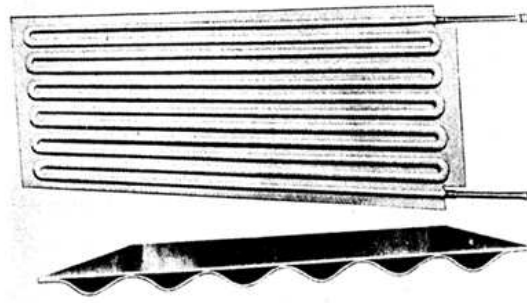


Figura 2.4 Evaporador serpentín estándar de placas³⁶

2.3.1.3 Aleteados

Son tubos descubiertos sobre los cuales se colocan aletas que sirven como superficie secundaria absorbadora de calor que tiene el efecto de aumentar el área superficial externa del evaporador, mejorando la eficiencia para enfriar aire u otros gases. El tamaño y espacio de las aletas en parte dependen del tipo de aplicaciones para el cual está diseñado el serpentín.

La capacidad del evaporador o serpentín de enfriamiento es la razón por la cual pasa calor a través de las paredes del evaporador proveniente del espacio o producto refrigerado a la vaporización del líquido interior y puede ser expresado en Btu/h.

2.3.2 CONDENSADOR

Al igual que el evaporador el condensador es una superficie de transferencia de calor. El calor del vapor del refrigerante caliente pasa a través de las paredes del condensador para su condensación. Como resultado de su pérdida de calor hacia el medio condensante el vapor refrigerante es primero enfriado hasta su saturación y después condensado hasta su estado líquido. El condensador utilizado en refrigeración doméstica es del tipo de placas, el vapor del refrigerante se enfría por la circulación natural del aire entre las placas las cuales tienen ondulaciones que forman canales o tubos como se muestra en la figura 2.5.

³⁶ ERASO F., pg. 229

Los condensadores pueden ser enfriados por aire o por agua. En refrigeración doméstica los condensadores son enfriados por aire y estos a su vez también se dividen en dos grupos que son del tipo de circulación forzada y del tipo de circulación natural.

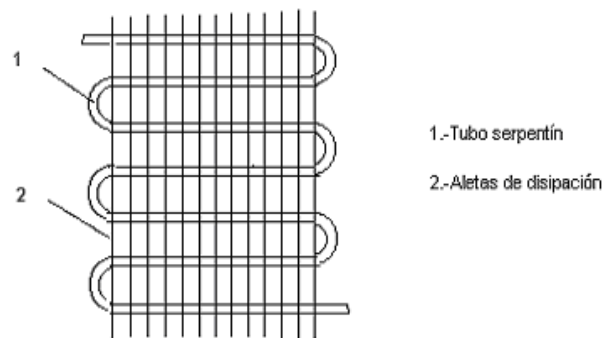


Figura 2.5 Condensador de un refrigerador convencional

2.3.3 GENERADOR

Los generadores utilizados en los sistemas de enfriamiento por adsorción solar están formados por el colector solar y el adsorbente. Existen dos tipos de disposición del adsorbente, en el primero, el más común, el adsorbente está dentro de los tubos del colector solar y en el segundo caso, el adsorbente está separado del colector solar en un recipiente el cual utiliza un fluido que es calentado en el colector solar. Respecto a la forma de la cama adsorbente existen las siguientes tres tecnologías:

- Adsorbedores inconsolidados: El adsorbente es distribuido en el intercambiador de tubos aleteados. El propósito de esta tecnología es de incrementar la capacidad térmica del adsorbedor, por lo tanto, los intercambiadores de calor de superficies extendidas requieren un manejo de calor eficiente para producir COPs razonables. Algunos intentos para mejorar las propiedades de transferencia en estas camas llevadas a cabo por científicos incluyen: mezclar el adsorbente de varios tamaño de grano en una distribución multimodal, utilizar insertos metálicos, utilizar adsorbentes compuestos con aditivos, etc.
- Adsorbedores recubiertos: La utilización de adsorbentes recubiertos es particular para aplicaciones donde un alto coeficiente de operación (COP)

no es tan importante como una alta capacidad específica de enfriamiento (SCP). Esta tecnología consiste en el aumento del coeficiente de transferencia de calor de la pared mediante la disminución efectiva de la resistencia térmica de contacto entre la superficie de transferencia de calor y el adsorbente. La principal desventaja de utilizar los adsorbentes recubiertos es la muy alta relación entre la masa inerte y la masa de adsorbente, lo que disminuye el COP, para sobrellevar esto se necesita un manejo adecuado de la transferencia de calor. Esto puede ser hecho pegando el adsorbente en un tubo o placa. Dunne (1996) realizó un trabajo utilizando tubos recubiertos de cristal monocapa de zeolita (espesor 5mm) en una superficie metálica, de esta forma se mostró un buen contacto entre el fluido de transferencia de calor y el adsorbente. Restucca (2002), utilizó un recubrimiento delgado en zeolita (consolidado con un pegamento inorgánico) y lo ligó a un tubo metálico. Se ha reportado que esta configuración permite un leve incremento en la conductividad térmica del adsorbente a ser obtenida pero hay un gran incremento en el coeficiente de transferencia de calor entre el metal y el adsorbente, debido a la adhesión metal-adsorbente.

- Adsorbentes consolidados: Otra manera de alcanzar un alto coeficiente de transferencia de calor es desarrollar un adsorbente consolidado con mayor conductividad térmica. El adsorbente es consolidado a través de un pegamento, hecho de soluciones de conductividad térmica adecuada, esto puede resultar en un dramático incremento de la conductividad. Por el otro lado, para alcanzar tal objetivo, el mejoramiento en la transferencia de calor no debe ser a costa de la reducción de la transferencia de masa, esto es particularmente interesante cuando las capas de polvo simple no son adecuadas. Este logro fue desarrollado por un largo período por hidruros metálicos, después los investigadores aplicaron el grafito natural expandido, utilizaron espuma de polvo de aluminio, pegamentos orgánicos y adsorbentes solidificados por medio de aglomeración. Una desventaja del adsorbente consolidado es el deterioro de la eficiencia de transferencia de masa, especialmente para refrigerantes que se evaporan bajo la presión atmosférica, tal como el agua, metanol, etc. También se

reportan en este grupo los adsorbentes compuestos, por ejemplo el desarrollado por R. Z. Wang hecho de cloruro de calcio (CaCl_2) y grafito expandido.³⁷

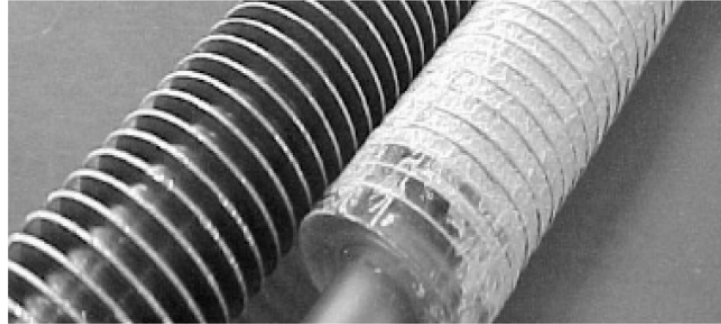


Figura 2.6 Tubo aleteado recubierto con adsorbente consolidado³⁸



Figura 2.7 Adsorbente compuesto consolidado (carbón activado y CaCl_2)³⁹

2.4 DESCRIPCIÓN DEL CICLO TERMODINÁMICO DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN SOLAR IDEAL

El ciclo de refrigeración por adsorción solar ideal consta de cuatro etapas que se describen a continuación y se muestran en la figura 2.8.

³⁷ ALGHOUL M., SULAIMAN M., AZMI B., SOPIAN K., "Review of materials for adsorption refrigeration technology", 2007, Instituto de Investigación de Energía Solar de la Universidad de Kabangsaan, Malasia

³⁸ YANAGI H., "Recent Development on Adsorption Refrigeration", 2006, Cyclec Electrical Engineering, Japón, Heat Transfer Society of Japan Vol. 45 No. 19, pg. 32-39

³⁹ WANG R., OLIVEIRA R., "Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy", 2006, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Progress in Energy and Combustion Science 32, pg. 424–458

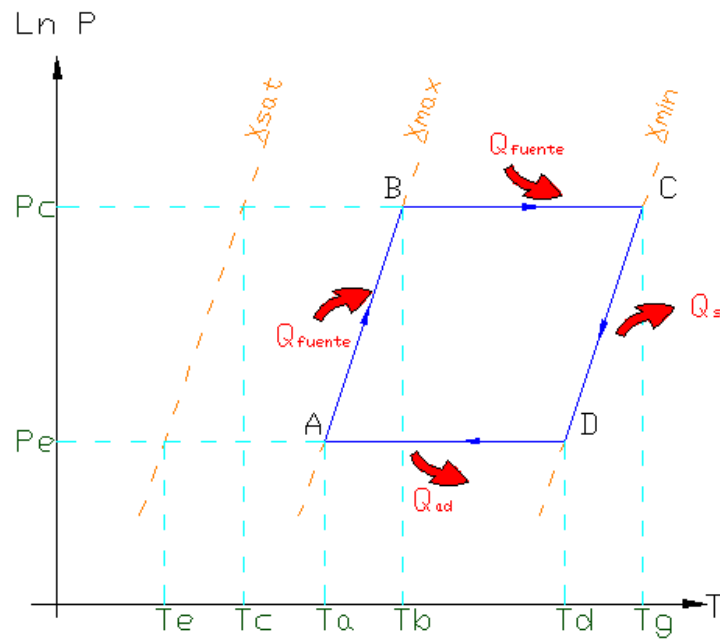


Figura 2.8 Ciclo de refrigeración con los referentes flujos de energía

Q_{Fuente} = calor entregado por la fuente; Q_s = calor disipado por el adsorbente; Q_{ad} = calor de adsorción

En la figura 2.9 se muestra el cambio de concentración (X) en el tiempo de acuerdo al ciclo. Este es un ejemplo por lo que las horas del día pueden variar, así como la concavidad de las curvas.

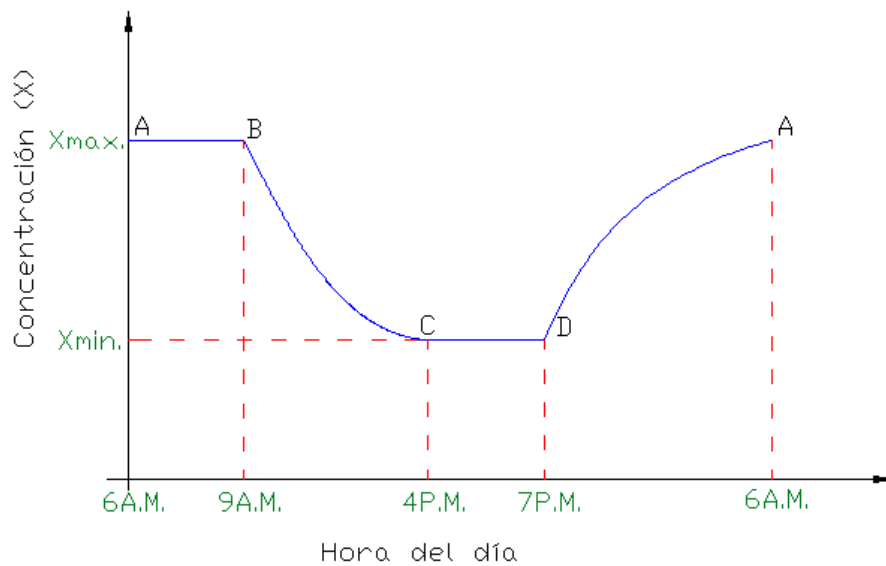


Figura 2.9 Concentración en función de la hora del día

2.4.1 ETAPA 1 (A → B) CALENTAMIENTO ISOSTÉRICO (CONCENTRACIÓN CONSTANTE) + PRESURIZACIÓN

El proceso empieza en el punto A, a las primeras horas de la mañana. El adsorbato se encuentra adsorbido en el adsorbente y está a temperatura baja T_a (temperatura de adsorción) y a presión P_e (presión de evaporador). Debido a la radiación solar el lecho adsorbente es calentado (Q_{Fuente}) y como consecuencia la temperatura y la presión se incrementan a lo largo de la isótera de concentración máxima (x_{max}). El calentamiento continúa hasta llegar al punto B, donde la presión alcanza el valor de presión de condensador (P_c). La duración típica de esta etapa es de 2 a 3 horas por la mañana, dependiendo de la cantidad de calor suministrada.

Las presiones del evaporador y condensador que son consideradas constantes son las de saturación correspondiente a las temperaturas del evaporador y del condensador respectivamente.⁴⁰

2.4.2 ETAPA 2 (B → C) CALENTAMIENTO Y DESORCIÓN + CONDENSACIÓN DEL ADSORBATO

El adsorbedor al continuar recibiendo calor (Q_{Fuente}) aumenta su temperatura y el adsorbato es desorbido en forma de vapor. La energía térmica aportada por el sol se invierte en incrementar la temperatura del generador y también en calor de desorción. El vapor del adsorbato cuando sale del generador llega al condensador es condensado cediendo calor al exterior. Este proceso se prolonga siempre a una presión (considerada constante) dictada por la temperatura a la que se encuentra el condensador. A final de esta fase, aproximadamente a media tarde (dependiendo de la cantidad de calor suministrada), el adsorbente alcanza la máxima temperatura, que es la de regeneración (T_g) y la masa de adsorbente decrece a un valor de concentración mínimo (x_{min}).

⁴⁰ GONZÁLEZ M., pg. 10-11

2.4.3 ETAPA 3 (C → D) ENFRIAMIENTO ISOSTÉRICO + DESPRESURIZACIÓN

Al caer la tarde decrecen sustancialmente los niveles de irradiación, el adsorbente libera calor (Q_s), el adsorbente empieza a reclamar el adsorbato pero la concentración se mantiene baja (x_{\min}) y constante debido a que la presión todavía es elevada. En esta etapa la temperatura y presión disminuyen desde la del condensador hasta la del evaporador.

2.4.4 ETAPA 4 (D → A) ENFRIAMIENTO Y DESORCIÓN + EVAPORACIÓN

A la última hora de la tarde y al principio de la noche la presión ha bajado hasta el valor de la del evaporador. En este momento comienza la evaporación, favorecida por el adsorbente frío que está ávido por capturar los vapores que se producen. Esta es la única etapa en la que se genera frío, sucede a una presión constante dictada por la temperatura en el evaporador y dura hasta las primeras horas de la mañana siguiente. Durante esta fase se libera en el generador calor de adsorción que se debe disipar al exterior (Q_{ad}), el adsorbato que está en el evaporador toma el calor de la carga de refrigeración para producir enfriamiento. La masa de adsorbato dentro del adsorbente alcanza un valor máximo en el punto A (X_{\max}).⁴¹

2.5 PARES DE ADSORCIÓN

Se entiende par de adsorción a la pareja de adsorbente (sólido) y adsorbato (gas) utilizada en el proceso de enfriamiento por adsorción.

2.5.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL PAR DE ADSORCIÓN

Para el adsorbente (sólido) se tiene:

- Buena afinidad por su adsorbato, es decir, adsorción de gran cantidad de adsorbato bajo condiciones de baja temperatura que produce un buen coeficiente de operación (COP).
- Desorción de la mayoría del adsorbato cuando el adsorbente es expuesto a energía térmica.

⁴¹ SPAHIS N., ADDOUN A., MAHMOUDI H., "Study on solar adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon prepared from olive stones", 2007, Facultad de Ciencias de la Universidad de Hassiba Ben Bouali, Algeria, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3, pg. 415 – 420

- El calor sensible acumulado durante la fase de calentamiento debe ser pequeño, en términos relativos, en comparación con el calor de desorción y adsorción.
- Conservación a través del tiempo y uso sin deteriorarse.
- No ser tóxico ni corrosivo.
- Bajo costo y gran disponibilidad en el mercado.

Para el adsorbato (refrigerante) se tiene:

- Temperatura de fusión bajo 0°C, ya que muchas aplicaciones requieren la producción o conservación de hielo en el recinto frío.
- Pequeño tamaño molecular que permita la fácil adsorción sobre los microporos del adsorbente.
- Alto calor latente de evaporización y bajo volumen específico.
- Térmicamente estable con el adsorbente en el rango de temperaturas de operación del ciclo.
- No ser tóxico, ni corrosivo ni inflamable y ser amigable con el ambiente.
- Baja presión de saturación (ligeramente sobre la atmosférica) a temperatura normal de operación.⁴²

No se puede señalar un par de adsorción que cumpla con todos los criterios de selección antes mencionados, en la literatura se ha encontrado que los pares que satisfacen de mejor manera los principales requerimientos, son los siguientes:

2.5.2 ZEOLITA - AGUA Y SÍLICA GEL - AGUA

Su principal característica es su alta temperatura de regeneración alrededor de 150°C o mayor, debido a esto la zeolita requiere una temperatura alta del colector. Aunque la zeolita puede ser utilizada con agua, amoníaco y metanol como refrigerantes se ha encontrado en la literatura que la mayoría de autores prefiere el uso de zeolita con agua debido a que su estructura permite adsorber grandes cantidades de moléculas molares pequeñas como el agua.⁴³ Este adsorbente

⁴² ALGHOUL M., SULAIMAN M., AZMI B., SOPIAN K.

⁴³ AHMED M., ABDULMAJEED A.

tiene una baja conductividad térmica de 0.1–1.0 W/mK, lo que demora la adsorción y desorción, limitando la capacidad específica de enfriamiento (SCP). Las zeolitas para alcanzar un equilibrio entre la afinidad por su adsorbato y la desorción de la mayoría del adsorbato requieren grandes cantidades de material aumentado su costo, además tienen la propiedad única que sus isothermas de adsorción tienen una dependencia no lineal de la presión, lo cual es lo importante en aplicaciones en refrigeración solar.

La sílica gel tiene una baja temperatura de regeneración la cual es de 70 a 80° C⁴⁴ su conductividad es similar a la zeolita y tiene isothermas de presión casi lineales. Este adsorbente tiene una buena afinidad por su adsorbato, no es tóxico, ni corrosivo pero es caro y no se lo puede comprar en los países en vía de desarrollo como el Ecuador.

El agua tiene un alto calor latente y es amigable con el medio ambiente, pero tiene una relativa baja presión de vapor lo que causa algunas dificultades técnicas debido al diseño con consideraciones de hermeticidad y también ocasiona una resistencia a la transferencia de masa lo cual reduce el coeficiente de operación (COP). El agua no es tóxica, ni corrosiva, ni inflamable, es amigable con el ambiente y está disponible en la mayoría de locaciones, pero tiene el problema que solidifica a 0°C, lo que en esencia restringe su uso a aplicaciones por debajo de esta temperatura.

2.5.3 CARBÓN ACTIVADO - METANOL, CARBÓN ACTIVADO - AMONÍACO

La temperatura de regeneración del carbón activado está alrededor de 120° C, es el adsorbente más ampliamente utilizado debido a que tiene una extremadamente grande área superficial. Es recomendado por muchos autores para el uso de energía solar con metanol y amoníaco como refrigerante. Para el enfriamiento solar presenta un mejor coeficiente de operación (COP) que otros pares de adsorción aunque la afinidad por su adsorbato y la desorción de la mayoría del adsorbato son criterios mutuamente exclusivos el carbón activado alcanza un

⁴⁴ WANG R., WANG L.

equilibrio entre estos. El carbón activado tiene una isoterma de presión casi lineal, es barato y puede ser producido en su país de origen y uso con propiedades que se adapten a aplicaciones particulares variando su tiempo y temperatura de activación. Al ser un compuesto covalente muestra preferencia por moléculas que tienden a ser no iónicas y poco polares, tal caso es la mayoría de los compuestos orgánicos.

El metanol tiene una presión mayor que la del agua por lo que puede ser utilizado para aplicaciones de producción de hielo y es inestable a temperatura superior de 120° C, por tales razones es considerado como mejor refrigerante en los sistemas de adsorción. Se mantiene líquido a muy bajas temperaturas, al ser la molécula de más pequeño tamaño que se encuentra en estado líquido en condiciones ambiente ordinarias se deja adsorber bien por sólidos microporosos adecuados. El metanol puede ser fabricado en países en vías de desarrollo con propiedades para aplicaciones de refrigeración, no es tóxico, ni corrosivo pero es inflamable.⁴⁵

El amoníaco tiene una alta presión de vapor, se puede utilizar para aplicaciones que requieran alto enfriamiento, debido a que la temperatura del evaporador puede alcanzar - 40° C, por el otro lado es toxico y corrosivo, lo que involucra altos costos de fabricación. Tiene una presión de vapor mayor que la atmosférica, lo que involucra que las eventuales pérdidas de estanqueidad en la máquinas son más fáciles de detectar y subsanar que en el caso del metanol y agua que actúan en vacío, además si son leves las fugas no dan lugar a caídas bruscas en el rendimiento del equipo, al menos durante un tiempo.

El amoníaco, metanol y agua tienen calores latentes relativamente altos de 1368, 1160 y 2258 kJ/kg respectivamente y sus volúmenes específicos son bajos en el orden de 10^{-3} m³/kg. El agua es el más estable térmicamente en la presencia de adsorbentes adecuados, le sigue el metanol y el amoníaco. El problema con el agua que su temperatura de congelamiento es de 0°C, esto hace que el metanol sea un adsorbato favorable para formar un par con un adsorbente estable.⁴⁶

⁴⁵ GONZÁLEZ M., pg. 18

⁴⁶ ALGHOUL M., SULAIMAN M., AZMI B., SOPIAN K.

Critoph, Vogel y Meunier estudiaron los coeficientes de operación (COP) de los pares carbón activado–metanol, zeolita–agua y otros y sus resultados muestran que el carbón activado-metanol, es el par de trabajo ideal para energía solar debido a su alto COP y baja temperatura de regeneración⁴⁷

El etanol es similar al metanol pero es sobrepasado por el metanol en todas las propiedades físicas y térmicas relevantes. También se ha explorado el dióxido de carbono pero requiere una presión de condensador muy alta. Existen nuevos adelantos en cuanto a pares de fibras de carbón activado-etanol y carbón activado-cetona. Se ha producido adsorbatos compuestos que son la combinación de adsorbato de fisisorción y quimisorción como es el caso de carbón activado con cloruro de calcio (CaCl₂). En todos estos casos se han obtenido resultados favorables. También se han estudiado las propiedades de carbón activado monolítico lo cual ha conducido a una reducción en el volumen consecuentemente una ganancia económica.⁴⁸

2.6 SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR ADSORCIÓN

Existen varios sistemas de enfriamiento en los cuales se ha aplicado el concepto de adsorción, los cuales se describe a continuación:

2.6.1 CHILLER

Un chiller de adsorción es un equipo que permite enfriar agua, consta generalmente de los siguientes elementos:

- Evaporador
- Condensador
- Múltiples camas de adsorbente (mínimo dos)
- Refrigerante (adsorbato)

⁴⁷ WANG L., WANG R., WU J., WANG K., WANG S., “Adsorption ice makers for fishing boats driven by the exhaust heat from diesel engine: choice of adsorption pair”, 2004, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Energy Conversion and Management 45, pg. 2043–2057

⁴⁸ LAMBERT M., JONES B., “Automotive adsorption air conditioner powered by exhaust heat”, 2006, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Diego, E.E.U.U

Las aplicaciones en las que se utilizan los chillers generalmente son de ciclo continuo. La naturaleza del ciclo de adsorción es discontinua, pero gracias al uso de múltiples camas de adsorbente se puede tener un funcionamiento continuo. Se han estudiado chillers de dos, cuatro y seis camas adsorbentes. El uso de múltiples camas no sólo permite un funcionamiento continuo, sino que busca aumentar el coeficiente de operación (COP). Se reporta que el par utilizado más comúnmente es sílica gel-agua.⁴⁹

El ciclo de un chiller de adsorción con dos camas se lo explica a continuación:

1. El refrigerante previamente adsorbido en un adsorbedor es removido con el uso de agua caliente (compartimiento derecho)
2. El refrigerante se condensa en el condensador y el calor de condensación es retirado por el agua de enfriamiento
3. El condensado es rociado en el evaporador y se evapora bajo condiciones de baja presión parcial. Este paso produce el efecto de enfriamiento útil.
4. El vapor de refrigerante es adsorbido en el otro compartimiento adsorbedor (izquierdo). El calor es removido por el agua de enfriamiento.

Una vez que el compartimiento derecho está totalmente cargado y el compartimiento izquierdo totalmente regenerado, sus funciones son intercambiadas. Las dos cámaras deben estar directamente acopladas por algún tiempo entre los cambios de su función para lograr la recuperación del calor, ya que la cámara caliente tiene que ser enfriada en el siguiente paso y viceversa. Así, un adsorbedor está disponible para adsorber el vapor del evaporador. El ciclo completo con las cuatro fases está demostrado en la figura 2.10.

⁴⁹ ZHAI X., WANG R., "Experimental investigation and theoretical analysis of the solar adsorption cooling system in a green building", 2009, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Applied Thermal Engineering 29, pg. 17–27

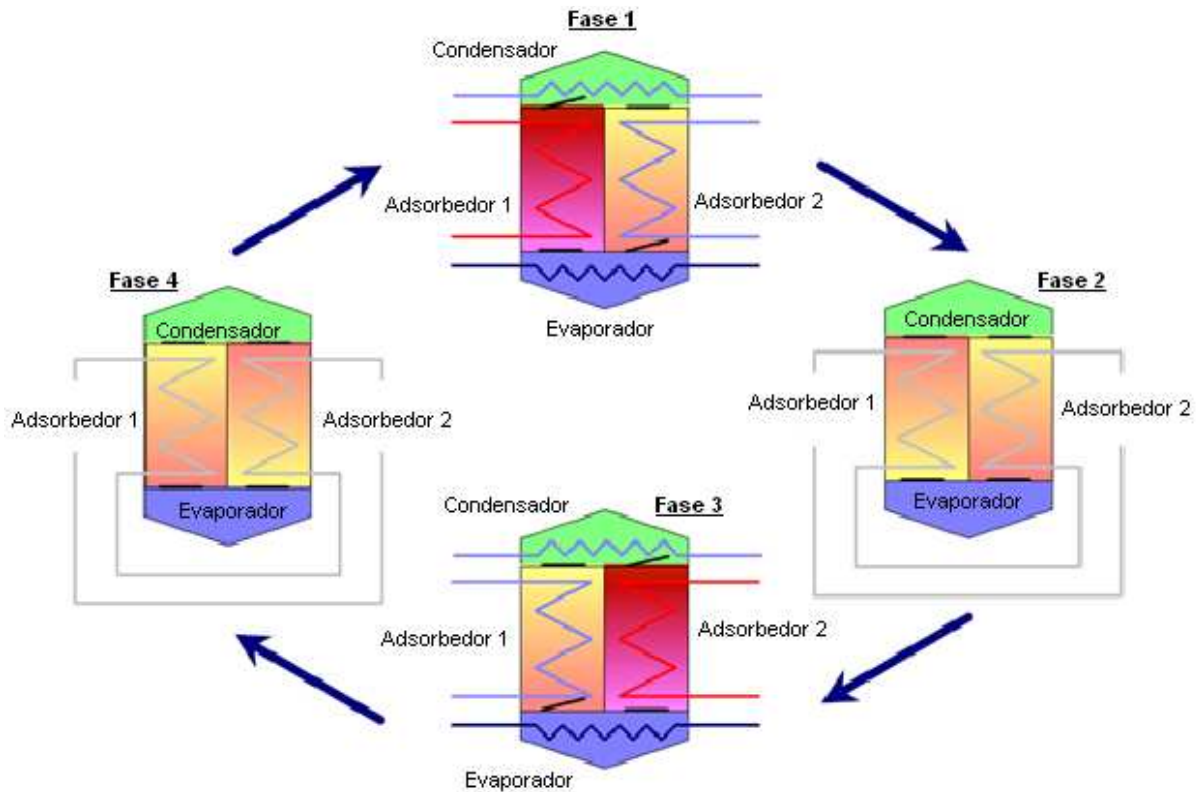


Figura 2.10 Esquema de un ciclo completo de adsorción
(fases 2 y 4: recuperación de calor), adsorbedor 1 = compartimiento derecho,
adsorbedor 2 = compartimiento izquierdo ⁵⁰

En el Anexo I se encuentra información adicional de un chiller comercial de adsorción.

En las aplicaciones reales se han considerado dos direcciones de investigación las cuales son:

- El uso de energía solar para aire acondicionado en el cual se utiliza agua calentada por el sol a temperatura de 60 a 90°C.
- El uso eficiente de calor de desecho, por ejemplo los gases de escape de motores a diesel, donde la temperatura de los gases de escape está entre 80 a 500°C ⁵¹

En la figura 2.11 se presenta un chiller de 6 camas de adsorción.

⁵⁰ LI M., WANG R., "Heat and mass transfer in a flat plate solar solid adsorption refrigeration ice maker", 2003, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Renewable Energy 28 pg. 613–622

⁵¹ WANG R., "Efficient adsorption refrigerators integrated with heat pipes", 2008, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Applied Thermal Engineering 28, pg. 317–326



Figura 2.11 Foto de una chiller experimental de 6 camas⁵²

Un aspecto fundamental en todo sistema de enfriamiento por adsorción es la transferencia de masa y de calor, para obtener una mejor eficiencia del ciclo es necesario incrementar estos parámetros. Para tales fines en los chillers de adsorción se utilizan algunos ciclos avanzados los cuales se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Ciclos avanzados utilizados en chillers de adsorción⁵³

Configuración	Propósito	Características Principales	Aplicaciones	Observaciones
Ciclo con múltiples fases	Utilización de fuente de calor de temperatura relativamente baja	El incremento de la presión de evaporación es dividida en más de un paso consecutivo	Aire acondicionado	Se requiere dos o más pares de camas adsorbentes
Sistema regenerativo con camas múltiples	Mejorar la eficiencia de la recuperación de la fuente de calor	La fuente de calor es usada serialmente, cama a cama	Aire acondicionado	Salida de agua enfriada uniforme
Ciclo con recuperación de masa	Mejorar el efecto enfriante	Mejorar la transferencia de calor entre el evaporador y el adsorbedor	Bombeo de calor o aire acondicionado	El adsorbedor y el desorbedor son conectados a través de un tubo y válvula

⁵² YANAGI H., "Recent Development on Adsorption Refrigeration", 2006, Cyclect Electrical Engineering, Japón, Heat Transfer Society of Japan Vol. 45 No. 19, pg. 32

⁵³ YANAGI H., pg. 33

Mayor información sobre los ciclos avanzados se encuentra en el Anexo I.

2.6.2 CAJA HELADERA (ICEMAKER) O REFRIGERADOR

Una de las formas más efectivas de refrigeración solar es la producción de hielo ya que el hielo puede acumular mucho calor latente. Los lugares con alta insolación tienen una gran demanda por enfriamiento para preservar comida, medicinas y vacunas. El desarrollo de los sistemas de refrigeración por sorción con fuente de energía solar emergió al final de los años 70, siguiendo el trabajo pionero de Tchernev. Desde entonces un gran número de estudios se han llevado a cabo pero los costos de estos sistemas aun los hacen no competitivos para su comercialización. Se han hecho estudios enfocados en la reducción de costos e incremento de la eficiencia muy prometedores, Pons y Guillemint concluyeron que los sistemas por adsorción pueden ser la base para refrigeradores eficientes accionados por el sol. Muchos investigadores han producido refrigeradores solares entre los cuales se tienen Critoph, Li, Grenier, Buchter, etc. A continuación se muestra una caja heladera solar que funciona sin válvulas, desarrollado por Li, Sun y Wang en el año 2004.

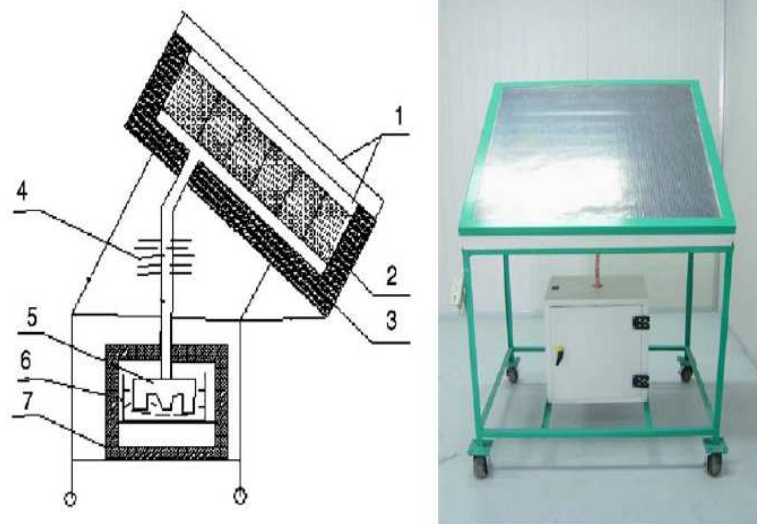


Figura 2.12 Caja heladera solar sin válvulas

(1) placa cobertora, (2) cama adsorbente, (3) aislante, (4) condensador, (5) evaporador, (6) tanque de agua, (7) caja fría ⁵⁴

⁵⁴ WANG R., OLIVEIRA R.

En los trabajos realizados sobre refrigeradores o cajas heladeras, el par de adsorción más utilizado es el carbón activado metanol. Las cajas heladeras desarrolladas son alimentadas con energía solar o con calor de desecho de relativa baja temperatura. En el campo de las cajas heladeras conducidas con calor de desecho cabe resaltar el trabajo del R. Z. Wang, el cual desarrollo una caja heladera para un barco pesquero conducida con los gases de escape de un motor a diesel.⁵⁵

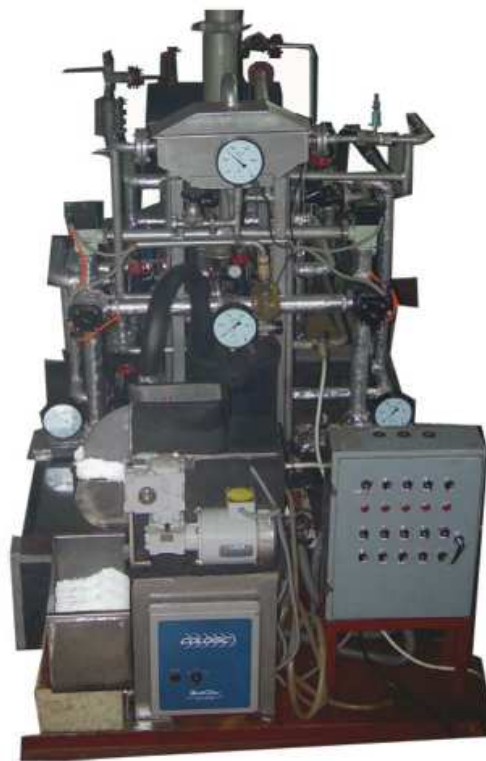


Figura 2.13 Caja heladera (icemaker) para barcos pesqueros⁵⁶

2.6.3 VENTILACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO

En el proyecto Solar Air-conditioning in Europe (SACE) se ha demostrado que el aire acondicionado solar tiene un potencial significativo en el ahorro de la energía primaria. En algunos países se han hecho bastantes trabajos en el estudio de aire acondicionado por adsorción conducido por calor de desecho. La aplicación principal en el aire acondicionado por adsorción se realiza en los automóviles. Los vehículos más adecuados para estos fines son los buses y las locomotoras,

⁵⁵ WANG L., WANG R., WU J., WANG K., WANG S.

⁵⁶ WANG R., OLIVEIRA R.

debido a que los sistemas de adsorción tienen gran volumen y masa. En este ámbito cabe resaltar los estudios de Suzuki y Zhang, el primero utilizó los gases de escape de un motor a diesel con zeolita y agua. En la figura 2.14 se presenta el aire acondicionado para una cabina de una locomotora que utiliza zeolita y agua.

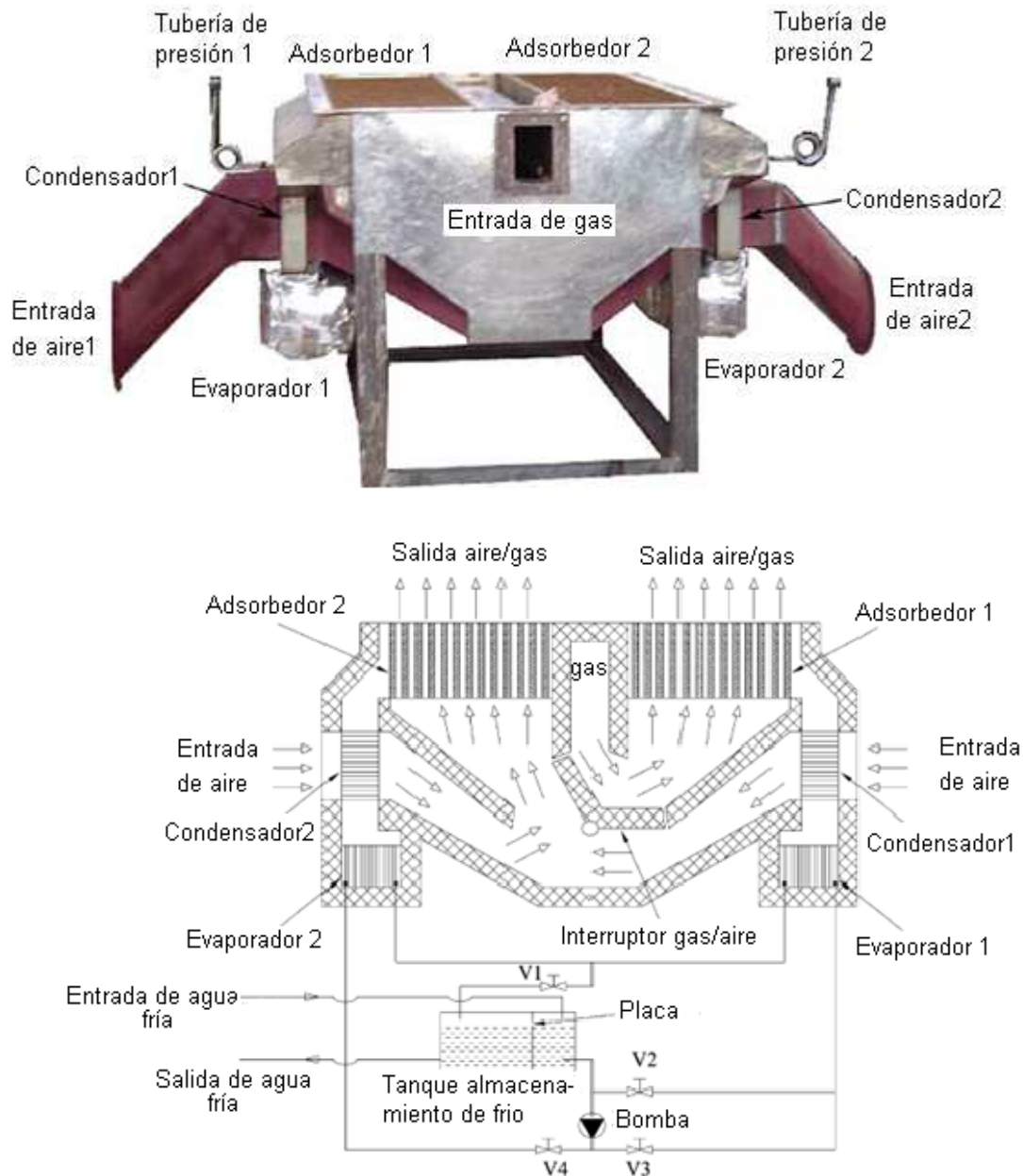


Figura 2.14 Aire acondicionado por adsorción de zeolita-agua. Parte superior equipo construido y parte inferior diagrama esquemático ⁵⁷

⁵⁷ WANG D., XIA Z., WU J., "Design and Performance Prediction of a Novel Zeolite–Water Adsorption Air Conditioner", 2005, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Energy Conversion and Management 47, pg. 590–610

2.7 COEFICIENTES DE RENDIMIENTO EN EL CICLO DE REFRIGERACIÓN

Para que los sistemas de adsorción se conviertan en una alternativa realista es necesario que estos sistemas presenten desempeños lo suficientemente altos. Los parámetros usualmente utilizados para evaluar el rendimiento de un sistema de refrigeración por adsorción son el COP, el SCP y la eficiencia termodinámica la cual es la relación entre el COP y el COP de Carnot.

2.7.1 DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE OPERACIÓN (COP)

El rendimiento en los sistemas de refrigeración se expresa en términos del coeficiente de funcionamiento (COP), que es la relación entre el efecto de enfriamiento y el calor y/o trabajo de entrada.

$$\text{COP} = \frac{\text{Efecto de enfriamiento}}{\text{Calor y/o Trabajo de entrada}} = \frac{\text{Calor extraído por la evaporación}}{\text{Transferencia de calor en el generador}} = \frac{Q_{\text{enf}}}{Q_{\text{Cal}}} \quad (2.1)$$

Donde:

Q_{enf} = suministro de enfriamiento resultado de la evaporación del refrigerante (J)

Q_{Cal} = calor para calentar la cama adsorbente y regenerar el adsorbente. (J)⁵⁸

El COP tiene una relación directa con la transferencia de calor y la transferencia de masa. Muchos estudios se han realizado en los sistemas de adsorción para mejorar la transferencia de calor y la transferencia de masa.

2.7.1.1 Eficiencia de Carnot

El ciclo de Carnot es un ciclo totalmente reversible que se compone dos procesos isotérmicos reversibles y de dos procesos isentrópicos; tiene la máxima eficiencia térmica para determinados límites de temperatura y sirve como estándar para la

⁵⁸ SAHA B., KOYAMA S., SHARKAWY E., KUWAHARA K., "Experiments for Measuring Adsorption Characteristics of an Activated Carbon Fiber/Ethanol Pair Using a Plate-Fin Heat Exchanger", 2006, Escuela de Ciencias de Ingeniería de la Universidad de Kyushu University, Japón, ASHRAE's Volume 12, Number 3b

comparación de otros ciclos. Puesto que el ciclo Carnot es reversible los cuatro procesos pueden invertirse dando origen al ciclo invertido, un refrigerador que opera en el ciclo invertido de Carnot recibe el nombre de refrigerador de Carnot.

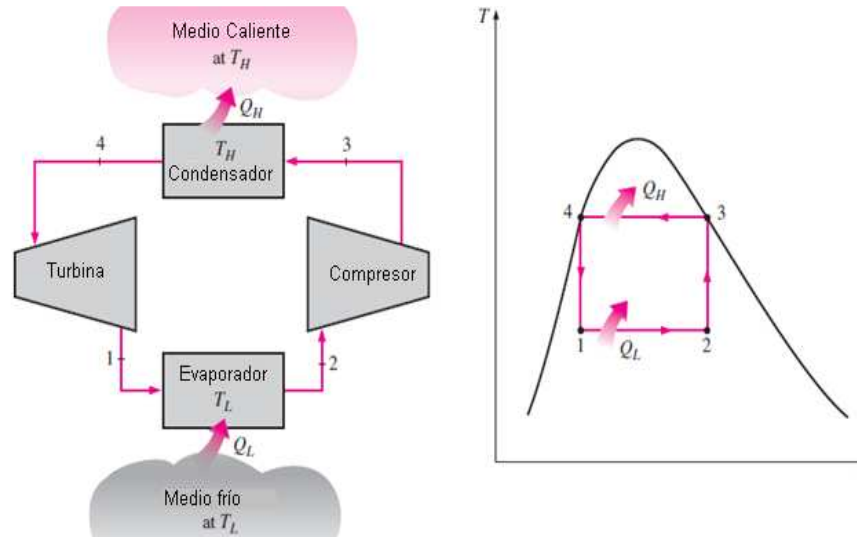


Figura 2.15 Esquema de un refrigerador de Carnot y el diagrama temperatura-entropía del ciclo de Carnot invertido⁵⁹

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (2.2)$$

Donde:

T_L = Temperatura del medio frío (K)

T_H = Temperatura del medio caliente (K)

2.7.2 DEFINICIÓN DE LA CAPACIDAD ESPECÍFICA DE ENFRIAMIENTO (SPECIFIC COOLING POWER) (SCP)

La capacidad específica de enfriamiento (SCP) es el flujo de calor extraído por el evaporador sobre masa de adsorbente y se expresa como:⁶⁰

$$\text{SCP} = \frac{\dot{Q}_{\text{enf}}}{M_e} \quad (2.3)$$

⁵⁹ CENGEL Y., BOLES M., Termodinámica, Mcgraw Hill, México, 2006, pg. 618

⁶⁰ GREGORY L., "Development of a Microchannel Device for Adsorption Cooling Application", 2009, Tesis previa a la obtención del masterado en ciencias de la Universidad Estatal de Oregón

Donde:

SCP = capacidad específica de enfriamiento (W/kg)

Q_{enf} = flujo de calor extraído por el evaporador (W)

M_e = masa total de adsorbente (kg)

2.7.3 DEFINICIÓN DEL POTENCIAL DE DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO (PDO)

El potencial de destrucción de la capa de ozono (PDO) es la relación entre el impacto en el ozono de un químico y el impacto de una masa similar de CFC-11. Así el PDO del CFC-11 es definido como 1.0. La capa de ozono ubicada en la estratosfera, se extiende entre los 15 y los 45 Km por encima de la superficie del planeta. Esta capa es rica en ozono que absorbe los rayos ultravioleta del sol, impidiendo su paso a la Tierra. En la primavera austral de 1985 se comprobó que la capa de ozono sobre la Antártida había desaparecido en más del 50%. Así mismo, hacia finales de la década del 80 se había comprobado que efectivamente la destrucción de la capa de ozono se debía a la presencia en la estratosfera de CFC, HCFC, y Halones, que liberan sus átomos de cloro y bromo por efecto de la radiación ultravioleta B, estos átomos reaccionan con el ozono y lo destruyen.⁶¹

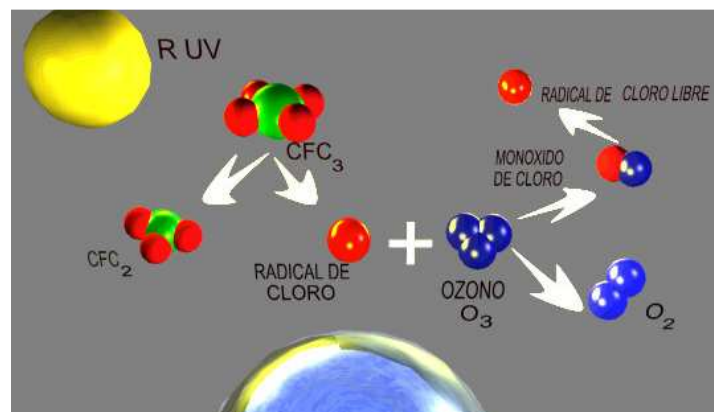


Figura 2.16. Reacción química que ocasiona la destrucción de la capa de ozono⁶²

⁶¹ PUEBLA J., Manual de Buenas Prácticas en Refrigeración, FONDOIN, Venezuela

⁶² <http://www.lasalleandujar.com/node/847>

Este efecto devastador sobre la capa de ozono es causado por los CFC, tales como R11, R12 y R502 (que contiene CFC115), por los Halones extintores de incendio y en menor grado por los HCFC como el R22 y el R123. Todos estos productos al ser liberados a la atmósfera, dado que son muy estables y permanecen intactos decenas de años, pueden ser transportados por las corrientes de aire, desde el hemisferio norte hasta el Polo Sur y desde la superficie hasta la estratosfera, donde son vulnerables a la luz ultravioleta, descomponiéndose y liberando cloro el cual inicia el ciclo de destrucción del ozono.

2.7.4 DEFINICIÓN DEL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (PCG)

El potencial de calentamiento global (PCG) es la relación entre el calentamiento causado por una sustancia y el calentamiento causado por una masa similar de dióxido de carbono. Así el PDG del CO₂ es definido como 1.0.⁶³

El calentamiento global o "efecto invernadero" es un fenómeno natural que se produce cuando parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra, para perder el exceso de calor recibido del sol, es absorbida en la troposfera por gases normalmente presentes en el aire, como vapor de agua, dióxido de carbono, metano, entre otros, impidiendo que ese calor escape al espacio y lo devuelve a la superficie como una segunda fuente de calor. Pero la acumulación progresiva de dióxido de carbono en la atmósfera, producto de la combustión de carbón, petróleo y gas, aunado a la presencia de los CFC, HCFC y Halones, han acentuado notablemente la absorción del calor desprendido por la Tierra, aumentando la temperatura promedio y causando cambios en el clima. Mientras sigan aumentando la concentración de estos gases en la atmósfera el calentamiento global incrementará, produciendo efectos catastróficos como tormentas, inundaciones y sequías extremas que alterarán las ciudades, las costas, las zonas de cultivo, la productividad, y la supervivencia de las especies.

⁶³ <http://www.epa.gov/espanol/estudiantesmaestros.htm>

Los CFC, HCFC y los HFC, tienen altos potenciales de calentamiento global, miles de veces superiores al del dióxido de carbono y el metano; son prácticamente indestructibles en la troposfera y sus períodos de vida superan en algunos casos los 100 años. De manera que estas sustancias que durante años se consideraron adecuadas como refrigerantes hoy se sabe que son doblemente peligrosas: en la troposfera por la cantidad de calor que atrapan y emiten, convirtiéndose en súper gases invernadero y en la estratosfera por la avidez destructora de ozono.

La refrigeración por compresión de vapor contribuye al calentamiento global en dos formas:

- Directamente: por la emisión de refrigerantes a la atmósfera debido a fugas en sistemas o por la liberación voluntaria y deliberada de gases refrigerantes en los procesos de reparación y puesta fuera de servicio de equipos de refrigeración.
- Indirectamente: por la cantidad de energía eléctrica consumida, la cual produce emisiones de dióxido de carbono cuando la energía es producida en plantas térmicas, que utilizan combustibles de origen fósil para su operación.

El Impacto Total Equivalente de calentamiento (Total Equivalent Warming Impact) (TEWI), se define como:

$$\text{TEWI} = E_{\text{dr}} + E_{\text{ie}} \quad (2.4)$$

Donde:

E_{dr} = Efecto directo por emisiones de refrigerantes

E_{ie} = Efecto indirecto por el consumo de energía

CAPÍTULO III

ENERGÍA SOLAR

3.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se presentan los conceptos básicos de la radiación solar, las ecuaciones que permitirán determinar la energía útil, los principales tipos de colectores e instrumentos de medición.

3.2 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR

3.2.1 RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (G_{on})

Es la intensidad de la radiación que llega a la parte exterior de la atmósfera de la Tierra, depende de la distancia entre el sol y la tierra. Oscila en valores entre 1400 y 1310 w/m^2 . La dependencia de radiación extraterrestre con el tiempo en el año está indicada por la siguiente ecuación:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360N}{365} \right) \right] \quad (3.1)$$

Donde:

G_{on} = radiación extraterrestre (W/m^2)

G_{sc} = constante solar = 1353 (W/m^2)

N = número de día en el año

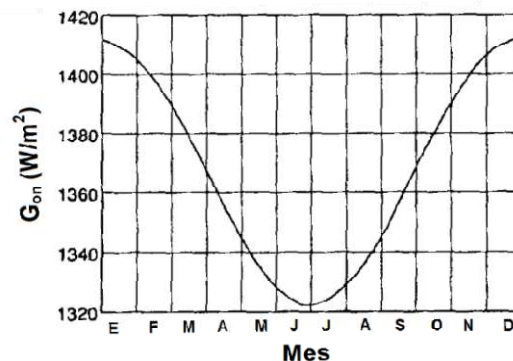


Figura 3. 1 Variación de la radiación solar extraterrestre en el año⁶⁴

⁶⁴ DUFFIE J., BECKMAN W., Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, E.E.U.U., 1980, pg. 9

3.2.2 RADIACIÓN DIRECTA

Radiación solar recibida del sol que no sufre ninguna dispersión al atravesar la atmósfera. Llega a la Tierra en línea recta desde el círculo solar.

3.2.3 RADIACIÓN DIFUSA

Es la parte de la radiación directa que al atravesar la atmósfera se dispersa al incidir sobre diversas partículas que flotan en el aire.

3.2.4 RADIACIÓN GLOBAL

Es la suma de las radiaciones directa y difusa. Las mediciones más comunes de la radiación solar son la radiación global en una superficie horizontal.

3.2.5 NÚMERO DE HORAS DE SOL

El número de horas de sol depende de la situación geográfica y de las condiciones climatológicas. Los valores máximos se alcanzan en las zonas desérticas (por ejemplo en el Sahara 4 000 horas al año) o en alta montaña. La distinta distribución del número de horas de sol año es consecuencia de la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano de la órbita, en un ángulo de declinación y esto da lugar a las distintas estaciones del año.

El número de horas en el día está dado por la siguiente fórmula

$$\#h = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (3.2)$$

Donde:

#h = número de horas de sol en el día

ϕ = latitud geográfica ($^{\circ}$)

δ = ángulo de declinación ($^{\circ}$)

3.2.6 INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA

La radiación que alcanza una superficie plana depende del ángulo de incidencia de esta respecto a la superficie. Si la dirección de la radiación no es perpendicular

a la superficie, entonces el valor real de la energía que incide sobre aquella superficie debe multiplicarse por el coseno del ángulo que forman la dirección de la radiación y la perpendicular a la superficie. El coseno es una función que varía poco para pequeños ángulos, incluso una desviación de 15° es prácticamente inapreciable, pues origina una reducción de la energía incidente del 3.5%.

3.2.7 USOS Y APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR

Las aplicaciones de la energía solar se pueden dividir en dos:

- Producción de energía térmica
- Producción de electricidad directa

El presente estudio se basará en la producción de energía térmica para enfriamiento. La energía térmica se puede dividir en tres grupos:

- Baja temperatura (hasta 100°C)
- Media temperatura (de 100°C a 400°C)
- Alta temperatura (más de 400°C)

3.2.8 CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL

El movimiento aparente del sol es motivado por la rotación de la Tierra, la cual gira sobre su eje en dirección Oeste-Este, provocando que parezca que el Sol es el que se mueve precisamente en la dirección contraria, de Este a oeste.

La trayectoria aparente que sigue el sol sobre el firmamento se llama eclíptica. La eclíptica es una circunferencia imaginaria, pero nosotros sólo apreciamos un arco de ella, puesto que el horizonte nos impide apreciar el arco que se encuentra debajo de nosotros.

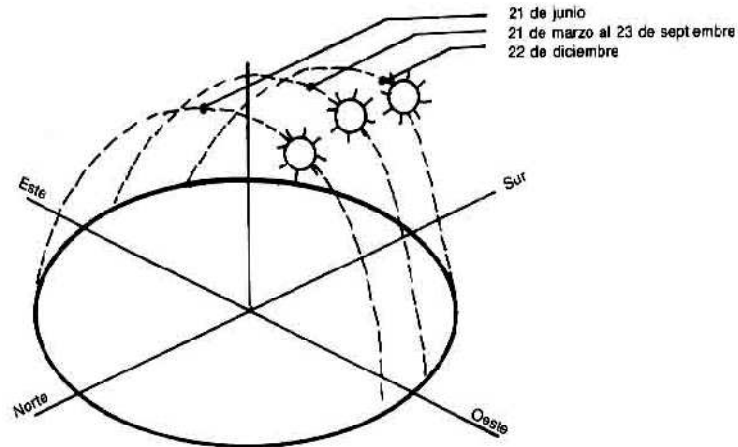


Figura 3.2 Movimiento aparente del Sol en un punto medio de la Tierra⁶⁵

3.2.9 LAS ESTACIONES

Las estaciones son cuatro: primavera, verano, otoño e invierno, correspondiéndose con las sucesivas alturas que va alcanzando el Sol sobre el horizonte en su movimiento anual a lo largo de la eclíptica. El solsticio de junio ocurre regularmente alrededor del 21 de junio y es llamado de verano en el Hemisferio Norte o de invierno en el Hemisferio Sur. El día del solsticio de junio es el día más largo del año en el hemisferio Norte, y el más corto en el hemisferio Sur. El solsticio de diciembre ocurre alrededor del 21 de diciembre y es llamado de invierno en el Hemisferio Norte o de verano en el Hemisferio Sur.

3.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

3.3.1 ABSORTIVIDAD (α)

Al incidir sobre los cuerpos una radiación, estos absorben parte de la radiación y reflejan el resto. Se llama absorptividad al cociente entre la radiación absorbida y la radiación incidente.

$$\alpha = \frac{\text{radiación absorbida}}{\text{radiación incidente}} \quad (3.3)$$

⁶⁵ RIBOT J., Curso de energía solar Tomo 1, Centro de Tecnología Educativa, España, 1995, pg. 83

3.3.2 EMITANCIA (ϵ)

Es el cociente entre la radiación emitida por el cuerpo en cuestión y la que emitiría un cuerpo negro perfecto a la misma temperatura.

$$\epsilon = \frac{\text{Emisión real}}{\text{Emisión del cuerpo negro a la misma temperatura}} \quad (3.4)$$

Si se desea obtener temperaturas elevadas necesitaremos que esta superficie tenga la absorptividad elevada y una emitancia reducida. Los valores de absorptividad y emitancia dependen de la longitud de onda.

3.3.3 SUPERFICIES SELECTIVAS

Son superficies que presentan elevada absorptividad para la luz visible e infrarroja próxima y una reducida emitancia para el infrarrojo lejano.

3.3.4 MATERIALES TRANSPARENTES

Los materiales transparentes son aquellos que permiten a su través el paso de la radiación electromagnética a determinadas longitudes de onda, se caracterizan por su coeficiente de transmitancia (τ) que se define como el cociente entre la radiación después de atravesar la superficie y la de antes de atravesarla. Este valor depende del ángulo de incidencia de la radiación respecto a la superficie.

$$\tau = \frac{\text{radiación que ha atravesado la superficie transparente}}{\text{radiación incidente}} \quad (3.5)$$

3.4 ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

El ángulo de incidencia de una superficie captadora de energía solar depende de los siguientes factores:

3.4.1 DECLINACIÓN (δ)

El ángulo de declinación es el ángulo en que vería al sol un habitante de la Tierra situado en el ecuador en el momento que pasase por el meridiano respecto al

cenit. La declinación, coincide en los solsticios con el valor de $23^{\circ} 27'$ y se anula en los equinoccios. La Tierra queda dividida en 3 zonas principales, simétricas respecto al Ecuador, la zona tropical, la zona templada y la zona glacial. El ángulo de la declinación se puede calcular mediante la fórmula de Cooper:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \times \frac{284+N}{365} \right) \quad (3.6)$$

Donde N es el día del año (N=1 para enero y N = 365 para el 31 de diciembre). La declinación es cero el 22 de marzo y el 23 de septiembre, y alcanza el valor máximo positivo el 22 de junio y el valor máximo negativo el 22 de diciembre.

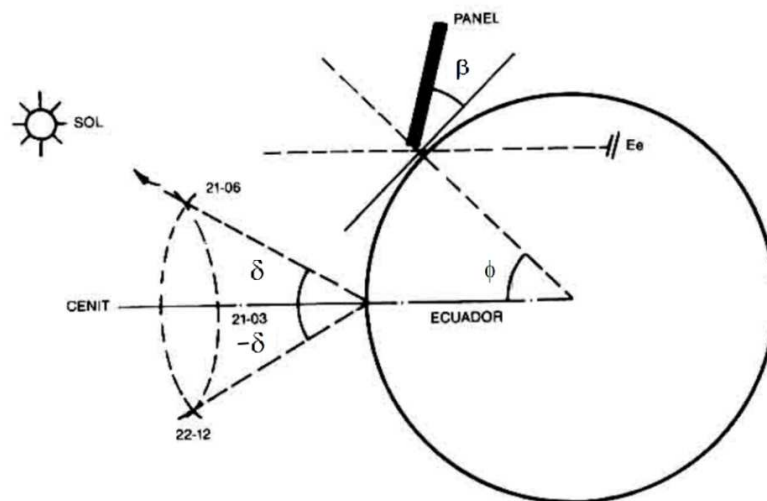


Figura 3.3 Ángulo de declinación⁶⁶

3.4.2 LATITUD GEOGRÁFICA (ϕ)

Si se hiciera un corte imaginario en la Tierra por un plano perpendicular al ecuador y que pase por los polos, existen infinitos planos que cumplen esta condición, pero sólo uno de ellos pasa por el lugar donde nos encontramos. Si sobre este plano trazamos un ángulo con vértice en el centro de la Tierra y extremos sobre el ecuador y sobre el lugar donde nos encontramos este ángulo es el la latitud. A los puntos situados sobre el ecuador, les corresponde una latitud de 0° y a los polos de 90° . La latitud es positiva en el hemisferio norte y negativa en el sur. Este ángulo oscila entre los valores de $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$.

⁶⁶ RIBOT J., pg. 86

3.4.3 INCLINACIÓN (β)

La inclinación de un colector solar es el ángulo formado por este y la horizontal del terreno. Un colector con ángulo de inclinación nulo estaría colocado en el suelo como si fuera una alfombra. Este ángulo oscila entre $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. β mayor a 90° significa que la superficie tiene una componente hacia abajo.

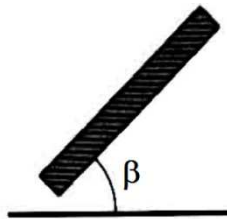


Figura 3.4 Ángulo de inclinación⁶⁷

3.4.4 ÁNGULO DE ACIMUT DE LA SUPERFICIE (γ)

Es el ángulo que forma el plano perpendicular al colector con la dirección de la meridiana. Este ángulo lo tomaremos hacia el sur si estamos en el hemisferio norte y hacia el norte si estamos en el hemisferio sur. Oscila entre $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

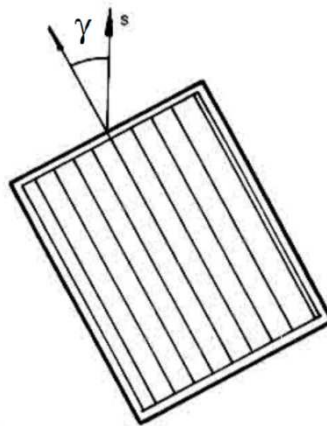


Figura 3.5 Ángulo de orientación (colector visto desde el aire)⁶⁸

3.4.5 ÁNGULO HORARIO (ω)

Es el ángulo que forma la dirección de la meridiana con la sombra proyectada por una estaca vertical. El origen se toma en el mediodía solar en que el ángulo

⁶⁷ RIBOT J., pg. 87

⁶⁸ RIBOT J., pg. 88

horario es de 0. Por convenio se ha acordado que es positivo para antes del mediodía solar (mañana) y negativo para después del mediodía solar (tarde). Dado que el día tienen 24 horas, 1 hora equivale a un ángulo de $360/24=15^\circ$. El ángulo horario expresa el valor del tiempo solar verdadero en grados y se ve afectado por tres circunstancias: la hora oficial, la longitud geográfica y la ecuación del tiempo.

Es necesario definir ciertos ángulos que describen la posición del sol en el cielo.

3.4.6 ÁNGULO DEL CENIT (θ_z)

Es el ángulo entre la vertical y la línea hacia el sol. Es el ángulo de incidencia de la radiación directa en una superficie horizontal.

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta \quad (3.7)$$

3.4.7 ÁNGULO DE LA ALTITUD SOLAR (α_s)

Es el ángulo entre la horizontal y la línea hacia el sol. Es el complemento del ángulo del cenit.

3.4.8 ÁNGULO DEL ACIMUT SOLAR (γ_s)

Es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación directa en el plano horizontal. Para la latitud = 0° se tiene que el ángulo de acimut solar viene dado por:⁶⁹

$$\text{sen}\gamma_s = \frac{\text{sen}\omega\cos\delta}{\text{sen}\theta_z} \quad (3.8)$$

⁶⁹ DUFFIE J., BECKMAN W., pg. 13

3.4.9 ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA INCLINADA

En efecto un colector solar puede captar energía un día determinado del año (por lo correspondiente un ángulo de declinación) y estar situado en un punto cualquiera de la tierra (que tendrá una cierta latitud). Este colector estará inclinado un cierto ángulo respecto a la horizontal del terreno (ángulo de inclinación) y orientado respecto a la dirección de la meridiana (ángulo de orientación). Finalmente, debido a que el sol se desplaza aparentemente sobre la elíptica, el ángulo de incidencia sobre el colector variará a lo largo del día, lo que hace necesario introducir el llamado ángulo horario. El valor del ángulo de incidencia de la radiación directa en una superficie inclinada está dado por:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \text{sen}\delta \text{sen}\phi \cos\beta - \text{sen}\delta \cos\phi \text{sen}\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \\ & \cos\delta \text{sen}\phi \text{sen}\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \text{sen}\beta \text{sen}\gamma \text{sen}\omega \end{aligned} \quad (3.9)$$

Donde:

θ = ángulo incidencia radiación solar sobre un plano inclinado ($^{\circ}$)

δ = declinación ($^{\circ}$)

ϕ = latitud ($^{\circ}$)

β = inclinación ($^{\circ}$)

γ = acimut de la superficie ($^{\circ}$)

ω = ángulo horario ($^{\circ}$)

3.4.10 ÁNGULOS PARA SUPERFICIES QUE RASTREAN AL SOL

Algunos colectores rastrean el sol mediante movimientos que permiten minimizar el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre la superficie y así poder maximizar la radiación directa incidente. Los sistemas de rastreo se clasifican según sus movimientos. La rotación puede ser alrededor de un eje (el cual puede tener cualquier orientación pero que en la práctica es usualmente horizontal este-oeste, horizontal norte-sur, vertical o paralelo al eje de la tierra) o alrededor de 2

ejes. Se analizará solo el movimiento alrededor de un solo eje pues es una opción viable para el caso de nuestro colector.

3.4.10.1 Plano rotado alrededor de un eje horizontal este-oeste con un ajuste diario

Se rota el plano alrededor del eje horizontal este-oeste de manera que la radiación directa sea normal a la superficie en la tarde de cada día. Se realiza un solo ajuste diario. Las ecuaciones para este caso son:

$$\cos\theta = \text{sen}^2\delta + \cos^2\omega \quad (3. 10)$$

La inclinación de la superficie será fijada para cada día y será:

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (3. 11)$$

$$\text{Si } (\phi - \delta) > 0, \gamma = 0^\circ \quad (3. 12)$$

$$\text{Si } (\phi - \delta) < 0, \gamma = 180^\circ \quad (3. 13)$$

3.4.10.2 Plano rotado alrededor de un eje horizontal este-oeste con un ajuste continuo

Se rota el plano alrededor del eje horizontal este-oeste de manera continua para minimizar el ángulo de incidencia. Las ecuaciones para este caso son:

$$\cos\theta = (1 - \cos^2\delta\text{sen}^2\omega)^{1/2} \quad (3. 14)$$

$$\tan\beta = \tan\theta_z|\cos\gamma_s| \quad (3. 15)$$

$$\text{Si } |\gamma_s| < 90, \gamma = 0^\circ \quad (3. 16)$$

$$\text{Si } |\gamma_s| > 90, \gamma = 180^\circ \quad (3. 17)$$

3.4.10.3 Plano rotado alrededor de un eje horizontal norte-sur con un ajuste continuo

Se rota el plano alrededor del eje horizontal norte-sur de manera continua para minimizar el ángulo de incidencia. Las ecuaciones para este caso son:⁷⁰

$$\cos\theta = (\cos^2\theta_z + \cos^2\delta\text{sen}^2\omega)^{1/2} \quad (3. 18)$$

$$\tan\beta = \tan\theta_z|\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (3. 19)$$

$$\text{Si } \gamma_s > 0, \gamma = 90^\circ \quad (3. 20)$$

⁷⁰ DUFFIE J., BECKMAN W., pg. 21-23

$$\text{Si } \gamma_S < 0, \gamma = -90^\circ \quad (3.21)$$

3.5 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN PARA CIELO DESPEJADO

Los efectos de la atmósfera en reducir y absorber la radiación dependen del tiempo y de las condiciones atmosféricas y el cambio en la masa de aire. Es útil definir un estándar de cielo despejado y calcular la radiación que recibe una superficie en estas condiciones. Hottel en 1976 presentó el siguiente método para determinar esta radiación.

$$G_b = G_{on} \tau_b \quad (3.22)$$

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(-\frac{k}{\cos \theta_z}\right) \quad (3.23)$$

Donde:

G_b = radiación directa (W/m^2)

G_{on} = radiación extraterrestre (W/m^2)

τ_b = transmitancia atmosférica para la radiación directa

Las constantes a_0 , a_1 y k para una atmósfera estándar con una visibilidad de 23 km se encuentran a partir de las constantes las cuales están dadas para altitudes menores a 2.5 km por:

$$a_0 = 0.4237 - 0.0082(6 - A_t)^2 \quad (3.24)$$

$$a_1 = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A_t)^2 \quad (3.25)$$

$$k = 0.2711 + 0.01858(2.5 - A_t)^2 \quad (3.26)$$

Donde:

A_t = altitud (km)

Para la transmitancia atmosférica de la radiación difusa se tiene:

$$\tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b \quad (3.27)$$

3.6 ESTIMACIÓN RADICIÓN HORARIA A PARTIR DE DATOS DIARIOS

Cuando se necesitan datos hora por hora (u otra base de tiempo menor) es necesario comenzar con datos diarios y estimar los valores horarios a partir de los números diarios. Sin embargo no hay manera de determinar condiciones de nubosidad intermitentes, por lo que el método presentado funciona mejor para días claros. Estudios estadísticos de la distribución de la radiación en las superficies horizontales a través del día, utilizando datos promedio mensuales para un gran número de estaciones, conllevaron a Liu y Jordan a desarrollar la siguiente ecuación:

$$r_d = \frac{I}{H_{td}} \quad (3.28)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \left(\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \right) \quad (3.29)$$

$$\omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (3.30)$$

Donde:

r_d = relación entre radiación horaria total y la radiación diaria total

I = radiación horaria total (W/m^2)

H_{td} = radiación diaria total (W/m^2)

ω = ángulo horario ($^\circ$)

ω_s = ángulo horario del ocaso ($^\circ$)

δ = declinación ($^\circ$)

ϕ = latitud ($^\circ$)

3.7 COMPONENTES DIRECTA Y DIFUSA DE LA RADIACIÓN DIARIA

Los estudios de la radiación diaria disponibles muestran que la fracción de radiación que es difusa es una función del índice de claridad (K_T).⁷¹

⁷¹ DUFFIE J., BECKMAN W., pg.73-89

De acuerdo a Collares-Pereira-Rabl los valores de $\frac{H_d}{H}$ vienen dados por:

$$\begin{array}{ll}
 0.99 & \text{para } K_T \leq 0.17 \\
 1.188 - 2.272 K_T + 9.473 K_T^2 - 21.865 K_T^3 + 14.648 K_T^4 & \text{para } 0.17 < K_T < 0.75 \\
 -0.54 K_T + 0.0632 & \text{para } 0.75 < K_T < 0.80 \\
 0.2 & \text{para } K_T \geq 0.80 \quad (3.31)
 \end{array}$$

Donde:

H_d = radiación difusa (W/m^2)

H = radiación diaria total (W/m^2)

K_T = índice de claridad

3.8 COLECTOR SOLAR

3.8.1 DEFINICIÓN DE COLECTOR

Sistema capaz de captar y aprovechar energía solar, para luego transformarla en energía térmica y así elevar la temperatura de un fluido.

3.8.2 CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES

En función al índice de concentración (C) se pueden clasificar a los colectores solares en dos grandes grupos:

- Sin concentración ($C=1$).
Dentro de este grupo se tienen: a) placa plana (flat plate collector) (FPC)
b) colector de tubos al vacío (evacuated tube collector) (ETC)
- Con concentración ($C>1$)
Dentro de este grupo se tienen: a) cilindro-parabólico (parabolic trough collector) (PTC) b) colector parabólico compuesto (compound parabolic collector) (CPC) c) reflector de Fresnel lineal (linear Fresnel reflector) (LFR) d) reflector de plato parabólico (parabolic dish reflector) (PDR) y e) colector de campo de heliostatos (heliostat field collector) (HFC).

Los colectores con concentración de la radiación solar pueden clasificarse a su vez en:

- No forman imagen (nonimaging collectors)
- Forma imagen (imaging collectors)

En función al movimiento de rotación del colector se pueden clasificar en estacionarios, rastreo alrededor de un eje y rastreo alrededor de dos ejes.

3.8.3 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES COLECTORES SIN CONCENTRACIÓN

3.8.3.1 Colector de placa plana (flat plate collector) (FPC)

Son los más extendidos comercialmente, pues consiguen aumentos de temperatura (temperatura de trabajo) de unos 60° C con un coste reducido. Están compuestos por los siguientes elementos:

- Cubierta exterior: tiene como funciones: permitir el paso de la radiación solar, disminuir las pérdidas de calor producidas por el viento y reducir las pérdidas de calor por radiación del absorbedor (radiación infrarroja).
- Absorbedor: Capta la radiación solar, la transforma en calor y transmite esta en forma de energía a un fluido portador de calor.
- Aislante térmico: Permite disminuir las pérdidas de calor debidas a la conducción de calor de la superficie absorbedora hacia el fondo y las partes laterales.
- Carcasa: Constituye el soporte para los elementos que forman el captador.

3.8.3.2 Colector de tubos al vacío (evacuated tube collector) (ETC)

Los colectores de tubos de vacío alcanzan mayores temperaturas que los colectores de placa plana. Es habitual que lleguen a temperaturas de trabajo de más de 100° C. Son bastante más caros que los colectores de placa plana. El vidrio exterior del colector plano se sustituye por los propios tubos, en el interior de los cuales se ha hecho el vacío. Las tuberías que transportan el fluido se

encuentran en el interior de los tubos de vidrio. El vacío impide cualquier transmisión de calor al exterior, lo que explica las altas temperaturas que pueden alcanzar este tipo de instalaciones.

Es oportuno señalar que los tubos al vacío se utilizan también en colectores con concentración como en el colector cilindro-parabólico (PTC) y en el concentrador parabólico compuesto (CPC).

3.8.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES COLECTORES CON CONCENTRACIÓN

3.8.4.1 Concentrador parabólico compuesto (compound parabolic concentrator) (CPC)

Consta de los siguientes elementos:

- Reflector: superficie que refleja los rayos del sol hacia el foco de la parábola
- Absorbedor: superficie que recepta los rayos del reflector y contiene en su interior el fluido portador del calor.
- Cubierta: disminuye las pérdidas de calor por convección y radiación, además de proteger al reflector.

El colector parabólico compuesto (CPC) es un concentrador que no necesita rastreo preciso y que no forma imágenes. Consiste de dos secciones de parábola de segundo grado localizadas simétricamente alrededor del plano medio del colector. Tiene la cualidad de poseer un gran ángulo de aceptación, que le permite funcionar durante el día entero sin la necesidad de orientación, cuando el eje más largo está orientado hacia el este-oeste. Este tipo de colector concentra la radiación mediante el uso de múltiples reflexiones así como la intercepción directa. El gran ángulo de aceptación del CPC tiene la gran ventaja que en aplicaciones en áreas nubosas puede interceptar y concentrar la radiación difusa con una relación de $1/C$. (C es el factor de concentración). El ángulo entre el eje del CPC y la línea que conecta el foco de una de las parábolas con la arista opuesta de la apertura es el semiángulo de aceptación θ_a .



Figura 3. 6 Partes de un concentrador parabólico compuesto CPC⁷²

Si el reflector es perfecto, cualquier radiación que entra a través de la apertura con ángulos entre $\pm \theta_a$ será reflejada hacia el absorbedor. El índice de concentración es una función del semiángulo de aceptación (θ_a) y está dado por:

$$C = \frac{1}{\sin \theta_a} \quad (3. 32)$$

Donde:

C = índice de concentración

θ_a = semiángulo de aceptación ($^\circ$)

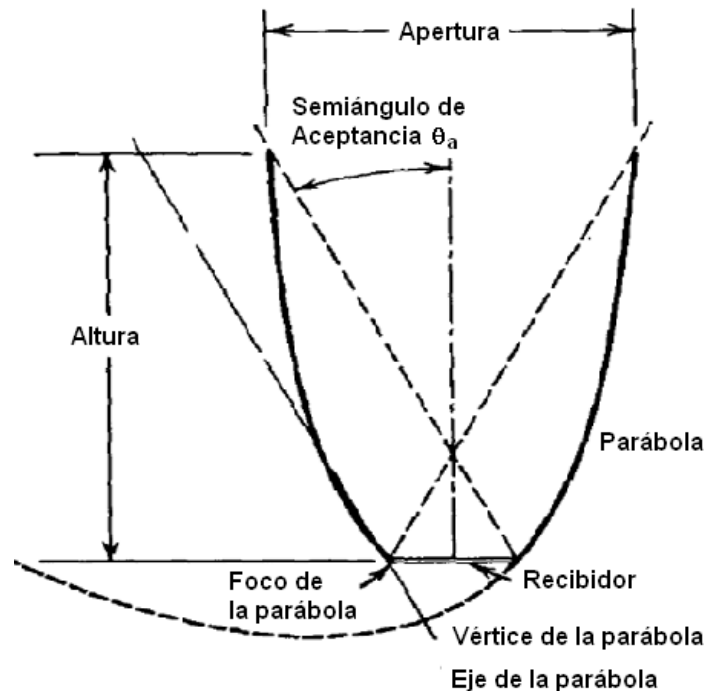


Figura 3.7 Sección transversal de un CPC simétrico no truncado⁷³

⁷² <http://www.solargenix.com/index.cfm>

⁷³ DUFFIE J., BECKMAN W., pg. 346

A continuación se presentan las configuraciones más comunes de los CPCs.

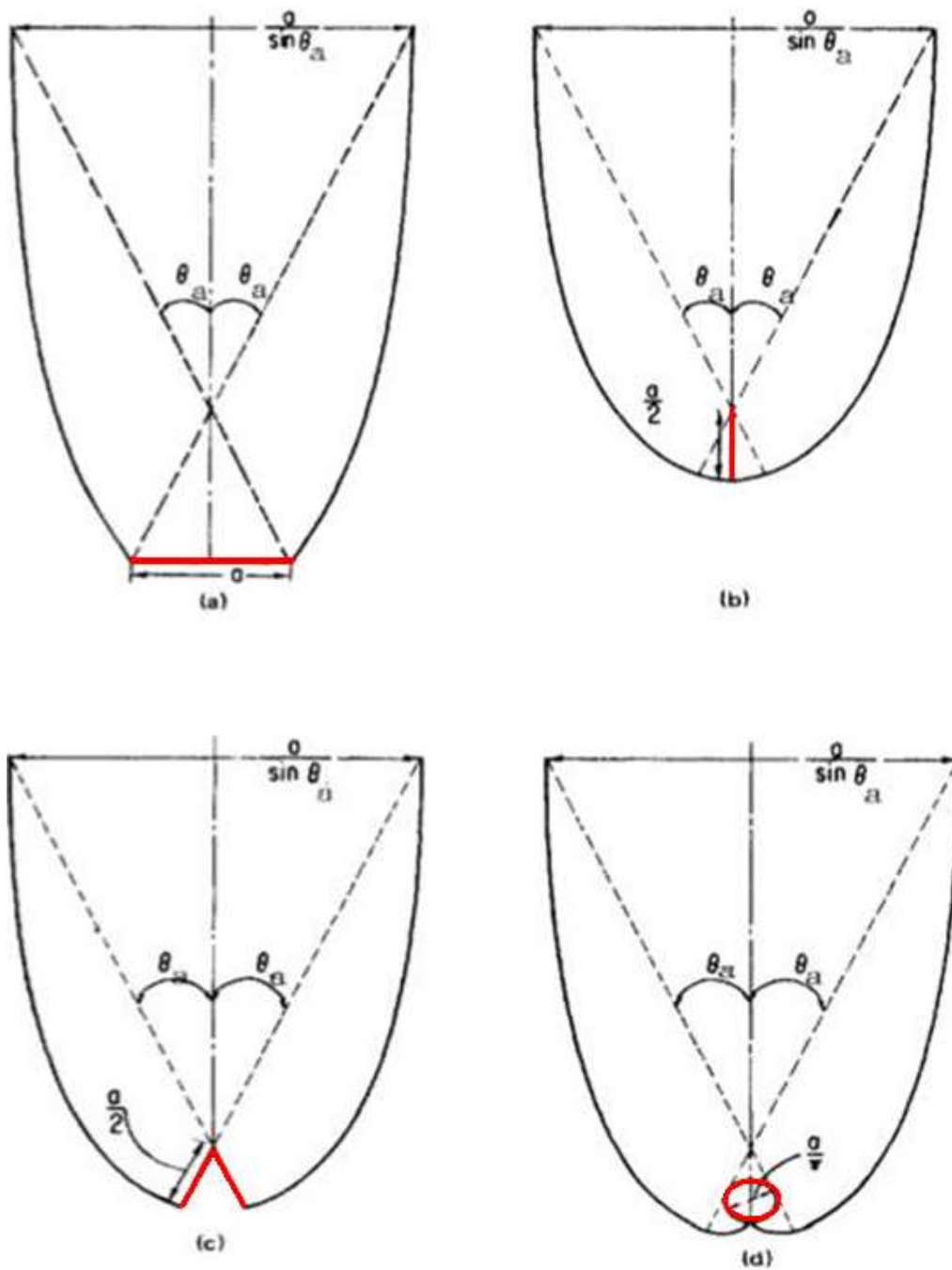


Figura 3.8 CPCs con diferentes formas de absorbedores. Tiene el mismo perímetro de absorbedor a y semiángulo de aceptación θ_c ⁷⁴

⁷⁴ RABL A., Active solar collectors and their applications, Oxford University Press, Estados Unidos, 1985, pg. 149

- **Geometría del CPC con receptor tubular**

Es conveniente utilizar las coordenadas especiales de la figura 3.9. El punto B del reflector está descrito en términos de dos parámetros: el ángulo $\theta = \angle AOC$, subtendido por las líneas desde el origen O (centro del tubo absorbedor) a A y C, y la distancia $\rho = \overline{BC}$. La recta BC es tangente al tubo absorbedor en C. La solución está dada en dos porciones separadas, una evolvente ordinaria para $|\theta < \theta_a + \frac{\pi}{2}|$, y una parábola para $|\theta > \theta_a + \frac{\pi}{2}|$. Para la construcción de la parábola se toman las siguientes ecuaciones que describen la posición del punto B:

$$x = r_a \text{sen}\theta_p - \rho_p \text{cos}\theta_p \quad (3.33)$$

$$y = -r_a \text{cos}\theta_p - \rho_p \text{sen}\theta_p \quad (3.34)$$

$$\rho_p = \left\{ \begin{array}{l} r_a \theta_p \text{ si } |\theta_p \leq \theta_a + \pi/2| \\ r_a \frac{\theta_p + \theta_a + \pi/2 - \text{cos}(\theta_p - \theta_a)}{1 + \text{sen}(\theta_p - \theta_a)} \text{ si } \theta_a + \pi/2 \leq |\theta_p| \leq 3\pi/2 - \theta_a \end{array} \right\} \quad (3.35)$$

Donde:

θ_p = ángulo de la parábola ($^\circ$)

x = coordenada x del punto B que describe a la parábola (m)

y = coordenada y del punto B que describe a la parábola (m)

r_a = radio del tubo absorbedor (m)

$\rho_p = \overline{BC}$ = distancia entre el punto B y C de la parábola (m)

Es frecuente trincar las hojas reflectoras del CPC para que ocupen menos espacio y reducir el costo del material reflector. El truncamiento reduce el factor de concentración C, pero la pérdida de eficiencia de captación que resulta de la operación en general es pequeña debido a que la parte superior de la parábola no intercepta mucha radiación.

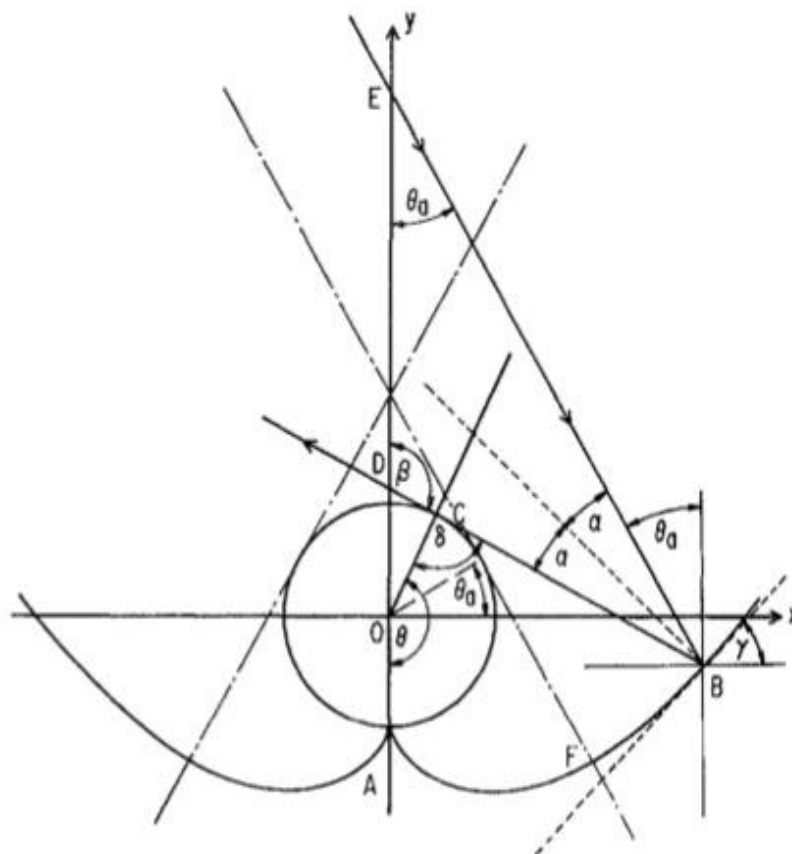


Figura 3.9 Coordenadas y parámetros para la descripción del CPC para un absorbedor tubular⁷⁵

El número de reflexiones que sufren los rayos dentro del colector varían con el ángulo de incidencia θ y con el punto de incidencia en la apertura. Una buena estimación de la fracción de radiación que es transmitida a través del CPC con una reflectividad de la parábola ρ está dada por:

$$\tau_{CPC} = \rho_r^{n_r} \quad (3.36)$$

Donde:

τ_{CPC} = transmisividad del CPC

ρ_r = reflectividad de la parábola

n_r = número promedio de reflexiones.

⁷⁵ RABL A., pg. 152

El valor de n se puede obtener de la figura 3.10. Para el caso de receptor tubular se puede utilizar la del caso b sin incurrir en mayor error. Si el truncamiento es tal que el número de reflexiones está por debajo de la curva N_{\min} , el número promedio es de $1-1/C$.

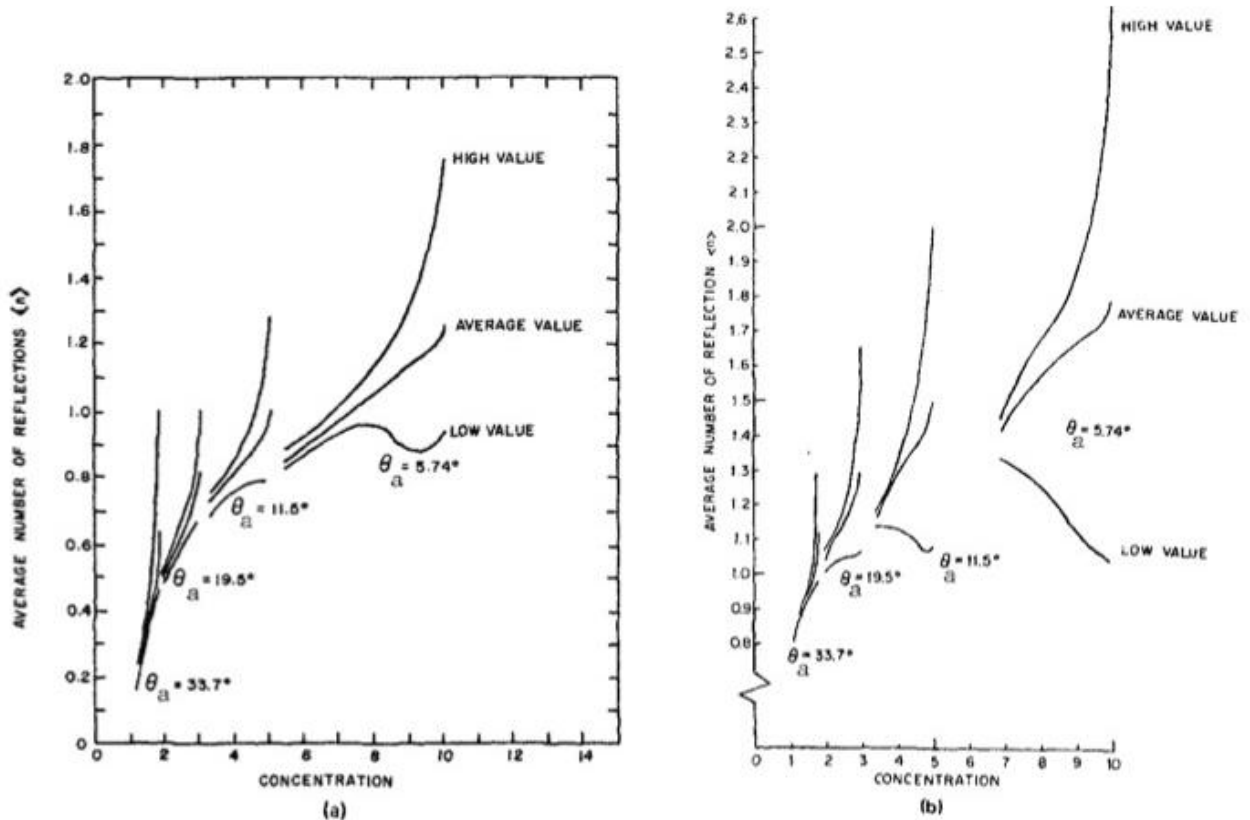


Figura 3.10 Número de reflexiones para CPCs completos y truncados
a) CPC con receptor plano (Fig. 3.11a) b) CPC con receptor en forma de aleta (Fig. 3.11b)⁷⁶

- **Orientación y energía absorbida para los colectores CPC**

Para encontrar la orientación idónea es necesario calcular la radiación absorbida. Una orientación lógica para tal colector es a lo largo del eje horizontal este-oeste inclinado hacia el ecuador, y más o menos ajustable respecto a este eje. El CPC es colocado de manera que el pseudo ángulo de incidencia de la radiación directa (la proyección del ángulo de incidencia en el plano vertical norte-sur) esté entre los límites $\pm\theta_c$ durante el tiempo que es necesario que funcione el colector. En la práctica, se necesitan compromisos entre la frecuencia del movimiento del

⁷⁶ RABL A., pg. 155

colector y el índice de concentración, con altos radios, asociados con pequeños ángulos de aceptación y posicionamiento relativamente frecuente.

Para estimar la radiación absorbida por el absorbedor de un CPC, es necesario determinar si el ángulo de incidencia de la radiación directa está dentro del ángulo de aceptación $2\theta_c$ y luego estimar las contribuciones de la radiación directa, difusa y la reflejada por el suelo. La radiación absorbida está dada por: ⁷⁷

$$S = A_c (G_b \tau_{c,b} \tau_{CPC,b} \alpha_b + G_d \tau_{c,d} \tau_{CPC,d} \alpha_d + G_g \tau_{c,g} \tau_{CPC,g} \alpha_g) \quad (3.37)$$

$$G_b = FG_{bn} \cos \theta \quad (3.38)$$

$$G_d = \begin{cases} \frac{G_d}{c} & \text{si } (\beta + \theta_a) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{c} + \cos \beta \right) & \text{si } (\beta + \theta_a) > 90^\circ \end{cases} \quad (3.39)$$

$$G_g = \begin{cases} 0 & \text{si } (\beta + \theta_a) < 90^\circ \\ \frac{G_g}{2} \left(\frac{1}{c} - \cos \beta \right) & \text{si } (\beta + \theta_a) > 90^\circ \end{cases} \quad (3.40)$$

Donde:

S = radiación absorbida (W)

A_c = área del colector (m^2)

G_b = radiación directa (W/m^2)

$\tau_{c,b}$ = transmisividad de la cubierta a radiación directa

$\tau_{CPC,b}$ = transmisividad del CPC a radiación directa

α_b = absorptividad del receptor de radiación directa

G_d = radiación difusa (W/m^2)

$\tau_{c,d}$ = transmisividad de la cubierta a radiación difusa

$\tau_{CPC,d}$ = transmisividad del CPC a radiación difusa

α_d = absorptividad del receptor de radiación difusa

G_g = radiación reflejada por el suelo (W/m^2)

$\tau_{c,g}$ = transmisividad de la cubierta a radiación reflejada por el suelo

$\tau_{CPC,g}$ = transmisividad del CPC a radiación reflejada por el suelo

⁷⁷ DUFFIE J., BECKMAN W., pg. 352

α_g = absorptividad del receptor de radiación reflejada por el suelo

C = índice de concentración

β = inclinación ($^\circ$)

θ_a = semiángulo de aceptación ($^\circ$)

F= factor que vale 1 dependiendo si el colector ve o no a la radiación

3.8.4.2 Cilindro-parabólico (parabolic trough collector) (PTC)

Se construyen en forma de sectores cilíndricos, en cuyo foco lineal se coloca la tubería que contiene el fluido a calentar. El seguimiento del sol sólo debe hacerse sólo en una dirección.



Figura 3. 11 Colector cilindro-parabólico

3.9 RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR

Una fuente importante de información respecto a la radiación solar es el Atlas Solar del Ecuador elaborado por Corporación para la Investigación Energética (CIE) y el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), donde se pueden encontrar datos de la radiación promedio mensual difusa, directa y global para los doce meses del año. En la figura 3.12 se presenta un ejemplo de los mapas que se encuentran en el Atlas y en la 3.13 un mapa de la radiación solar anual promedio en el Ecuador obtenido del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

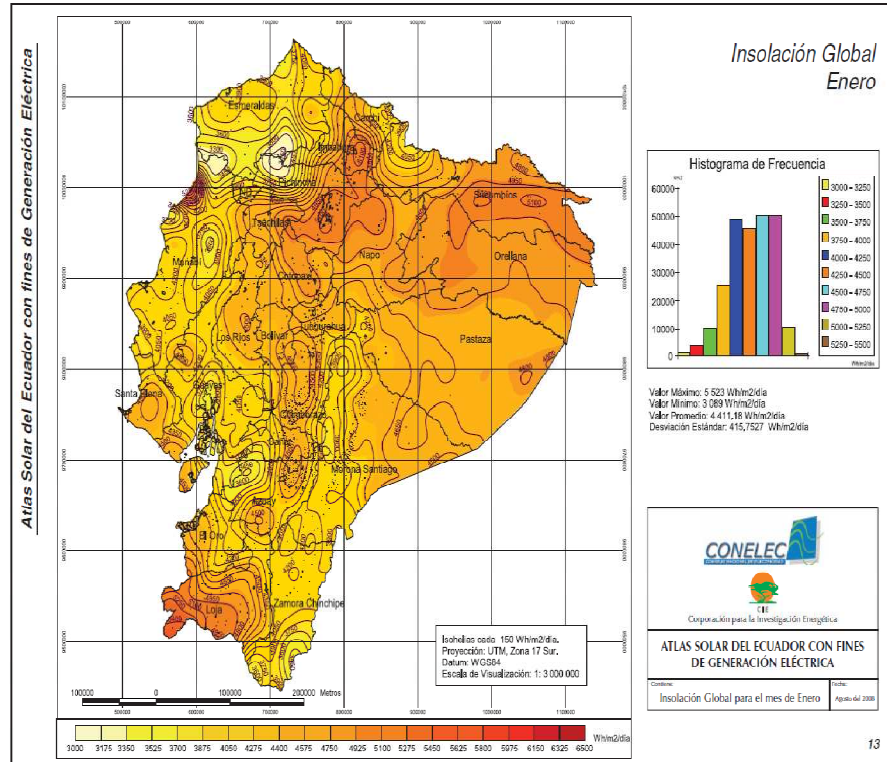


Figura 3.12 Mapa del Atlas Solar del Ecuador⁷⁸

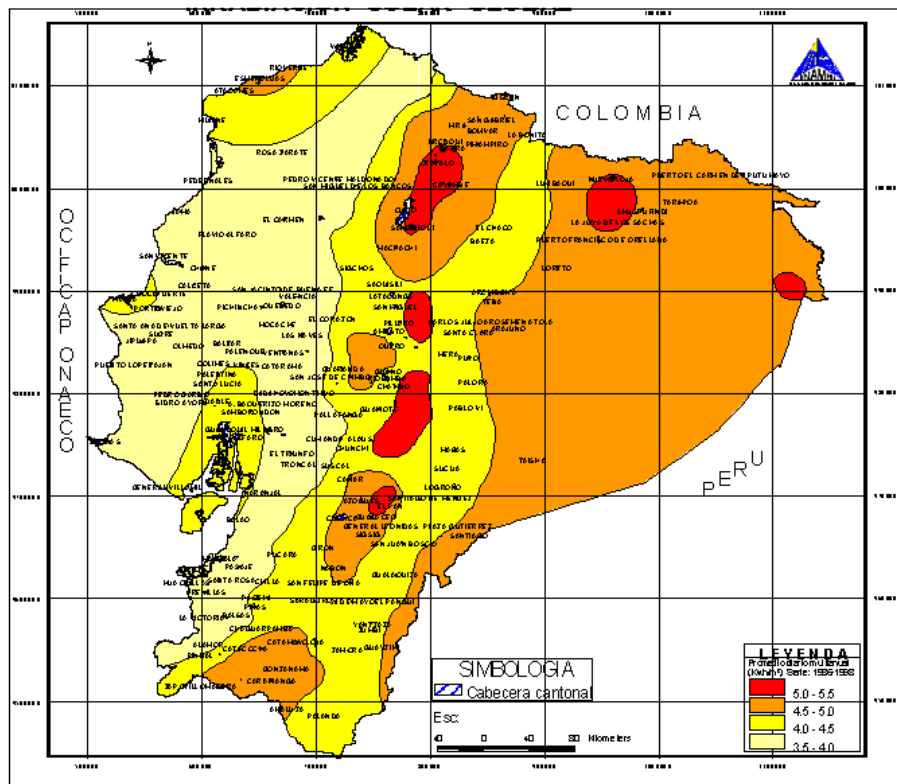


Figura 3.13 Mapa de la irradiación solar global del Ecuador⁷⁹

⁷⁸ <http://www.conelec.gov.ec/downloads/Atlas.pdf>

3.10 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para las medidas de la radiación solar, existen diversos instrumentos que son:

- Piranómetro
- Pirheliómetro
- Heliógrafo

3.10.1 PIRANÓMETRO

Es un instrumento que mide la radiación total (directa + difusa). Consta de una cubierta transparente semiesférica en cuyo interior se ha hecho vacío. En el centro se encuentra una célula fotoeléctrica especial o una termopila formada por sectores blancos y negros. El piranómetro proporciona una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente.

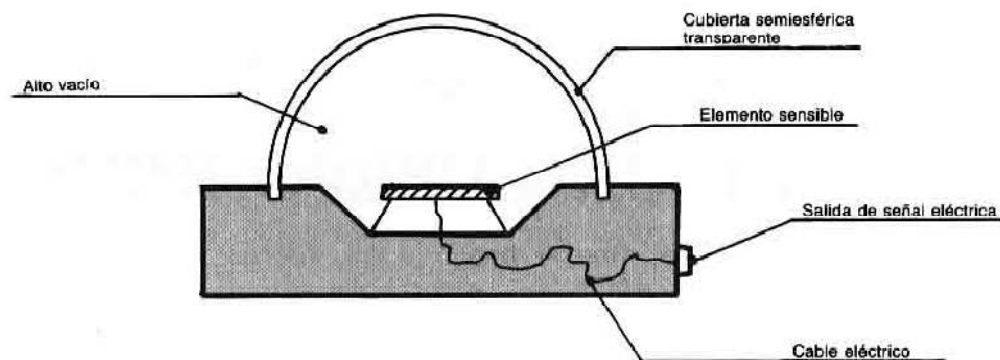


Figura 3.14 Esquema de un piranómetro⁸⁰

3.10.2 PIRHELIÓMETRO

Es un instrumento destinado a medir la radiación directa. Tiene un funcionamiento similar al del piranómetro. Este requiere un mecanismo de seguimiento del sol.

⁷⁹ <http://www.inamhi.gov.ec/mapas/irradiacion.gif>

⁸⁰ RIBOT J., pg. 9

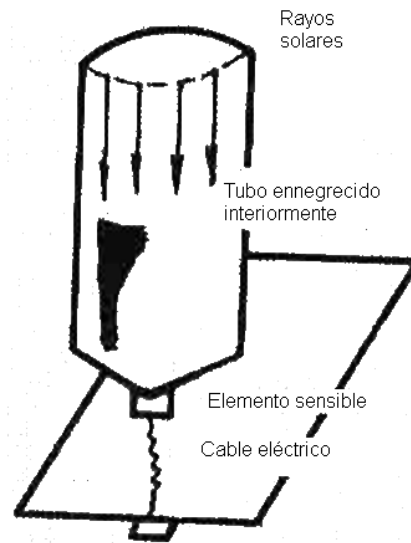


Figura 3.15 Esquema de un pirheliómetro⁸¹

3.10.3 HELIÓGRAFO

Es un instrumento que no mide propiamente la radiación solar sino el número de horas de sol. Consta de una bola de vidrio que hace de lente y de una tira de papel especial, convenientemente graduada. Cuando hace sol el papel se va quemando y al cabo del día puede saberse el número de horas en función de las marcas consumidas.

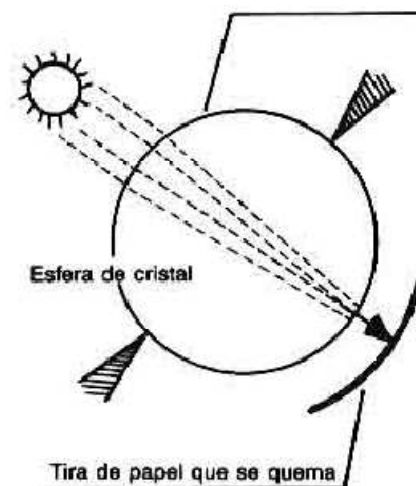


Figura 3.16 Esquema de un heliógrafo⁸²

⁸¹ RIBOT J., pg. 10

⁸² RIBOT J., pg. 12

CAPÍTULO IV

OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS DE ADSORCIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se construye un equipo de obtención de isósteras para poder obtener los parámetros de la ecuación de estado del par adsorptivo. Con los resultados experimentales se construyen las isósteras y a través del método de los mínimos se encuentran los coeficientes de la ecuación Dubinin-Astakhov (D-A). El par adsorbente-adsorbato utilizado es carbón activado (hecho en Ecuador) y metanol.

4.2 ANTECEDENTES

Dentro del grupo de adsorbentes existentes (zeolitas, sílica gel, carbón activado, etc.), se presentan una gran diversidad de tipos. Dentro de la literatura los adsorbentes utilizados en su mayoría son obtenidos localmente o de donaciones de compañías fabricantes. En pocas ocasiones se especifica con exactitud el material adsorbente utilizado, ya sea porque este fue producido en los laboratorios o porque es un material doméstico. Se reporta que en las aplicaciones de refrigeración el adsorbente más utilizado es el carbón activado⁸³, debido a que este puede ser producido localmente. La zeolita y sílica gel tienen altas temperaturas de regeneración (250 - 300°C) mientras que el carbón activado tiene bajas temperatura de regeneración (80 - 150 °C).⁸⁴ Construir un colector que alcance temperaturas de regeneración de la zeolita y sílica gel encarece más el equipo. Por estas razones se estudiará el carbón activado como adsorbente y como adsorbato el metanol. Por último se procederá a calcular los valores de los coeficientes de de la ecuación de Dubinin-Astakhov (n , W_0 , D).

⁸³ WANG R., WANG L.,

⁸⁴ ALGHOUL M., SOPIAN K., WAHAB M.

4.3 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Las isotermas de adsorción pueden ser obtenidas por medio de la ecuación más general (1.16) o por las diferentes relaciones mostradas en la sección 1.3. Dependiendo del método utilizado se empleará una de estas ecuaciones. En el presente estudio se considerarán los métodos para la obtención de isotermas:

- Gravimétrico: se pesa la masa de adsorbato adsorbido
- Volumétrico: se mide el volumen de adsorbato adsorbido

4.3.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Este es utilizado en muchas aplicaciones de la adsorción en fase gaseosa, involucra la medición de la cantidad adsorbida por el adsorbente mediante el pasaje. Estas medidas de isotermas son rápidas y precisas, y la interpretación es sencilla, un problema es la adsorción en las paredes del equipo en vez del adsorbente, que puede conllevar a un error. Otra versión utiliza una columna de adsorbente donde periódicamente el flujo es detenido y la columna es sellada y pesada. La medida de la presión como una función de la temperatura para una serie de cargas de adsorbatos diferentes conduce a una familia de isósteras de las cuales las isotermas pueden ser construidas.

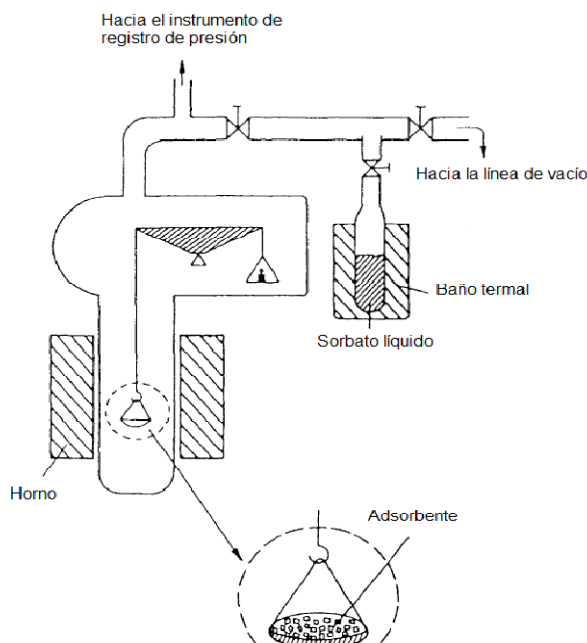


Figura 4.1 Esquema del método gravimétrico⁸⁵

⁸⁵ KARGE H., WEITKAMP J., pg. 19

4.3.2 MÉTODO VOLUMÉTRICO

Generalmente tiene un recipiente que contiene el adsorbente sujeto a un cambio medido de su concentración de adsorbato. La última concentración revela el monto adsorbido mediante un balance de masas. Para gases es necesario un transductor de presión ya que el volumen y temperatura son establecidos. Este método es probablemente el mejor en términos de flexibilidad, exactitud adecuada y bajo costo⁸⁶. La aplicación del método volumétrico para la determinación de las isothermas de adsorción puede ser reducida al siguiente procedimiento. Primero el adsorbato gaseoso es introducido en un recipiente y el monto dosificado es medido, generalmente en centímetros cúbicos estándares. Luego, cuando el equilibrio es logrado la cantidad de gas no adsorbida y la adsorbida son calculadas.

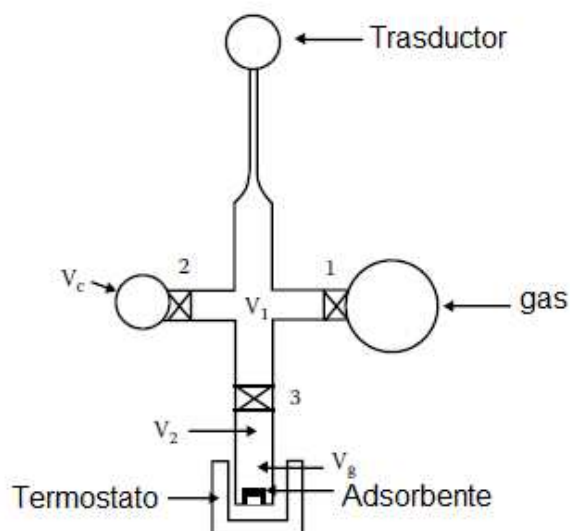


Figura 4.2 Esquema del método volumétrico⁸⁷

Cabe resaltar que para ambos métodos antes del ensayo es necesario regenerar la muestra de adsorbente bajo condiciones de vacío y alta temperatura durante algunas horas para asegurar una desorción completa.

Las constantes que rigen las ecuaciones de adsorción descritas en la sección 1.3 se obtendrán del diagrama de Clapeyron que muestra en el eje vertical la presión y en el eje horizontal la temperatura. En este diagrama se dibujan isósteras

⁸⁶ KENT S., pg. 17

⁸⁷ MALHERBE R., Adsorption and Diffusion in Nanoporous Materials, CRC Press, E.E.U.U, 1995, pg. 48

(concentración constante) y se visualiza mucho mejor el cliso termodinámico de la adsorción. Tanto las ecuaciones como los métodos de obtención de isotermas son los mismos para las isósteras, la diferencia radica en que para las isotermas el parámetro que se mantiene constante es la temperatura y para las isósteras la concentración del adsorbato. Se ha decidido obtener isósteras (concentración constante) en vez de isotermas debido a la complejidad del control del proceso de mantener la temperatura constante.

4.4 EQUIPO SELECCIONADO PARA LA DETERMINACIÓN DE ISÓSTERAS

Se ha consultado en los distintos laboratorios del Ecuador sobre la posibilidad de realizar isotermas (temperatura constante) o isósteras (concentración constante) de adsorción en gases, pero se manifestó que no se puede realizar este ensayo por lo cual se ha decidido construir un equipo propio. Debido a que en la bibliografía no se identifica ninguna norma para obtención de isósteras en fase gaseosa se aplicó el método volumétrico encontrado en la literatura. No se escogió el método gravimétrico porque no se cuenta con una balanza electrónica de la precisión necesaria. Se tomará como base para su construcción un equipo desarrollado en la Universidad de Burgos, España por el Dr. Martín González⁸⁸

4.4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo permite obtener directamente la ecuación de estado con vista a representar el diagrama de Clapeyron y posteriormente obtener las variables de la ecuación de estado. En la figura 4.3 se muestra un diagrama del equipo y en la 4.4 se enseña una foto del mismo. Fotos adicionales y costo del equipo se pueden encontrar en el Anexo II. El equipo consta de una olla de presión de aluminio con capacidad de 8 litros. La hermeticidad del recinto viene dada por un empaque de caucho entre la olla y la tapa. En el interior de la olla se encuentra un disipador calor. En la parte inferior del disipador se colocan tres resistencias cerámicas de 15Ω y 30W que calientan controladamente el adsorbente. Para la

⁸⁸ GONZÁLEZ M., pg. 5

alimentación de electricidad de las resistencias se utiliza una fuente de 12V y 5.3A. En la olla de presión está colocado un aislante de lana de vidrio de 5cm de espesor. Conectada a la olla de presión se encuentra una probeta de vidrio de 250 ml donde se coloca el metanol a ser adsorbido. Se conecta al sistema empleado una bomba de vacío similar a la que se muestra en el catálogo del Anexo III. Las características de esta bomba son las siguientes:

- Marca: Gast
- Vacío Máximo: 20" Hg (27" intermitente), 1.3 CFM de flujo abierto
- Trabajo intermitente está definido como 10 minutos o menos encendido, y 10 minutos o más apagado.

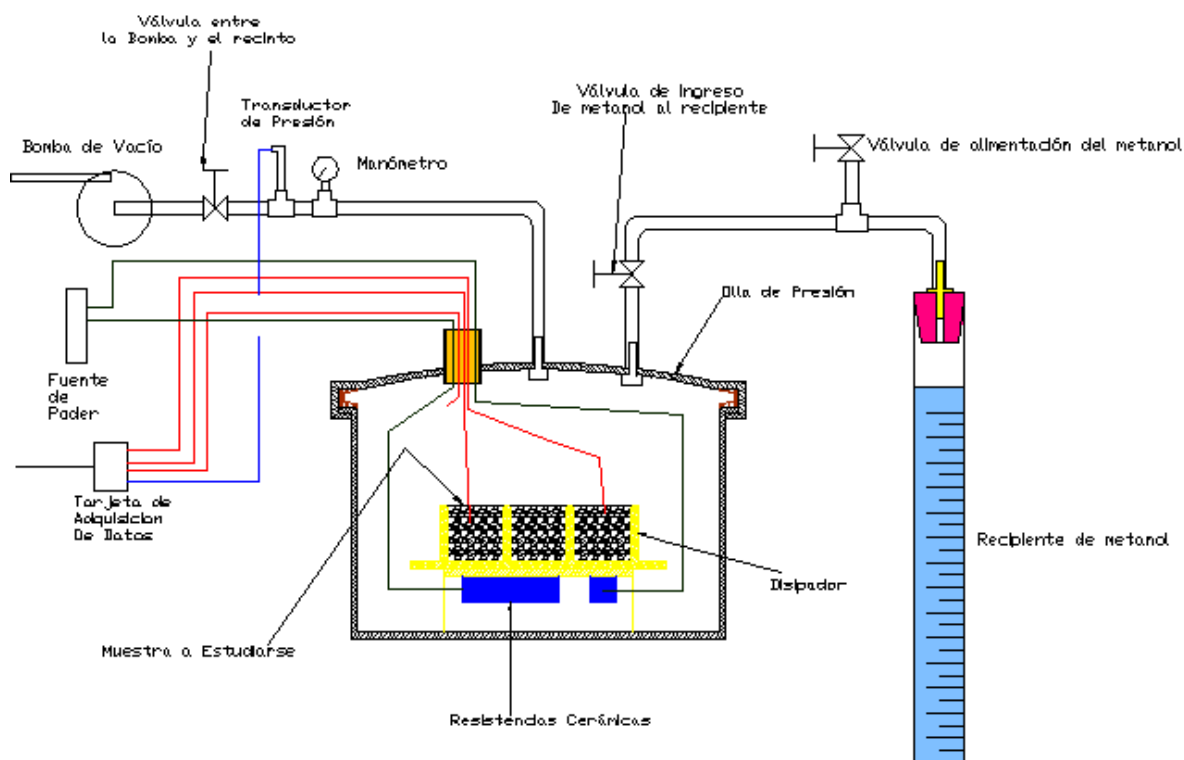


Figura 4.3 Diagrama del equipo para la obtención de isósteras⁸⁹

Los sistemas de medición empleados en el equipo son los siguientes:

- Transductor de presión absoluta de -1 a 5 bar, salida 4 a 20 mA, exactitud 0.5% F.S. Suministro de electricidad VDC de $24 \pm 10\%$. (Anexo III)
- 2 termocuplas tipo K para medir la temperatura en la muestra.

⁸⁹ Elaboración propia

- 1 termocupla tipo K para medir la temperatura ambiente dentro de la olla
- 1 termómetro de Bulbo, marca BOECO, rango -15 a 115 °C. (medición temperatura ambiente)
- Tarjeta de adquisición datos USB 6009 marca National Instruments (Anexo III).
- 1 Manómetro marca REED, rango - 30" Hg a 0"Hg, 0 psi a 30 psi.

La tarjeta de adquisición de datos presenta entradas de voltaje mas no de amperios por lo que se procedió a cambiar la señal de salida del transductor de presión de 4 – 20 mA a 0.88 – 4.4 voltios, por medio de un circuito con una resistencia de 220 Ω .

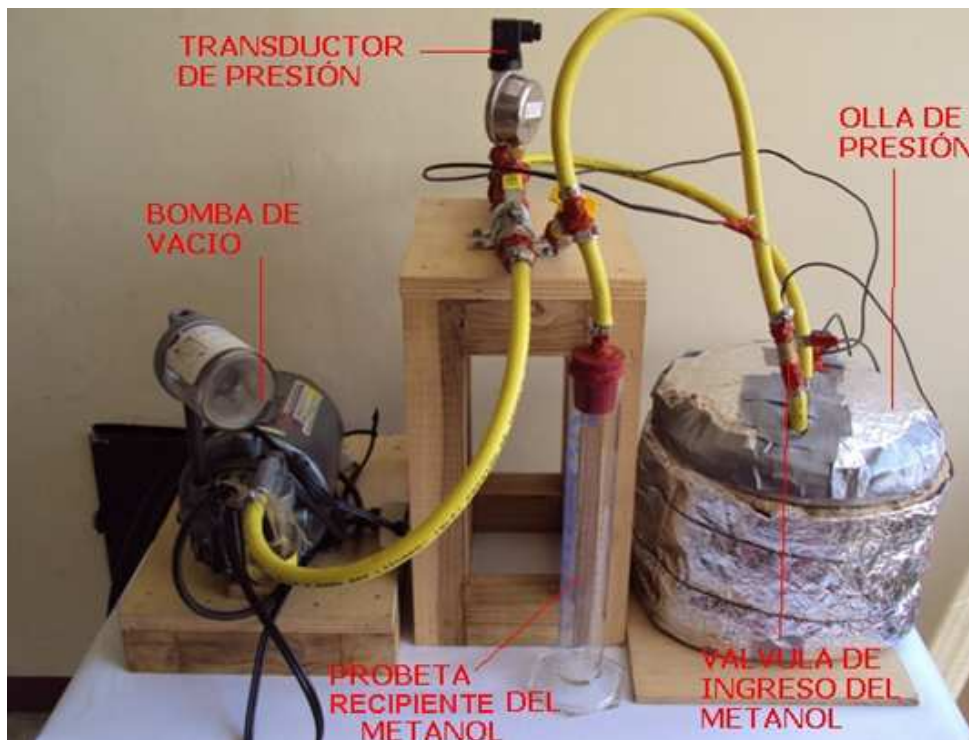


Figura 4.4 Equipo construido para la obtención de isósteras

4.4.2 MONTAJE DEL EQUIPO Y PRUEBAS DE ESTANQUEIDAD

Para realizar las conexiones entre la olla de presión, la bomba de vacío y la probeta se utilizó manguera para gas de presión máxima de 250 psi, válvulas para gas y abrazaderas de acero inoxidable. Para garantizar la estanqueidad del recinto se utilizó en las uniones de tubería y manguera sellador de tuberías y

silicón rojo que resiste altas temperaturas. Al realizar la conexión de las termocuplas y cables eléctricos de las resistencias eléctricas se presentó un problema de pérdida de estanqueidad a través de los cables. Tal problema se solucionó recubriendo los cables con “fit térmico” y con el uso de silicón rojo. En un inicio el equipo presentaba falta de estanqueidad debido a pequeños orificios en el silicón rojo. Se procedió entonces a inyectar aire comprimido con un pequeño compresor utilizado para inflar llantas de bicicletas y colocar agua con jabón donde se creía existían fugas, donde se detectaba la formación de burbujas se localizaban las fugas para posteriormente sellarlas con silicón rojo. Luego de este procedimiento se realizó la prueba de estanqueidad por 24 horas, y el manómetro indicó que el vacío de 20 in Hg se mantuvo por este tiempo.

4.4.3 SELECCIÓN DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

Para el dimensionamiento de de las resistencias se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Cantidad de material adsorbente a probar que depende del volumen disponible en el disipador para dicho fin. Para nuestro disipador el volumen es de 564.4 cm³ aproximadamente en el cual se puede colocar alrededor de 300 gr de carbón activado.
- Temperatura máxima de calentamiento para la limpieza de la muestra de carbón activado es de 150 °C.
- Temperatura máxima de calentamiento de la muestra de carbón activado para la obtención de la isósteras es de 130°C⁹⁰ o hasta que se alcance una presión absoluta de 516 mbar aproximadamente. Trabajos anteriores reportan que incrementar la temperatura de regeneración sobre los 100°C no genera mejoras en la eficiencia. El valor de la presión máxima a alcanzar se lo obtuvo experimentalmente, debido a que a presiones superiores el equipo perdía la estanquidad.
- Tiempo de calentamiento: El tiempo de calentamiento debe ser tal que siempre se encuentre en estado de equilibrio, se ha considerado un tiempo

⁹⁰ A temperatura mayor a 130 °C el metanol se hace inestable en contacto con el carbón activado de acuerdo a ALGHOUL.

referencial de 5 horas. Este tiempo depende de los valores de las resistencias y fuentes que se encuentran en el mercado local.

- Dimensiones del recinto: El recinto está formado por una olla de presión de 8 litros adaptada para dicho fin.
- Propiedades del par de adsorción: conductividad térmica, densidad, calor específico, etc.

Tabla 4. 1 Parámetros de los materiales

	Bronce	Carbón Activado⁹¹	Metanol gaseoso
Conductividad térmica (W/mK) a 300K	52	0.431	0.202
Calor específico (J/kgK)	420	836	1370 (293K)
Densidad (kg/m³)	8800	500	0.263

Para la construcción del disipador de calor se obtuvo perfil de bronce. Las dimensiones del disipador quedaron determinadas por las dimensiones del perfil. En la figura 4.5 se muestran las medidas y configuración del disipador que van a ser utilizadas en el programa de simulación.

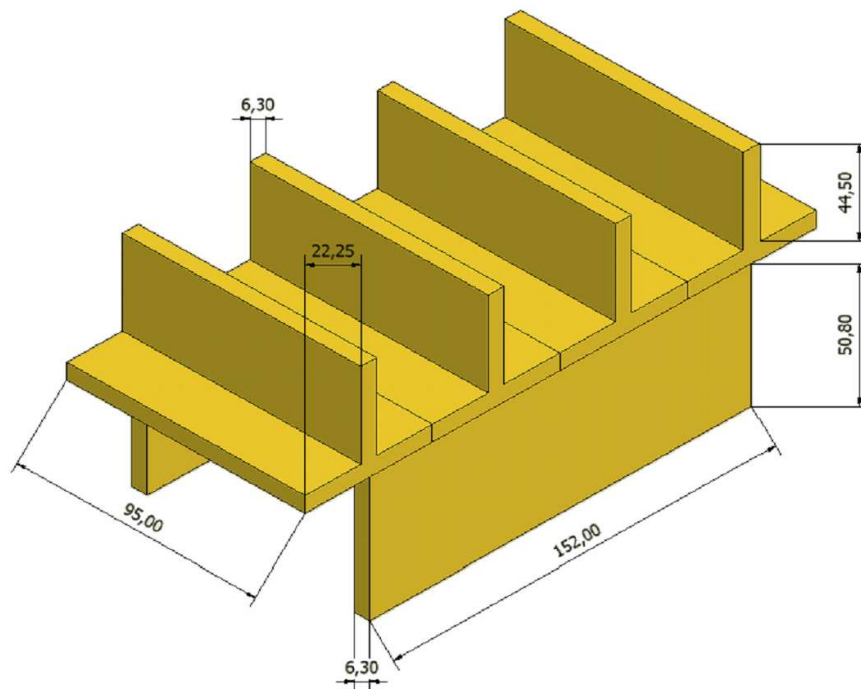


Figura 4.5 Dimensiones del disipador (medidas en mm)

⁹¹ ALGHOUL M., SULAIMAN M., AZMI B., SOPIAN K.

Para el dimensionamiento del sistema de calentamiento se procedió a realizar un cálculo con las siguientes suposiciones:

- Todas las pérdidas de calor, se consideran en un valor de eficiencia de transferencia de calor de 30%. Entre estas se tienen: pérdida del calor generado por las resistencias por conducción del bronce y por convección y radiación al ambiente, pérdida de calor por convección con el metanol gaseoso existente en el espacio muerto, pérdida de calor por conducción de la pared de la olla y de la lana de vidrio, pérdida de calor por convección y radiación de la olla.
- El sistema se encuentra aislado con lana de vidrio de espesor 5cm., por lo que se considera que el sistema es adiabático.
- Se considera que el carbón activado se encuentra como un bloque que presenta las propiedades de los gránulos de carbón activado.

A partir de la Primera Ley de la Termodinámica se puede escribir la ecuación de conservación de la energía para un volumen de control, el volumen de control se muestra en la figura 4.6.

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g = \dot{E}_{alm} + \dot{E}_{sale} \quad (4. 1)$$

Donde:

\dot{E}_{ent} = energía que entra al volumen de control (W)

\dot{E}_g = energía generada en el volumen de control (W)

\dot{E}_{sale} = energía que sale del volumen de control (W)

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

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{alm} \quad (4. 2)$$

$$\frac{V_f^2}{R_r} \eta = m_{ad} C_{pC-A} \left(\frac{T_{fc} - T_{ic}}{t_m} \right) \quad (4. 3)$$

$$t_m = \frac{m_{ad} C_{pC-A} R_r (T_f - T_i)}{V_f^2 \eta} \quad (4. 4)$$

Donde:

R_r = resistencia equivalente (5Ω)

V_f = Voltaje de la fuente (12V)

η = eficiencia de transferencia de calor (30%)

m_{ad} = masa de carbón activado en el disipador (0.3 kg)

C_{pC-A} = Calor específico del carbón (800 J/kg-K)

T_{ic} = temperatura inicial del carbón activado (150°C)

T_{fc} = temperatura final del carbón activado (20°C)

t_m = tiempo de calentamiento de la muestra (s)

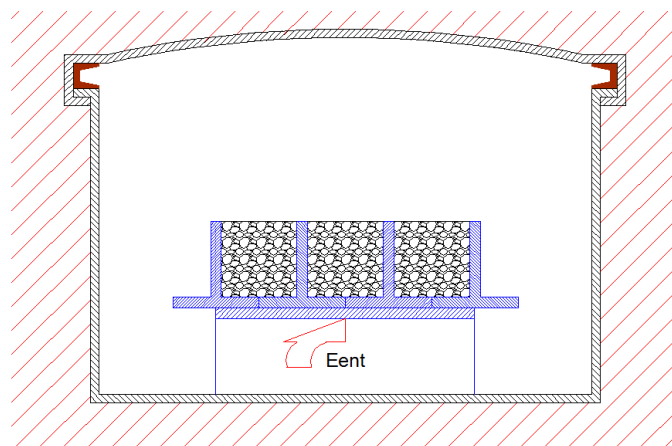


Figura 4.6 Esquema del balance de energías

Se hicieron variar los arreglos de las resistencias y los valores comerciales de estas y un tiempo adecuado se obtuvo con la configuración de tres resistencias de 15Ω (300W) en paralelo. Al resolver la ecuación se obtuvo un tiempo de 3 horas. Posteriormente se simuló en el programa T.C.B. (Transferencia de Calor Bidimensional) programado por José María Barreda Zamora y se obtuvo un tiempo de 3.16 horas. En el anexo IV se muestra la simulación, condiciones y geometría que se introdujo del programa, además se muestra el equipo construido.

4.5 OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS

4.5.1 DESCRIPCIÓN DEL PAR ADSORCIÓN A UTILIZAR

El par de adsorción a ser utilizado es carbón activado y metanol, se los ha podido obtener en el mercado nacional. Las características de estos materiales se presentan en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2 Propiedades del Carbón activado adquirido

Tipo	Fabricante	Número de Iodo	Granulometría	Densidad (kg/m³)
ECOK-70	ECOKARBONES	700 mg/gr	4x8(TYLER)	450-500

Tabla 4.3 Propiedades del metanol adquirido

Proveedor	%Pureza
Químicos H & H	98

4.5.2 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS

Primeramente se debe realizar la regeneración del carbón activado para eliminar residuos de agua o metanol, etc., para esto se calienta el recinto con el carbón a una temperatura superior de 150°C con un vacío con tinuo durante 5 horas. Para obtener cada isósteras se debe de ejecutar el siguiente procedimiento:

1. Registrar el valor de la temperatura ambiente del termómetro de bulbo.
2. Encender la fuente del transductor y conectar el cable USB de la tarjeta al computador.
3. Cambiar el valor de la junta fría del programa de la tarjeta de adquisición de datos de acuerdo a la temperatura ambiente para las 3 termocuplas y encender la adquisición de datos.
4. Abrir la válvula que conecta la probeta que contiene el metanol y el recinto que contiene el carbón activado, dejar pasar cantidades controladas de metanol y encender la adquisición de datos.
5. Dejar enfriar la muestra hasta la temperatura ambiente luego de la adsorción.
6. Encender la fuente de 12V hasta que la temperatura del carbón activado sea 80°C.
7. Alcanzada la temperatura de 80°C cambiar la fuente de calentamiento a una de 16V. Mantener el calentamiento hasta que la temperatura de la muestra alcance 130°C o hasta que se alcance una presión absoluta de 516 mbar aproximadamente.

En la simulación se consideró un sistema adiabático, y los resultados que se obtuvieron de esta simulación permitían calentar con un valor constante de voltaje. En la realidad a partir de los 80°C el equipo toma un tiempo extremadamente alto en realizar el calentamiento, por lo que se optó por aumentar el voltaje, sin que este cambio afecte al equilibrio.

4.5.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Los datos son adquiridos con una tarjeta USB 6009 de la compañía National Instruments y con la ayuda del programa LabView estos son guardados en una hoja de Microsoft Excel para tratarlos posteriormente. En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran el panel frontal del programa y el diagrama de bloques. En el Anexo V se puede encontrar más información acerca del programa LabView.

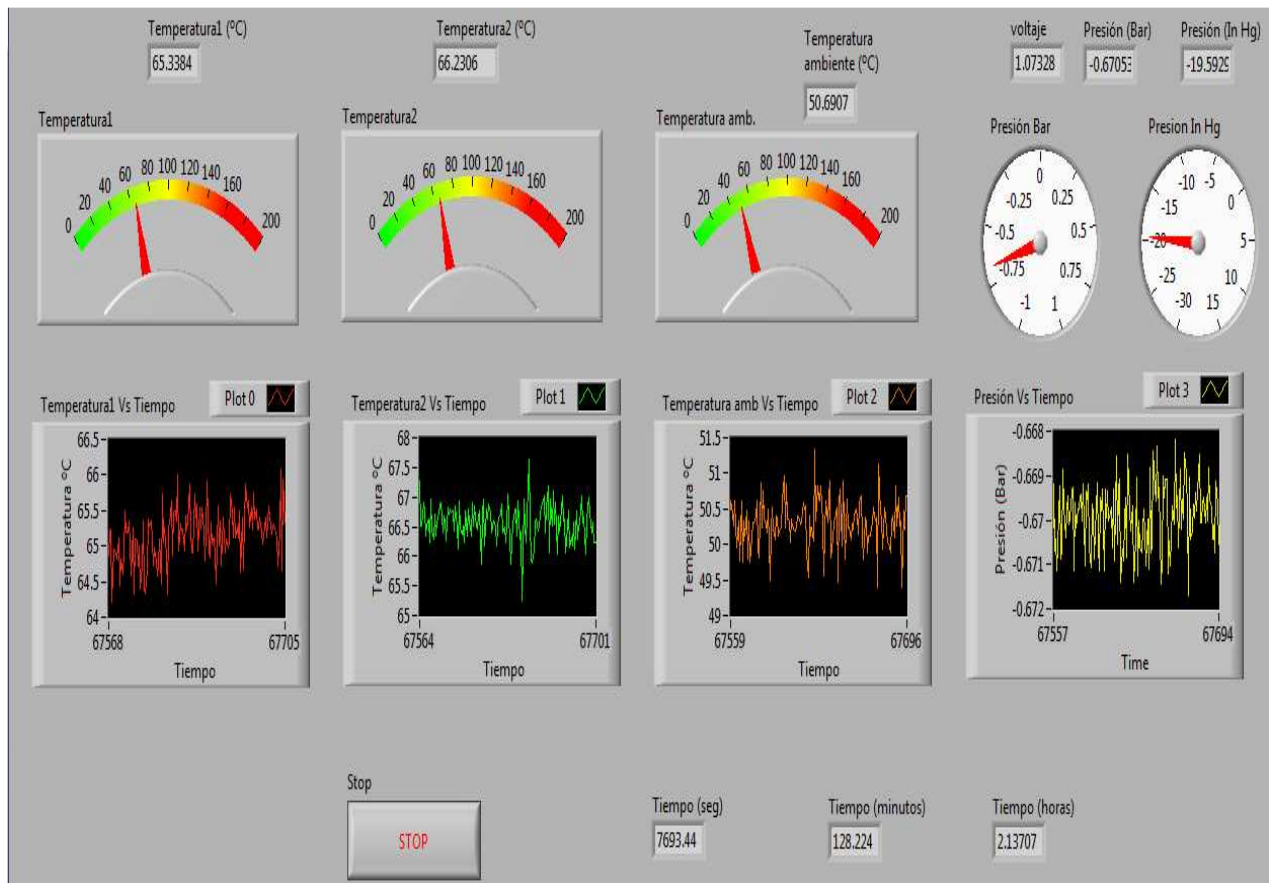


Figura 4.7 Panel frontal del programa LabView

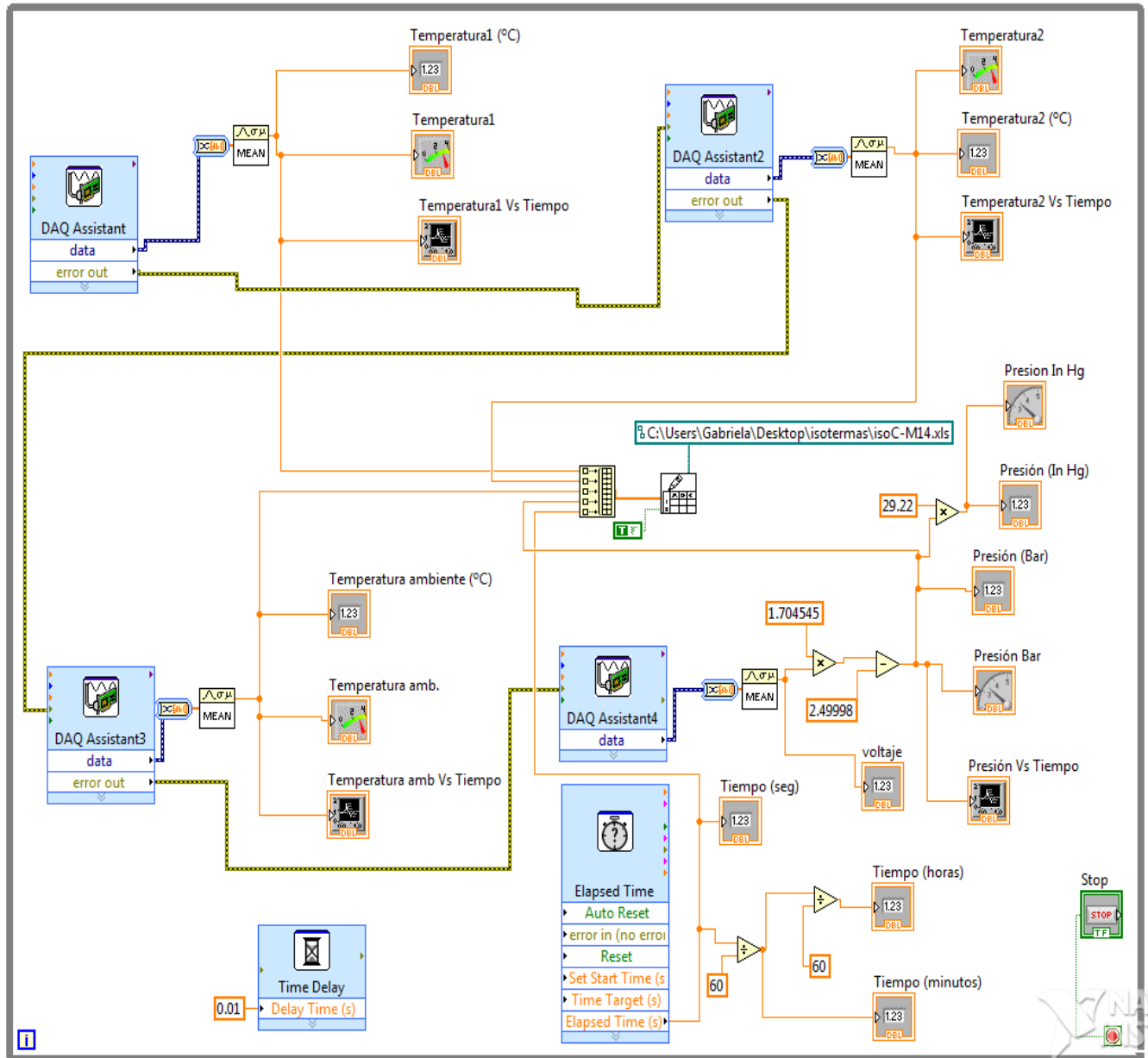


Figura 4.8 Diagrama de bloque en el programa LabView

4.5.4 TRATAMIENTO DE DATOS

Para el tratamiento de datos se mostrarán las isósteras en el diagrama de Clapeyron y se ajustarán los datos a la ecuación de Dubinin-Astakhov (D-A) (1.4), obteniendo como resultado, W_0 , D y n que resume la ecuación de estado del par carbón activado- metanol. Se ha decidido utilizar la ecuación de estado D-A porque es la que mejor se ajusta al comportamiento del carbón activado.

Los valores de presión y temperatura tomados para cada concentración de metanol no pueden ser tomados como verdaderos valores por que existen espacios muertos donde se encuentran vapor de metanol no adsorbido que no se puede despreciar, por tal motivo hay que corregir la concentración que se ha hecho pasar al recinto por la concentración real. Para obtener la masa que se encuentra en el espacio muerto se aplica la ley de los gases ideales con los valores de presión y temperatura de la atmósfera de metanol tomados y el volumen del espacio muerto que es constante. La masa de metanol absorbido real se obtiene restando la del espacio muerto de la que se hizo pasar al recinto. De este modo cada serie de puntos [X(concentración), P(presión), T_{C-A} (temperatura de la muestra)] de las isósteras queda convertido en una serie con concentración real pero no constante pero similares entre sí, por lo tanto, es preciso reducir los valores de nuevo a la concentración original que se hizo pasar, obteniendo valores a la misma concentración. Este proceso se llevó a cabo por interpolación tomando la serie actual y las concentraciones inferior y superior a ella, para calcular los valores de temperatura y presión para cada concentración.

4.5.5 ISÓSTERAS OBTENIDAS PARA EL PAR DE ADSORCIÓN CARBÓN ACTIVADO – METANOL Y CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DUBININ-ASTAKHOV

En la figura 4.9 se muestran las isósteras del carbón activado-metanol. Se presenta en el eje de las abscisas la temperatura del carbón y en las ordenadas el logaritmo de la presión (T_{C-A} , $\ln P$).

La ecuación de Dubinin-Astakhov está dada por:

$$\frac{X}{\rho_{met-liq}} = W_0 \exp \left[-D \left[T_{C-A} \ln \left(\frac{p_{sat}}{P} \right) \right]^n \right] \quad (4.5)$$

Donde:

X = concentración, cantidad de adsorbato que hay en el adsorbente por unidad de masa del adsorbente (kg/kg)

W_0 = máxima capacidad de adsorción (m^3/kg)

$\rho_{met-liq}$ = densidad del metanol estado líquido (kg/m^3)

D = coeficiente de afinidad, que depende de las características del adsorbato y adsorbente.

T_{C-A} = temperatura del carbón activado (K)

P = presión del adsorbente carbón activado (bar)

P_{sat} = presión de saturación del adsorbato a la temperatura del adsorbente (bar)

n = exponente obtenido experimentalmente

Para determinar los valores de la ecuación primero se comienza escribiéndola de la siguiente manera (ver Anexo VI):

$$\ln\left(\frac{X}{\rho_{met-liq}}\right) = \ln(W_o) - D\left(T_{C-A} \ln\left(\frac{P_{sat}}{P}\right)\right)^n \quad (4.6)$$

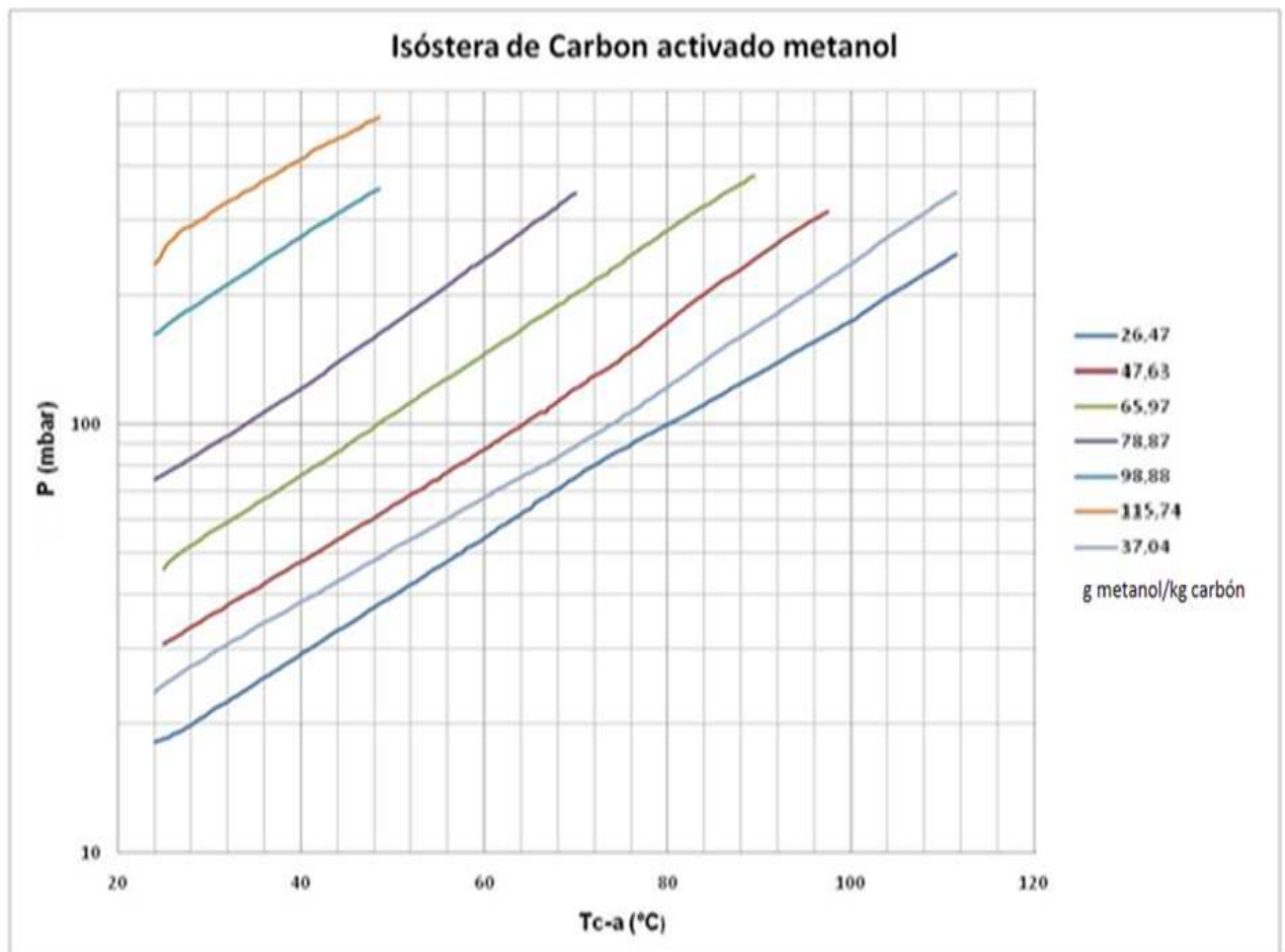


Figura 4.9 Isóteras de Carbón Activado-metanol obtenidas

Si el valor de “n” fuera conocido, la nube de puntos del diagrama isotérico se puede representar en un gráfico con abscisas $\left(T_{C-A} \cdot \ln\left(\frac{P_{sat}}{P}\right)\right)^n$ y ordenadas $\ln\left(\frac{x}{\rho_{met-liq}}\right)$ generando una recta de pendiente “D” y ordenada en el origen igual a “Wo”. El valor de “n” no es conocido por lo que se varía el valor de n hasta que este se ajusten a los valores de la nube de puntos a una recta. Para ajustar esta ecuación se ha tomado el método de los mínimos cuadrados y con la ayuda del programa Datafit se han encontrado los valores en la cual “R²” se ajustan mejor. En la tabla 4.4 se muestra las interacciones que se realizaron.

Tabla 4.4 Interacciones realizadas para el cálculo de los valores de D, n, Wo

n	Ln (Wo)	(-D)	Wo	R ² ⁹²
1.5	-2.100	-3.49E-05	0.122	0.833063
1.2	-1.990	-3.01E-04	0.137	0.837087
1	-1.888	-1.28E-03	0.151	0.835495
0.8	-1.753	-5.56E-03	0.173	0.828530
0.9	-1.826	-2.66E-03	0.161	0.832822
1.3	-2.032	-1.47E-04	0.131	0.836440
0.95	-1.858	-1.85E-03	0.156	0.834342
1.25	-2.011	-2.10E-04	0.134	0.836865
1.15	-1.967	-4.33E-04	0.140	0.837086
1.18	-1.981	-3.48E-04	0.138	0.837115
1.19	-1.985	-3.24E-04	0.137	0.837105
1.17	-1.976	-3.74E-04	0.139	0.837114
1.16	-1.971	-4.02E-04	0.139	0.837105
2	-2.237	-9.84E-07	0.107	0.817100

De acuerdo a la tabla 4.4 se tomaron los valores de n = 1.18, Wo = 0.138 (litros_{met}/kg_{C-A}) y D=3.48E-4. En la Fig. 4.10 se muestra el diagrama Dubinin-Astakhov mostrando el ajuste con n=1.18.

⁹² Mientras más cercano a uno sea el valor de R², menor es el error cometido al ajustar los datos a una ecuación

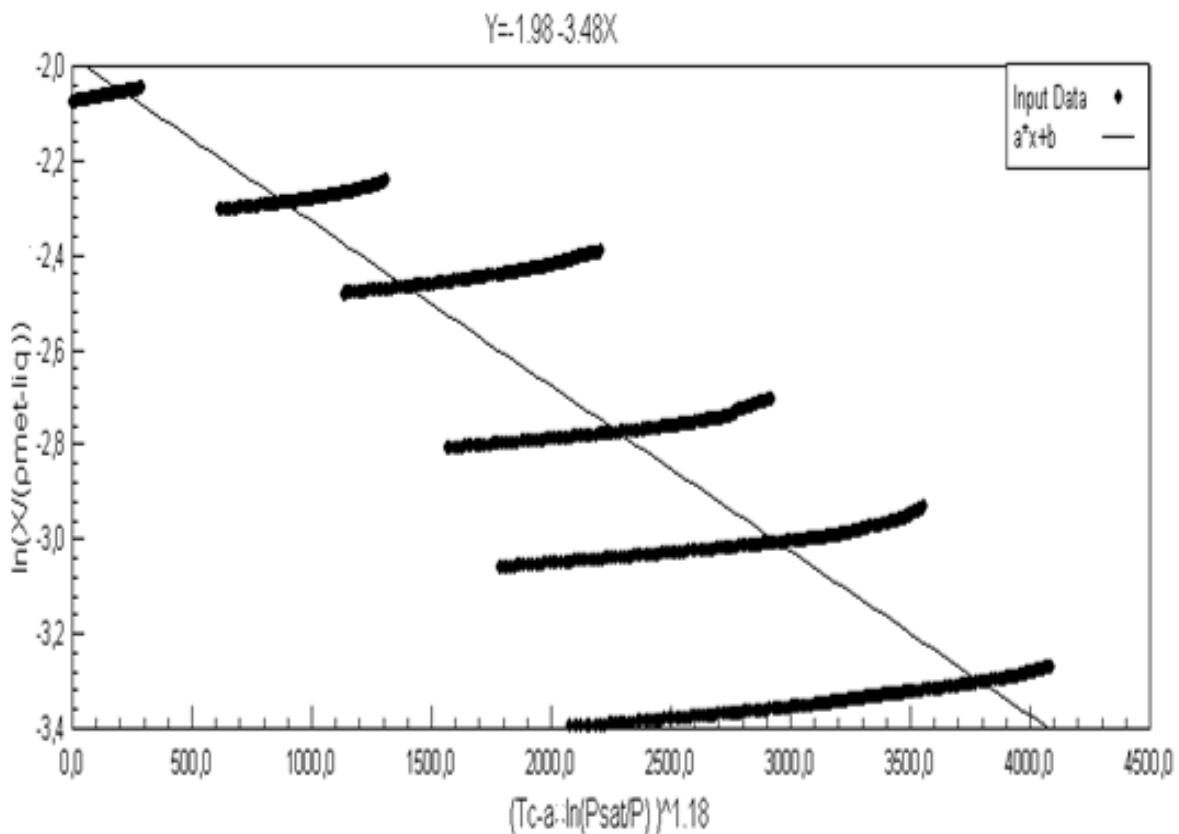


Figura 4.10 Diagrama de Dubinin-Astakhov con $n=1.18$ (más óptimo)

4.5.6 REPRODUCIBILIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL EQUIPO.

Debido a que en la bibliografía no se identifica ninguna norma para obtención de isósteras en fase gaseosa se aplicó el método volumétrico encontrado en la literatura. Para comprobar la reproducibilidad del equipo se procedió a obtener tres isósteras que tengan el mismo valor de concentración a condiciones similares de presión y temperatura ambiente y los resultados se muestran en la figura 4.11. Se puede observar que las isósteras son similares, manteniendo la forma de la relación presión y temperatura del carbón activado.

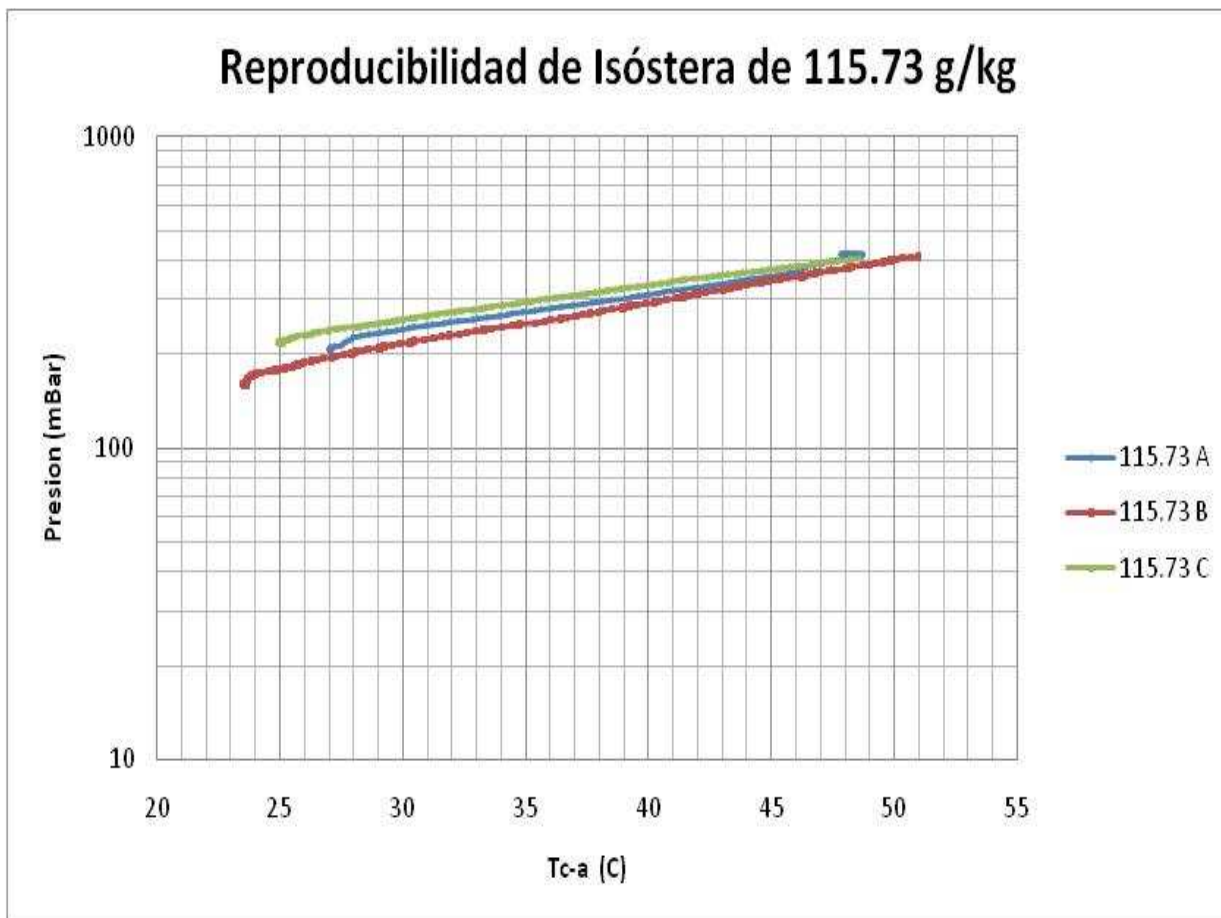


Figura 4.11 Reproducibilidad de la isótera de concentración 115.73g/kg

4.5.7 COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DUBINI-ASTAKHOV OBTENIDOS CON LOS DE OTROS TRABAJOS

En la tabla 4.5, se comparan los parámetros obtenidos de la ecuación de Dubinin-Astakhov con parámetros del par de carbón activado metanol que se encontraron en la literatura.

Tabla 4.5 Comparación de los parámetros de la ecuación Dubinin-Astakhov obtenidos en el presente trabajo y de la literatura encontrada

Autor	Tipo de Carbón Activado ⁹³	n	D ó k	W _o ó X _o
Trabajo actual	ECOK-70	1.18	D=3.48E-4.	0.138 L/kg
GONZÁLEZ M.	CNR115	1.4	D=1,30E-04	1.17 L/kg
GONZÁLEZ M.	WSC470	2.18	D=4,90E-07	0.62 L/kg
CRITOPH R.	AC-35	2.15	D=7,00E-07	0.425 L/kg
WANG R., OLIVEIRA R.,	YKAC, 14–20	1.5	k=13.38	0.45 kg/kg
CRITOPH R.	DEG	1.31	D=5.95E-5	0.534 L/kg
CRITOPH R.	NORIT RB	2	D=1.82E-7	0.415 L/kg
CRITOPH R.	PKST	2	D=1.55E-7	0.258 L/kg
CRITOPH R.	207C	2	D=0.698E-7	0.289 L/kg
WANG R., XU Y., WU J.,	Shanghai “YK” (cascarilla de coco)	1.39	k=10.21	0.284kg/kg
ALGHOUL M., SULAIMAN Y.	AC-5060	1.599	D=2.067E-5	0.363 L/kg

El parámetro W_o expresa la concentración máxima que puede alcanzar el carbón activado en L/kg mientras que X_o expresa lo mismo en kg/kg.

Se observa en la tabla 4.5 que el carbón a utilizar tiene una capacidad máxima inferior a la de los carbones utilizados en otros estudios. Con estos resultados se demuestra que fue indispensable la obtención de las constantes del par de adsorción y si se hubiera optado por tomar los valores de otro carbón se hubiera introducido un error en el dimensionamiento del equipo.

⁹³ Par utilizado carbón activado-metanol

CAPÍTULO V

DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL EQUIPO

5.1 INTRODUCCIÓN

El sistema de enfriamiento a diseñar y simular es un refrigerador solar que utiliza el par de adsorción carbón activado-metanol se diseñará el sistema para que pueda funcionar en la ciudad de Quito. Se realiza el modelo matemático para poder simularlo y determinar los valores de los parámetros del colector, cámara adsorbedora, condensador, evaporador y recinto a enfriar.

5.2 MODELO MATEMÁTICO

Para el diseño del equipo se procederá a dividirlo en varios subsistemas:

1. Colector Solar.
2. Cama adsorbedora.
3. Condensador.
4. Evaporador y cámara fría o recinto a enfriar.

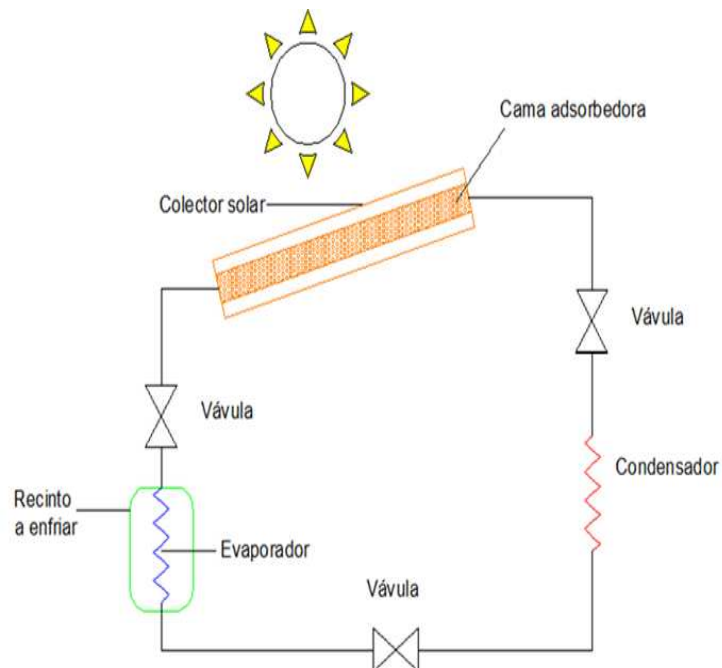


Figura 5.1 Esquema del equipo de enfriamiento por adsorción solar

5.2.1 COLECTOR SOLAR

5.2.1.1 Selección del tipo de colector

Para la selección de tipo de colector se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

- Temperatura de regeneración del adsorbente
- Costo de fabricación
- Disponibilidad de materiales en el mercado nacional para su fabricación
- Costos de un sistema de rastreamiento de requerirlo

La temperatura de regeneración del carbón activado está alrededor de 120°C⁹⁴, por lo que el colector de placa plana queda descartado al tener un rango de temperaturas menor. En un colector de concentración las pérdidas térmicas son menores porque el área que es calentada a la temperatura de operación es reducida haciendo posible al colector calentar el fluido a una mayor temperatura que los colectores planos. El uso de tubos al vacío permite a un colector plano aumentar su rango de temperatura a una adecuada para nuestro propósito pero el uso de esta tecnología incrementa altamente el costo del colector por lo que no es una opción viable. Los colectores con rastreamiento alrededor de dos ejes presentan altos costos de fabricación y se justifica su uso cuando el rango de temperaturas a alcanzar es muy alto, por lo que se descartan para nuestra selección. Según lo expuesto quedan dos opciones:

- Cilindro-parabólico (parabolic trough collector) (PTC)
- Concentrador parabólico compuesto (compound parabolic concentrator) (CPC)

Se ha decidido utilizar el concentrador parabólico compuesto (CPC) porque tiene las ventajas de aprovechar la radiación difusa y funciona sin necesidad de un rastreamiento muy preciso. El desarrollo de esta clase de colector es un trabajo pionero en la Politécnica Nacional debido a que no existen trabajos similares.

⁹⁴ WANG R., WANG L.

Tabla 5.1 Comparación de la temperatura alcanzada por los diferentes colectores Rangos de temperatura⁹⁵

Movimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbedor	Índice de concentración	Rango de temperatura (°C)
Estacionario	Placa plana (flat plate collector) (FPC)	Plano	1	30-80
	Colector de tubos al vacío (evacuated tube collector) (ETC)	Plano	1	50-200
Estacionario	Concentrador parabólico compuesto (compound parabolic concentrator) (CPC)	Tubular	1-5	60-240
			5-15	60-300
Rastreo alrededor de un eje	Reflector de Fresnel lineal (linear Fresnel reflector) (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Cilindro-parabólico (parabolic trough collector) (PTC)	Tubular	15-45	60-300
Rastreo alrededor de dos ejes	Reflector de plato parabólico (parabolic dish reflector) (PDR)	Punto	100-1000	100-500
	Colector de campo de heliostatos (heliostat field collector) (HFC)	Punto	100-1500	150-2000

⁹⁵ KALOGIROU S., "Recent patents in solar energy collectors and applications", 2007, I, 223-33, Higher Technical Institute of Cyprus

5.2.1.2 Geometría del colector

De acuerdo a las ecuaciones descritas en el literal 3.8.4.1 y a la figura 5.2, las coordenadas que describen el perfil del reflector están dadas por:

$$x = r_a \operatorname{sen} \theta_p - \rho_p \operatorname{cos} \theta_p \quad (5.1)$$

$$y = -r_a \operatorname{cos} \theta_p - \rho_p \operatorname{sen} \theta_p \quad (5.2)$$

$$\rho_p = \left\{ \begin{array}{l} r_a \theta_p \text{ si } |\theta_p \leq \theta_a + \pi/2| \\ r_a \frac{\theta_p + \theta_a + \pi/2 - \operatorname{cos}(\theta_p - \theta_a)}{1 + \operatorname{sen}(\theta_p - \theta_a)} \text{ si } \theta_a + \pi/2 \leq |\theta_p| \leq 3\pi/2 - \theta_a \end{array} \right\} \quad (5.3)$$

$$C = \frac{1}{\operatorname{sen} \theta_a} \quad (5.4)$$

Donde:

θ_p = ángulo de la parábola ($^\circ$)

x = coordenada x del punto B que describe a la parábola (m)

y = coordenada y del punto B que describe a la parábola (m)

r_a = radio del tubo absorbedor (m)

$\rho_p = \overline{BC}$ = distancia entre el punto B y C de la parábola (m)

θ_a = semiángulo de aceptación ($^\circ$)

C = índice de concentración

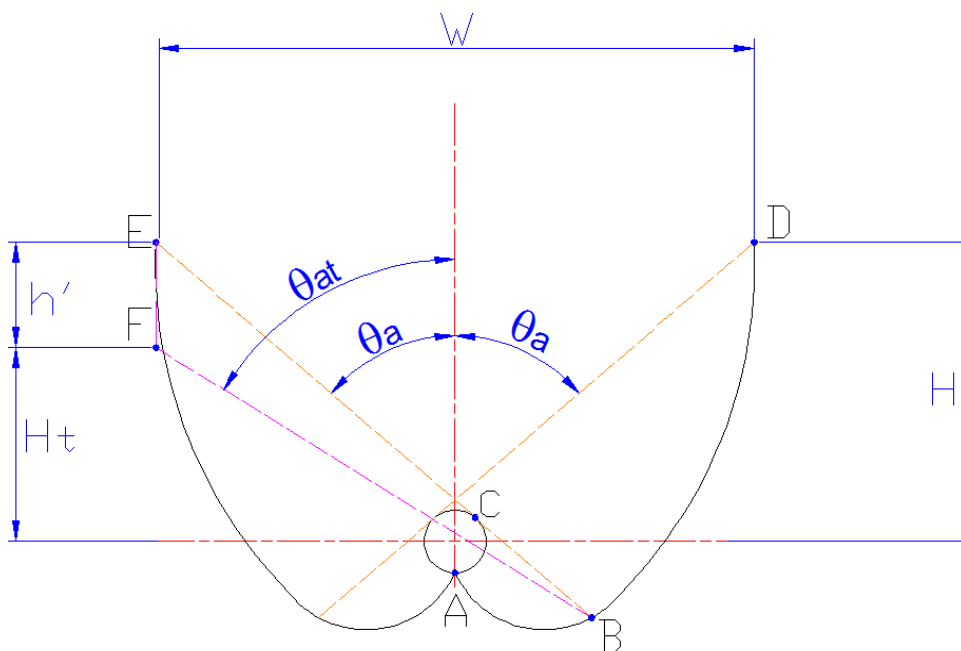


Figura 5.2 Parábola CPC completa y truncada

Para poder calcular la longitud del perfil del reflector se hizo un primer intento al integrar la siguiente ecuación:

$$L_{\text{parabola}} = \int_0^{3\pi/2 - \theta_a} dR_p \quad (5.5)$$

Donde R_p es la distancia entre el origen y el punto B que describe el perfil de la parábola y está dada por:

$$R_p = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.6)$$

$$L_{\text{parabola}} = R_p \Big|_0^{3\pi/2 - \theta_a} \quad (5.7)$$

Lamentablemente el programa utilizado (MATLAB 7.7) no pudo realizar la integración de esta ecuación. Se decidió entonces dividir el perfil en muchas rectas y sumar la longitud de estas rectas.

Para calcular la altura del reflector medida desde el centro del tubo absorbedor y para el ancho se utilizaron las coordenadas del punto final de la parábola (D) que se muestran en la figura 5.2.

$$H = y_D \text{ (coordenada "y" del punto D)} \quad (5.8)$$

$$W = 2x_D \text{ (dos veces la coordenada x del punto D)} \quad (5.9)$$

Donde:

H = altura del reflector medida desde el centro del tubo absorbedor (m)

W = ancho del reflector (m)

Si la altura del reflector resulta ser muy grande se puede truncar la misma. Se recorta una altura h' del reflector y se supone que el extremo final de la parábola es totalmente vertical (Figura 5.2). Conociendo los valores límite de donde empieza y termina la parábola (B, E) y el nuevo final de la parábola (F) se puede determinar el valor de la altura truncada y semiángulo de aceptación truncado mediante relaciones geométricas.

$$\sin \theta_{\text{at}} = \frac{\overline{FG}}{\overline{FB}} \quad (5.10)$$

$$H_t = \overline{GB} \quad (5.11)$$

$$W_t = 2x_F \text{ (dos veces la coordenada x del punto D)} \quad (5.12)$$

Donde:

θ_{at} = semiángulo de aceptación truncado ($^{\circ}$)

H_t = altura truncada del reflector (m)

W_t = ancho truncado del reflector (m)

La longitud de la parábola truncada se calcula de la misma manera que se realizó para la parábola completa.

5.2.1.3 Balance de energías

Para determinar la temperatura del absorbedor y poder introducir esta en los cálculos del ciclo de refrigeración se realiza un balance de energías al colector CPC.

(5. 13)

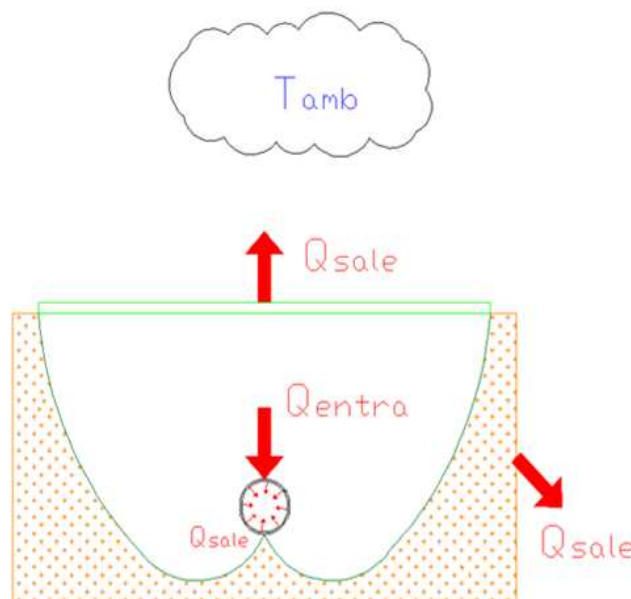


Figura 5.3 Balance de energías del colector

- **Energía que entra (S)**

La energía que entra al sistema viene dada por la radiación incidente sobre el colector afectada por pérdidas de transmisividad de la cubierta, reflexión del reflector y absorptividad del receptor. Para determinar la radiación incidente se

simularán dos modelos de radiación solar y se tomarán el modelo que permita un diseño conservador. El primer modelo es el de cielo despejado y está dado por:

$$G_{cnb} = G_{on}\tau_b \quad (5.14)$$

$$G_{cnd} = G_{on}\tau_d \quad (5.15)$$

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(-\frac{k}{\cos\theta_z}\right) \quad (5.16)$$

$$\tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b \quad (5.17)$$

$$a_0 = 0.4237 - 0.0082(6 - A_t)^2 \quad (5.18)$$

$$a_1 = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A_t)^2 \quad (5.19)$$

$$k = 0.2711 + 0.01858(2.5 - A_t)^2 \quad (5.20)$$

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \quad (5.21)$$

Donde:

G_{cnb} = radiación directa (W/m^2)

G_{cnd} = radiación difusa (W/m^2)

G_{on} = radiación extraterrestre (W/m^2)

τ_b = transmitancia atmosférica para la radiación directa

τ_d = transmitancia atmosférica para la radiación difusa

A_t = altitud (km)

Para el segundo modelo se analizan datos promedios mensuales obtenidos para Quito de diferentes fuentes como se indica en la tabla 5.2. Estos datos fueron utilizados para encontrar la radiación incidente en función de la hora del día, para esto se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} \quad (5.22)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \left(\frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s} \right) \quad (5.23)$$

$$\omega = 15(H_h - 12) \quad (5.24)$$

$$\omega_s = -\tan\phi \tan\delta \quad (5.25)$$

Donde:

r_d = relación entre radiación horaria total y la radiación diaria total

I = radiación horaria total (W/m^2)

H_h = hora del día (hora)

ω = ángulo horario ($^\circ$)

ω_s = ángulo horario del ocaso ($^\circ$)

δ = declinación ($^\circ$)

ϕ = latitud ($^\circ$)

Tabla 5.2 Valores de Radiación mensual promedio para la ciudad de Quito

	DIRECTA ($Wh/m^2/día$)	DIFUSA ($Wh/m^2/día$)
ATLAS ⁹⁶	3040	2465
NASA ⁹⁷	3100	2350
DUFFIE ($I=14.60J/m^2/día$, $kt=0.39$)	5000	1095

Se decidió tomar los valores del Atlas Solar debido a que estos son similares a los de la Nasa, mientras que los de DUFFIE difieren sustancialmente. Se realiza el estudio para el mes de marzo que presenta un valor semejante al promedio de los valores de la radiación mensual, para el día 16 que es día representativo de este mes que equivale al día 75 del año. ⁹⁸

Una vez que se conoce la radiación perpendicular se calcula la radiación sobre el plano inclinado y los ángulos solares para usarlos posteriormente:

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (5.26)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284+N}{365}\right) \quad (5.27)$$

⁹⁶ <http://www.conelec.gov.ec/downloads/Atlas.pdf>

⁹⁷ <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

⁹⁸ DUFFIE J., BECKMAN W., pg.16

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta \quad (5.28)$$

$$\sin\gamma_s = \frac{\sin\omega\cos\delta}{\sin\theta_z} \quad (5.29)$$

Donde:

θ = ángulo incidencia radiación solar sobre un plano inclinado ($^\circ$)

δ = declinación ($^\circ$)

ϕ = latitud ($^\circ$)

β = inclinación ($^\circ$)

γ = acimut de la superficie ($^\circ$)

ω = ángulo horario ($^\circ$)

θ_z = ángulo del cenit ($^\circ$)

γ_s = ángulo del acimut solar ($^\circ$)

A continuación se presenta el cálculo de la energía que entra al volumen de control (S). Se ha decidido realizar un diseño conservativo y despreciar la contribución de la energía reflejada por el suelo. Se asume que los parámetros de transmisividad, reflectividad y absortividad son los mismos tanto para la radiación directa y difusa por lo que se toma un valor único para la radiación global, la cual es la suma de la radiación directa más la difusa. El número de reflexiones puede ser calculado con la fórmula 5.35 o empleando la figura 3.10.

$$S = A_c G (\tau_c \tau_{CPC} \alpha_a) \quad (5.30)$$

$$G = G_b + G_d \quad (5.31)$$

$$G_b = F G_{bn} \cos\theta \quad (5.32)$$

$$G_d = \begin{cases} \frac{G_d}{C} & \text{si } (\beta + \theta_c) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{C} + \cos\beta \right) & \text{si } (\beta + \theta_c) > 90^\circ \end{cases} \quad (5.33)$$

$$\tau_{CPC} = \rho_r^{n_r} \quad (5.34)$$

$$n_r = 1 - \frac{1}{c} \quad (5.35)$$

Donde:

S = radiación absorbida (W)

A_c = área del colector (m^2)

G = radiación global (W/m^2)

G_b = radiación directa (W/m^2)

G_d = radiación difusa (W/m^2)

τ_c = transmisividad de la cubierta

τ_{CPC} = transmisividad del CPC

α_a = absorptividad del receptor

C = índice de concentración

β = inclinación ($^\circ$)

θ_a = semiángulo de aceptación ($^\circ$)

ρ_r = reflectividad de la parábola

n_r = número promedio de reflexiones.

En cuanto a la orientación del eje longitudinal del colector y la necesidad de un sistema de rastreamiento de la posición del sol se analizarán cuatro casos, F es una función que vale uno dependiendo si el colector ve o no la radiación:

1. Orientación este-oeste (sin rastreamiento)
2. Orientación este-oeste (con un ajuste diario)

$$\cos\theta = \sin^2\delta + \cos^2\omega \quad (5.36)$$

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (5.37)$$

$$\text{Si } (\phi - \delta) > 0, \gamma = 0^\circ \quad (5.38)$$

$$\text{Si } (\phi - \delta) < 0, \gamma = 180^\circ \quad (5.39)$$

$$F = \begin{cases} 1 & \text{si } (\beta - \theta_a) \leq \tan^{-1}(\tan\theta_z \cos\gamma_s) \leq (\beta + \theta_a) \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (5.40)$$

3. Orientación norte-sur (sin rastreamiento)

4. Orientación norte-sur (con rastreamiento continuo)

$$\cos\theta = (\cos^2\theta_z + \cos^2\delta \sin^2\omega)^{1/2} \quad (5.41)$$

$$\tan\beta = \tan\theta_z |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (5.42)$$

$$\text{Si } \gamma_s > 0, \gamma = 90^\circ \quad (5.43)$$

$$\text{Si } \gamma_s < 0, \gamma = -90^\circ \quad (5.44)$$

$$F = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{\sin\theta_z \cos\gamma_s \sin\beta + \cos\beta \cos\theta_a}{\sqrt{(\sin\theta_a \cos\gamma_s \sin\beta + \cos\beta \cos\theta_a)^2 + (\sin\theta_a \sin\gamma_s)^2}} > \cos\theta_a \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (5.45)$$

No se analizó la orientación este-oeste con un rastreamiento continuo porque este involucra un mecanismo sumamente complicado cuya construcción resultaría sumamente costosa.

- **Energía que sale**

La energía que sale viene dada por las pérdidas de calor del sistema, las cuales son:

- Radiación entre el absorbedor y la cubierta
- Radiación entre el absorbedor y el reflector
- Convección entre el absorbedor y el fluido circundante
- Radiación entre la cubierta y el ambiente
- Convección entre la cubierta y el ambiente
- Conducción entre el reflector y el aislante
- Radiación entre el aislante y el ambiente
- Convección entre el aislante y el ambiente
- Radiación entre el reflector y la cubierta

Dichas pérdidas se calculan con las siguientes fórmulas:

Pérdidas por radiación

Radiación entre dos superficies: Suponiendo a las dos superficies grises el intercambio de radiación que sucede entre las dos superficies será:

$$\dot{Q}_{r1} = -\dot{Q}_{r2} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (5.46)$$

Esta transferencia de calor también puede ser descrita por:

$$\dot{Q}_r = A_1 h_r (T_2 - T_1) \quad (5.47)$$

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1-\epsilon_2)A_1}{\epsilon_2 A_2}} \quad (5.48)$$

La resistencia térmica viene dada por:

$$R_r = \frac{1}{h_r A} \quad (5.49)$$

Radiación hacia el cielo: Considerando al cielo un cuerpo negro a una temperatura equivalente T_s el calor emitido será:

$$\dot{Q}_r = \epsilon A \sigma (T^4 - T_s^4) \quad (5.50)$$

Donde:

\dot{Q}_r = calor transmitido por radiación (W)

σ = constante de Steffan Boltzman ($W/m^2 K^4$)

$T_1, T_2,$ = temperaturas de la superficies 1 y 2 respectivamente (K)

T = temperatura de la superficie (K)

ϵ_1, ϵ_2 = emisividad de la superficies 1 y 2 respectivamente

A_1 y A_2 = área de transferencia de calor de las superficies 1 y 2 respectivamente (m^2)

h_r = coeficiente de transferencia de calor por radiación ($W/m^2 K$)

R_r = resistencia térmica por radiación (K/W)

Pérdidas por convección

La razón de transferencia de calor por convección entre una superficie y un fluido se calcula con la relación

$$\dot{Q}_c = h_c A_{cv} (T_s - T_\infty) \quad (5. 51)$$

Coeficiente de convección entre la cubierta y el ambiente:

Según Duffie para una placa el coeficiente de convección esta dado por:

$$h_c = 5.7 + 3.8V \quad (5. 52)$$

Coficiente de convección entre el absorvedor y el medio circundante:

Hsieh a partir de datos experimentales plantea que este coeficiente de convección viene dado por:

$$h_c = 3.25 + 0.0085 \left(\frac{T_a - T_{amb}}{4r_{cv}} \right) \quad (5. 53)$$

La resistencia térmica viene dada por:

$$R_c = \frac{1}{h_c A_{cv}} \quad (5. 54)$$

Donde:

\dot{Q}_c = calor transmitido por convección (W)

T_s, T_∞ = temperaturas de la superficies y del fluido respectivamente (K)

T = temperatura de la superficie (K)

A_{cv} = área de transferencia de calor de por convección (m^2)

h_c = coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2K)

V = velocidad del viento (m/s)

R_c = resistencia térmica por convección (K/W)

r_{cv} = radio del tubo sometido a transferencia de convección (m)

Tamb y Ta = temperaturas del ambiente y del absorbedor respectivamente (K)

Coeficiente de convección entre el aislante y el ambiente:

Para una placa vertical de una altura L_v sometida a convección libre (aire) para flujo laminar se tiene:

$$h_c = 0.29 \left(\frac{(T_{pv} - T_{amb}) \text{sen} \beta}{L_v} \right)^{1/4} \quad (5.55)$$

Y para flujo turbulento se tiene:

$$h_c = 0.19 \left((T_{pv} - T_{amb}) \text{sen} \beta \right)^{1/3} \quad (5.56)$$

Para placas rectangulas se tiene:

$$L_v = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (5.57)$$

$$h_c = 0.27 \left(\frac{(T_{pv} - T_{amb}) \text{cos} \beta}{L_v} \right)^{1/4} \quad (5.58)$$

Y para flujo turbulento se tiene:

$$h_c = 0.22 \left((T_{pv} - T_{amb}) \text{cos} \beta \right)^{1/3} \quad (5.59)$$

Entendiéndos por flujo laminar cuando $10^9 > Ra > 10^3$ y turbulento cuando $Ra > 10^9$

$$Ra = \frac{g r \beta_a (T_{pv} - T_{amb}) L_v}{\nu \alpha} \quad (5.60)$$

Donde:

T_{pv} = temperatura de una placa (K)

β = ángulo de inclinación respecto a la horizontal ($^\circ$)

Ra = número de Rayleigh

Pérdidas por conducción en el aislante

Para una pared plana considerando que la conductividad térmica (k) es independiente de la temperatura se tiene que la transferencia de calor por conducción está dada por:

$$\dot{Q}_k = \frac{A_k k_m}{L_p} (T_{\text{caliente}} - T_{\text{frío}}) \quad (5.61)$$

La resistencia térmica viene dada por:

$$R_k = \frac{L_p}{A_k k_m} \quad (5.62)$$

Donde:

\dot{Q}_k = calor transmitido por conducción (W)

T_{caliente} , $T_{\text{frío}}$ = temperaturas de las superficies caliente y fría respectivamente (K)

A_k = área de transferencia de calor por conducción (m^2)

k_m = conductividad térmica del material ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

L_p = espesor de la pared plana (m)

R_k = resistencia térmica por conducción (K/W)

Las pérdidas de calor pueden ser calculadas por la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{\text{sale}} = \frac{(T_a - T_{\text{amb}})}{R_{\text{eqc}}} \quad (5.63)$$

Donde:

T_a = temperatura del absorbedor (K)

T_{amb} = temperatura ambiente (K)

R_{eqc} = resistencia térmica equivalente del circuito del colector solar (K/W)

Al no conocer una relación entre la temperatura de la cubierta, del reflector y del aislante ya que en la bibliografía no se encuentra información del tema se decide simular dos modelos y tomar el más conveniente. En el primero estas temperaturas son distintas y se las calcula, mientras que en el segundo se asume que son semejantes y se toma una única temperatura. Para el primer modelo para el balance de energías se tiene:

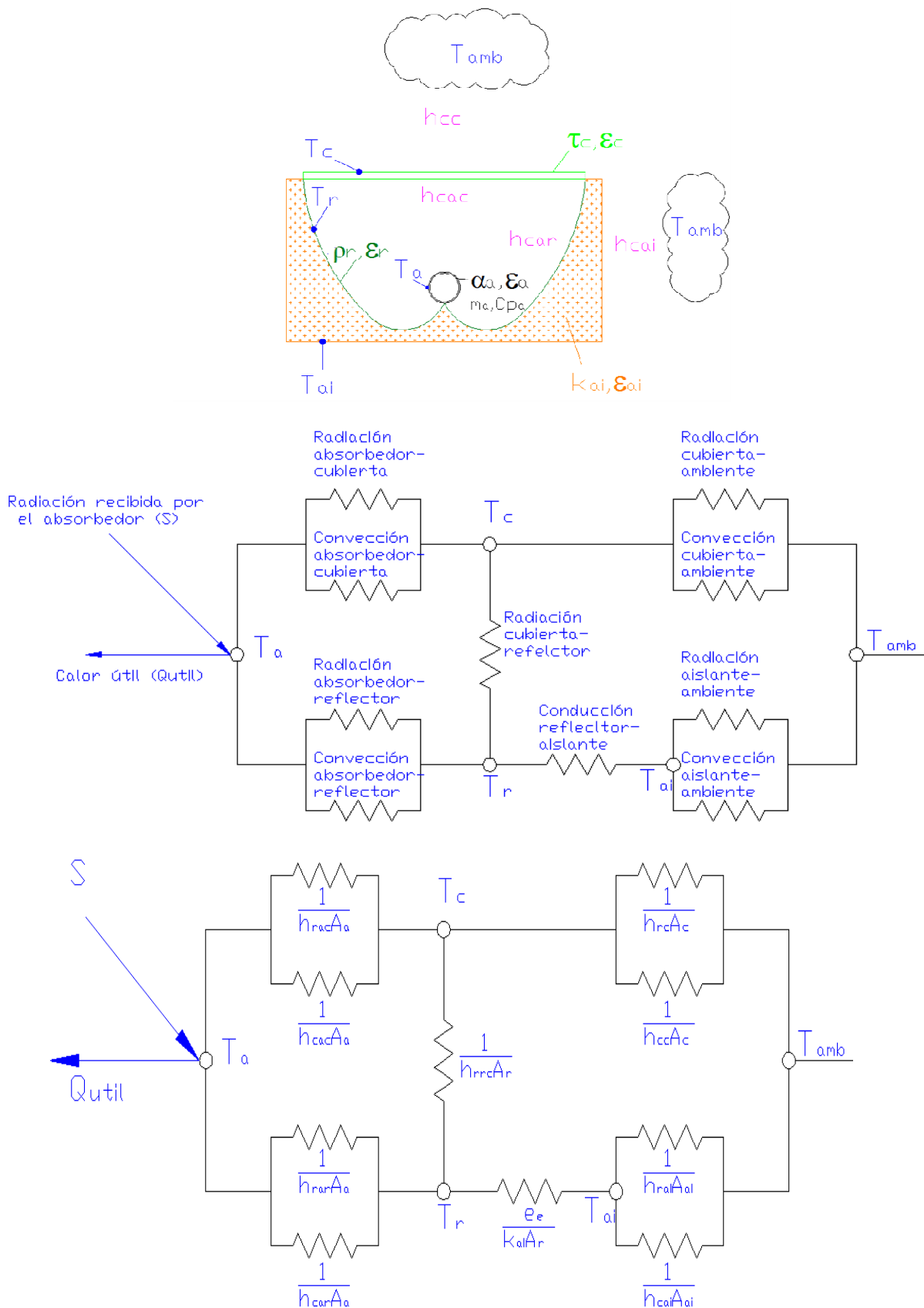


Figura 5.4 Circuito de resistencias equivalente para el primer modelo

Si se considera que la temperatura de la cubierta, la temperatura del reflector y del aislante son semejantes se tiene:

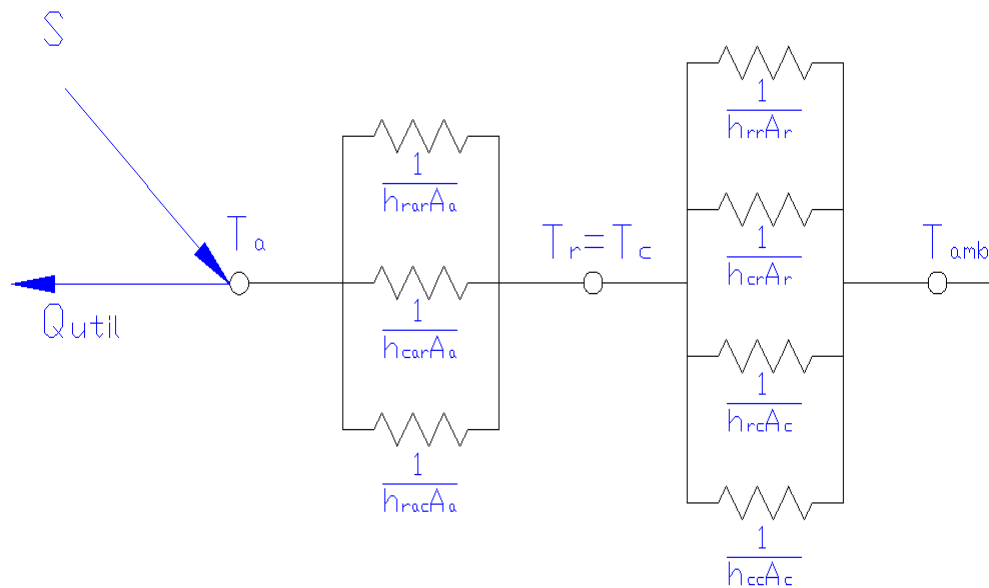


Figura 5.5 Circuito de resistencias equivalente para el segundo modelo

Donde:

h_{rac} = coeficiente de radiación entre el absorbedor y la cubierta (W/m^2K)

h_{rar} = coeficiente de radiación entre el absorbedor y la cubierta (W/m^2K)

h_{car} = coeficiente de convección entre el absorbedor y el fluido circundante (W/m^2K)

h_{rc} = coeficiente de radiación entre la cubierta y el ambiente (W/m^2K)

h_{cc} = coeficiente de convección entre la cubierta y el ambiente (W/m^2K)

k_{ai} = conductividad térmica del aislante (W/mK)

h_{raia} = coeficiente de radiación entre el aislante y el ambiente (W/m^2K)

h_{caia} = coeficiente de convección entre el aislante y el ambiente (W/m^2K)

h_{rrc} = coeficiente de radiación entre el reflector y la cubierta (W/m^2K)

h_{rra} = coeficiente de radiación entre el reflector y el ambiente (W/m^2K)

h_{cra} = coeficiente de convección entre el reflector y el ambiente (W/m^2K)

h_{rai} = coeficiente de radiación entre el aislante y el ambiente (W/m^2K)

h_{cai} = coeficiente de convección entre el aislante y el ambiente (W/m^2K)

k_{ai} = conductividad térmica del aislante (W/mK)

e_e = espesor equivalente del aislante (m)

A_a = área del absorbedor (m^2)

A_c = área de la cubierta (m^2)

A_r = área del reflector (m^2)

A_{ai} = área del aislante (m^2)

T_a = Temperatura del absorbedor (K)

T_c = Temperatura de la cubierta (K)

T_r = temperatura del reflector (K)

T_{ai} = temperatura del aislante (K)

T_{amb} = temperatura ambiente (K)

Se ha considerado que la resistencia de contacto entre el reflector y el aislante es despreciable. Para el análisis de la radiación la temperatura del cielo es considerada como la ambiental. Para poder determinar la temperatura del absorbedor se considera que está aislado, por lo que no se considera el calor transmitido al carbón (Q_{util}) en este análisis. En la siguiente sección se considera el calor que es transmitido al carbón para determinar la concentración de alcohol en el carbón activado. Por lo tanto se tiene:

$$S = \frac{(T_a - T_{amb})}{R_{eqc}} \quad (5. 64)$$

Donde R_{eqc} se calcula resolviendo el circuito de resistencias equivalente mostrado en la figura 5.4 o 5.5, dependiendo del caso que se considere.

Para las resistencias en serie:

$$R_{eqs} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (5. 65)$$

Para las resistencias en paralelo:

$$\frac{1}{R_{\text{cap}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (5.66)$$

Para las fases AB, CD y DA (figura 2.8) es importante conocer el tiempo en que se calienta o enfría el adsorbedor por lo que se debe considerar el almacenamiento de energía y realizar un análisis transitorio, para las pérdidas se calcula una resistencia equivalente constante. En el caso de la fase BC se hace un análisis para régimen estable. La demostración de las ecuaciones 5.68 y 5.72 se encuentran en el Anexo VII.

Para la fase AB:

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} = E_{\text{acumulada}} \quad (5.67)$$

$$T_a = T_{\text{amb}} - SR_{\text{eqc}} e^{t/B} + SR_{\text{eqc}} \quad (5.68)$$

Para la fase BC:

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} = 0 \quad (5.69)$$

$$S = \frac{T_a - T_{\text{amb}}}{R_{\text{eqc}}} \quad (5.70)$$

$$T_a = SR_{\text{eqc}} + T_{\text{amb}} \quad (5.71)$$

Para la fase CD y DA:

$$T_a = T_{\text{amb}} + (T_i - T_{\text{amb}}) e^{t/B} \quad (5.72)$$

5.2.2 CAMA ADSORBEDORA

Para el análisis de la transferencia de masa y transferencia de calor de la cama adsorbedora se procederá a identificar los parámetros influyentes en el desempeño del sistema y cómo evolucionan.

Para el diseño de la cama adsorbedora se procederá a tener en cuenta varias suposiciones para poder simplificar el modelo matemático.

1. Existe un equilibrio termodinámico en el sistema adsorbente/ adsorbato en todos los puntos del adsorbedor y en todo momento.
2. La difusión ocurre en la fase gaseosa.
3. Las propiedades del carbón activado como calor específico, conductividad térmica y densidad son constantes
4. El calor latente de vaporización y condensación del metanol es una constante.
5. El efecto de la convección en los poros de la cama son despreciables
6. El calor específico del metanol adsorbido es igual a la del metanol líquido.
7. En la fase de adsorción y desorción la presión del vapor es igual a la presión de saturación del evaporador y del condensador a la temperatura respectivamente.
8. El sistema es considerado como unidimensional, la temperatura varía con respecto a la dirección del radio.
9. El metanol en estado gaseoso se comporta como gas ideal.
10. El sistema adsorbente/adsorbato es tratado como medio continuo para efectos de conducción térmica.

- **Balance de energías**

De acuerdo a las suposiciones descritas anteriormente, el balance de energías de la cama adsorbedora puede ser expresado de la siguiente forma:

$$E_{entra} - E_{sale} + E_{generada} = E_{acumulada} \quad (5.73)$$

$$\rho_{Cad} C_{pCad} \frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} = k_{C-A} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial r} \right) + \rho_{C-A} \Delta H_{ad/des} \frac{\partial X}{\partial t} + \omega \rho_{C-A} C_{p_{met-v}} (T_e - T_{C-A}) \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.74)$$

⁹⁹ WANG R., XU Y., WU J., "Research on a Combined Adsorption Heating and Cooling System", 2001, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Applied Thermal Engineering 22 pg. 603-617

$$\rho_{\text{Cad}} C_{p\text{Cad}} = \rho_{\text{C-A}} C_{p\text{C-A}} + \rho_{\text{met-liq}} C_{p\text{met-liq}} \quad (5.75)$$

$$\rho_{\text{met-liq}} = \rho_{\text{C-A}} X \quad (5.76)$$

Donde:

T = temperatura (°C)

ρ = densidad (kg/m³)

k = conductividad térmica (W/mK)

C_p = calor específico (kJ/kgK)

$\Delta H_{\text{ad/des}}$ = Calor de adsorción o desorción (kJ/kg_{met})

T_e = temperatura del evaporador (°C)

X = concentración (kg_{met}/kg_C)

t = tiempo (seg)

r = radio de la cama adsorbadora (m)

ω = variable cuyo valor es igual a 1 cuando se adsorbe y 0 en el calentamiento, enfriamiento isostérico y en la desorción.

Subíndices:

C-A= carbón activado

Cad = cama de adsorción

met-liq = metanol líquido

met-v = metanol gaseoso

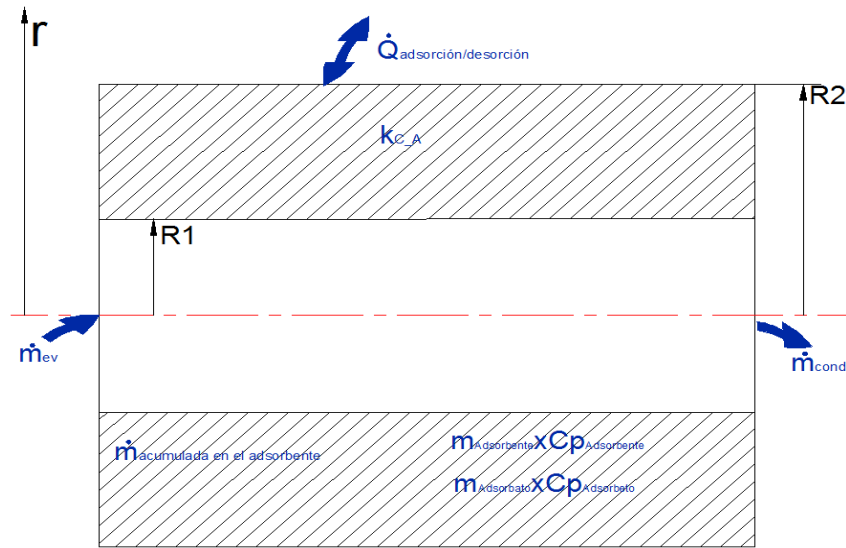


Figura 5.6 Balance de transferencia de masa y energía a lo largo del colector

El calor de adsorción o desorción viene expresado por la ecuación (A.8.11).

$$\Delta H_{ad/des} = \Delta H_{f,g} + RT_{C-A} \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) + \frac{\alpha RT_{C-A}}{nD} \left[T_{C-A} \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^{1-n} \quad (5.77)$$

Y la concentración respecto al tiempo viene expresada por la ecuación (A.9.20).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = g \left[\frac{\partial \ln P}{\partial t} - \frac{\Delta H_{ad/des}}{RT_{C-A}^2} \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) \right] \quad (5.78)$$

Donde:

$\Delta H_{f,g}$ = entalpía de evaporación y/o condensación (kJ/kg)

R= constante universal de los gases (J/molK)

P_{sat} = Presión de saturación del metanol gaseoso a la temperatura del adsorbente (bares)

P = presión del adsorbente (bar)

α = Coeficiente de dilatación cúbica (m^3/K)

n = exponente obtenido experimentalmente de la ecuación D-A

D = coeficiente de afinidad, que depende de las características del adsorbato y adsorbente.

g = variable (ver ecuación A9.9)

- **Balance de masa**

De acuerdo al balance de masa que se representa en la figura 5.6 se puede expresar:

$$\dot{m}_{ev} - \dot{m}_{cond} - \dot{m}_{ad/des} = 0 \quad (5.79)$$

$$\dot{m}_{ad/des} = m_{C-A} \int_{R1}^{R2} r \frac{\partial X}{\partial t} dr \quad (5.80)$$

$$\dot{m}_{ev} - \dot{m}_{cond} - m_{C-A} \int_{R1}^{R2} r \frac{\partial X}{\partial t} dr = 0 \quad (5.81)$$

Donde:

\dot{m}_{ev} = flujo másico proveniente del evaporador (kg/s)

\dot{m}_{cond} = flujo másico hacia el condensador (kg/s)

$\dot{m}_{ad/des}$ = flujo másico adsorbido o desorbido (kg/s)

R1 = diámetro de la tubería interior (fig. 5.6)

R2 = diámetro de la tubería exterior (fig. 5.6)

$$m_{C-A} = (\pi R_2^2 - \pi R_1^2) L_{colector} N_{tubos} \rho_{C-A} \quad (5.82)$$

Donde:

$L_{colector}$ = longitud del colector (m)

N_{tubos} = número de tubos del colector

- **Fases del ciclo termodinámico**

Para cada una de las fases del ciclo termodinámico de adsorción (figura 2.8) el balance de masa y energía queda:

La fase A-B es un proceso a concentración constante, por lo cual, el cambio de concentración respecto al tiempo es igual a cero y el flujo de adsorbente

proveniente del evaporador y flujo de adsorbente hacia el condensador es igual a cero, entonces se tiene:

$$\rho_{\text{Cad}} C_{p\text{Cad}} \frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} = k_{\text{C-A}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial r} \right) \quad (5.83)$$

De acuerdo con la ecuación (5.78) y remplazando en la ecuación (5.81).

$$m_{\text{C-A}} \int_{R_1}^{R_2} r \left[\frac{\partial \ln P}{\partial t} - \frac{\Delta H_{\text{ad/des}}}{RT_{\text{C-A}}^2} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) \right] dr = 0 \quad (5.84)$$

Realizando las operaciones respectivas y tomando en cuenta que la presión no depende del radio se tiene:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial t} = \frac{\int_{R_1}^{R_2} r \left[\frac{\Delta H_{\text{ad/des}}}{RT_{\text{C-A}}^2} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) \right] dr}{\int_{R_1}^{R_2} r dr} \quad (5.85)$$

La fase B-C es un proceso a presión constante, por lo cual el cambio de presión respecto al tiempo es igual a cero, el flujo proveniente del evaporador es igual a cero y el flujo hacia el condensador es diferente de cero entonces se tiene:

$$\rho_{\text{Cad}} C_{p\text{Cad}} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) = k_{\text{C-A}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial r} \right) + \rho_{\text{C-A}} \Delta H_{\text{ad/des}} \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) \quad (5.86)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -g \frac{\Delta H_{\text{ad/des}}}{RT_{\text{C-A}}^2} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) \quad (5.87)$$

Remplazando la ecuación (5.87) en (5.81)

$$-\dot{m}_{\text{cond}} + m_{\text{C-A}} \int_{R_1}^{R_2} r g \frac{\Delta H_{\text{ad/des}}}{RT_{\text{C-A}}^2} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) dr = 0 \quad (5.88)$$

Despejando el flujo másico hacia el condensador se tiene:

$$\dot{m}_{\text{cond}} = m_{\text{C-A}} \int_{R_1}^{R_2} r g \frac{\Delta H_{\text{ad/des}}}{RT_{\text{C-A}}^2} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) dr \quad (5.89)$$

La fase C-D es un proceso a concentración constante, por lo cual el cambio de concentración respecto al tiempo es igual a cero entonces se tiene:

$$\rho_{\text{Cad}} C_{p\text{Cad}} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) = k_{\text{C-A}} \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial r} \right) \quad (5.90)$$

De acuerdo con la ecuación (5.78) y remplazando en la ecuación (5.81)

$$m_{\text{C-A}} \int_{R_1}^{R_2} r \left[\frac{\partial \ln P}{\partial t} - \frac{\Delta H_{\text{ad/des}}}{RT_{\text{C-A}}^2} \left(\frac{\partial T_{\text{C-A}}}{\partial t} \right) \right] dr = 0 \quad (5.91)$$

Realizando las operaciones respectivas se tiene:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial t} = \frac{\int_{R_1}^{R_2} r \left[\frac{\Delta H_{ad/des}}{RT_{C-A}^2} \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) \right] dr}{\int_{R_1}^{R_2} r dr} \quad (5.92)$$

La fase D-A es un proceso a presión constante por lo cual el cambio de presión respecto al tiempo es igual a cero, entonces se tiene:

$$\rho_{C-A} C_{p_{C-A}} \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) = k_{C-A} \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial r} \right) + \rho_{C-A} \Delta H_{ad/des} \frac{\partial X}{\partial t} + \omega \rho_{C-A} C_{p_{met-v}} (T_e - T_{C-A}) \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.93)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -g \left(\frac{\Delta H_{ad/des}}{RT_{C-A}^2} \right) \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) \quad (5.94)$$

Remplazando la ecuación (5.94) en (5.81)

$$\dot{m}_{ev} + m_{C-A} \int_{R_1}^{R_2} r g \left(\frac{\Delta H_{ad/des}}{RT_{C-A}^2} \right) \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) dr = 0 \quad (5.95)$$

Despejando el flujo másico proveniente del evaporador se tiene:

$$\dot{m}_{ev} = -m_{C-A} \int_{R_1}^{R_2} r g \left(\frac{\Delta H_{ad/des}}{RT_{C-A}^2} \right) \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) dr \quad (5.96)$$

- **Condiciones iniciales y de borde de la cama de adsorción**

Para las condiciones de borde de la cama adsorbadora en $r=R_2$ se tiene que la conducción de calor está dada por:

$$-k_C \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial r} \right)_{r=R_2} = h(T_w - T_p)^{100} \quad (5.97)$$

Donde:

k_C = Conductividad térmica del carbón en $r=R_2$ (W/mK)

h = conductancia térmica (W/m²K)

T_w = Temperatura de la tubería exterior (°C)

T_p = Temperatura del adsorbente próximo a la pared (°C)

¹⁰⁰ W. CHEKIROU, N. BOUKHEIT AND T. KERBACHE, "Numerical modelling of combined heat and mass transfer in a tubular adsorber of a solid adsorption solar refrigerator", Departamento de física de la Universidad de Mentouri, Algeria, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3, pg. 367 – 379

El entorno del lecho adsorbedor/tubo interior de difusión del adsorbato ($r=R_1$, fig. 5.6) es considerado adiabático, de acuerdo a las suposiciones anteriormente mencionadas se tiene:

$$\left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t}\right)_{r=R_1} = 0 \quad (5.98)$$

Al empezar el ciclo la distribución de temperatura de la cama adsorbente y las paredes del tubo pueden ser consideradas uniformes e iguales a la temperatura ambiente y la presión igual a la presión del evaporador.

$$T(r,t=0)=T_w(t=0)=T_{amb} \quad (5.99)$$

$$P(t=0)=P_e=P_{sat}(T_e) \quad (5.100)$$

Donde:

T_{amb} = temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

P_e =presión de saturación (Bar)

- **Propiedades del metanol**

Las propiedades del metanol en estado líquido y gaseoso en función de la temperatura son:

Presión de saturación del metanol en estado gaseoso es:

$$P_{sat} = \exp\left(18.67 - \frac{3473}{T_{C-A}} - \frac{167800}{T_{C-A}^2}\right) \quad (5.101)$$

Calor específico del metanol líquido:

$$C_{p_{met-liq}} = 1.0580E05 - 3.62223E02T_{C-A} + 9.3790E-01T_{C-A}^2 \quad (5.102)$$

Calor específico del metanol gaseoso:

$$C_{p_{met-v}} = 19 + 9.152E-02T_{C-A} - 1.22E-05T_{C-A}^2 - 8.039E-09T_{C-A}^3 \quad (5.103)$$

Donde:

P_{sat} = presión de saturación del metanol (mbar)

T_{C-A} = temperatura del carbón activado (K)

$C_{p\text{met-liq}}$ = calor específico del metanol líquido (J/kmol.K)

$C_{p\text{met-v}}$ = calor específico del metanol gaseoso (J/kmol.K)

5.2.3 DISEÑO DEL CONDENSADOR

Para el diseño del condensador se procederá a calcular el calor necesario que debe remover el aire para poder llevar al metanol del estado gaseoso al líquido.

- **Balance de energías**

En la figura 5.7 se muestra las energías que actúan en el condensador

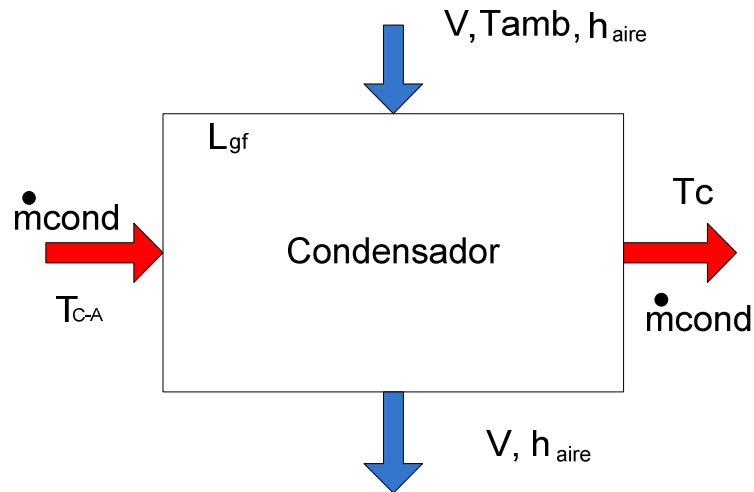


Figura 5. 7 Flujo de energías del condensador

Se tomará como volumen de control el metanol:

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} + E_{\text{generada}} = E_{\text{acumulada}} \quad (5. 104)$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{Q}_{\text{met}} = \dot{m}_{\text{cond}} C_{p\text{met-v}} (T_c - T_{C-A}) - L_{gf} \dot{m}_{\text{cond}} \quad (5. 105)$$

$$\dot{Q}_{\text{met}} = \dot{m}_{\text{cond}} [C_{p\text{met-v}} (T_c - T_{C-A}) - L_{gf}]^{101} \quad (5. 106)$$

Donde:

L_{gf} = calor latente de condensación del metanol (J/kg)

¹⁰¹ ZHANG X., WANG R., "A New Combined Adsorption-Ejector Refrigeration and Heating Hybrid System Powered by Solar Energy", 2002, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jia Tong, China, applied Thermal Engineering 22, pg 1245-1258

\dot{Q}_{cond} = flujo de calor del condensador (W)

\dot{Q}_{met} = flujo de calor del metanol (W)

Remplazando la ecuación (5.89) en (5.106) se tiene:

$$\dot{Q}_{met} = m_{C-A} \int_{R1}^{R2} r \frac{\partial X}{\partial t} [Cp_{met-v}(T_c - T_{C-A}) - L_{gf}] dr \quad (5.107)$$

que es semejante a:

$$\dot{Q}_{met} = m_{C-A} \frac{\Delta X}{\Delta t} [Cp_{met-v}(T_c - T_{C-A}) - L_{gf}] \quad (5.108)$$

Aplicando la diferencia de temperaturas logarítmicas para el condensador se tiene:

$$\dot{Q}_{met} = U_{cond} A_{cond} DMLT_{cond} \quad (5.109)$$

Donde:

U_{cond} = coeficiente global de transferencia de calor del condensador (W/m²K)

A_{cond} = área de transferencia del condensador (m²)

$DMLT_{cond}$ = diferencia media logarítmica de temperaturas del condensador (K)

$$U_{cond} = \frac{1}{\frac{1}{h_{met}} + \frac{1}{h_{airec}}} \quad (5.110)$$

Debido a que las velocidades son bajas del metanol en estado gaseoso para el cálculo del h_{met} considerando tubería horizontal, INCROPERA¹⁰² recomienda una expresión de la forma:

$$h_{met} = 0.555 \left[\frac{g_r \rho_{liq} (\rho_{liq} - \rho_v) k_{liq}^3 h'_{fg}}{\mu_{liq} (T_{sat} - T_s) D_c} \right]^{1/4} \quad (5.111)$$

$$h'_{fg} = L_{fg} + \frac{3}{8} Cp_{liq} (T_{sat} - T_s) \quad (5.112)$$

¹⁰² INCROPERA f., DE WITT D., Fundamentos de transferencia de calor, Prentice Hall, cuarta edición, México, 1999, pg. 568.

Donde:

h'_{fg} = calor latente modificado (kJ/kg)

T_{sat} = temperatura de saturación a la presión del condensador (°C)

T_s = temperatura de la superficie (°C)

D_c = diámetro de la tubería del condensador (m)

g_r = gravedad (m/s^2)

μ_{liq} = viscosidad del metanol líquido (kg/m.s)

h_{met} = coeficiente de convección del metanol (W/m^2K)

h_{airec} = coeficiente de convección del aire circundante al condensador (W/m^2K)

k_{liq} = conductividad térmica del metanol líquido ($W/m.K$)

Cp_{liq} = calor específico del metanol líquido (J/kg.K)

ρ_{liq} = densidad del metanol líquido (kg/m^3)

ρ_v = densidad del metanol en estado gaseoso (kg/m^3)

Para calcular la temperatura de la superficie del condensador se tiene.

$$T_s = \frac{T_{aire} + T_h}{2} \quad (5.113)$$

$$T_h = \frac{T_{c-A} + T_c}{2} \quad (5.114)$$

$$A_{cond} = \pi D_c L_{tuberiacond} \quad (5.115)$$

$L_{tuberiacond}$ = longitud de la tubería del condensador (m)

D_c = diámetro de la tubería del condensador (m)

T_c = temperatura del condensador (°C)

5.2.4 DISEÑO DEL EVAPORADOR Y DE LA CÁMARA FRÍA

Para el diseño del evaporador hay que tener en cuenta que el metanol que proviene del condensador se encuentra a la temperatura ambiente, por tal motivo, hay que considerar el calor sensible del metanol para que disminuya su temperatura desde la ambiente hasta la del evaporador.

- **Balance de energías**

En la figura 5.8 se muestran el flujo de energías que actúan en el evaporador:

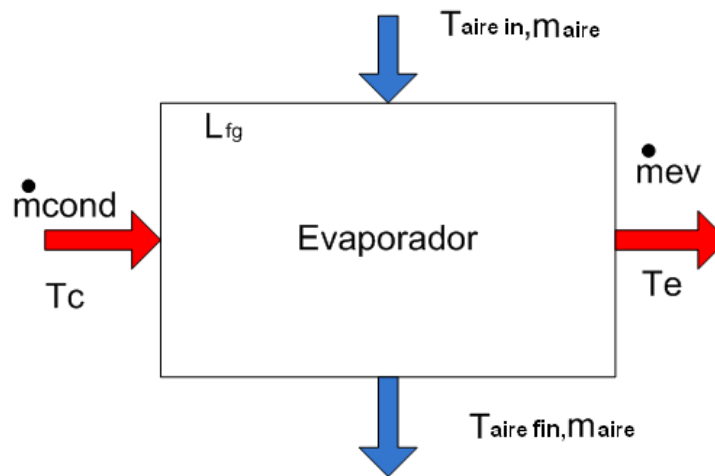


Figura 5.8 Balance de energías del evaporador

Se tomará como volumen de control el metanol:

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} + E_{\text{generada}} = E_{\text{acumulada}} \quad (5.116)$$

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{Q}_{met} = -\dot{m}_{ev} C_{p_{met-liq}} (T_c - T_e) + L_{fg} \dot{m}_{cond} \quad (5.117)$$

Donde:

L_{fg} = calor latente de evaporación del metanol (J/kg)

\dot{Q}_{ev} = flujo de calor del evaporador (W)

\dot{Q}_{met} = flujo de calor del metanol (W)

Considerando que la misma masa que entra al evaporador sale se obtiene:

$$\dot{Q}_{met} = \dot{m}_{ev} (L_{gf} - C_{p_{met-v}} (T_c - T_e)) \quad (5.118)$$

Remplazando la ecuación (5.96) en (5.118) se tiene:

$$\dot{Q}_{met} = m_{C-A} \int_{R1}^{R2} r \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) Q_{met} = \dot{m}_{ev} [L_{fg} - C_{p_{met-v}}(T_c - T_e)] dr \quad (5.119)$$

Es semejante a:

$$\dot{Q}_{met} = m_{C-A} \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right) [L_{fg} - C_{p_{met-v}}(T_c - T_e)] \quad (5.120)$$

El producto a congelar será agua a una temperatura de 0 °C por ese motivo se procede a calcular el tiempo que se requiere para congelar el agua a un calor de evaporador dado.

Tomando como volumen de control el aire el balance de energía sería el siguiente, en la figura 5.9 se muestra el balance de energía al aire del interior de la cámara a enfriar.

$$E_{entra} - E_{sale} + E_{generada} = E_{acumulada} \quad (5.121)$$

$$t(-\dot{Q}_{ev} - \dot{Q}_{ganancias}) = m_{aire} C_{p_{aire}}(T_{airefin} - T_{aguain}) - Q_{producto} \quad (5.122)$$

Despejando el tiempo que se requiere para enfriar el agua será:

$$t = \frac{m_{aire} C_{p_{aire}}(T_{airefin} - T_{aguain}) - Q_{producto}}{(-\dot{Q}_{ev} - \dot{Q}_{ganancias})} \quad (5.123)$$

$$Q_{producto} = m_{agua} C_{p_{agua}}(T_{aguafin} - T_{aguain}) - L_{fusión} m_{agua} \quad (5.124)$$

Donde

m_{agua} = masa de agua (kg)

$C_{p_{agua}}$ = calor específico del agua (J/kg.K)

m_{aire} = masa de aire (kg)

$C_{p_{aire}}$ = calor específico del aire (J/kgK)

$T_{aguafin}$ = temperatura final del agua (°C)

T_e = temperatura del evaporador (°C)

$T_{airefin}$ = temperatura final del aire (°C)

T_{airein} = temperatura inicial del aire (°C)

T_{aguain} = temperatura inicial del agua ($^{\circ}\text{C}$)

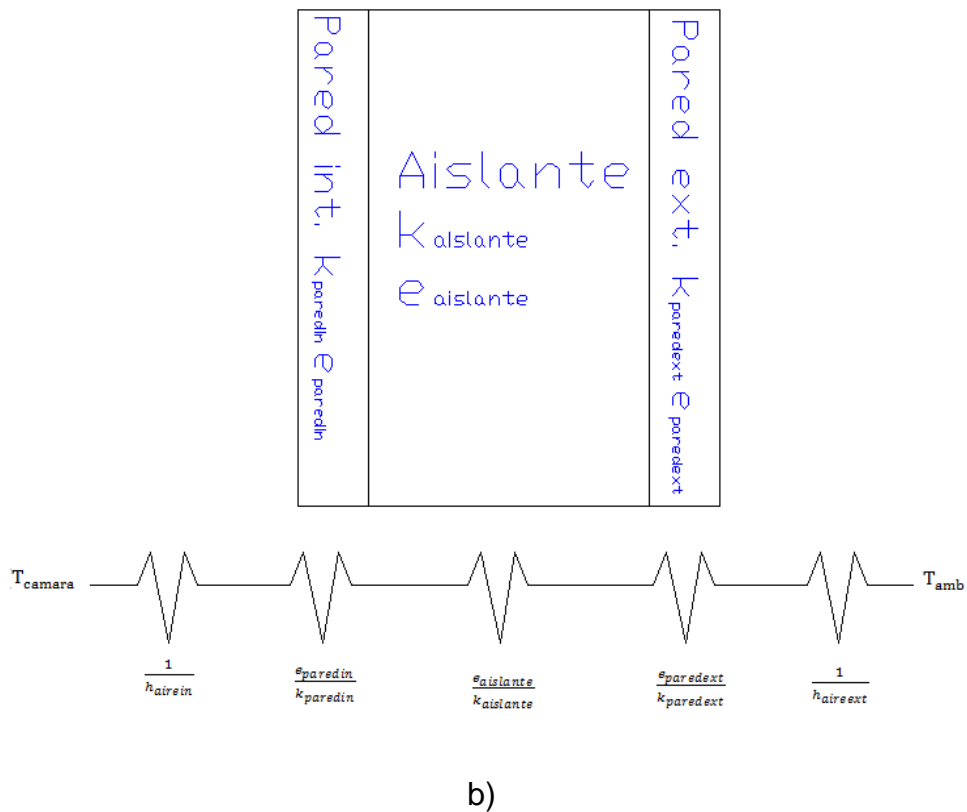
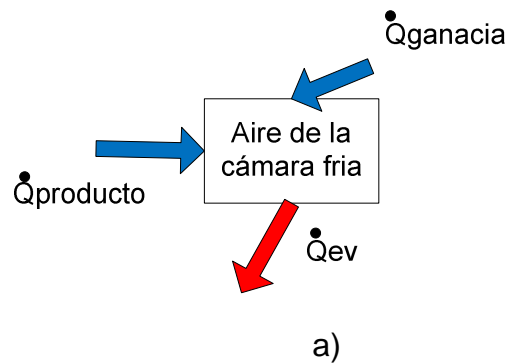
$L_{\text{fusionagua}}$ = calor latente de fusión del agua (J/kg)

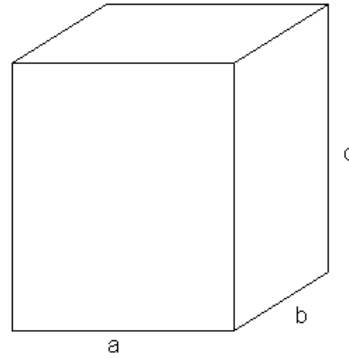
Q_{producto} = calor extraído del producto (J)

t_{ea} = tiempo que transcurre para enfriar el agua (seg.)

$\dot{Q}_{\text{ganancia}}$ = flujo de calor ganado por las paredes de la cámara a enfriar por el ambiente (W)

La ganancia del calor a través las paredes de la cámara a enfriar se calcularán por el método de las resistencias y se muestra en la figura 5.9.





c)

Figura 5.9 Representación de la cámara a enfriar

a) Balance de energías del aire. b) Esquema de las resistencias térmicas de la pared. c) Dimensiones de la cámara a enfriar

$$\dot{Q}_{\text{ganancias}} = U_{\text{pared}} A_{\text{pared}} (T_{\text{camara}} - T_{\text{amb}}) \quad (5.125)$$

$$\frac{1}{U_{\text{pared}}} = R_{\text{total}} = R_{\text{airein}} + R_{\text{paredin}} + R_{\text{aislnte}} + R_{\text{paredext}} + R_{\text{aireext}} \quad (5.126)$$

$$R_{\text{airein}} = \frac{1}{h_{\text{airein}}} \quad (5.127)$$

$$R_{\text{paredin}} = \frac{e_{\text{paredin}}}{k_{\text{paredin}}} \quad (5.128)$$

$$R_{\text{paredext}} = \frac{e_{\text{paredext}}}{k_{\text{paredext}}} \quad (5.129)$$

$$R_{\text{aireext}} = \frac{1}{h_{\text{aireext}}} \quad (5.130)$$

$$R_{\text{aislante}} = \frac{e_{\text{aislante}}}{k_{\text{aislante}}} \quad (5.131)$$

$$A_{\text{pared}} = 2a_{\text{pared}}b_{\text{pared}} + 2a_{\text{pared}}c_{\text{pared}} + 2b_{\text{pared}}c_{\text{pared}} \quad (5.132)$$

Donde:

a_{pared} = largo de la pared del cuarto a enfriar (m)

b_{pared} = ancho de la pared del cuarto a enfriar (m)

c_{pared} = altura de la pared del cuarto a enfriar (m)

A_{pared} = área de la pared del cuarto a enfriar (m²)

h_{airein} = coeficiente de convección del aire interior de la cama a enfriar (W/m²K)

$h_{aireext}$ = coeficiente de convección de los alrededores de la cámara fría (W/m²K)

$e_{aislante/paredext/paredin}$ = espesor del aislante, pared exterior y pared interior (m)

$k_{paredext/aislante/paredin}$ = conductividad térmica pared exterior, aislante, y pared interior (W/mK)

T_{camara} = temperatura del cuarto a enfriar (°C)

T_{amb} = temperatura ambiente (°C)

Se procederá a calcular el área de transferencia de calor para el evaporador

$$Q_{ev} = U_{ev} A_{ev} DTML_{ev} \quad (5. 133)$$

$$A_{ev} = \frac{U_{ev} DTML_{ev}}{Q_{ev}} \quad (5. 134)$$

El coeficiente global de transferencia de calor para evaporador no se considera la el espesor de la tubería del evaporador por que este tiene un espesor pequeño ni las perdidas a través de la las paredes de la cámara fría y que el producto y el aire en el interior de la cámara fría se encuentran a la misma temperatura.

$$U_{ev} = \frac{1}{\frac{1}{h_{met}} + \frac{D_{tuberiaex}}{h_{airee} D_{tuberiain}}} \quad (5. 135)$$

$$DTML_{ev} = \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)} \quad (5. 136)$$

$$\Delta T1 = T_{airein} - T_e \quad (5. 137)$$

$$\Delta T2 = T_{aire fin} - T_e \quad (5. 138)$$

Donde:

$D_{tuberiaex}$ = diámetro exterior de la tubería del evaporador (m)

$D_{tuberiain}$ = diámetro de la tubería interior (m)

h_{airee} = coeficiente de convección del aire circundante al evaporador (W/m²K)

A_{ev} = área del evaporador (m²)

U_{ev} = coeficiente de global de transferencia de calor del evaporador (W/m²K)

$DTML_{ev}$ =diferencia media logarítmica del evaporador (K)

Se calcularán los coeficientes de convección para el metanol de la forma siguiente:

Para el aire hay que tener en cuenta que se encuentra en aire estanco. El evaporador se considerara que es tubería horizontal ya que este es una espira que crece hacia arriba como se muestra en la figura:

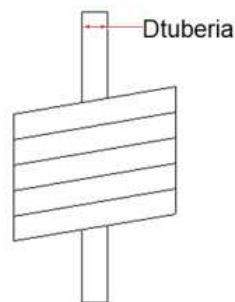


Figura 5.10 Esquema del evaporador y condensador

El coeficiente de convección del metanol se calcula a la temperatura de la superficie donde ocurre la ebullición:

$$T_{superficie} = \frac{T_{airein} + T_e}{2} \quad (5.139)$$

$$\Delta T_x = T_{superficie} - T_e \quad (5.140)$$

Utilizando la correlación de ebullición nucleada se tiene

$$q'' = \left(\frac{Cp_{met-liq} \cdot \Delta T_x}{C_{sf} \cdot L_{fg} \cdot Pr_{liq}^{n_{hev}}} \right)^3 \cdot \mu_{liq} \cdot L_{fg} \sqrt{\frac{(\rho_{liq} - \rho_v) g_r}{\sigma_{liq}}} \quad (5.141)$$

$$h_{met} = \frac{q''}{\Delta T_x} \quad (5.142)$$

$$q''_{max} = \frac{\pi}{24} \cdot \rho_v^{1/2} \cdot L_{fg} [\sigma_{liq} \cdot g_r (\rho_{liq} - \rho_v)]^{1/4} \quad (5.143)$$

Donde:

$T_{superficie}$ = temperatura de la superficie del evaporador (°C)

μ_{liq} = viscosidad del metanol líquido (kg/m.s)

h_{met} = coeficiente de convección del metanol (W/m²K)

σ_{liq} =tensión superficial del metanol de la interface líquida-vapor (N/m)

q'' = flujo calórico real (W/m²K)

q''_{max} = flujo calórico máximo (W/m²K)

ρ_{liq} =densidad del metanol líquido (kg/m³)

ρ_v = densidad del metano en estado gaseoso (kg/m³)

C_{sf} = constante empírica que depende de la naturaleza de la superficie de calentamiento-fluido cuyo valor numérico varía de un sistema a otro

n_{hev} = 1 para el agua y 1.7 para otros líquidos

$C_{p_{met-liq}}$ = calor específico del metanol líquido (J/kgK)

Pr_{liq} = número de Prandtl del metanol líquido

Para poder utilizar esta correlación se debe cumplir que flujo de calor de ebullición real es mayor que el flujo de calor máximo, por lo tanto, el núcleo en ebullición supuesto es correcto.

$$A_{ev} = \pi \cdot D_{tuberiaex} \cdot L_{tuberia} \quad (5. 144)$$

$$L_{tuberiaev} = \frac{A_{ev}}{\pi \cdot D_{tuberiaex}} \quad (5. 145)$$

Donde:

$L_{tuberiaev}$ = Longitud de la tubería del evaporador (m)

5.3 SIMULACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO

Una vez descrito el modelo matemático a utilizar se procederá a simular en el programa MATLAB 7.7 para obtener los valores de los parámetros de diseño. La programación se encuentra en el Anexo X.

5.3.1 PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

En las siguientes tablas se muestran los valores tomados de las variables en la simulación:

Tabla 5.3 Variables para la simulación

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Observación
Semiángulo de aceptación	θ_a	5 - 90	°	
Porcentaje de truncamiento	%p	10-100	%	
Ángulo de inclinación	β	0-180	°	
Acimut superficie	γ	0-180	°	
Hora del día	H	6-18	hora	La duración del día en Quito ($\phi=0$) es 12 horas
Longitud del colector	l	0.5-3	m	
Temperatura del evaporador	Te	-10	°C	
Temperatura del condensador	Tc	20	°C	Temperatura ambiental

Tabla 5.4 Constantes tomadas para la simulación

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Observación	Referencia
Altitud	A	2.8	Km		
Día del año	N	135	adimensional	Día representativo del mes de abril	DUFFIE, pg. 4
Latitud	ϕ	0	°		
Radiación directa	G _b	3040	Wh/m ² /día	Promedio	Atlas Solar
Radiación difusa	G _d	2120	Wh/m ² /día	Promedio	Atlas solar
Transmisividad de la cubierta	τ_c	0.78	adimensional		CENGEL, pg. 742
Reflectividad	ρ	0.88	adimensional	Parábola de acero inoxidable	KREITH, pg.536
Absortividad del tubo	α_a	0.94	adimensional	Tubo acero inoxidable pintado color negro	CENGEL, pg. 742
Emisividad cubierta	ϵ_c	0.90	adimensional	Material vidrio	INCROPERA, pg.852
Emisividad reflector	ϵ_r	0.18	adimensional	Material acero inoxidable	INCROPERA, pg.852

Emisividad del absorbedor	ε_a	0.98	adimensional	Tubo acero inoxidable pintado color negro	INCROPERA, pg.852
Velocidad del viento	V	1	m/s		NASA
Temperatura ambiente	T_{amb}	20	°C		NASA
Conductividad térmica del aislante	$a_{islante}$		W/mK	Fibra de vidrio	INCROPERA, pg. 834
Espesor del aislante	$e_{islante}$	0.05	(m)		
Constante de la ecuación de Dubinin-Astakhov	D	3.48E-4	adimensional	Obtenida experimentalmente	
Constante de la ecuación de Dubinin-Astakhov	n	1.18	adimensional	Obtenida experimentalmente	
Concentración máxima ecuación Dubinin - Astakhov	Wo	0.137	L/kg	Obtenida experimentalmente	
Conductividad térmica del carbón	k_{ca}	0.79	W/mK		WANG R.Z.
Densidad del carbón	ρ_{ca}	500	Kg/m ³		Ecuakarbon
Calor específico del carbón	$C_{p_{ca}}$	800	W/kgK		WANG R.Z.
Calor latente de vaporización o condensación	Lfg o Lgf	1100-1200	KJ/kg		HORN

Para el condensador las propiedades del metanol se tomaran a una temperatura promedio de 70.0515 °C y para el evaporador a 5 °C que fueron tomadas de las propiedades termodinámicas del metanol que se encuentran en el anexo XIII.

5.3.2 OBTENCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN ÓPTIMA DEL COLECTOR SOLAR CPC

En cuanto a la determinación de la radiación incidente en Quito se realizó una comparación entre el modelo de cielo despejado y los datos promedios tomados del Atlas Solar, la cual se presenta en la figura 5.11.

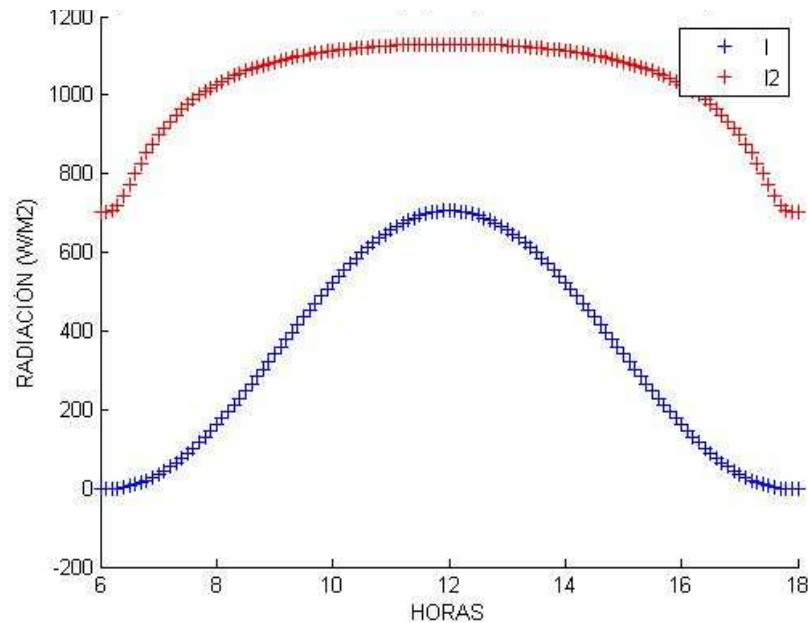


Figura 5.11 Comparación de la radiación con cielo despejado (I) y calculada con datos obtenidos del Atlas Solar (I2).

Se puede observar que la radiación obtenida con el Atlas Solar es inferior a la predicción del modelo de cielo despejado. Debido a esto se descarta el uso del modelo de cielo despejado para la simulación del colector.

A continuación se presenta una comparación de las diferentes orientaciones posibles que puede tener el colector.

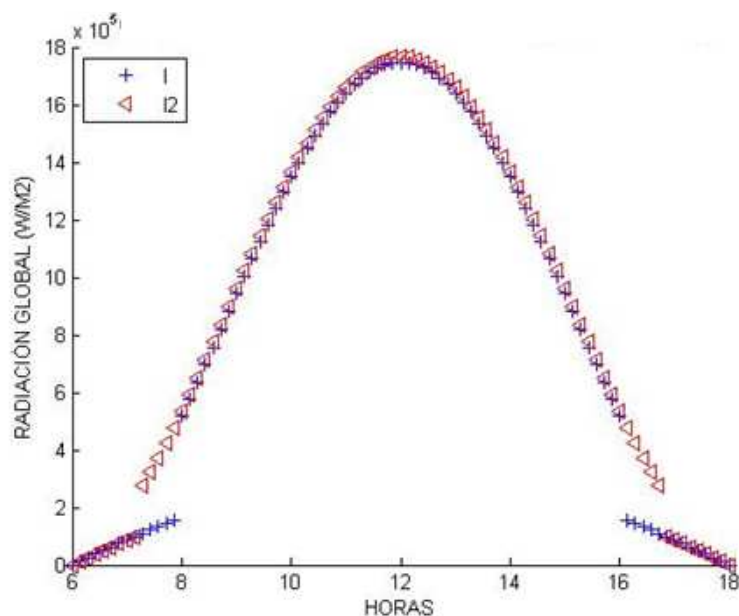


Figura 5.12 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este-oeste sin rastrear (1) y este-oeste con ajuste diario (2)
 Ángulo de inclinación y azimut = 0°, Ángulo de aceptación (sin truncar) 15°, 80% de truncamiento

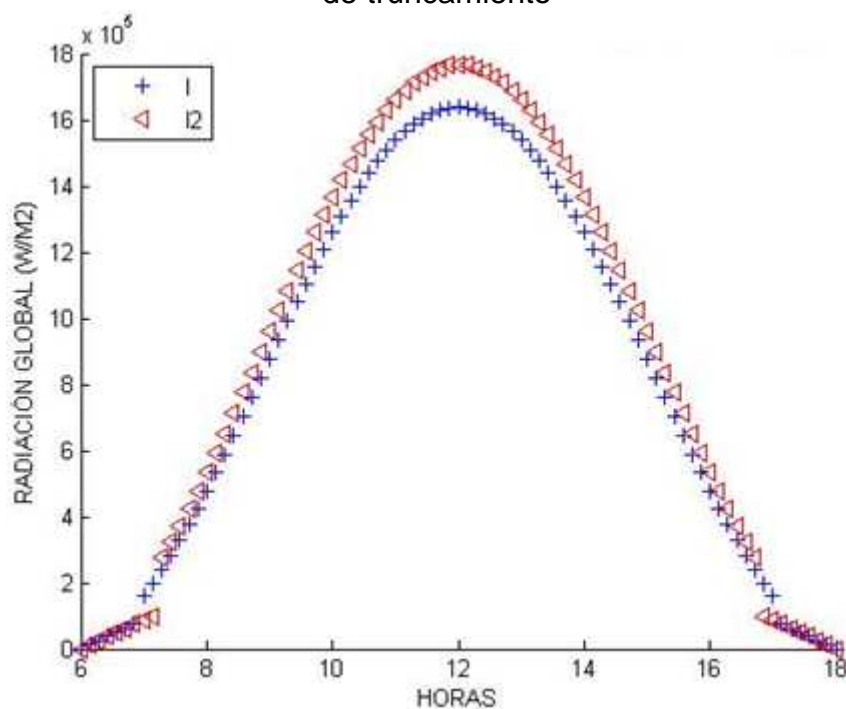


Figura 5.13 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este-oeste sin rastrear (1) y este-oeste con ajuste diario (2)
 Ángulo de inclinación = 15° y azimut = 0°, Ángulo de aceptación (sin truncar) 15°, 80% de truncamiento

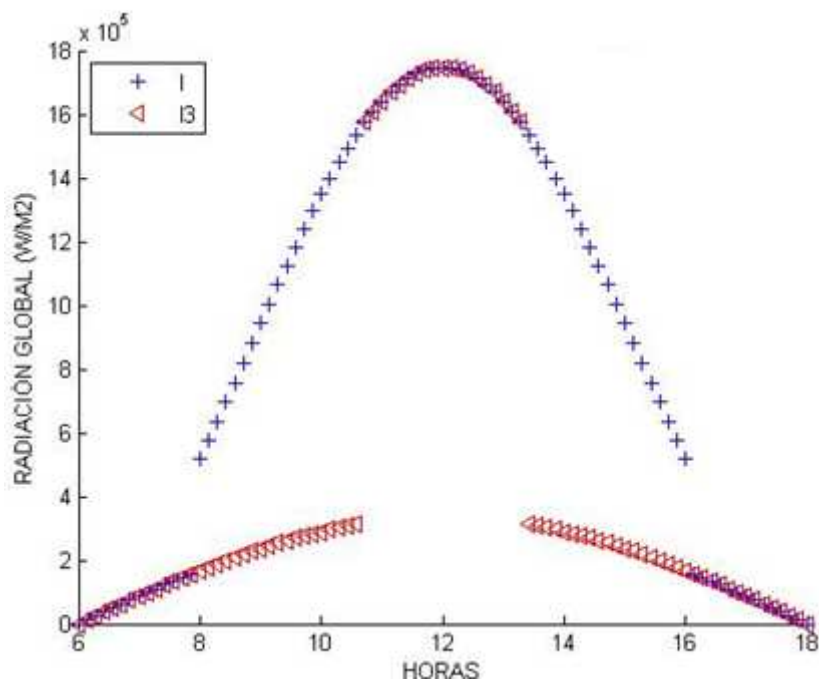


Figura 5.14 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este-oeste sin rastrear (1) y norte-sur sin rastrear (3)

Ángulo de inclinación y azimut = 0° , Ángulo de aceptación (sin truncar) 15° , 80% de truncamiento

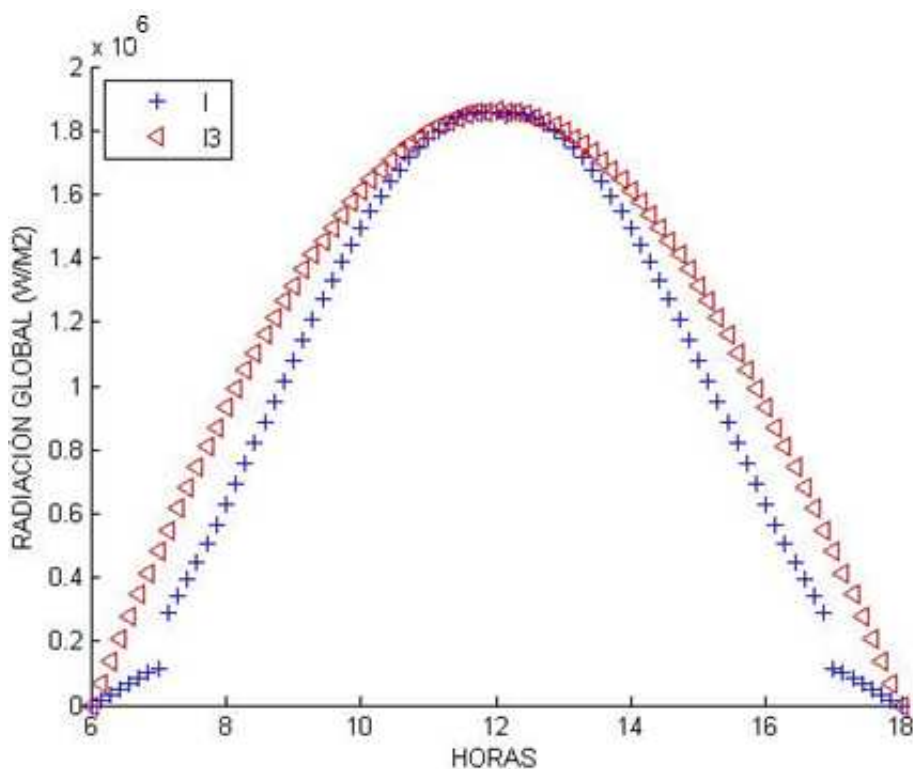


Figura 5.15 Comparación entre la radiación incidente de la orientación este-oeste sin rastrear (1) y norte sur con rastreamiento (4)

Ángulo de inclinación y azimut = 0° , Ángulo de aceptación (sin truncar) 13° , 45% de truncamiento

De las gráficas expuestas se concluye que la orientación norte-sur sin rastreamiento no es viable porque la energía total captada es muy inferior a la este-oeste sin rastrear. También se ha decidido descartar la orientación este-oeste con un ajuste diario debido a que no hay una mejora considerable en cuanto a la orientación este-oeste sin rastreamiento. Comparando entre la orientación este-oeste sin rastrear y norte-sur con rastreamiento, se observa que no que la norte-sur presenta ligeramente mayor radiación, pero tomando en cuenta los costos de un sistema de rastreamiento se concluye que el aumento en la radiación no es significativo para pensar en implementar un rastreamiento de este tipo. Cabe resaltar que no se analiza la orientación este-oeste con rastreamiento porque el sistema es muy complejo. Por lo tanto se decide orientar el colector con su eje focal este-oeste sin rastreamiento.

5.3.3 DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DENTRO DEL COLECTOR SOLAR CPC

En cuanto al análisis térmico del colector inicialmente se consideró que la temperatura del reflector, de la cubierta y del aislante eran distintas y se procedió a calcularlas con MATLAB, pero al ser una programación larga involucraba un tiempo excesivo para obtener los valores de las temperaturas. Como resultado de esta simulación se obtuvo que la temperatura del reflector, de la cubierta y del aislante son semejantes, por lo que se decidió tomar una temperatura única para estas tres temperaturas y acortar el tiempo de procesamiento de simulación.

Para realizar el cálculo de las temperaturas del circuito de resistencias equivalente se procedió a asumir las temperaturas, calcular los coeficientes de transferencia de calor y calcular un nuevo valor para estas temperaturas. Este valor es utilizado para recalculer las temperaturas hasta que el error entre las temperaturas asumidas y calculadas sea menor a 0.1.

5.3.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

A continuación se presenta la simulación hecha en MATLAB y GUIDE 7.7 en la cual se iteraron los parámetros y estos fueron los mejores resultados. Cabe resaltar que las dimensiones del equipo son de un prototipo por lo que la cantidad de agua a congelar o enfriar es pequeña, la longitud del colector, los radios de la tubería exterior e interior y la tubería del condensador y evaporador fueron determinados en base a las dimensiones comerciales de planchas de acero inoxidable y tuberías de cobre y acero inoxidable.

En la figura 5.16 se presenta la geometría del reflector más óptima que se obtuvo iterando los valores del semiángulo de aceptación, radio del absorbedor, porcentaje de truncamiento tratando de que la radiación absorbida sea la máxima. Se observa que si no se truncara la parábola esta tuviera una altura demasiada grande aproximadamente de 2.5 m, lo que complicaría su construcción y transporte, esta reducción de la parábola no afecta sustancialmente a la energía receptada por el colector.

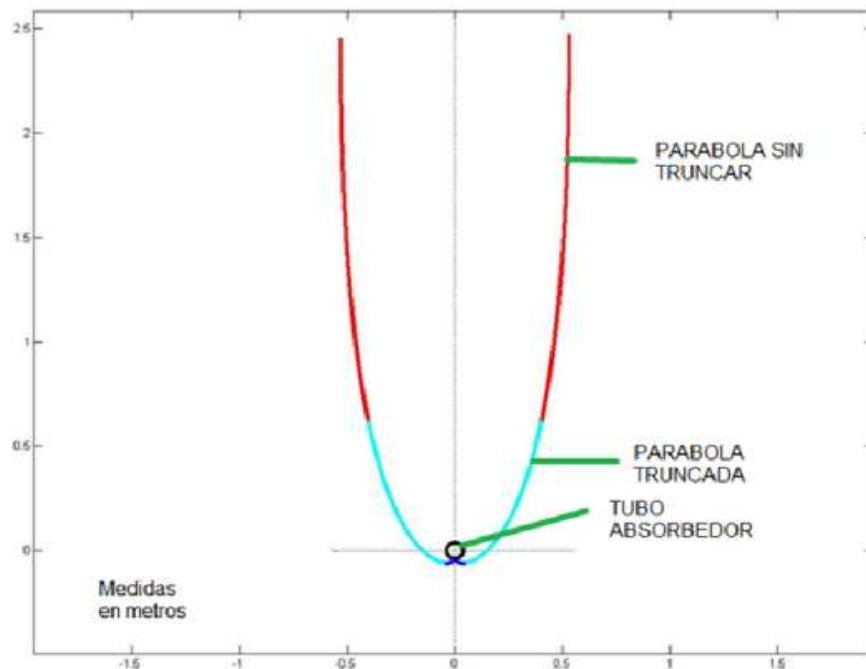


Figura 5.16 Geometría del reflector, semiángulo de aceptación 13° , inclinación 0° , porcentaje de truncamiento 75%, radio del absorbedor 3"

En las siguientes gráficas se muestran los valores obtenidos para cada una de las fases del ciclo (fig. 2.8).

FASE AB CALENTAMIENTO ISOSTÉRICO

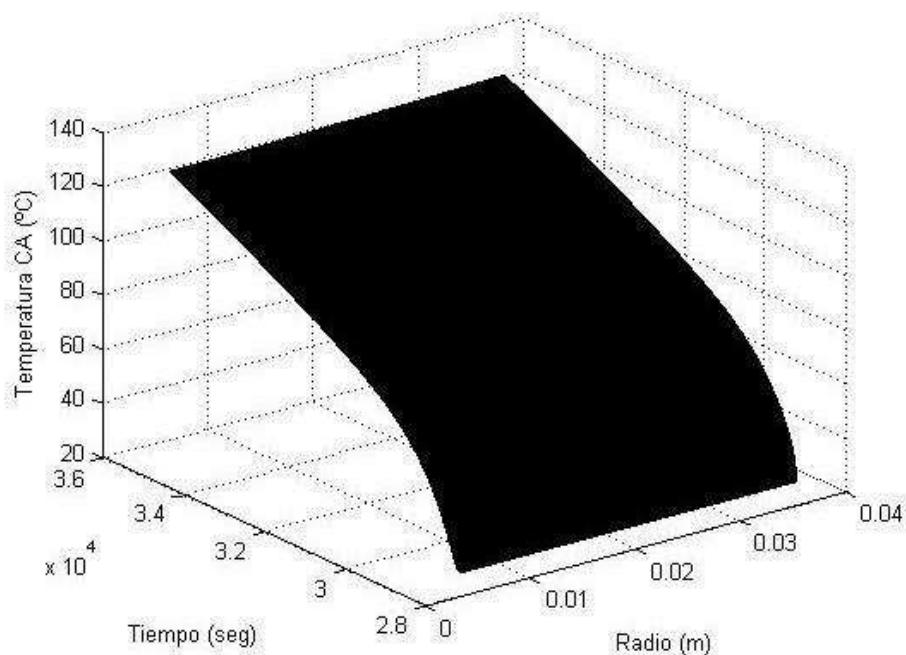


Figura 5.17 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase AB

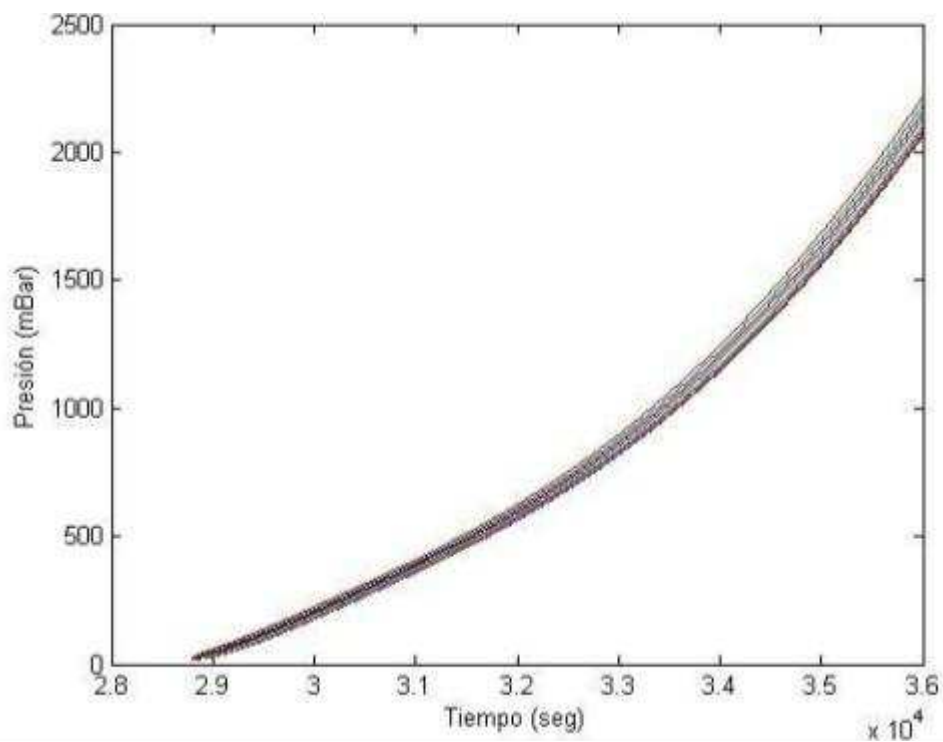


Figura 5.18 Presión en función del tiempo de la fase AB

FASE BC CALENTAMIENTO Y DESORCIÓN

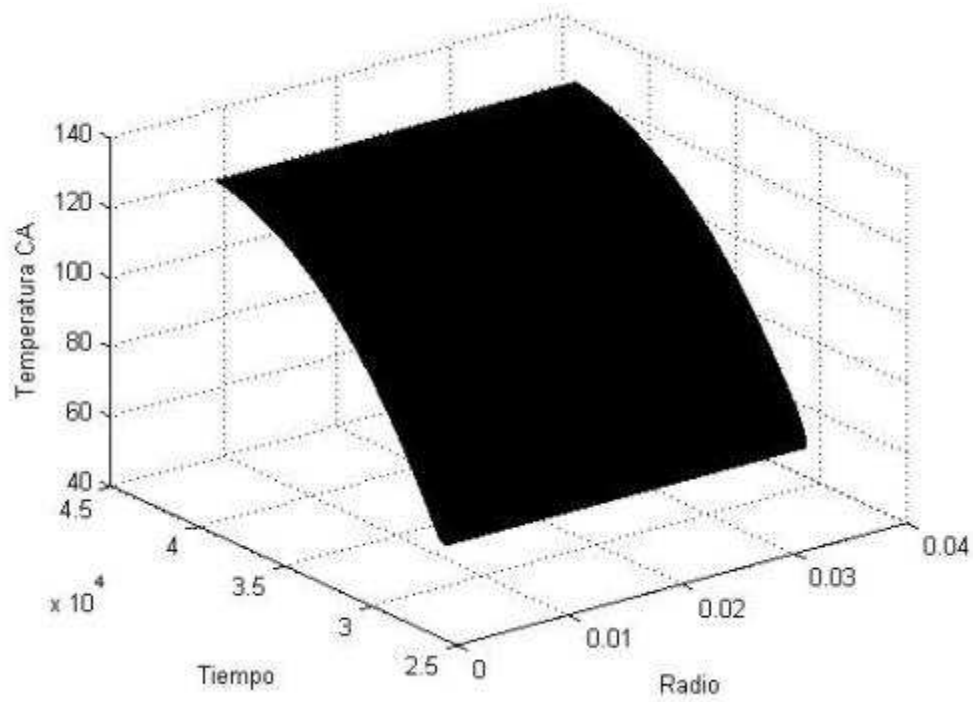


Figura 5.19 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase BC

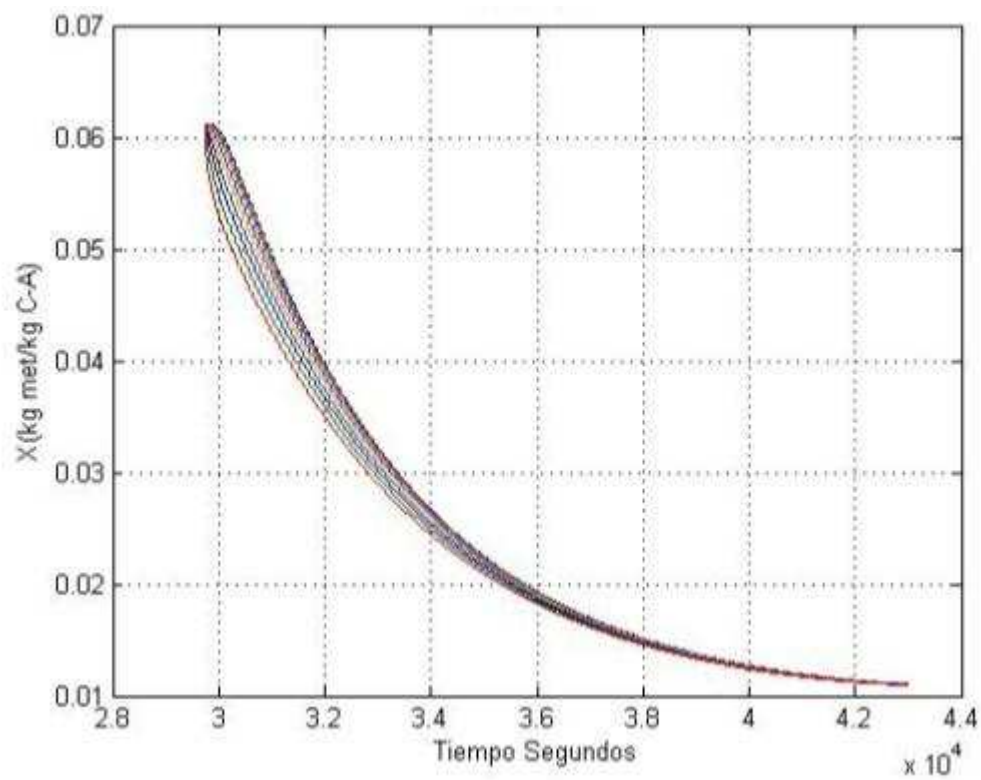


Figura 5.20 Concentración en función del tiempo de la fase BC

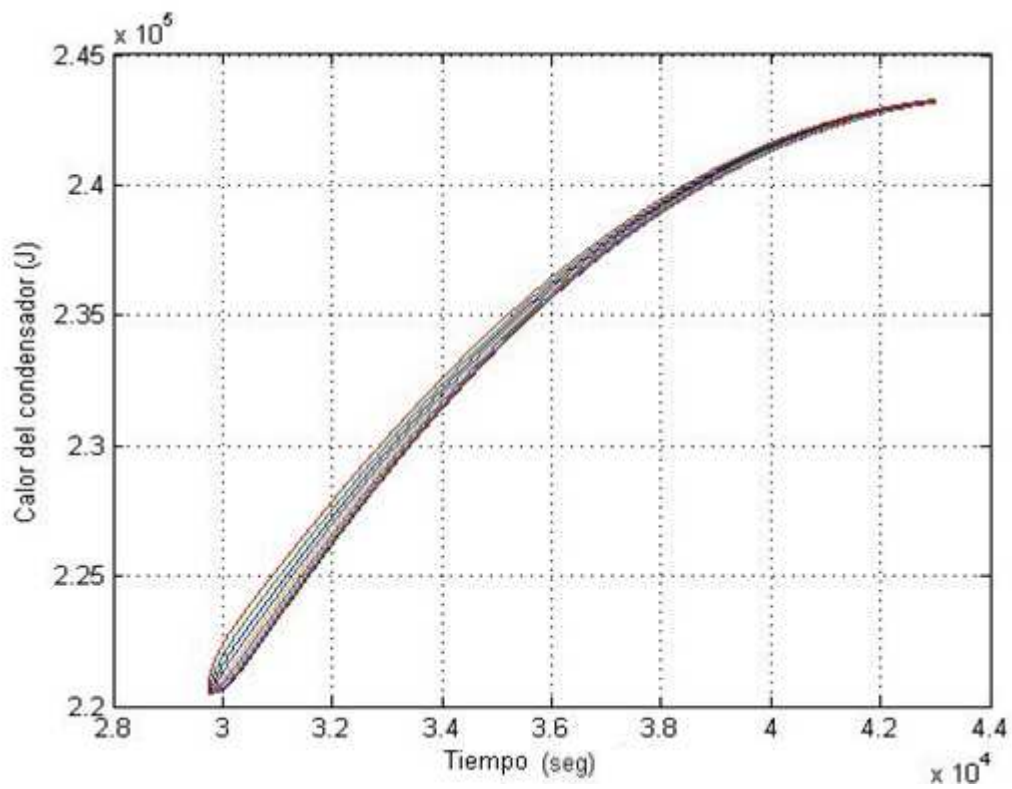


Figura 5.21 Calor de condensación en función del tiempo de la fase BC

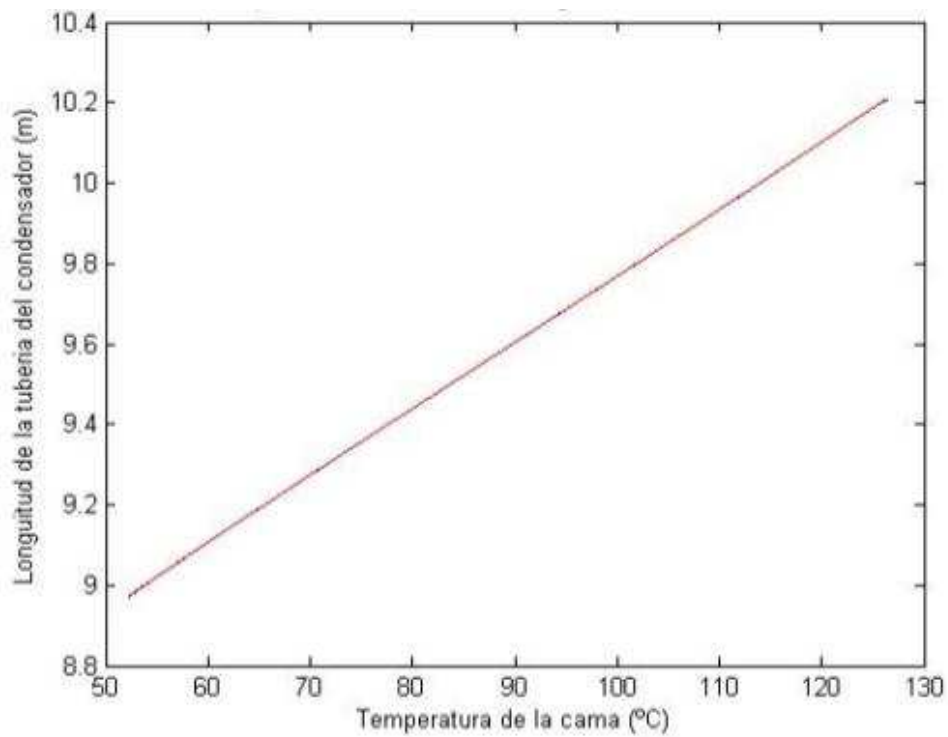


Figura 5 22 Temperatura de la cama vs longitud de la tubería del condensador

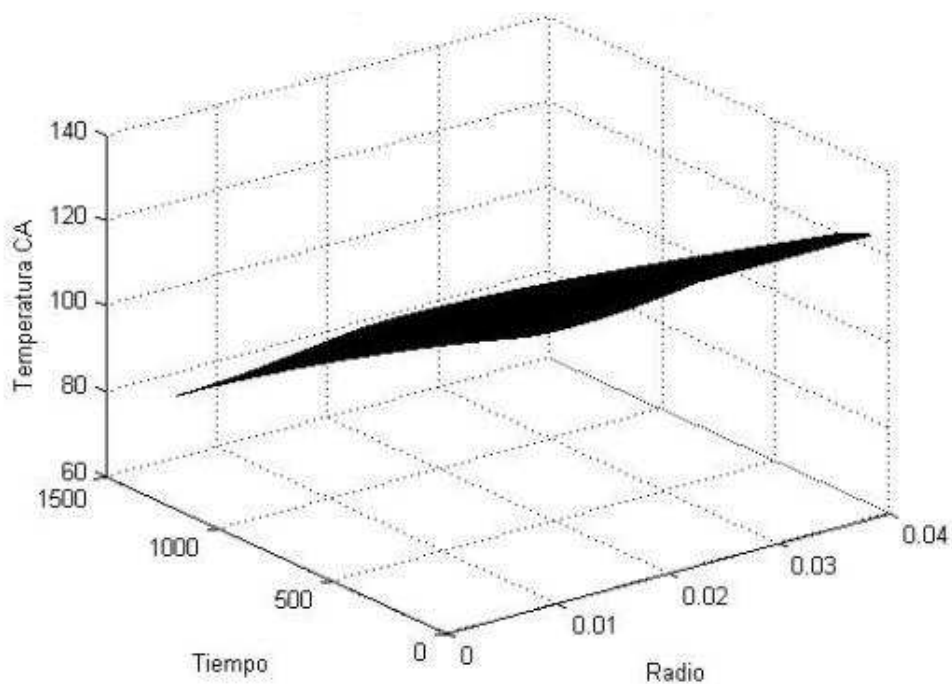
FASE CD ENFRIAMIENTO ISOSTÉRICO

Figura 5.23 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase CD

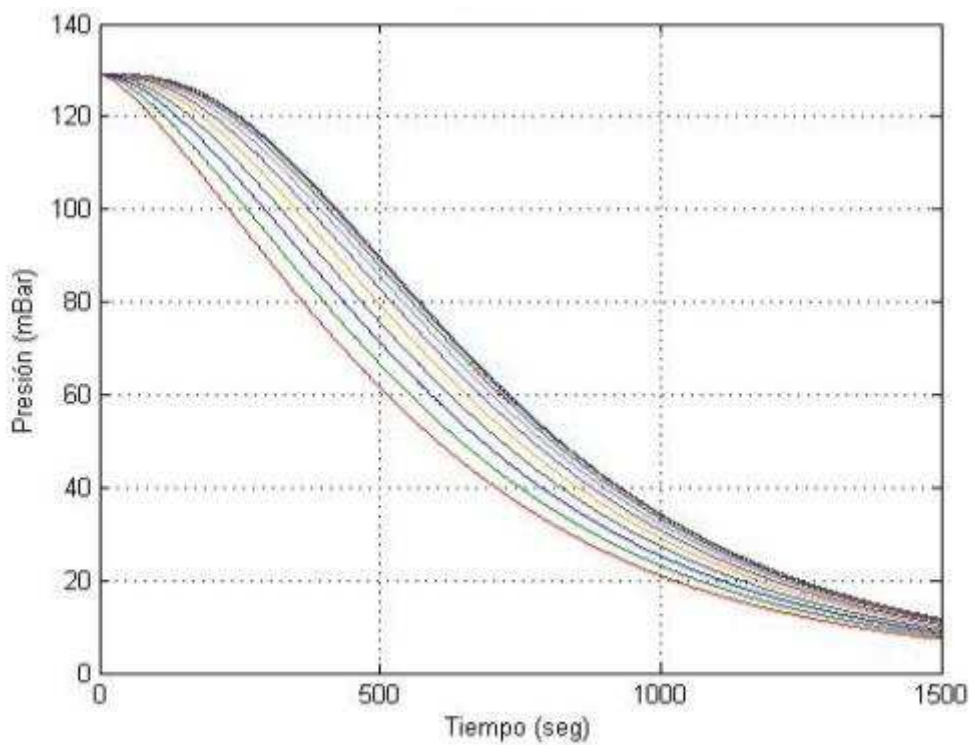


Figura 5.24 Presión en función del tiempo de la fase CD

FASE DA ENFRIAMIENTO Y DESORCIÓN

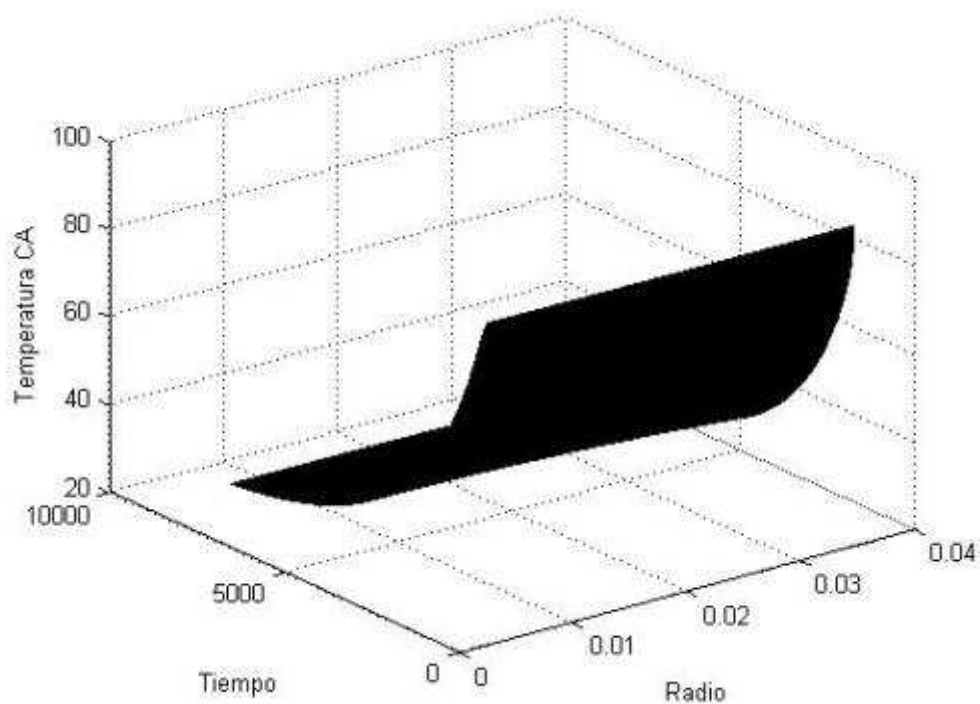


Figura 5.25 Temperatura del carbón activado y radio de la cama adsorbente en función del tiempo de la fase DA

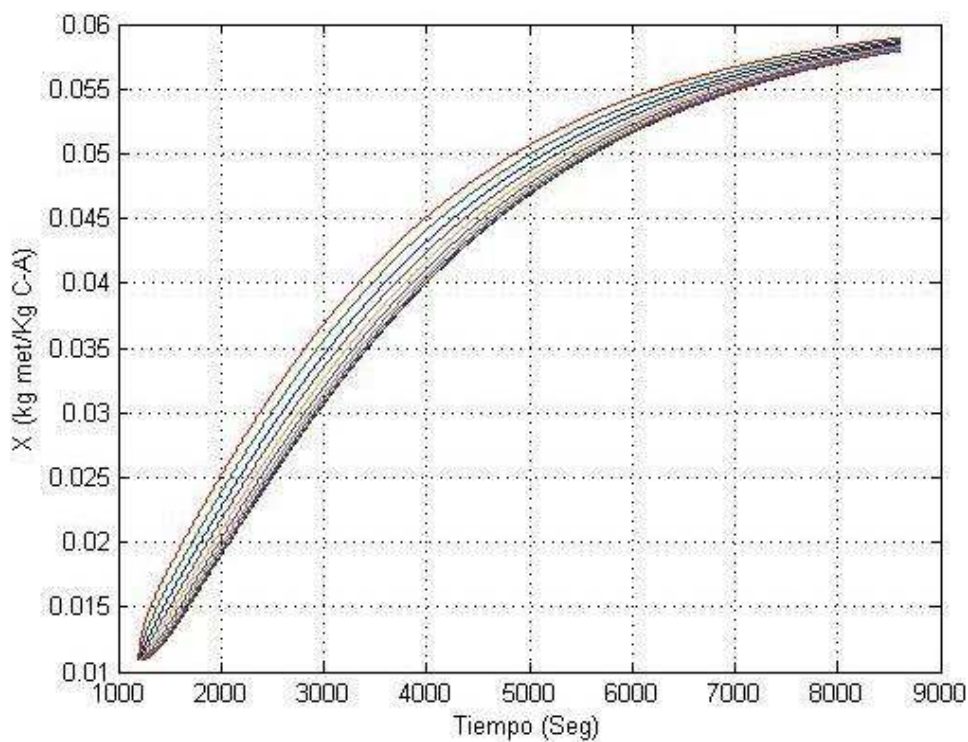


Figura 5.26 Concentración en función del tiempo de la fase DA

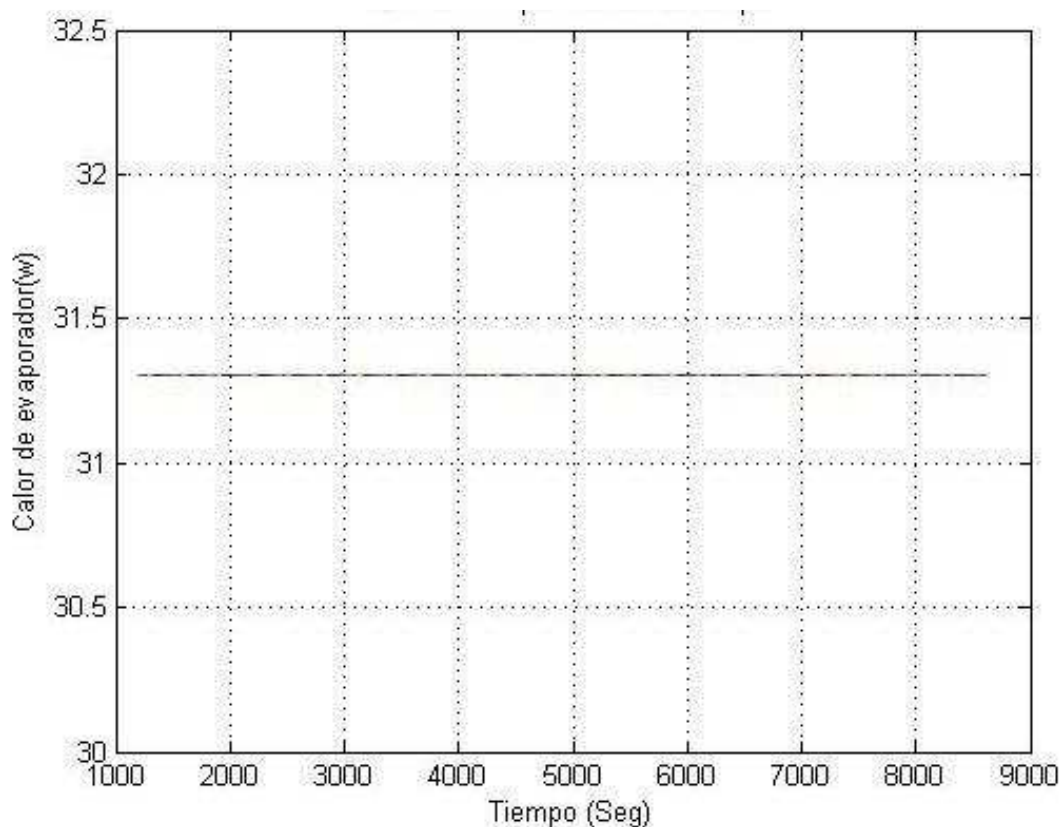
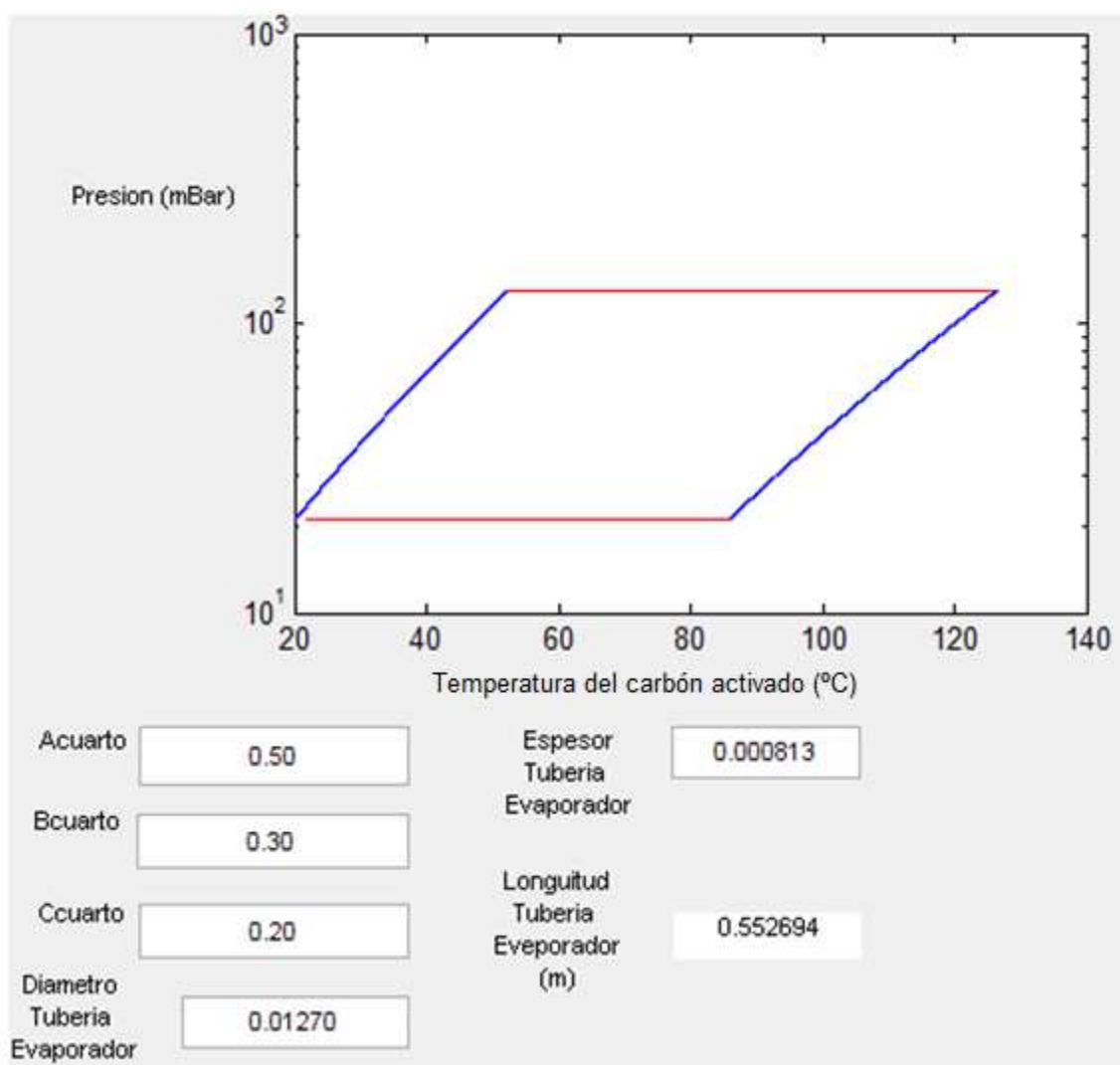


Figura 5.27 Calor de condensación en función del tiempo de la fase DA

En las siguientes gráficas se mostrarán los valores que salieron luego de la simulación y el ciclo termodinámico.

R1 (m)	<input type="text" value="0.00635"/>	Numero de nodos en el cilindro	<input type="text" value="10"/>
R2 (m)	<input type="text" value="0.0381"/>	L tubería (m)	<input type="text" value="1.22"/>
	<input type="button" value="Fase A-B"/>		<input type="button" value="Fase B-G"/>
	<input type="text" value="52.2328"/>		<input type="text" value="126.384"/>
TB (°C)	<input type="text" value="52.2328"/>	TG(°C)	<input type="text" value="126.384"/>
Tiempo A-B (segundos)	<input type="text" value="935"/>	Xmin	<input type="text" value="0.0109721"/>
	<input type="text" value="935"/>		<input type="text" value="0.0109721"/>

	Fase G-D		Fase D-A
TD(°C)	85.7928	TA(°C)	21.594
	85.7928	Xmax	0.0589293
Tiempo B-G (Segundos)	1200	Tiempo para producir Hielo (horas)	0.765595
	1200	SCP (W/Kgca)	17.7868



COP 0.0214337



Figura 5.28 Resultados de la simulación en el programa realizado

Luego de haber presentado los resultados obtenidos del MATLAB se procederá a realizar un resumen de los parámetros relevantes de la simulación para poder construir el equipo que ha sido dimensionado.

Colector solar

Tipo: Concentrador Parabólico Compuesto

Ancho del colector: 0.8m

Altura del colector (medida desde el centro del tubo): 0.62m

Longitud del colector: 1.22 m

Material del reflector: acero inoxidable

Longitud del reflector: 1.7m

Material del tubo receptor y el interior: acero inoxidable

Recubrimiento del tubo receptor: pintura negro mate

Radio externo del tubo receptor: 0.0381

Radio externo del tubo interior: 0.00635

Material del aislante: lana de vidrio

Espesor del aislante: 5 cm.

Material de la cubierta: vidrio

Evaporador y Condensador

Material: tubería de cobre flexible

Diámetro exterior del tubo: 0.0127m

Espesor del tubo: 0.000813

Longitud del tubo del condensador: 10m

Longitud del tubo del evaporador: 4.8m

Refrigerante

Sustancia: metanol

Volumen: 400ml

Recinto a enfriar

Largo: 0,44m

Ancho: 0.32m

Profundidad: 0.20m

Cantidad de agua a enfriar: 250 cm³

Adsorbente

Material: Carbón activado tipo ECOK-70, suministrado por ECOKARBONES

Peso: 3.5 kg

CAPÍTULO VI

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el proceso de construcción del refrigerador solar. Una vez que fueron dimensionados los distintos componentes del equipo, se elaboraron los planos y la lista de materiales. Para la construcción se utilizaron procesos como soldadura, torneado, corte, taladrado, doblado, pintado, etc., los cuales fueron ejecutados en los distintos laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional. Una vez construido el equipo se realiza una prueba de estanqueidad, regeneración del carbón activado y se estudia el comportamiento del equipo en un ciclo de 24 horas.

6.2 PROCESO DE REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

El proceso de regeneración consiste en calentar el carbón por algunas horas para que este desorba los gases y contenido de agua que pueda contener.

Se tamizó el carbón para obtener los gránulos de mayor tamaño y que el carbón no se fugue por los orificios del tubo de media pulgada. Inicialmente se colocó una muestra de carbón activado de 100gr durante 3 horas a 150°C, y se determinó que a esta temperatura e inferiores no hay inflamación. Se colocó en el horno el carbón a ser utilizado en el colector, 5479.8 gr, a 110°C durante 23 horas y perdió 131.1 gr., que equivale al 2.4%. del peso inicial, realizando así una correcta regeneración.

6.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Los instrumentos de medición que se utilizan son los siguientes, ver Anexo XI:

1. Piranómetro: para medir la radiación global, se lo debe colocar en una superficie horizontal y nivelarlo

2. Termómetro de bulbo: para medir la temperatura ambiente, se lo debe colocar en un lugar sombreado donde no le afecte la radiación solar ni el viento
3. Brújula: para poder orientar adecuadamente el colector
4. Nivel: para verificar que el equipo no esté desnivelado por irregularidades del piso
5. Termocuplas: para medir la temperatura donde sea necesario, tipo K
6. Transductor de presión y vacuómetro: para medir la presión donde sea necesario
7. Termómetro infrarrojo: para verificar la temperatura marcada por las termocuplas
8. Multímetro: para tomar el milivoltaje del piranómetro

Los puntos de medición de temperatura son:

1. Extremo derecho del tubo absorbedor del colector
2. Extremo izquierdo del tubo absorbedor del colector
3. Plancha reflectora
4. Mitad de la longitud del serpentín del condensador
5. Mitad de la longitud del serpentín del evaporador
6. Aire interior de la cámara fría

Se ha decidido medir la temperatura de la cama, condensador y evaporador indirectamente, es decir sobre el tubo. Esto se debe a que en la bibliografía se reportan muchos casos de pérdida de estanqueidad por las mediciones directas de las temperaturas. Además una causa de fugas en el equipo construido para la obtención de la isósteras fue el cableado de las termocuplas.

Los puntos de medición de presión son:

1. A la salida de cama adsorbadora, antes de la válvula que une la cama con el condensador (presión de la cama adsorbadora)
2. A la salida del evaporador, antes de la válvula que une el evaporador con la cama adsorbadora (presión del evaporador)

En la figura 6.1 se pueden observar los puntos de medición de temperatura y presión.

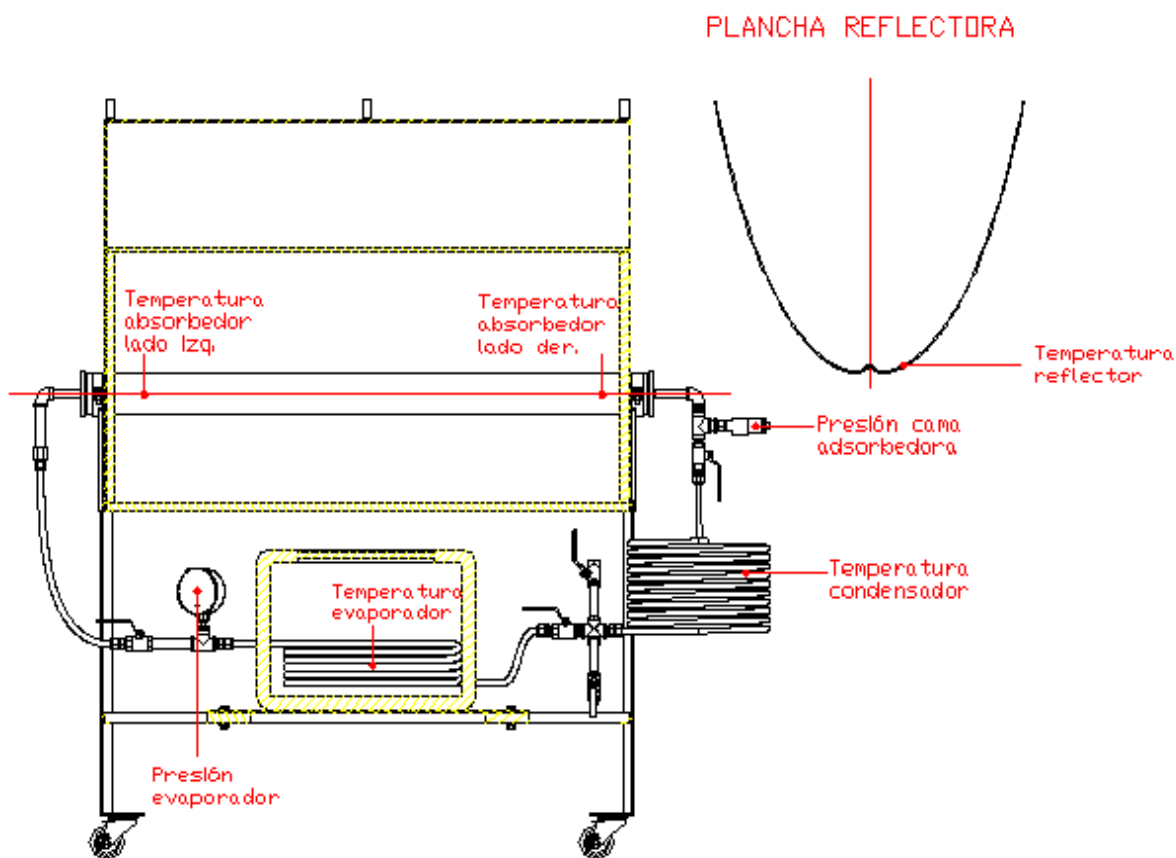


Figura 6.1 Esquema de la localización de los puntos de medición de presión y temperatura

6.4 CONSTRUCCIÓN

Para la elaboración de los planos del equipo se utilizó el dimensionamiento realizado en la etapa de diseño y simulación. Los planos se encuentran en el Anexo XIII y las fotografías de la construcción y el costo del equipo en el Anexo XI.

Para la construcción del equipo se siguió el siguiente procedimiento:

1. Adquisición de todos los materiales

2. Para la construcción de la estructura metálica se procede a cortar el perfil y soldar con SMAW¹⁰³ todas las partes, utilizando las siguientes herramientas: cizalla, sierra, soldadora, escuadra, grata y amoladora. Las abrazaderas se realizan doblando en la entenalla la platina, perforando con talador los orificios para los pernos y soldando estas al soporte con varilla cuadrada. Finalmente se sueldan las ruedas al soporte.
3. Para la construcción del soporte de madera se procede a cortar las planchas de madera y los listones y a unir todas las partes, utilizando las siguientes herramientas y materiales: caladora, sierra, lija, martillo, cola, clavos, etc.
4. La forma parabólica a la plancha de acero inoxidable se la da con los tornillos que unen a la plancha con el soporte de madera. Para su colocación primero se perfora la plancha de acero inoxidable y luego se colocan los tornillos autoroscantes en la madera.
5. Colocar la lana de vidrio en la parte posterior de la plancha con cemento de contacto y se la recubre con papel aluminio. La protección de los ojos, vías respiratorias y de la piel es indispensable para manipular la lana de vidrio.
6. Colocar al tubo de acero inoxidable de ½ pulgada en el torno y roscar los dos extremos, luego colocar en el taladro de pedestal, perforar y lijar las rebabas.
7. Cortar con sierra las dos placas que une los tubos de 3 con el de ½ pulgada y torneear el orificio interno.
8. Regenerar el carbón activado en una mufla que tenga control de temperatura.
9. Soldar la primera placa perforada al extremo de los tubos de 3 y ½ pulgada con proceso TIG¹⁰⁴ y retirar la escoria con grata. Introducir el carbón activado en el espacio entre el tubo de ½ y 3 pulgadas, soldar la segunda placa al otro extremo y retirar la escoria con grata.
10. Pintar la estructura metálica primero con una capa base inicial (primer) y luego con dos capas de esmalte de cualquier color.

¹⁰³ Shield Metal Arc Welding

¹⁰⁴ Tungsten Inert Gas

11. Pintar el soporte de madera, las tapas laterales y frontales mezclando sellador y tinte.
12. Pintar el tubo de acero inoxidable de 3 pulgadas primero con primer y luego con una capas de esmalte color negro mate.
13. Cortar con cortador la tubería de cobre flexible de $\frac{1}{2}$ pulgada de acuerdo a las medidas establecidas en el plano de conjunto. Con la ayuda de un doblador de tubos dar forma al condensador y evaporador.
14. Perforar la caja fría en los extremos por donde pasara en evaporador.
15. Cortar la plancha de acero inoxidable que soporta la cámara fría con cizalla y las maderas soporte y taladrar los orificios que alojarán a los pernos. Con la ayuda de una llave de boca ajustar los 4 pernos y tuercas que unen la plancha, madera y estructura metálica.
16. Colocar el soporte de madera encima de la estructura metálica
17. Situar el tubo de 3 pulgadas dentro de las abrazaderas y ajustar los pernos hasta que el tubo quede centrado.
18. Retirar la cubierta protectora de la plancha de acero inoxidable.
19. Clavar y pegar las tapas laterales y frontales al soporte de madera.
20. Colocar el vidrio frontal con cinta doble faz y silicón rojo sobre el soporte de madera.
21. Introducir el evaporador dentro de la caja fría.
22. Ensamblar, según el plano de conjunto, la tubería de cobre, condensador, evaporador y accesorios con la ayuda de llaves de tubo y de ser el caso entenalla. A todas las uniones roscadas se les aplica teflón y PERMATEX 2B y posteriormente una capa de silicón rojo para asegurar la estanqueidad.
23. Ubicar las termocuplas, transductor de presión y manómetro en los puntos de medición como está especificado en el literal 8.2.1.
24. Finalmente, colocar el vidrio cubierta dentro del canal del soporte de madera con macilla.

A continuación se muestra una fotografía del equipo terminado.

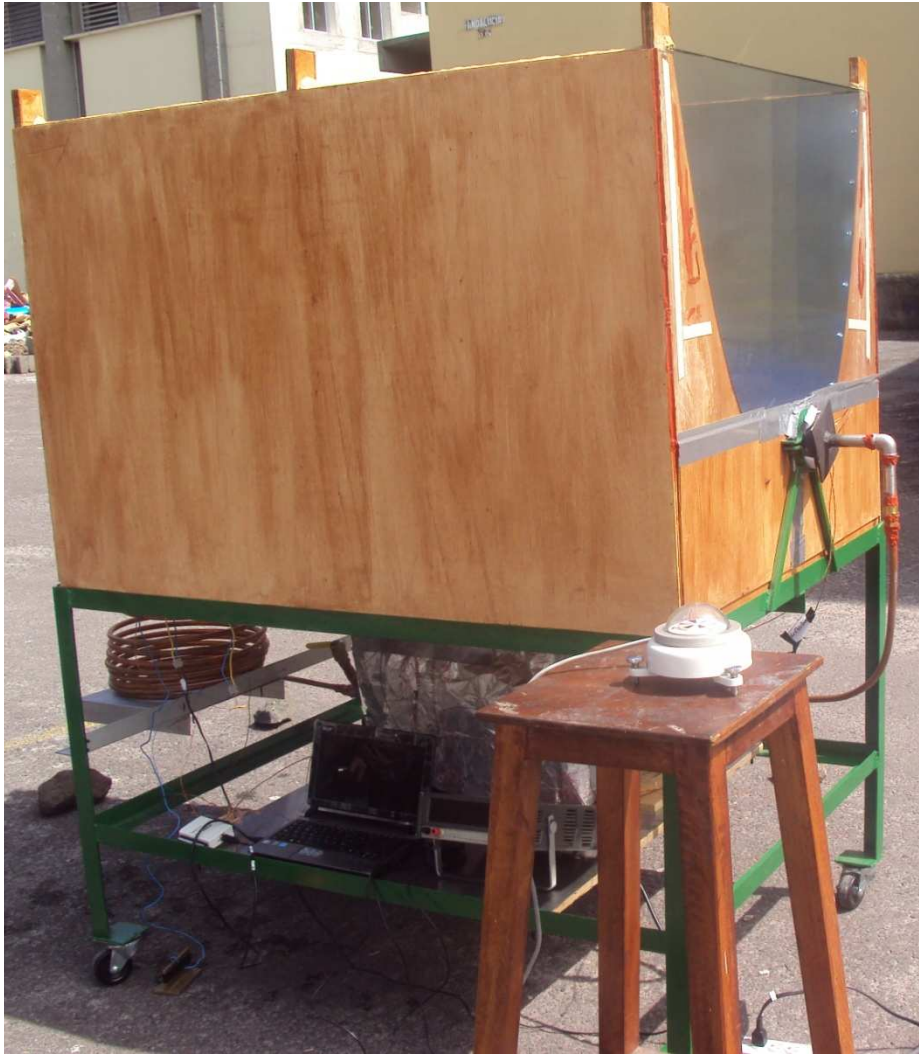


Figura 6.2 Fotografía del equipo de refrigeración por adsorción solar construido

El equipo de enfriamiento solar por adsorción tiene las siguientes características:

Largo: 122 cm

Ancho: 92.5 cm

Altura: 170.5 cm

Peso aproximado: 40 kg

Refrigerante: metanol

Dimensiones de la cámara fría: 45x30x20 cm

Área de colección solar: 0.98 m²

6.5 PROTOCOLO DE PRUEBAS

Para esta sección se hará uso del siguiente esquema

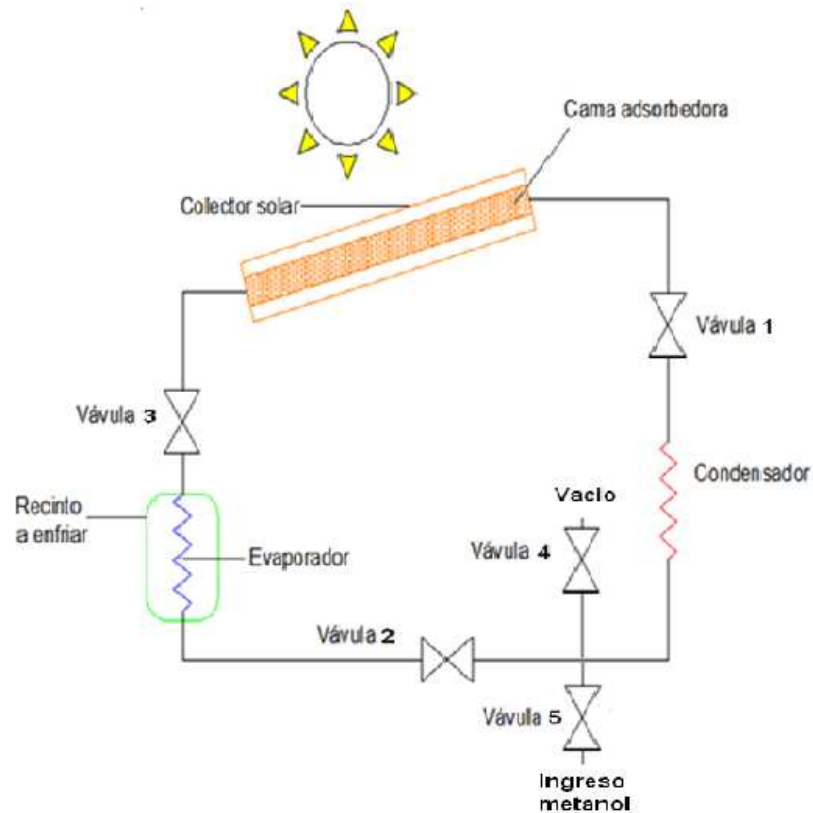


Figura 6.3 Esquema del equipo construido

6.5.1 PRUEBA DE ESTANQUEIDAD

1. Realizar la prueba de estanqueidad en un período de 24 horas, caída de presión admisible 1 pulgada de mercurio. Abrir las válvulas 1, 2, 3, 4 (figura 6.3) y prender la bomba de vacío durante 15 minutos. Cerrar la válvula 4 y apagar la bomba de vacío. Anotar los valores del transductor de presión y del vacuómetro. Dentro de 24 horas observar si estos valores han disminuido y comparar sus diferencias con la pérdida de vacío admisible.
2. En caso de que la pérdida de vacío sea superior a la admisible se debe localizar la fuga, para lo cual se debe hacer vacío por tramos cerrando las válvulas. Una vez localizada la o las fugas sellarlas y volver a repetir la prueba de estanqueidad.

La prueba de estanqueidad se la debe realizar después de la construcción antes de poner a funcionar el equipo y durante el funcionamiento si se sospecha que el equipo esté perdiendo estanqueidad.

6.5.2 REGENERACIÓN DE LA CÁMARA ADSORBEDORA Y LLENADO DE REFRIGERANTE

La regeneración del carbón activado y el llenado de refrigerante se los debe realizar una sola vez, luego de ser construido y cuando haya superado la prueba de estanqueidad.

A pesar de haber realizado la regeneración del carbón en el horno durante el proceso de construcción es necesario regenerar nuevamente el carbón para asegurar que este tenga una capacidad adecuada de adsorción. Para esto se coloca el equipo en el sol y se abren las válvulas 1, 2, 3, 4 (figura.6.3), y prender la bomba de vacío durante dos horas. Cerrar la válvula 4 y apagar la bomba de vacío. El carbón debe estar a una temperatura alrededor de 100°C.

Una vez frío el carbón abrir la válvula 5, cerrar las válvulas 1 y 3 (figura 6.3) e introducir con un embudo y una probeta 400 cm³ de metanol. Cerrar las válvulas 5 y 2, abrir las válvulas 1,3, 4 y encender la bomba de vacío. Cuando se perciba olor a metanol o se observe en el aceite de la bomba rastros de metanol cerrar las válvulas 4, 3, 1 y apagar la bomba de vacío.

6.5.3 OPERACIÓN DEL EQUIPO

1. Verificar que todas las válvulas del equipo estén cerradas, y que el vacío no haya disminuido.
2. Colocar el agua que va a ser enfriada en el recipiente.
3. Verificar que el equipo esté nivelado; caso contrario, nivelarlo con alzas en las ruedas. Accionar la adquisición de datos y comenzar a anotar los valores de la radiación solar y la temperatura ambiente.

4. Cuando la presión absoluta de la cama adsorbadora sea 126 mbar o la presión manométrica en Quito sea -612 mbar¹⁰⁵ abrir la válvula 1.
5. Cuando la presión absoluta haya descendido a 126 mbar abrir la válvula 2 y luego la 3. Después cerrar la válvula 1 y esperar a que el equipo enfríe.
6. En las primeras horas de la mañana cerrar las válvulas 2 y 3 y volver a repetir el ciclo.

6.6 PRUEBAS REALIZADAS

6.6.1 ESTANQUEIDAD

La primera prueba de estanqueidad realizada fue fallida, en 12 horas se perdió en su totalidad el vacío. Entonces por medio del manejo de las válvulas y realizando vacío se determinó que la única fuga se encontraba en el tramo del evaporador. Se detectó que no se había colocado silicón rojo en la unión del neplo corrido y la T. Se colocó silicón rojo y se realizó nuevamente la prueba de estanqueidad, como resultado se obtuvo que en 24 horas no hubo pérdida alguna de vacío, por lo que el equipo pasó la prueba de vacío.

6.6.2 ENFRIAMIENTO

La primera prueba para producir frío realizada fue fallida. Se aplicó mal el protocolo de pruebas y se cerró la válvula del condensador cuando desapareció el sol y el metanol pasó al evaporador a muy alta presión, luego al abrir la válvula que conecta el evaporador y la cama el metanol debido a la brusca caída de presión pasó bruscamente el metanol. Se realizaron algunas pruebas en días soleados y nublados. Por último se pidió prestada una bomba de vacío de mayor capacidad a la que originalmente se tenía y con eso se consiguió realizar el ciclo a menor presión. A continuación se presenta la última prueba (10 de junio del 2010), ejecutada con una radiación solar en un día despejado con un valor total de 741.6 W.

¹⁰⁵ Calculada con una presión atmosférica de 737.7 mbar

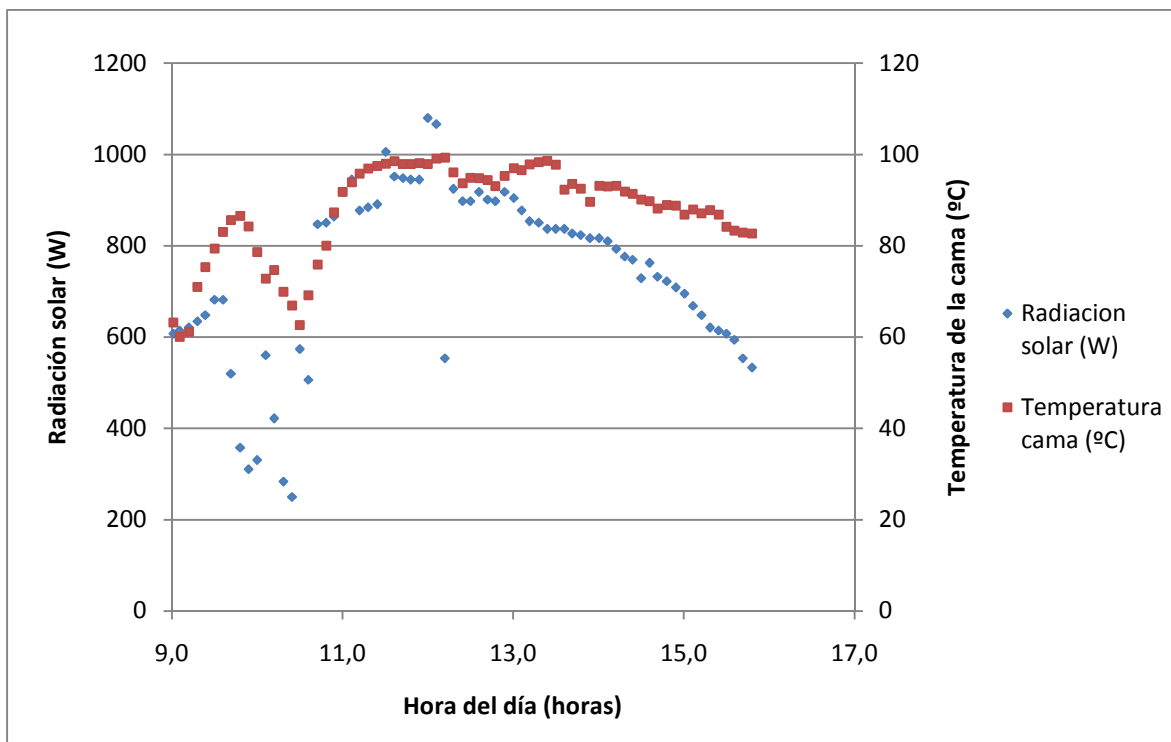


Figura 6. 4 Radiación solar y temperatura de la cama vs hora del día

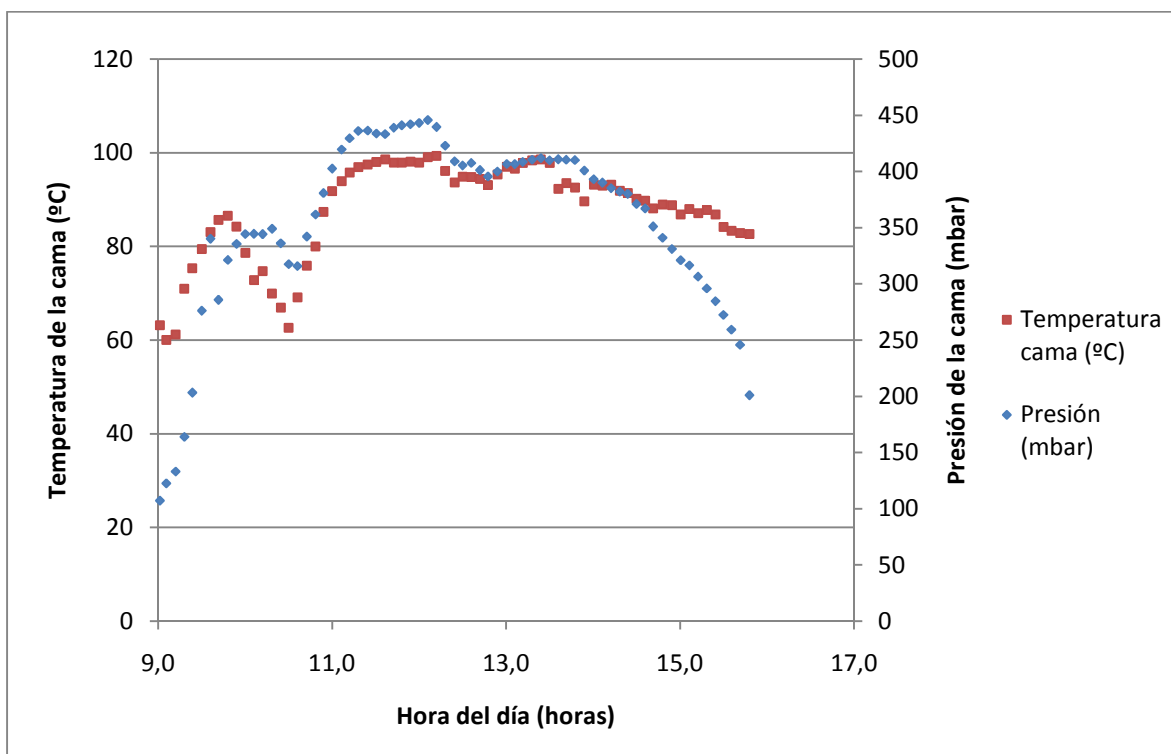


Figura 6.5 Temperatura y presión de la cama vs hora del día

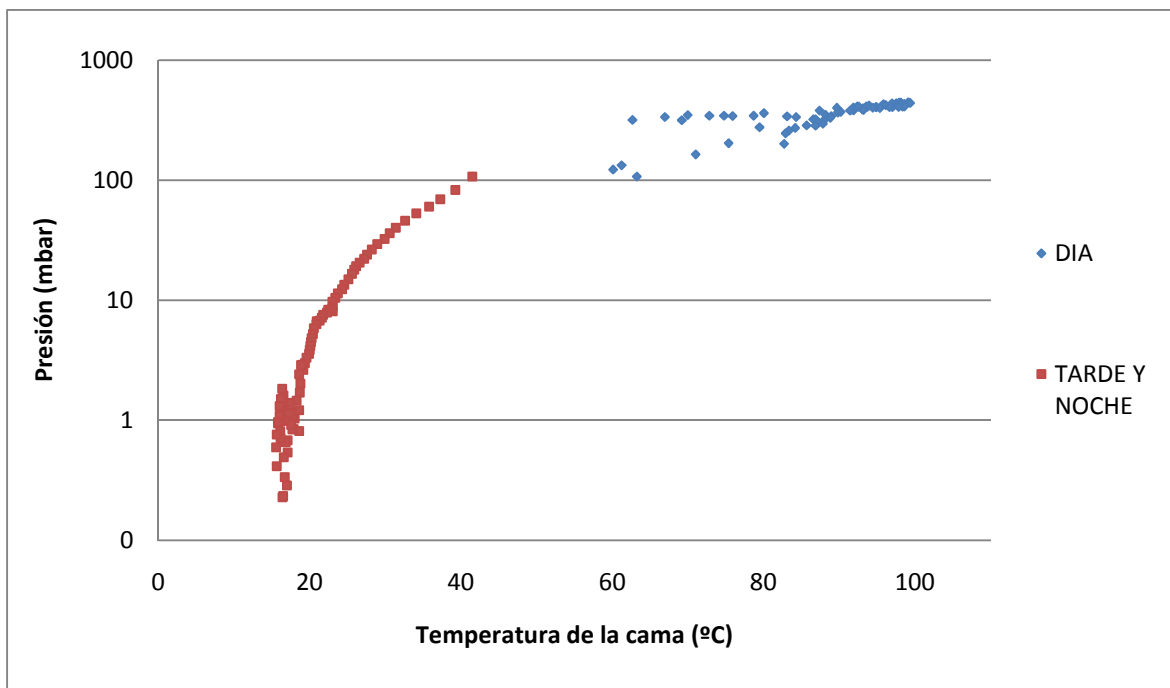


Figura 6.6 Diagrama del ciclo

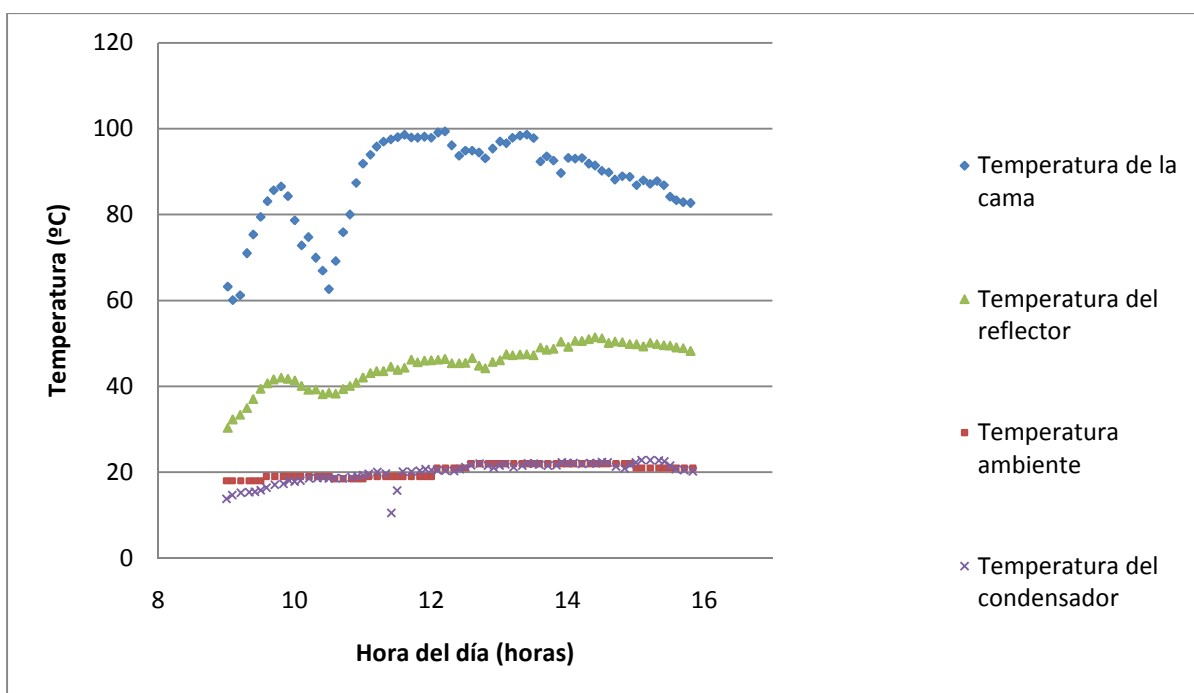


Figura 6.7 Temperaturas varias vs hora del día

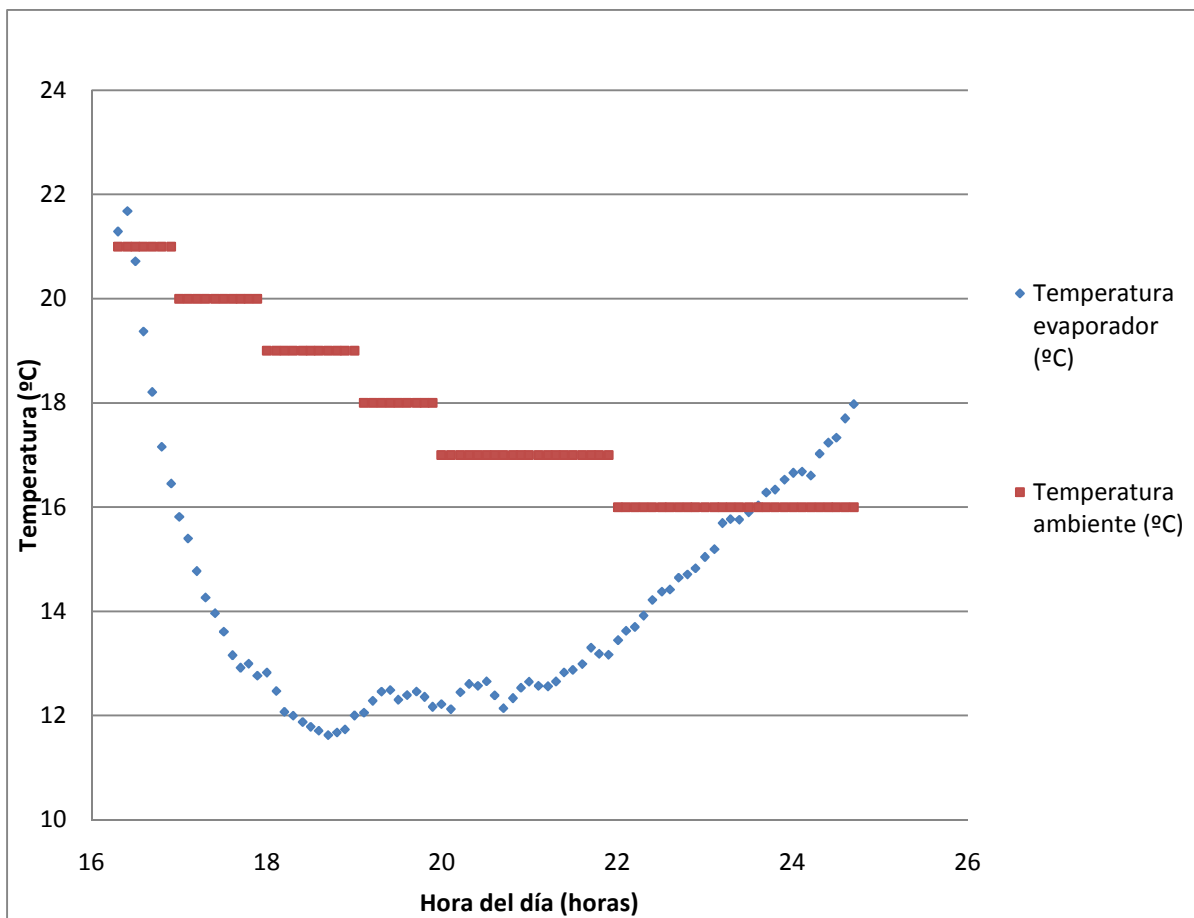


Figura 6.8 Temperatura del evaporador y ambiente vs hora del día

6.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 6.3 se puede apreciar que la temperatura de la cama responde a los cambios en la intensidad de la radiación de una manera rápida, de modo que cuando existe un pico en la radiación, existe un pico en la temperatura.

Una presión alta indica la existencia en la cama de vapores de metanol, por lo que de acuerdo a la figura 6.4 se puede decir que el carbón está desorbiendo. Se visualiza también que la presión tiene una rápida respuesta a la variación de la temperatura del carbón activado.

En la figura 6.5, se puede apreciar que el diagrama real del ciclo difiere sustancialmente al teórico mostrado en la simulación pero en este se pueden apreciar las fases del ciclo.

De acuerdo a la figura 7.6 se puede afirmar que existen pérdidas de calor del colector solar, ya que la temperatura del reflector es menor a la del tubo absorbedor, pero al ser esta temperatura aún alta se justifica el uso de aislante en la plancha reflectora.

En la figura 7.7 se observa que la temperatura del evaporador disminuyó, por lo tanto la de cámara fría también, esto indica que el sistema de enfriamiento funciona. Se visualiza que hay una diferencia aproximada de 10°C, respecto a la temperatura inicial de la cámara.

Con la ayuda de las ecuaciones 2.1 y 2.3 y tomando los valores promedios de la radiación receptada por el colector, la diferencia de temperaturas del evaporador, la cantidad de carbón, etc., se calculan el coeficiente de operación (COP) y la capacidad específica de enfriamiento (SCP) reales obtenidos en la prueba, obteniéndose los valores de:

$$\text{COP}_{\text{experimental}} = 0.01$$

$$\text{SCP}_{\text{experimental}} = 0.34$$

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Se cumplió el objetivo principal del proyecto de diseñar y construir un equipo de enfriamiento por adsorción que funciona independientemente del suministro de electricidad solamente con energía solar.
- Es factible la construcción de un equipo que funciona con el ciclo de refrigeración de adsorción solar en el Ecuador con materiales de adquisición en el mercado local.
- El equipo construido, al ser un prototipo, es susceptible a mejoras como la sustitución de la tapa frontal de madera por espejo, instalación de un reservorio de refrigerante, funcionamiento sin uso de válvulas, etc.
- La construcción del equipo para obtención de isósteras fue fundamental para determinar las constantes del par de adsorción (ecuación D-A), puesto que las constantes determinadas fueron muy distintas a las encontradas en la bibliografía. El carbón suministrado localmente presentó menor capacidad de adsorción y si se hubiera tomado los valores de la ecuación D-A sin experimentación se hubiera subdimensionado el equipo.
- Mediante el equipo construido se puede obtener las isósteras de cualquier par de adsorción en estado gaseoso. Por tal motivo, se considera un trabajo valioso para la investigación en el Ecuador puesto que ningún laboratorio del país tiene un equipo similar.
- El disponer de un sistema electrónico de adquisición de datos permitió obtener con mejor resolución los valores de temperatura y presión para poder cuantificarlos y realizar un mejor análisis; sin embargo, el alto costo

de este equipo no permitió adquirir de esta manera todas las variables como lo realizan en otros países donde existe mayor presupuesto.

- La capacidad de enfriamiento del equipo está íntimamente relacionada con la capacidad de adsorción del adsorbente, si en el equipo se sustituyera el material adsorbente por uno de mayor capacidad como el carbón AC-35 citado en la mayoría de bibliografías o por un carbón ecuatoriano mejorado se pudiera disponer de un equipo de mayor capacidad de refrigeración.
- Fue una acertada decisión medir en el refrigerador las temperaturas superficialmente en los tubos y no en la cama de adsorción porque con esto se logró una excelente estanqueidad del equipo, la cual fue muy difícil de conseguir en el equipo para la obtención de isósteras por fugas en los cables de señal de las termocuplas y cables eléctricos de las resistencias.
- El uso del concentrador tipo parabólico compuesto (CPC) permitió alcanzar altas temperaturas que producen la desorción del metanol. En la práctica se obtuvo una temperatura máxima de 150°C.
- El CPC, al poder receptar parte de la radiación difusa y al no necesitar un sistema de rastreamiento, es una selección adecuada que permite enfriar en días nublados.
- De acuerdo al modelo matemático, el equipo fue diseñado para congelar agua pero el equipo construido en la operación enfrió solamente una diferencia de 10°C debido a que la cantidad de metanol fue insuficiente para lograr a menor temperatura. En el modelo matemático se considera que todo el metanol es desorbido por el carbón pero se asume que en la práctica no se desorbió todo el metanol.

- La mayoría de los equipos de la bibliografía tienen un tanque de reserva para evitar que la cantidad de metanol sea insuficiente en el evaporador, por lo que los siguientes prototipos deberán construirse con este depósito.
- El coeficiente de operación (COP) y la capacidad específica de enfriamiento (SCP) están directamente relacionados con el calor de enfriamiento y este está relacionado con la cantidad de metanol que esté en el evaporador. Al quedarse sin metanol estos disminuyeron y no salieron iguales a los de diseño.
- Fue una decisión acertada poner aislamiento en la parábola porque a través de esta se podía perder calor y no alcanzar la temperatura deseada.
- Fue conveniente optar por utilizar una caja fría existente en el mercado y no construir una porque así se pudieron minimizar las pérdidas de calor.

7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda investigar respecto a otros pares de adsorción que puedan estar disponibles en el país como zeolita-agua, silica gel-agua, etc. para conocer su comportamiento y seleccionar aquel que permita obtener mayores eficiencias.
- Se recomienda disponer de un espacio apropiado en la universidad para investigaciones que permita que el equipo no sea transportado y se puedan captar todos los datos.
- Para futuros prototipos se sugiere cambiar la tapa frontal por espejo para disminuir pérdidas de calor a través de la madera.

- Se recomienda mantener la limpieza de los vidrios, porque las suciedades disminuyen el paso de la energía solar y por lo tanto la temperatura alcanzado por el colector.
- Se sugiere que la tapa frontal no sea fija para que se la pueda retirar en las noches y así realizar la limpieza del interior del colector lo cual aumenta su eficiencia.
- Es recomendable que la Politécnica Nacional disponga de un laboratorio de energía solar en el que se pueda simular la radiación mediante el uso de lámparas debido a que la presencia del sol es variable en la ciudad de Quito.
- Se sugiere colocar en el refrigerador solar, después del condensador un tanque de reserva de metanol para que el evaporador no se quede sin refrigerante.
- Se recomienda para la unión de los accesorios roscados y a presión se utilice teflón y silicón rojo para poder contrarrestar el efecto ácido del metanol a altas temperaturas y evitar fugas en el sistema.
- Se sugiere se disponga de una bomba de vacío que permita alcanzar presiones absolutas muy cercanas a cero, para que el metanol se evapore con mayor facilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. AHACHAD M., ALMERS A., MIMET A, “Solar-based comparison of adsorption and absorption refrigerating machines”, 2005, Laboratorio de Transferencia de Calor y Energía de la Facultad de Ciencias de Morocco, International Journal of Sustainable Energy Vol. 24, No. 4, December 2005, pg. 199–206
2. AHMED M., ABDULMAJEED A., “ Current Technologies and Future Perspectives in Solar Powered Adsorption Systems”, 2004, Canadá, “Canadian Solar Buildings Conference of Montreal”
3. ALGHOUL M., SOPIAN K., WAHAB M., “Review of materials for adsorption refrigeration technology”, 2007, Universidad de Kabangsaan, Malasia, Anti-Corrosion Methods and Materials, pg. 225–229
4. ALGHOUL M., SULAIMAN M., AZMI B., SOPIAN K., “Review of materials for adsorption refrigeration technology”, 2007, Instituto de Investigación de Energía Solar de la Universidad de Kabangsaan, Malasia
5. ASUMPINPONG K., Development of a Microchannel Device for Adsorption Cooling Application, Tesis previa a la obtención del grado de doctor en ciencias, Universidad Estatal de Oregon, 2009, pg. 29-31
6. CENGEL Y., BOLES M., Termodinámica, 4ª edición, Mcgraw Hill, México, 2006, pg. 618
7. CENGEL Y., Transferencia de Calor, 2ª edición, McGraw-Hill, México, 2003
8. CHUNFANG T., QINGHAI L., XIANGMEI L., XIAOJUAN Z., “Comparison of Several Eco-friendly Refrigeration Technologies”, Universidad Central del Sur de Predicción y Tecnología, China, Renewable Energy Resources and a Greener Future Vol.VIII-4-6
9. Departamento de la Armada Americana, Adsorption Design Guide, 2001, pg. 21, 23-24
10. DOSSAT R., Principios de Refrigeración, Continental, México, 1986, pg. 228, 229
11. DUFFIE J., BECKMAN W., Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, E.E.U.U., 1980, pg. 9, 13, 16, 21-23, 73-89, 346, 352

12. Energía solar térmica en la comunidad de Madrid, Cámara Oficial de Comercio e Industria de Madrid, pg. 12-13
13. GAMARRA P., PARDO C., Equilibrio de Adsorción de Mezclas Gaseosas en Tamices Moleculares, Universidad Complutense de Madrid, 2005, pg. 6, 20-28, 30-31
14. GONZÁLEZ M., Refrigeración Solar por Adsorción con Sistema de Captación CPC: Experimentos y Modelo, Tesis previa a la obtención de grado de Doctor en Ciencias Físicas, Departamento de Física Universidad de Burgos, 2006
15. GREGORY L., "Development of a Microchannel Device for Adsorption Cooling Application", 2009, Tesis previa a la obtención del masterado en ciencias de la Universidad Estatal de Oregón
16. HORN M., RAMOS M., Diseño de un Prototipo Experimental de Refrigeración por Adsorción
17. INCROPERA f., DE WITT D., Fundamentos de transferencia de calor, 4ª edición, Prentice Hall, México, 1999, pg. 568
18. KALOGIROU S., "Recent patents in solar energy collectors and applications", 2007, pg. 223-33, Higher Technical Institute of Cyprus
19. KARGE H., WEITKAMP J., Adsorption and Diffusion, Springer, Alemania, 2008, pg. 5-7, 16, 19
20. KENT S., Adsorbent Selection, Adsorption Research, E.E.U.U, pg. 4, 9, 12-13, 15, 17
21. KREITH F., BOHN M., Principios de transferencia de calor, 6ª edición, Thomson Learning, México, 2001
22. LAMBERT M., JONES B., "Automotive adsorption air conditioner powered by exhaust heat", 2006, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Diego, E.E.U.U
23. LI M., WANG R., "Heat and mass transfer in a flat plate solar solid adsorption refrigeration ice maker", 2003, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Renewable Energy 28 pg. 613–622
24. LI T., WANG R., OLIVEIRA R., KIPLAGAT J., WANG L., "A combined double-way chemisorption refrigeration cycle based on adsorption and

- desorption processes”, 2009, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, International journal of refrigeration 32, pg. 47-57
25. LI T., WANG R., OLIVEIRA R., KIPLAGAT J., WANG L., “A combined double-way chemisorption refrigeration cycle based on adsorption and desorption processes”, 2009, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, International journal of refrigeration 32, pg. 47-57
26. MALHERBE R., Adsorption and Diffusion in Nanoporous Materials, CRC Press, E.E.U.U, 1995, pg 45-46
27. MALHERBE R., Adsorption and Diffusion in Nanoporous Materials, CRC Press, E.E.U.U, 1995, pg. 48
28. MARTÍNEZ M., Adsorción física de gases y vapores, Universidad de Alicante, 1999, pg. 11-14, 20-24, 56, 57
29. MEYERS A., Chemical Thermodynamics for Industry, Cambridge, 2004, pg. 244
30. PUEBLA J., Manual de Buenas Prácticas en Refrigeración, FONDOIN, Venezuela
31. RABL A., Active solar collectors and their applications, Oxford University Press, Estados Unidos, 1985, pg. 149, 152, 155
32. RIBOT J., Curso de energía solar Tomo 1, Centro de Tecnología Educativa, España, 1995 pg. 9, 10, 12-17, 81-84, 86-88
33. ROUSSEAU R., Handbook of Separation Process Technology, John Wiley & Sons, Canada, 1987, pg. 649, 652, 654
34. SAHA B., KOYAMA S., “Experiments for Measuring Adsorption Characteristics of an Activated Carbon Fiber/Ethanol Pair Using a Plate-Fin Heat Exchanger”, 2006, Escuela de Ciencias de Ingeniería de la Universidad de Kasuga, Japón, Hvac&R Research Special Issue Vol. 12, No. 3b
35. SPAHIS N., ADDOUN A., MAHMOUDI H., “Study on solar adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon prepared from olive stones”, 2007, Facultad de Ciencias de la Universidad de Hassiba Ben Bouali, Algeria, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3, pg. 415 – 420

36. TREYBAL R., Operaciones de Transferencia de Masa, Mc-GrawHill, México, 1990, pg. 430, 626-627
37. W. CHEKIROU, N. BOUKHEIT AND T. KERBACHE, "Numerical modelling of combined heat and mass transfer in a tubular adsorber of a solid adsorption solar refrigerator", Departamento de física de la Universidad de Mentouri, Algeria, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N^o3, pg. 367 – 379
38. WANG D., XIA Z., WU J., "Design and Performance Prediction of a Novel Zeolite–Water Adsorption Air Conditioner", 2005, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Energy Conversion and Management 47, pg. 590–610
39. WANG L., WANG R., WU J., WANG K., WANG S., "Adsorption ice makers for fishing boats driven by the exhaust heat from diesel engine: choice of adsorption pair", 2004, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Energy Conversion and Management 45, pg. 2043–2057
40. WANG R., "Efficient adsorption refrigerators integrated with heat pipes", 2008, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Applied Thermal Engineering 28, pg. 317–326
41. WANG R., OLIVEIRA R., "Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy", 2006, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Progress in Energy and Combustion Science 32, pg. 424–458
42. WANG R., WANG L., "Adsorption refrigeration green cooling driven by low grade thermal energy", 2005, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Chinese Science Bulletin 2005 Vol. 50 No. 3 pg. 193—204
43. WANG R., WANG L., "Adsorption refrigeration green cooling driven by low grade thermal energy", 2005, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Chinese Science Bulletin 2005 Vol. 50 No. 3 pg. 193—204

44. YANAGI H., "Recent Development on Adsorption Refrigeration", 2006, Cyclelect Electrical Engineering, Japón, Heat Transfer Society of Japan Vol. 45 No. 19, pg. 32-39
45. YANAGI H., "Recent Development on Adsorption Refrigeration", 2006, Cyclelect Electrical Engineering, Japón, Heat Transfer Society of Japan Vol. 45 No. 19, pg. 32-39
46. YU. I. ARISTOV L., "Chemical and Sorption Heat Engines: State of the Art and Development Prospects in the Russian Federation and the Republic of Belarus", 2008, Academia de Ciencias de Novosibirsk, Rusia, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 81, No. 1
47. ZHAI X., WANG R., "Experimental investigation and theoretical analysis of the solar adsorption cooling system in a green building", 2009, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jiao Tong, China, Applied Thermal Engineering 29, pg. 17–27
48. ZHANG X., WANG R., "A New Combined Adsorption-Ejector Refrigeration and Heating Hybrid System Powered by Solar Energy", 2002, Instituto de Refrigeración y Criogenia de la Universidad de Shanghai Jia Tong, China, applied Thermal Engineering 22, pg 1245-1258
49. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
50. <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Activated-carbon.jpg>
51. http://es.wikipedia.org/wiki/Calentamiento_global
52. http://es.wikipedia.org/wiki/Silica_gel
53. http://www.camfilfarr.com/cou_espana/filtertechnology/profilt/adsorption.cfm
54. <http://www.conelec.gov.ec/downloads/Atlas.pdf>
55. <http://www.epa.gov/espanol/estudiantesmaestros.htm>
56. <http://www.inamhi.gov.ec/mapas/irradiacion.gif>
57. <http://www.lasalleandujar.com/node/847>
58. <http://www.mariopilato.com/bentonita-sodica.htm>
59. <http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm>
60. <http://www.solargenix.com/index.cfm>

ANEXOS

ANEXO I: CHILLERS CON MÚLTIPLES CAMAS Y EXPERIENCIAS EN OTROS PAÍSES CON EL SISTEMA DE ADSORCIÓN

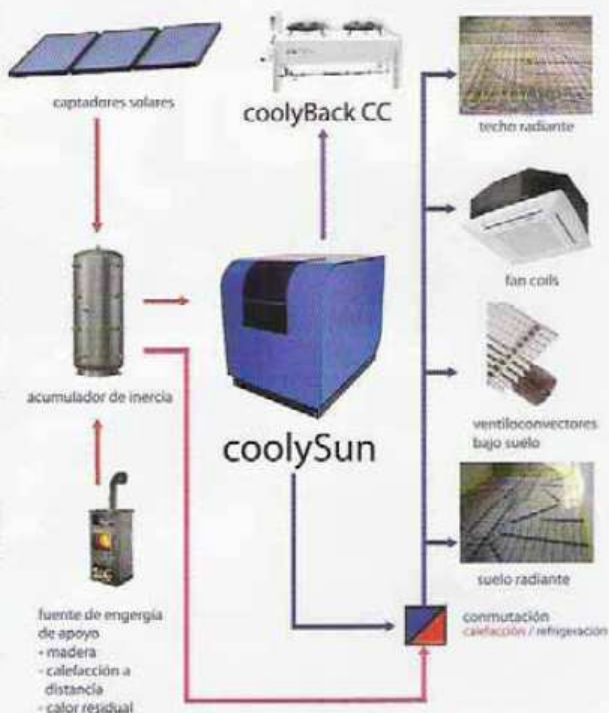


GASOKOL coolySun
Sistema de refrigeración solar



Calentar y refrigerar con la energía solar!

- Esto nuevo concepto no sólo permite el calentamiento sino también la refrigeración con la energía solar
- El sistema coolySun fue desarrollado especialmente para casas unifamiliares y oficinas pequeñas
- Los componentes perfectamente acordados permiten un diseño fácil y garantizan el funcionamiento óptimo y el alto ahorro de energía
- El sistema coolySun está disponible en dos tipos de 7,5 kW y 15 kW. Por eso el sistema se ajusta perfectamente a las necesidades – sistemas más grandes à petición
- Tecnología limpia “sortech” – utiliza agua como fluido de trabajo y materiales ecológicos de adsorción
- Sistema fácil con poco mantenimiento
- Posibilidad de integración de varios sistemas de calefacción y de refrigeración, por ejemplo calefacción/refrigeración por suelo radiante, calefacción/refrigeración con fan coils, refrigeración por techo radiante.
- Baja temperatura de activación a partir de 65°C, por eso un rendimiento óptimo y la integración de sistemas backup diferentes son posibles



Kit de refrigeración:

	Kit de refrigeración coolySun 7,5	Kit de refrigeración coolySun 15
Captadores:	12 uds. sunnySol UP con bastidor de montaje	24 uds. sunnySol UP con bastidor de montaje
Área útil de los captadores:	24,12 m ²	48,24 m ²
Máquina de adsorción:	coolySun AD 8-1	coolySun AD 15-1
Torre de refrigeración:	coolyBack CC 8-1	coolyBack CC 15-1
Acumulador Inercial:	1 acumulador inercial accuHeat PSM1500 litros	2 acumuladores inerciales accuHeat PSM1500 litros
Accesorios:	Grupo de estratificación para acumulador inercial Vaso de expansión Anticongelante Regulación para 3 circuitos Set de bombas para el circuito de agua de refrigeración	Grupo de estratificación para acumulador inercial Vaso de expansión Anticongelante Regulación para 3 circuitos Set de bombas para el circuito de agua de refrigeración
Opcional:	Módulo de agua para la preparación de agua caliente sanitaria	Módulo de agua para la preparación de agua caliente sanitaria

- Otros kits de refrigeración bajo pedido!



CICLOS CON MULTIPLES CAMAS

Ciclo con múltiples fases:

Este ciclo puede estar destinado a lograr alto coeficiente de operación (COP) y/o alta capacidad específica de enfriamiento (SCP), puede utilizar calor de desecho a temperatura relativamente baja (45 a 60°C) con sumideros de calor a temperatura casi ambiente (30°C). A continuación se reporta la experiencia del proyecto “Development of Waste Heat Driven Multi-Bed, Multi-Stage Regenerative Adsorption Chiller”. En el ciclo avanzado de 3 etapas el incremento de la temperatura de regeneración del adsorbente puede ser pequeño debido a que el incremento en la temperatura de evaporación es dividido en tres pequeños aumentos de temperatura. Así la presión incrementa en tres pasos progresivos del nivel de evaporación al de condensación; para lograr esto es necesaria la introducción de dos pares de camas adsorbentes. A pesar que los niveles de presión de operación son diferentes, las temperaturas de adsorción y desorción se mantienen iguales para las tres camas.

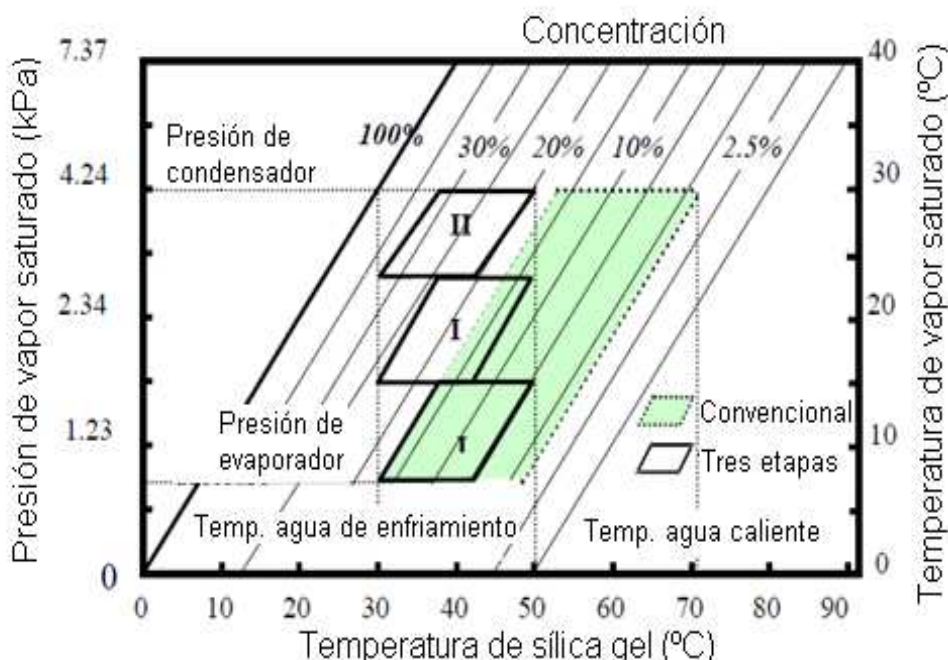
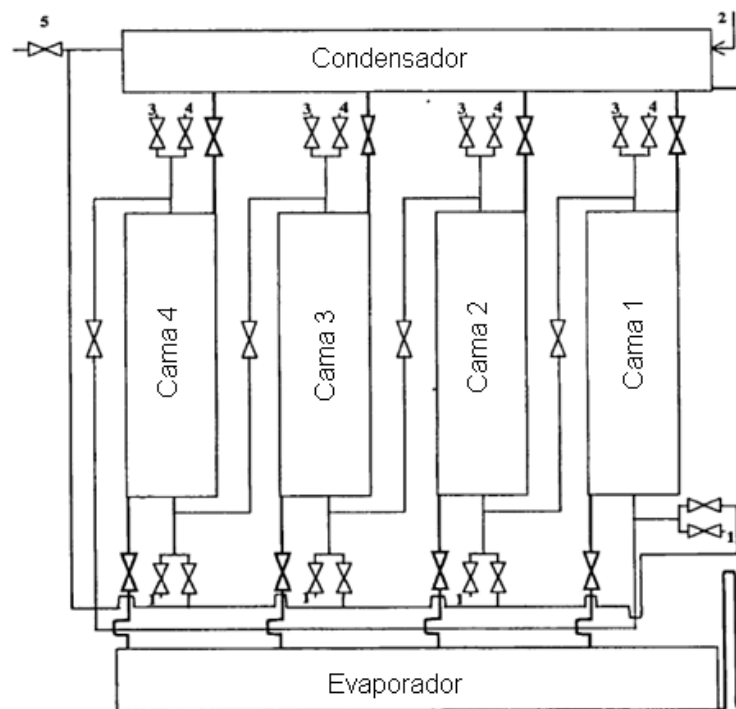


Diagrama Presión-Temperatura-Concentración para un ciclo de adsorción de 3 etapas¹⁰⁶

¹⁰⁶ YANAGI H., pg. 34

Sistema regenerativo con camas múltiples:

Para utilizar de mejor manera el calor de desecho, Chua propuso un chiller de adsorción regenerativo de múltiples camas. Después Chua investigó la eficiencia de un chiller de adsorción regenerativo de cuatro camas. En el chiller convencional de dos camas la inherente restricción en el número de camas resulta en una significativa fluctuación de la temperatura en todos sus componentes. En el tope de fluctuación de la temperatura del agua enfriada, el valor pico de la temperatura de salida del condensador que sigue después de la conmutación de las camas añade la carga instantánea de la torre de enfriamiento. El sistema de regeneración de 4 camas significativamente reduce las temperaturas pico en el evaporador y condensador.



Esquema de un chiller de regeneración de 4 camas¹⁰⁷

Ciclo con recuperación de masa:

En el chiller de adsorción de dos camas convencional, una cama está fría y la otra caliente al final de medio ciclo. En este punto, el adsorbente está en una baja presión (presión de evaporación), mientras que el desorbente está a alta presión

¹⁰⁷ YANAGI H., pg. 36

(presión de condensación). Por lo tanto el adsorbedor y el desorbedor deben ser presurizados y despresurizados respectivamente mediante la aplicación de procesos de calentamiento o enfriamiento.

Este procedimiento puede ser hecho conectando las dos camas con un tubo y una válvula como se muestra en la figura siguiente.

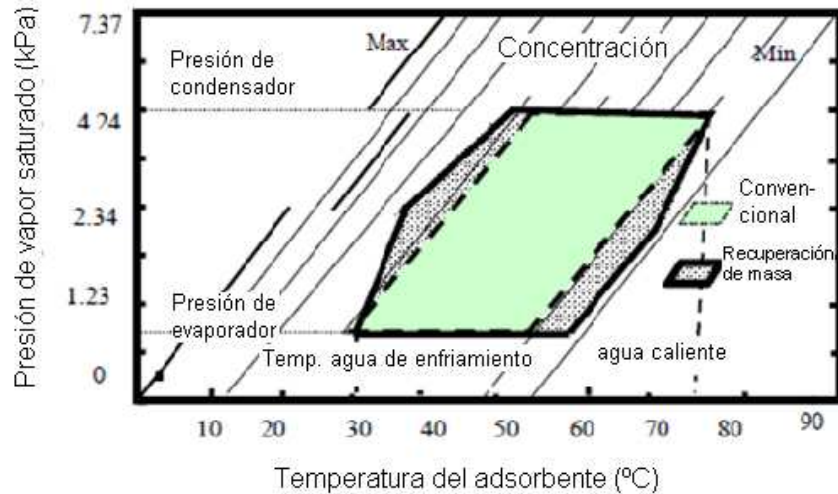


Diagrama Presión-Temperatura-Concentración para un ciclo de adsorción con recuperación de masa ¹⁰⁸

Para mayor información sobre los ciclos avanzados con múltiples camas revisar la publicación: YANAGI H., "Recent Development on Adsorption Refrigeration", 2006, Cyclelect Electrical Engineering, Japón, Heat Transfer Society of Japan Vol. 45 No. 19, pg. 32-39

¹⁰⁸ YANAGI H., pg. 39

Tabla de Resumen de las Experiencias en otros países (elaboración propia)

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Aire acondicionado	zeolita-agua	T _{ge} = 350-450 °C , T _{sal} = 8-12°C, Q _{ref} =5kW, T _{evap} =6.5°C	Suzuki	-	0.25	-	NO	China	2005	D.C. Wang, Z.Z. Xia, J.Y. Wu
Aire acondicionado	carbón activado-amoníaco	A _c =1,25m ² , Q _{enf} =430 W.	-	0.85	0.95	-	SI	Reino Unido	-	Dr. Robert E. Critoph
Aire acondicionado	carbón activado-metanol	Colector plano, T _{evap} =7°C	D-A	-	0.08	16W/kg	NO	India	2004	Yong Li K. Sumathy, Ph.D. N.D. Kaushika, Ph.D.
Aire acondicionado	zeolita-agua	T _i =230°C	-	0.41	-	97 W/kg	SI	Francia	1999	Poyelle F, Guilleminot JJ, Meunier F.
Aire acondicionado	zeolita-agua	T _i =310°C	-	0.38	-	25.7 W/kg	SI	China	200	Xia ZZ, Wang RZ, Wu JY, Wang DC.
Aire acondicionado	carbón activado-amoníaco	Bajo costo, T _{evap} =0°C, T _i =100°C	-	0.2	-	600 W/kg	SI	Reino Unido	2003	Tamainot-Telto Z, Critoph RE.
Aire acondicionado	zeolita-agua	T _i =230-300°C	-	0.20- 0.21	-	21.4-30 W/kg	SI	China	2002	Lu YZ, Wang RZ, Jianzhou S, Xu YX, Wu JY.
Aire acondicionado	carbón activado-amoníaco	Para automóvil, energía de desecho	-	0.3-0.4	-	-	NO	USA	2006	Lambert, Jones

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Chiller	CaCl ₂ sílica gel-agua	Modelación	Toth	-	0.42–0.45	-	NO	Japón-Rusia	2009	Bidyut Baran Saha, Anutosh Chakraborty
Chiller	sílica gel-agua	Sistema Comercial	-	0.7	-	-	SI	Japón	-	NISHIYODO
Chiller	sílica gel-agua	Dos etapas, 4 camas, modelación y construcción, Qenf=1tonelada de refrigeración	Ecuación de fuerzas cinéticas, Chiara-Suzuki	0.35	-	0.25 kW/kg	SI	Japón	2004	K. C. A. Alam, B. B. Saha
Chiller	sílica gel-agua	Qenf=6,6 kW, Tac=85°C, Tsal=10,7°C, recuperación de masa	Boelman	0.37	0.7	63.4 W/kg	SI	China	2005	D.C. Wang, Z.Z. Xiaa, J.Y. Wua,
Chiller	sílica gel-agua	Qenf= 0,9kW , Tevap`=13°C, Treg=80°C	-	0.33-0.5	-	91.7-171.8 W/kg	SI	China	2004	Y.L. Liu, R.Z. Wang*1, Z.Z. Xia
Chiller	sílica gel-agua	Tac min= 65°C, híbrido, Qenfr=7,5 y 15kW, colector solar plano, conocido como COOLYSUN	-	0.56	-	-	SI	Alemania	2008	Dr. Uli Jakob
Chiller	sílica gel A-agua	Dos camas	Freundlich		0.14		NO	Japón	1986	Sakoda y Suzuki

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Chiller	sílica gel-agua	Ti=55°C	-	0.36	-	3.2 kW	SI	Japón	2001	Saha BB, Akisawa A, Kashiwagi T
Chiller	carbón activado-metanol	Ti=100°C	-	0.4	-	73.1 kW/kg	SI	China	2001	Wang RZ, Wu JY, Xu YX, Wang W.
Chiller	sílica gel-agua	Ti=65°C	-	0.28	-	12.2 kW	SI	China	2004	Xia ZZ, Wang RZ, Wu JY, Wang DC.
Chiller	sílica gel-agua	Ti=75-95°C	-	0.35-0.6	-	15 kW	SI	Alemania	2004	Nuñez T, Mittelbach W, Henning HM
Chiller	sílica gel-agua	Ti=80-95°C	-	0.3-0.6	-	20 W/kg	SI	Italia-Rusia	2004	Restuccia G, Freni A, Vasta S, Aristov Y.
Chiller	sílica gel RD-agua	Dos camas y cuatro camas	Henry y Toth	0.35	-	10 kW	NO	China	2001	Chua, Wang
Icemaker	carbón activado-amoniaco	Simulación, 1m ² colector al vacío y plano	BET	-	0.4	-	NO	Morocco-Francia	2005	M. AHACHAD, A. ALMERS, A. MIMET
Icemaker	carbón activado-metanol	Colector tubos concéntricos al vacío	Clapeyron	-	-	-	SI	República Dominicana	2004	Sagredo Eduardo
Icemaker	carbón activado-metanol	I=2100-3000 kJ/m ²	Equilibrio de adsorción	0.11	-	-	SI	Morocco-Francia	1990	Meunier, Lemmini
Icemaker	carbón activado-etanol	Modelo matemático	D-A	-	-	-	NO	Tailandia	1998	J. Tiansuwan, J. Hirunlabh

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Icemaker	carbón activado-amoniaco	Simulación, colector parabólico	Equilibrio de adsorción	-	0.15	-	NO	Morocco-Francia	2008	A. El Fadar, A. Mimet.
Icemaker	carbón activado y CaCl ₂ -amoniaco	Energía solar y calor de desecho	-	0.27; 0.39	-	524.2; 770.4 W/kg	SI	China	2006	Wang R. Z. y Wang L.
Icemaker	sílica gel - agua	Panel solar, Ac=2 m ² , 32 litros de agua enfriada de 35°C a 5°C	-	0.16	-	-	SI	Francia	2004	Hildbrand, Dind Pons Butcher
Icemaker	carbón activado-metanol	Ac=2m ²	-	0.09- 0.13	-	-	SI	Suiza	2002	F. Buchtera, Ph. Dinda.
Icemaker	carbón activado-metanol	Ac=0,92 m ² , Proh=4-5 kg hielo/día, adsorbente fuera del colector	-	-	-	1.12	SI	Hong Kong	-	K.Sumathy
Icemaker	carbón activado-metanol	Proh=6,9-9,4kg/hielo, tubo de ensayo con reflectores, l=20 MJ/m ² día	Equilibrio de adsorción	0.14 a clima frío, 0.16 a clima caliente	-	-	SI	Egipto	2004	N. M. Khattab
Icemaker	carbón activado (5060)-metanol	2 camas, colector plano, Ac=3,07m ² , T _{evap} =-5°C	-	-	0.1	-	NO	Malasia	2007	M. A. Alghoul, M.Y.Sulaiman

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Icemaker	carbón activado-metanol	Colector placa plana, sin válvulas, Proh= 6-7kg, l=17-20MJ/m ²	-	0.13-0.15	-	-	SI	China	2006	M. Li, C.J. Sun, R.Z. Wang, W.D. Cai.
Icemaker	fibra carbón activado-etanol	Rotativo	-	-	0.85	-	NO	China	2006	Aiping Zheng, Juan Gu
Icemaker	carbón activado de coco (ACG-825-1.5)-metanol	$\Delta T=0,218^{\circ}\text{C}$ Qenf=6160J	-	-	-	0.18 W/kg	SI	India	2007	G Halder
Icemaker	carbón activado-metanol	Tubos evacuados, Treg= 101°C, Proh=6,05kg/m ²	-	0.07	-	-	SI	Brasil-Francia	2006	Antonio Pralon, Ferreira Leitea, Marcelo Bezerra Grilóa,
Icemaker	carbón activado-metanol	Proh=15,38kg/h Qenf=1,98kW, gases de escape, 2 camas	-	0.1	-	35.5W/kg	SI	China	2003	L.W. Wang, R.Z. Wang *, J.Y. Wu, K. Wang, S.G. Wang
Icemaker	carbón activado-metanol	Tevap=4,9°C,	-	-	-	-	SI	Argentina	2008	Inna Samson, Rodolfo Eharri

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Icemaker	grafito-amoníaco	Colector de tubos evacuados, $I=950W/m^2$, $Ac=2,1m^2$, $Qenf=1,78kW/h$	-	-	-	-	NO	Brasil	1997	M.E. Vieira and H.B.C. Moreira
Icemaker	carbón activado (maxsorb y tipo ACF-A10)-CO2	Simulación	Toth	-	0.15 a maxsorb; 0.83 a ACF-A10	-	NO	Japón	2008	Skander Jribi, Anutosh Chakraborty, Ibrahim.
Icemaker	carbón activado-metanol	Isoterma con distribución uniforme y no uniforme, $Tevap=0^{\circ}C$	D-R	-	0.72	-	NO	España	2004	Jesús Guallar Paracuellos, Isabel Lorente Calvo
Icemaker	zeolita 13X-agua	Adaptación del construido por EGSOLAR, $Tevap=-14^{\circ}C$, $Pvac=1mbar$	-	-	-	-	SI	Perú	2001	R. Miguel Ramos Chaya, Manfred Horn
Icemaker	carbón activado-metanol	Colector de placa, hibrido, $Tac=75-98^{\circ}C$	-	0.11	-	-	SI	Tailandia	-	Peerapong Thumautok, Wipawadee Wongsuwan,
Icemaker	zeolita-agua	Colector parabólico, $Tevap=0-10^{\circ}C$.	-	-	-	-	SI	Perú	2003	R. Miguel Ramos Chaya, Manfred Horn

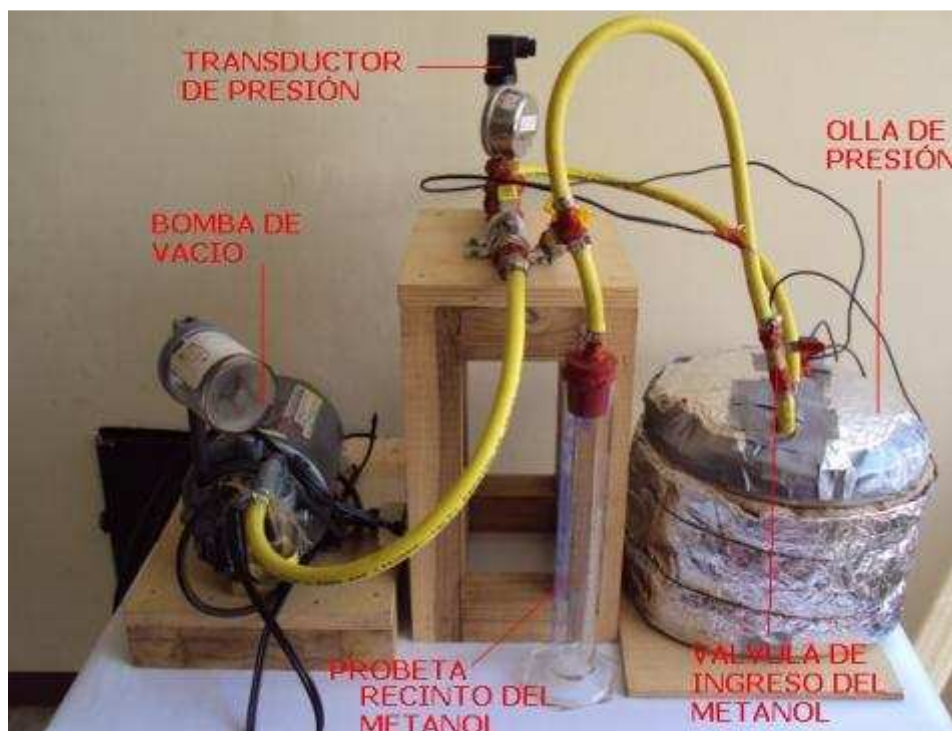
Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Icemaker	carbón activado-metanol	Colector plano, Proh=7,8kg, Ac=0,75m ²	Dubinin	0.13	0.13	-	SI	China	2002	M. Li, R.Z. Wang
Icemaker	zeolita-agua	Tubos al vacío, Qenf=4832kJ/m ²	Equilibrio de adsorción	-	0.25	-	NO	China	2002	C.H. Li, R.Z. Wang, Y.J. Dai
Icemaker	zeolita agua	Colector plano	-	-	0.18-0.25	-	NO	Turquía	2007	K. Baker, B. Kaftanoglu
Icemaker	carbón activado-metanol	Híbrido, simulado con resistencia eléctrica, Tevap=-1°C, Proh=9kg hielo, Treg=80°C	D-A	0.41	-	-	SI	China	2001	R.Z. Wang, Y.X. Xu, J.Y. Wu, M. Li, H.B. Shou
Icemaker	carbón activado-metanol	Colector cilindro parabólico, l=20MJ, Tcond=24,3°C, Qenf=0,72MJ	D-A	0.09	-	-	SI	España	2005	González M.

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Icemaker	carbón activado-metanol	Simulación, sin válvulas	-	-	-	-	NO	Australia	1996	Eric Jing Hu
Icemaker	carbón activado-metanol	$A_c=6\text{m}^2$, $Proh=30\text{-}5\text{kg/día}$, $Id=22\text{MJ/m}^2$	-	0.12	-	-	SI	Francia	1986	Pons, Guillemint
Icemaker	carbón activado-metanol	$A_c=2\text{m}^2$, $Proh=1\text{kg/día}$, $Id=25\text{MJ/m}^2$	-	0.02	-	-	SI	Trinidad y Tobago	1994	Headley, Kohdiwala, Doom
Icemaker	carbón activado-metanol	$A_c=1\text{m}^2$, $Proh=4\text{kg/día}$, $Id=19,5\text{MJ/m}^2$	-	0.12	-	-	SI	Francia	2000	Boubarkri, Guillemint, Meunier
Icemaker	carbón activado-metanol	$A_c=1.1\text{m}^2$, $Proh=3\text{kg/día}$, $Id=22\text{MJ/m}^2$	-	0.09	-	-	SI	China	1992	Tan, Feng, Cui

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Icemaker	carbón activado-metanol	$Id=22MJ/m^2$	-	0.12	-	-	SI	Francia	1987	Pons, Grenier
Icemaker	carbón activado-metanol	-	-	-	0.16	-	NO	Brasil	1989	Passos, EscoBedo
Icemaker	carbón activado-metanol	$Id=18MJ/m^2$	-	0.14	-	-	SI	Hong Kong	1999	Sumathy, Li
Icemaker	carbón activado-amoniaco	$Ti=105^{\circ}C$	-	0.1		35 W/kg	SI	Reino Unido	1997	Tamainot Telto Z, Critoph RE.
Icemaker	carbón activado-metanol	$Proh=5-6kg/día/m^2$, $Id=18.1-19.2MJ/m^2$	-	0.12-0.14	-		SI	China	2002	Li M, Wang RZ, Xu YX, Wu JY, Dieng AO
Intercambiador de calor	carbón activado-metanol	2 camas, intercambiador de coraza y tubo	D-A	-	0.6	-	NO	Brasil	2007	Douglas Bressan Riffel,

Aplicación	Par de adsorción	Características	Ecuación isoterma	COP	COP calculado	SCP	Construcción	País	Año	Autor
Intercambiador de calor	zeolita (CBV 901) - metanol	1 y 2 camas.	Equilibrio de adsorción	-	0.54; 0.93	-	NO	Reino Unido	2003	S.Waszkiewicz, S. Jenkins
Sistema de enfriamiento	zeolita-agua	Tevap=10°C, Ti=305°C	Equilibrio de adsorción	0.45	-	10 kW	NO	China	1999	Zhang, Wang
Sistema de enfriamiento	zeolita-metanol	Simulación 1 y 2 camas.	D-A	-	0.54; 0.94	-	NO	Reino Unido	-	S.Waszkiewicz, H. Saidani-Scott
Sistema de enfriamiento	carbón-amoníaco	100 tubos y 20 tubos	D-A	-	1.0; 0.7	10 kW/kg 30 kW/kg	NO	Reino Unido	2004	Critoph
Sistema de enfriamiento y calentamiento	zeolita-agua	Eyector	D-A	-	0.33	0.34 MJ/kg	NO	China	2002	X.J. Zhang, R.Z. Wang
Sistema enfriamiento y calentamiento	carbón activado-metanol	Simulación, 2 camas	D-A	-	0.18	87.8	NO	China	2002	X.J. Zhang, R.Z. Wang

**ANEXO II: FOTOS Y COSTO DEL EQUIPO CONSTRUÍDO PARA LA
OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS DE ADSORCIÓN**



VISTA FRONTAL DEL EQUIPO DE OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS



VISTA LATERAL DEL EQUIPO DE OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS



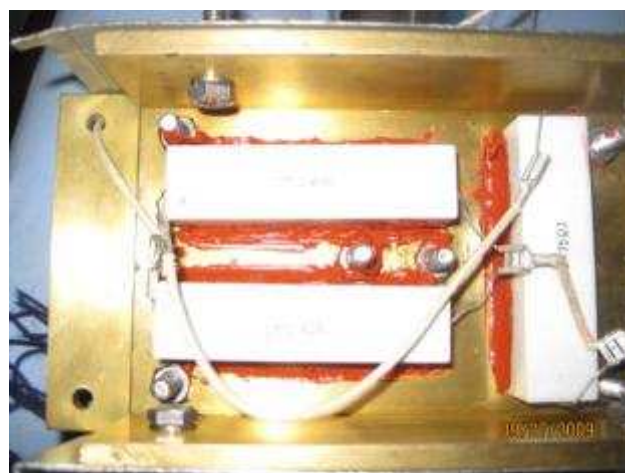
CARBÓN ACTIVADO



DISIPADOR



TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS



RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO EN EL DISIPADOR

COSTOS DEL EQUIPO DE OBTENCIÓN DE ISÓSTERAS

CANT.	DESCRIPCIÓN	COSTO (USD)
3	Cable de alta temperatura 18AWG, 250GC.	4.94
3	Termocupla tipo K	111.82
7	Fit térmico 1/8	15.05
1	Caja de proyectos	2.39
2	Probeta de vidrio 250	32.64
1	Tapón de caucho	3.01
1	Probeta de vidrio 250 ml base plástica	11.97
1	Probeta plástica de 1000 ml	18.01
1	Olla de presión de 18 litros	40.00
7	Resistencia de 30W 15H	9.31
1	Válvula de respiradero UMCO	3.27
1	Permatex para unión tuberías	2.71
4	Permatex alta temperatura	10.12
2	Cinta teflón	1.24
2	Cable sólido 18	0.16
3	Enchufe 15A/125V	2.37
1	Bushing 3/4" a 1/2"	0.50
1	Cable sólido 14	0.24
1	Unión 3/8" P/Manguera	2.27
1	Grata	2.01
2	Broca 1/2"	4.01
4	Rodela plana 3/8	0.80
3	Toma doble	2.97
3	Interruptor	2.70
1	Cinta de ducto	2.87
1	Caja machuelos	9.00
12	Perno inoxidable 1/4"	4.03
4	Tornillos	0.54
4	Tuercas	0.13
8	Arandelas	0.09
4	Pernos	1.03
1	Broca de 8.25	1.30

12	Tuerca inoxidable 1/4"	1.61
2	Boquilla manguera 1/4"x3/8	4.59
1	T 3/8	4.55
3	Válvula de gas	24.06
1	Taípe	0.50
1	Boquilla manguera 1/2"x3/8 hembra	3.96
10	Abrazadera 3/8" inoxidable	9.30
5	Manguera para gas 1/4"	5.77
1	Válvula de bola para gas 1/2"	6.76
2	Neplo corrido POLIMEX 1/2"	0.63
1	Neplo POLIMEX 1/2"x10cm	0.29
2	T POLIMEX 1/2"	1.03
1	Neplo cónico hexagonal 1/2"	3.55
2	Bushing 1/2" a 1/2"	0.72
1	Fuente variable 0-32 V	34.16
4	Temocupla tipo K	36.24
1	Fuente variable 0-32 V	41.44
1	Papel de aluminio	1.98
TOTAL		484.65

ANEXO III: CATÁLOGOS DE EQUIPOS
BOMBA DE VACÍO

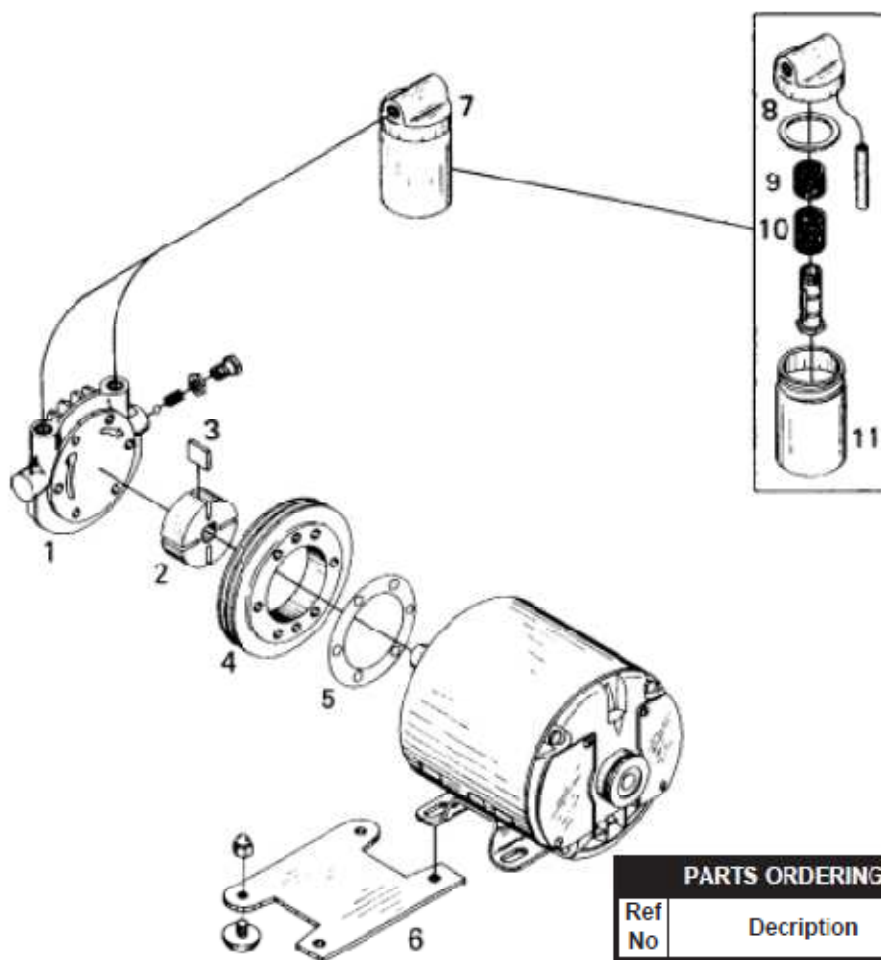


70-160 G320PL (Rev. D)

**0211 SERIES OIL-LESS VACUUM
PUMPS & COMPRESSORS OPERATION
& MAINTENANCE MANUAL**



EXPLODED VIEW & PARTS ORDERING INFORMATION



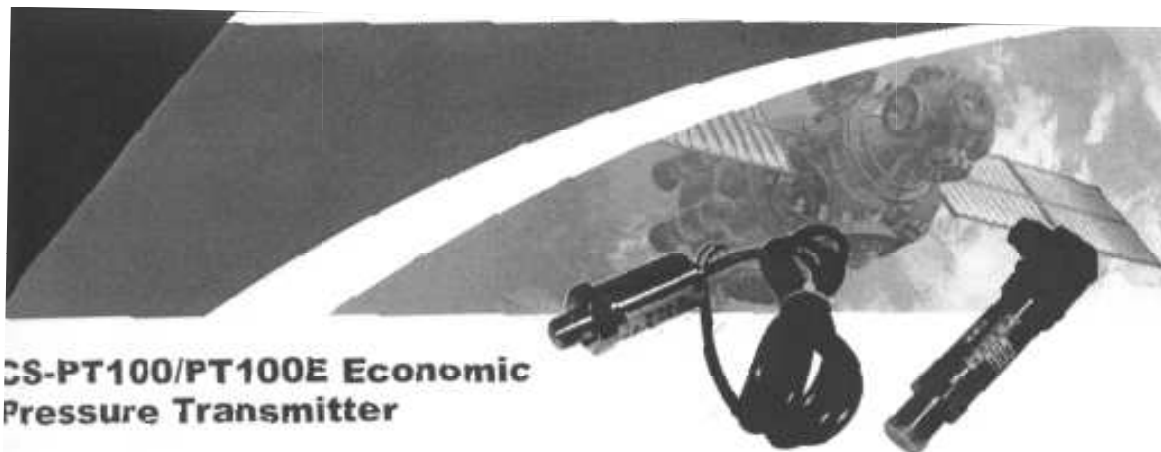
PARTS ORDERING INFORMATION

Ref No	Description	Qty	0211-103A
1	End Plate	1	AC130R
2	Rotor	1	CM20J
* 3	Vane	4	AA348A
4	Body	1	AC129
* 5	Body Spacer	1	AA34
6	Foot Support Assembly	1	AC136
7	Filter/Muffler Assembly	2	AA617G
* 8	Cover Gasket	2	AA691
* 9	Filter Felt	2	AA683A
* 10	Filter Felt	4	AA683B
11	Support Stem	1	AA000
12	Glass Jar	2	AA690-43
	Service Kit	1	K218

* Denotes parts included in Service Kit.

Parts listed are for stock models. For specific OEM models consult the factory. When corresponding or ordering parts, please give complete model and serial number.

TRANSDUCTOR DE PRESIÓN



CS-PT100/PT100E Economic Pressure Transmitter

1) Feature

The core elements of transmitter, which adopts high performance silicon dies as well as offering to OEM customers. Compact structure, easy installation, low cost, product has high safety performance since it has the reversed circuit protection.

CS-PT100E can be specially used in some flammable environment.

2) Technology Data

- Measurement Range:** 0 to 200Kpa 0~35Mpa
- Accuracy:** 0.5% F.S (including linearity, repeatability and hysteresis)
- Output:** 4 to 20mA (two-wire types)
- Power Supply:** 24 VDC±16%
- Pressure Connection:** M20 x 1.5 (on request)
- Response Time:** 10ms
- Allowed overpressure:** 2.5 times full scale
- Pressure form:** Gauge pressure
- Long Term Stability:** ±0.2% F.S per year
- Compensated Temperature:** from -10°C to +60°C
- Working Temperature:** from -40°C to +80°C

(3) Application

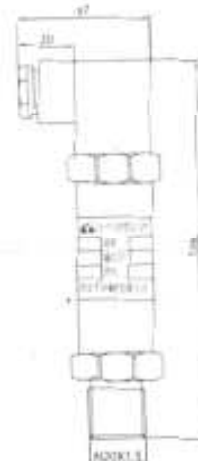
It can be used in measuring pressure of the fluid of mechanical or equipment, Pharmaceutical Machinery and Food Machinery.

(4) Sample

CS-PT100—XX—XX—XX—XX



CS-PT100



02

(5) Ordering code

Product	Measurement	Measurement			
		1	2	3	4
CS-PT100	1~10	1	0~200KPa	5	0~10MPa
		2	0~400KPa	7	0~16MPa
		3	0~1MPa	8	0~25MPa
		4	0~3.5MPa	9	0~35MPa
		5	0~6MPa	10	Others on request
	1~2	Pressure Connection			
		1	M20×1.5		
		2	Others on request		
		Explosion Proofing			
		0 or E	O	Non-Anti-explosion	
		E	Anti-Explosion		
	Electric Connection				
		A	Shield PVC cable		
		B	3-pin connector		
		C	Hirschmann connector		

TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS



Av. Paucarbamba 1-160 y Manuel J. Calle
 Tel. (07) 288 2288 Fax. (07) 281 7800
 hl-ni@etapaonline.net.ec Casilla 01.05.1879
 CUENCA – ECUADOR

NI – 390 – 09

Cuenca, 17 de agosto de 2009
 Sr. (Sres.)
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 Atn.: Sr. Juan Víctor Chiriboga Albuja
 Ciudad

De mis consideraciones.

A continuación encontrará la cotización por un sistema de adquisición de datos portable con comunicación USB de bajo costo dirigido para aplicaciones académicas.



USB-6009

- Entradas analógicas:
 - o 8 terminal simple / 4 diferenciales
 - o Velocidad 48 kS/s, Resolución 14 bits, Rango de +/- 20 a +/- 0.05 V
- Salidas analógicas:
 - o 2 referenciadas
 - o Velocidad 150 Hz, Resolución 12 bits, Rango de 0-5 V
- Entradas/Salidas Discretas
 - o 12 canales bidireccionales
 - o Señales compatibles TTL/CMOS (0-5 V)
- Contador
 - o 1 contador de 32 bits de 5 MHz

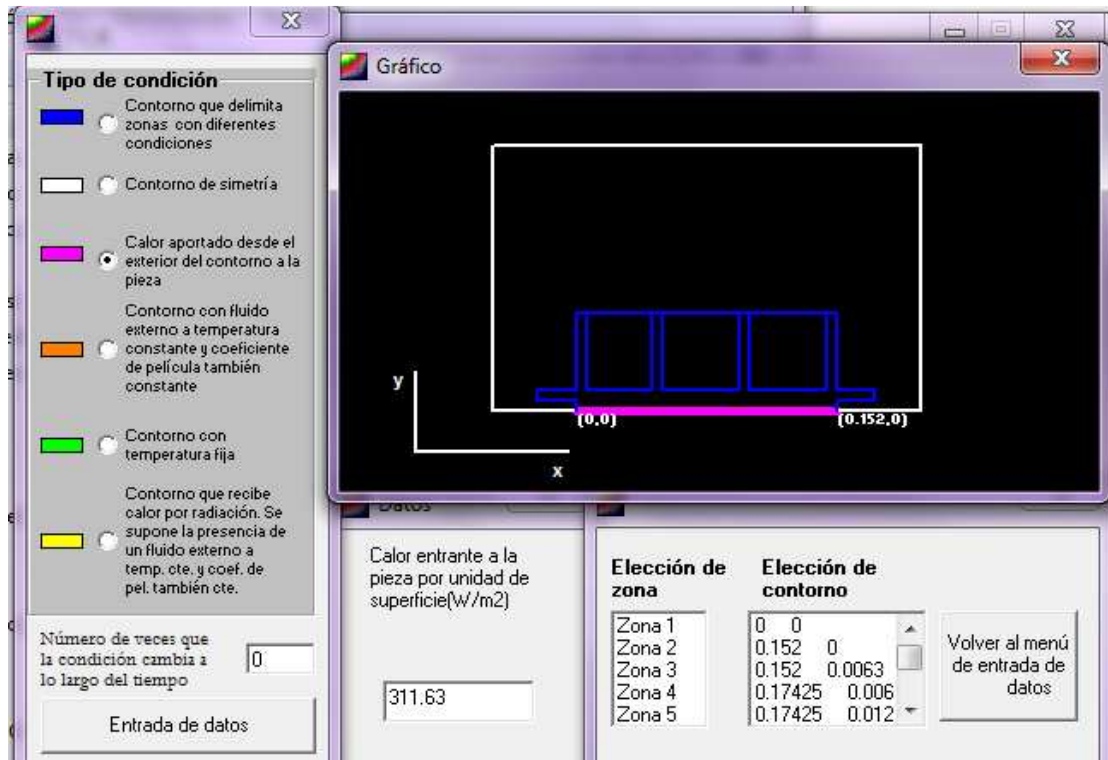
ANEXO IV: SIMULACIÓN EN EL TCB DEL DISIPADOR DE CALOR



Simulación en el programa T.C.B en el tiempo 157seg



Simulación en el programa T.C.B en el tiempo 314 seg



Tipo de condiciones y geometría de la simulación en el T.C.B

ANEXO V: INFORMACIÓN ACERCA DEL PROGRAMA LABVIEW

LabView es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico. Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y Linux. La versión actual 8.6, publicada en agosto de 2008, cuenta también con soporte para Windows Vista.

Los programas desarrollados con LabView se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica (Instrumentación electrónica) sino también a su programación embebida. Un lema tradicional de LabView es: "La potencia está en el Software", que con la aparición de los sistemas multinúcleo se ha hecho aún más patente. Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a profesionales de cualquier otro campo. LabView consigue combinarse con todo tipo de software y hardware, tanto del propio fabricante -tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, instrumentos y otro Hardware- como de otros fabricantes.

Principales usos

Es usado principalmente por ingenieros y científicos para tareas como:

- Adquisición de datos y análisis matemático
- Comunicación y control de instrumentos de cualquier fabricante
- Automatización industrial y programación de PACs (Controlador de Automatización Programable)
- Diseño de controladores: simulación, prototipaje rápido, hardware-en-el-ciclo (HIL) y validación
- Diseño embebido de micros y chips
- Control y supervisión de procesos
- Visión artificial y control de movimiento

- Robótica
- Domótica y redes de sensores inalámbricos
- En 2008 el programa fue utilizado para controlar el LHC, el acelerador de partículas más grande construido hasta la fecha.
- Pero también juguetes como el Lego Mindstorms o el WeDo lo utilizan, llevando la programación gráfica a niños de todas las edades.

Principales características

Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer (programas) relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con LabView y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él. Los programas en LabView son llamados instrumentos virtuales (VIs) Para los amantes de lo complejo, con LabView pueden crearse programas de miles de VIs (equivalente a millones de páginas de código texto) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, proyectos para combinar nuevos VIs con VIs ya creados, etc. Incluso existen buenas prácticas de programación para optimizar el rendimiento y la calidad de la programación. El LabView 7.0 introduce un nuevo tipo de subVI llamado VIs Expreso (Express VIs). Estos son VIs interactivos que tienen una configuración de caja de diálogo que permite al usuario personalizar la funcionalidad del VI Expreso. El VIs estándar son VIs modulares y personalizables mediante cableado y funciones que son elementos fundamentales de operación de LabView.

Presenta facilidades para el manejo de:

- Interfaces de comunicaciones:
 - Puerto serie
 - Puerto paralelo
 - GPIB
 - PXI
 - VXI

- TCP/IP, UDP, DataSocket
- Irda
- Bluetooth
- USB
- OPC...
- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones:
 - DLL: librerías de funciones
 - .NET
 - ActiveX
 - Multisim
 - Matlab/Simulink
 - AutoCAD, SolidWorks, etc.
- Herramientas gráficas y textuales para el procesado digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición y tratamiento de imágenes.
- Control de movimiento (combinado incluso con todo lo anterior).
- Tiempo Real estrictamente hablando.
- Programación de FPGAs para control o validación.
- Sincronización entre dispositivos.

Programa en LabView

Como se ha dicho es una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión. Al tener ya pre-diseñados una gran cantidad de bloques, se le facilita al usuario la creación del proyecto, con lo cual en vez de estar una gran cantidad de tiempo en programar un dispositivo/bloque, se le permite invertir mucho menos tiempo y dedicarse un poco más en la interfaz gráfica y la interacción con el usuario final. Cada VI consta de dos partes diferenciadas:

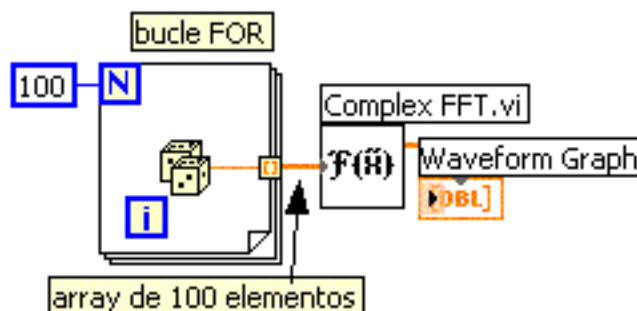
- Panel Frontal: El Panel Frontal es la interfaz con el usuario, la utilizamos para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real (como van fluyendo los datos, un ejemplo sería una calculadora, donde

se pone las entradas, y te pone el resultado en la salida). En esta interfaz se definen los controles (los usamos como entradas, pueden ser botones, marcadores etc.) e indicadores (los usamos como salidas, pueden ser gráficas...).

- Diagrama de Bloques: es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan íconos que realizan una determinada función y se interconectan (el código que controla el programa --. Suele haber una tercera parte icono/conector que son los medios utilizados para conectar un VI con otros VIs.--

En el panel frontal, encontraremos todo tipos de controles o indicadores, donde cada uno de estos elementos tiene asignado en el diagrama de bloques una terminal, es decir el usuario podrá diseñar un proyecto en el panel frontal con controles y indicadores, donde estos elementos serán las entradas y salidas que interactuarán con la terminal del VI. Podemos observar en el diagrama de bloques, todos los valores de los controles e indicadores, como van fluyendo entre ellos cuando se está ejecutando un programa VI.

La figura muestra un Diagrama de Bloques de un programa en el que se genera un arreglo de 100 elementos aleatorios, a continuación se hace la FFT de este arreglo y se muestra en una gráfica.¹⁰⁹



¹⁰⁹ <http://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>

ANEXO VI: ECUACIÓN D-A Y EL DIAGRAMA (LN P, 1/T)

Se muestra que para un sistema adsorbente-adsorbato que verifique la ecuación Dubinin-Astakhov (D-A) las isósteras son aproximadamente líneas rectas cuando se representa en un diagrama (ln P, 1/T). La ecuación D-A está dada por:

$$X(P, T) = W_o \rho_{liq} \exp \left[-D \left[T \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right] \quad (A.6. 1)$$

Asumiendo que la densidad del adsorbato líquido no varía apreciablemente con la temperatura se tiene:

$$\frac{X(P,T)}{W_o \rho_{liq}} = \exp \left[-D \left[T \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right] = A \quad (A.6. 2)$$

Donde:

A = constante

Por lo tanto, se tiene:

$$D \left[T \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n = B \quad (A.6. 3)$$

Donde:

B = constante positiva

Esto es así porque D y T son cantidades positivas y $P_o > P$, sea cual sea el valor de n se tiene:

$$T \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) = C_c \quad (A.6. 4)$$

Donde:

C_c = constante

o bien:

$$T(\ln P_{sat} - \ln P) = C_c \quad (A.6. 5)$$

Si se trata de representar en un diagrama $(\ln P, 1/T)$ realizando el cambio de $1/T=Y$ y $\ln P = Z$ se tiene:

$$\frac{1}{Y}(\ln P_{\text{sat}} - Z) = C_c \quad (\text{A.6. 6})$$

Despejando Z se tiene:

$$Z = \ln P_{\text{sat}} - C_c Y \quad (\text{A.6. 7})$$

Teniendo en cuenta que la curva de saturación es, también aproximadamente una recta, se supone que su ecuación de la forma "**D+EX**", se tiene finalmente:

$$Z = D + (E + FY) \quad (\text{A.6. 8})$$

Lo que muestra efectivamente que las isósteras tienen forma de línea recta.

ANEXO VII: CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL COLECTOR PARA CADA FASE DEL CICLO

Para la fase AB se tiene:

$$E_{entra} - E_{sale} = E_{acumulada} \quad (A.6. 9)$$

$$S - \frac{T_a - T_{amb}}{R_{eqc}} = m_M C p_M \frac{dT_a}{dt} \quad (A.6. 10)$$

$$-SR_{eqc} + T_a - T_{amb} = -R_{eqc} m_M C p_M \frac{dT_a}{dt} \quad (A.6. 11)$$

$$u = T_a - T_{amb} - SR_{eqc} ; B = -R_{eqc} m_M C p_M \quad (A.6. 12)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{dT_a}{dt} \quad (A.6. 13)$$

$$u = B \frac{du}{dt} \quad (A.6. 14)$$

$$\int_0^t dt = B \int_{u_0}^u \frac{du}{u} \quad (A.6. 15)$$

$$t = B \ln \left(\frac{T_a - T_{amb} - SR_{eqc}}{-SR_{eqc}} \right) \quad (A.6. 16)$$

$$T_a = T_{amb} - SR_{eqc} e^{t/B} + SR_{eqc} \quad (A.6. 17)$$

Para la fase CD y DA se tiene:

$$E_{sale} = -E_{acumulada} \quad (A.6. 18)$$

$$\frac{T_a - T_{amb}}{R_{eqc}} = -m_M C p_M \frac{dT_a}{dt} \quad (A.6. 19)$$

$$T_a - T_{amb} = -R_{eqc} m_M C p_M \frac{dT_a}{dt} \quad (A.6. 20)$$

$$u = T_a - T_{amb} ; B = -R_{eqc} m_M C p_M \quad (A.6. 21)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{dT_a}{dt} \quad (A.6. 22)$$

$$u = B \frac{du}{dt} \quad (A.6. 23)$$

$$\int_0^t dt = B \int_{u_0}^u \frac{du}{u} \quad (A.6. 24)$$

$$t = B \ln \left(\frac{T_a - T_{amb}}{T_i - T_{amb}} \right) \quad (A.6. 25)$$

$$T_a = T_{amb} + (T_i - T_{amb}) e^{t/B} \quad (A.6. 26)$$

ANEXO VIII: CÁLCULO DEL CALOR DE ADSORCIÓN

Se calcula el calor de adsorción y de desorción en base de la ecuación 1.4 de Dubinin-Astakhov, reescribiendo esta ecuación se tiene:

$$-\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{X(T_{C-A}, P)}{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})} \right) = \left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \quad (A.8. 1)$$

$$\left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{1/n} = T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \quad (A.8. 2)$$

$$\ln(P_{sat}) - \ln(P) = \frac{1}{T_{C-A}} \left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{1/n} \quad (A.8. 3)$$

Aplicando la ecuación 1.59 para cada una de las presiones se tiene:

$$\left(\frac{\partial \ln(P)}{\partial T_{C-A}} \right)_x = \frac{\Delta H_{ad/des}}{R \cdot T_{C-A}^2} \quad (A.8. 4)$$

$$\left(\frac{\partial \ln(P_{sat})}{\partial T_{C-A}} \right)_x = \frac{\Delta H_{f,g}}{R \cdot T_{C-A}^2} \quad (A.8. 5)$$

Derivando la ecuación (A.8.3) respecto a la temperatura y teniendo en cuenta que la ecuación de Clapeyron es a concentración constante se tiene:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \ln(P_{sat})}{\partial T_{C-A}} \right)_x - \left(\frac{\partial \ln(P)}{\partial T_{C-A}} \right)_x &= -\frac{1}{T_{C-A}^2} \left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{1/n} + \left(\frac{1}{n \cdot T_{C-A}} \right) \\ &\left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{X(T_{C-A}, P) \cdot W_0 \left(\frac{\partial \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{\partial T_{C-A}} \right)}{D \cdot W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A}) \cdot X(T_{C-A}, P)} \right) \end{aligned} \quad (A.8. 6)$$

Remplazando las ecuaciones (A.8.4) y (A.8.5) en (A.8.6) se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H_{f,g}}{R \cdot T_{C-A}^2} - \frac{\Delta H_{ad/des}}{R \cdot T_{C-A}^2} &= -\frac{1}{T_{C-A}^2} \cdot \left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{1/n} + \left(\frac{1}{n \cdot T_{C-A}} \right) \\ &\left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{\frac{\partial \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{\partial T_{C-A}}}{D \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})} \right) \end{aligned} \quad (A.8. 7)$$

Por definición del coeficiente de dilatación cubica se tiene:

$$\frac{\partial \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{\partial T_{C-A}} = -\rho_{mel-liq}(T_{C-A}) \cdot \alpha \quad (A.8. 8)$$

Remplazando la ecuación A.8.8 en la A.8.7 se tiene:

$$\frac{\Delta H_{f,g}}{R \cdot T_{C-A}^2} - \frac{\Delta H_{ad/des}}{R \cdot T_{C-A}^2} = -\frac{1}{T_{C-A}^2} \left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{1/n} + \frac{1}{n \cdot T_{C-A}}$$

$$\left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{-\rho_{mel-liq}(T_{C-A}) \cdot \alpha}{D \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})} \right) \quad (\text{A.8. 9})$$

Remplazando la ecuación A.8.1 en la A.8.9 se tiene:

$$\frac{\Delta H_{f,g}}{R \cdot T_{C-A}^2} - \frac{\Delta H_{ad/des}}{R \cdot T_{C-A}^2} = -\frac{1}{T_{C-A}^2} \left[\left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right]^{1/n} - \frac{\alpha}{n \cdot T_{C-A} \cdot D}$$

$$\left[\left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right]^{\frac{1}{n}-1} \quad (\text{A.8. 10})$$

Despejando $\Delta H_{ad/des}$ y realizando algunos artificios matemáticos se tiene:

$$\Delta H_{ad/des} = \Delta H_{f,g} + R \cdot T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) + \frac{\alpha \cdot R \cdot T_{C-A}}{n \cdot D} \left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^{1-n} \quad (\text{A.8. 11})$$

ANEXO IX: CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Para calcular la el cambio de concentración con respecto al tiempo se realiza un artificio matemático, por lo cual se tiene:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \left(\frac{\partial X}{\partial T_{C-A}} \right)_{\ln P} \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial X}{\partial \ln P} \right)_{T_{C-A}} \left(\frac{\partial \ln P}{\partial t} \right) \quad (\text{A.9. 1})$$

Se procede a derivar la ecuación de Dubinin-Astakhov teniendo en cuenta la ecuación A.9.1:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial X}{\partial \ln P} \right)_T &= W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A}) \exp \left[-D \left(T \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right)^n \right] \\ &\left[-D \cdot T^n \cdot n \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)}{\partial \ln(P)} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.9. 2})$$

$$\ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) = \ln(P_{sat}) - \ln(P) \quad (\text{A.9. 3})$$

Derivando la ecuación A.9.3 respecto al logaritmo natural de la presión se tiene:

$$\frac{\partial \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)}{\partial \ln(P)} = \frac{\partial \ln(P_{sat})}{\partial \ln(P)} - \frac{\partial \ln(P)}{\partial \ln(P)} \quad (\text{A.9. 4})$$

La presión de saturación es una función de la temperatura por lo que la derivada con respecto al logaritmo de P es cero, por ende se tiene:

$$\frac{\partial \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)}{\partial \ln(P)} = -1 \quad (\text{A.9. 5})$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial X}{\partial \ln P} \right)_T &= W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A}) \cdot \exp \left[-D \left(T \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right)^n \right] \\ &\left[(-D) \cdot T^n \cdot n \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)^{n-1} \cdot (-1) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.9. 6})$$

$$X = W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A}) \cdot \exp \left[-D \left(T \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right)^n \right] \quad (\text{A.9. 7})$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial \ln P} \right)_T = X \cdot (-D) \cdot T^n \cdot n \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)^{n-1} \cdot (-1) = g \quad (\text{A.9. 8})$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial \ln P} \right)_T = g \quad (\text{A.9. 9})$$

Para el siguiente término de la ecuación se tiene:

La ecuación A.9.3 se deriva de acuerdo de la temperatura teniendo en cuenta que el logaritmo natural de la presión es una constante y la concentración varia en el tiempo, se tiene:

$$\frac{\partial \ln(P_{sat})}{\partial T_{C-A}} = -\frac{1}{T_{C-A}^2} \left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{1/n} + \frac{1}{n \cdot T_{C-A}} \left[\frac{1}{D} \cdot \ln \left(\frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})}{X(T_{C-A}, P)} \right) \right]^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{X(T_{C-A}, P)}{D \cdot W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A})} \right) \left(\frac{W_0 \cdot (-\rho_{mel-liq}(T_{C-A})) \cdot \alpha}{X(T_{C-A}, P)} - \frac{W_0 \cdot \rho_{mel-liq}(T_{C-A}) \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\ln(P)}}{X(T_{C-A}, P)^2} \right) \quad (A.9. 10)$$

Remplazando la ecuación de Clapeyron se tiene:

$$\frac{\Delta H_{fg}}{R \cdot T_{C-A}^2} = -\frac{1}{T_{C-A}^2} \left[\left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right]^{1/n} - \frac{\alpha}{n \cdot T_{C-A} \cdot D} \left[\left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right]^{\frac{1}{n}-1} - \left[\left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right]^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{\left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\ln(P)}}{n \cdot T_{C-A} \cdot D \cdot X(T_{C-A}, P)} \right) \quad (A.9. 11)$$

Realizando algunos artificios matemáticos se tiene:

$$\Delta H_{fg} + R \cdot T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) + \frac{\alpha \cdot R \cdot T_{C-A}}{n \cdot D} \left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^{1-n} = - \left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^{1-n} \left(\frac{R \cdot T_{C-A} \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\ln(P)}}{n \cdot D \cdot X(T_{C-A}, P)} \right) \quad (A.9. 12)$$

Remplazando la ecuación del A.9.11 se tiene:

$$\Delta H_{ad/des} = - \left[T_{C-A} \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^{1-n} \left(\frac{R \cdot T_{C-A} \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\ln(P)}}{n \cdot D \cdot X(T_{C-A}, P)} \right) \quad (A.9. 13)$$

$$\Delta H_{ad/des} = -T_{C-A}^{1-n} \left(\ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right)^{1-n} \left(\frac{R \cdot T_{C-A} \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\ln(P)}}{n \cdot D \cdot X(T_{C-A}, P)} \right) \quad (A.9. 14)$$

Despejando la derivada de la concentración con respecto a la temperatura se tiene:

$$\Delta H_{ad/des} = - \left(\frac{T_{C-A}}{T_{C-A}^n} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)^{1-n} \left(\frac{R \cdot T_{C-A} \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\ln(P)}}{n \cdot D \cdot X(T_{C-A}, P)} \right) \quad (A.8 15)$$

$$\frac{(-\Delta H_{ad/des}) \cdot T_{C-A}^n \cdot n \cdot D \cdot X(T_{C-A}, P)}{R \cdot T_{C-A}^2 \cdot \ln\left(\frac{P_{sat}}{P}\right)^{1-n}} = \left(\frac{\partial X}{\partial T}\right)_{\ln(P)} \quad (\text{A.9. 16})$$

$$\frac{(-\Delta H_{ad/des}) \cdot T_{C-A}^n \cdot n \cdot D \cdot X(T_{C-A}, P) \cdot \ln\left(\frac{P_{sat}}{P}\right)^{n-1}}{R \cdot T_{C-A}^2} = \left(\frac{\partial X}{\partial T}\right)_{\ln(P)} \quad (\text{A.9. 17})$$

Remplazando de la ecuación A.9.8 en A.9.17 se tiene:

$$\frac{-\Delta H_{ad/des} \cdot g}{R \cdot T_{C-A}^2} = \left(\frac{\partial X}{\partial T}\right)_{\ln(P)} \quad (\text{A.9. 18})$$

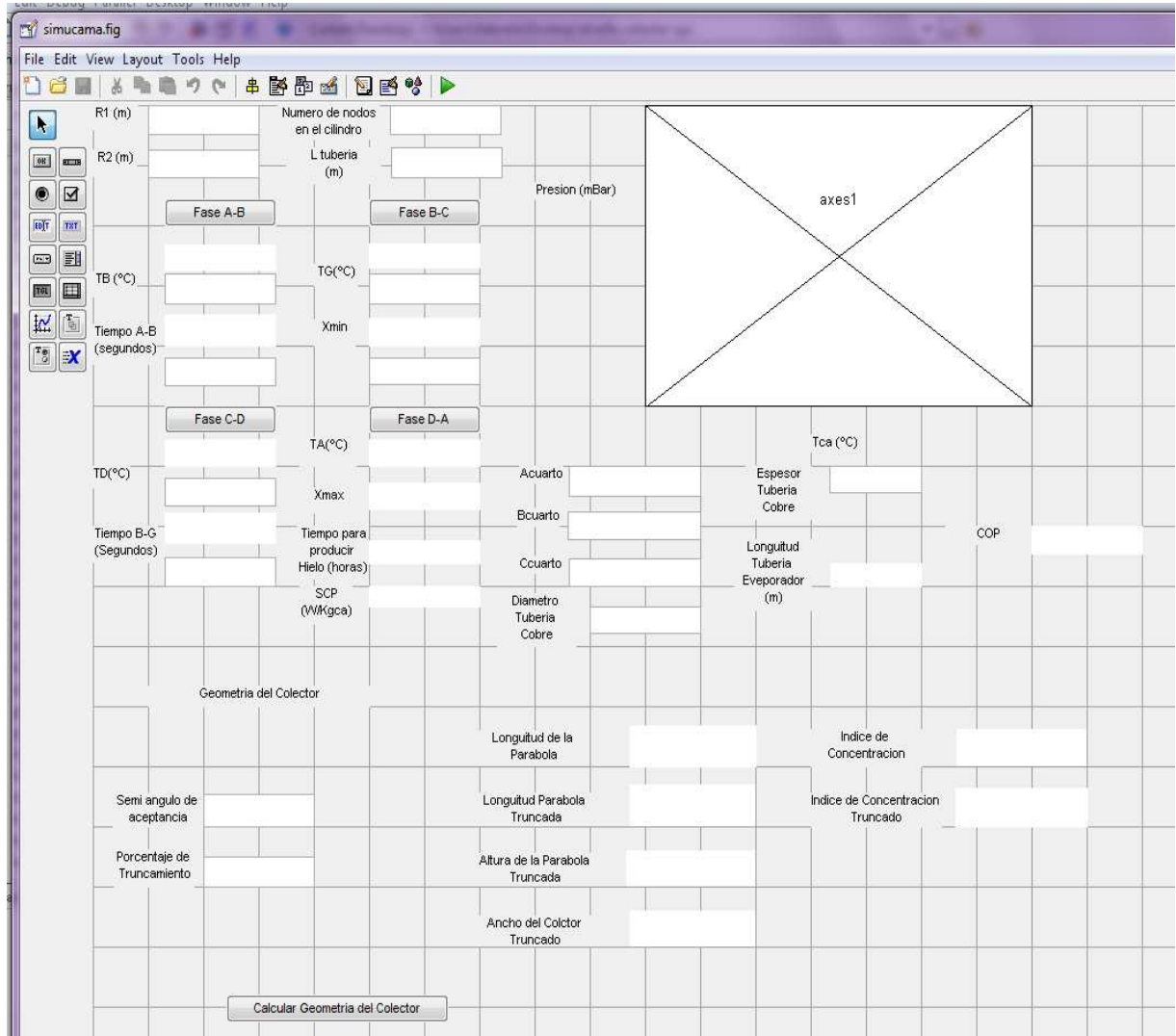
Remplazando la ecuación A.9.19 y A.9.9 en A.9.1 se tiene:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{-\Delta H_{ad/des} \cdot b}{R \cdot T_{C-A}^2} \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t}\right) + g \left(\frac{\partial \ln P}{\partial t}\right) \quad (\text{A.9. 19})$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = g \left(\frac{\partial \ln P}{\partial t} - \left(\frac{\Delta H_{ad/des}}{R \cdot T_{C-A}^2} \right) \left(\frac{\partial T_{C-A}}{\partial t} \right) \right) \quad (\text{A.9. 20})$$

ANEXO X: PROGRAMACIÓN REALIZADA EN MATLAB 7.7

DISEÑO DE LA PANTALLA DEL PROGRAMA



PANTALLA DEL PROGRAMA

PROGRAMACIÓN REALIZADA EN MATLAB 7.7

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pc L
m=1;
L=handles.edit10;
R1=handles.edit2;
R2=handles.edit1;
nnodos=handles.edit5;
x=linspace(R1,R2,nnodos);
t=linspace(28800,36000,7201);
sol = pdepe(m,@ecuapdel,@inicialic1,@borde2bc1,x,t);
u = sol(:, :, 1);
Psat1=exp(18.67-(3473./(u+273))-167800./(u+273).^2);
D=3.48e-4;
TA=20+273;
Dmetliq=(2.288/(0.2685^(1+(1-(TA)/512.64)^0.2453)))*32.042;
```

```

Dmetliq1=(2.288./(0.2685.^(1+(1-(u+273)./512.64).^0.2453))).*32.042;
Wo=0.137;
Xo=Wo*Dmetliq/1000;
n=1.18;
Te=-10+273;
Pe=exp(18.67-3473/Te-167800/Te^2);
Psat=exp(18.67-3473/TA-167800/TA^2);
Xmax=Xo*exp(-D*(TA*log(Psat/Pe))^n);
Xol=Wo*Dmetliq1/1000;
Tc=20+273;
Pc=exp(18.67-3473/Tc-167800/Tc^2);
P=exp((log(Psat1)-((log(Xol/Xmax)./D).^(1/n))./(u+273))));
i=0;
j=0;
for i=0:1:7199
    i=i+1;
    for j=0:1:(nnodos-1)
        j=j+1;
        if P(i,j)<=Pc
            a=u(i,j);
            i;
            P(i,j);
            semilogy(u(i,j),P(i,j))
            set(handles.text3,'string',a)
            set(handles.text5,'String',i)
        hold on
    end
end

end

figure;
surf(x,t,u);
title('Cambio de temperatura con respecto al tiempo y al radio');
xlabel('Radio (m)');
ylabel('Tiempo (seg)');
zlabel('Temperatura CA (°C)');
figure;
plot(t,P)
title('Simulacion');
xlabel('Tiempo (seg)');
ylabel('Presión (mBar)');

function [c,f,s] = ecuapdel(x,t,u,DuDx)
Dca=666.67;
Cpca=800;
D=3.48e-4;
TA=20+273;
Dmetliq=(2.288/(0.2685^(1+(1-(TA)/512.64)^0.2453)))*32.042;
Wo=0.137;
Xo=Wo*Dmetliq/1000;
n=1.18;
Te=-10+273;
Cpmet=(105800-362.223*(u+273)+0.93790*(u+273)^2)/32.04;
Pe=exp(18.67-3473/Te-167800/Te^2);
Psat=exp(18.67-3473/TA-167800/TA^2);
Xmax=Xo*exp(-D*(TA*log(Psat/Pe))^n);
Kca=0.79;

```

```

c = Dca*Cpca+Dca*Xmax*Cpmet;
f = Kca*DuDx;
s = 0;
function u0 = inicialic1(x)
u0 = 20;

function [pl,ql,pr,qr] = borde2bc1(xl,ul,xr,ur,t)
global gct Wt Ct Ht longparabolat r
%calculo de la radiacion que incide sobre el absorbedor
L=1;
N=75; %numero de dia del año, 16 de marzo
La=0; %latitud
Si=5; %inclinacion
v=0; %angulo de orientacion del acimut
H=t/3600; %hora del dia
%calculo angulo de declinacion
decl=360*(284+N)/365;
declr=decl*pi/180;
d=23.45*sin(declr);
%calculo angulo horario
Wo=15*(H-12);
%conversion de grados a radianes
Lr=La*pi/180;
Sr=Si*pi/180;
vr=v*pi/180;
dr=d*pi/180;
Wr=Wo*pi/180;
tetasol=acos(sin(dr)*sin(Lr)*cos(Sr)-
sin(dr)*cos(Lr)*sin(Sr)*cos(vr)+cos(dr)*cos(Lr)*cos(Sr)*cos(Wr)+cos(dr)*s
in(Lr)*sin(Sr)*cos(Wr)*cos(vr)+cos(dr)*sin(Sr)*sin(vr)*sin(Wr));
tetasolz=acos(cos(dr)*cos(Lr)*cos(Wr)+sin(dr)*sin(Lr)); %superficie
horizontal
costetasolz=cos(tetasolz);
vs=asin(sin(Wr)*cos(dr)/sin(tetasolz)); %azimut solar

%RADIACION HORARIA A PARTIR DATOS MENSUALES
Ws=acos(-tan(Lr)*tan(dr));
%collares-pereira-rabl
RRAD=pi/24*(cos(Wr)-cos(Ws))/(sin(Ws)-Ws*cos(Ws));

%calculo de la radiacion incidente perpendicular
Idpt=3040; %radiacion diaria directa promedio
Idfpt=2465; %radiacion diaria difusa promedio
Idp=Idpt*RRAD;
Idfp=Idfpt*RRAD;

%orientacion y calculo de la energia recibida
%orientación E-O (sin rastreamiento)
B1=Sr-gct;
B2=Sr+gct;
B3=atan(tan(tetasolz)*cos(vs));
if B3>=B1&B3<=B2;
FD1=1;
else FD1=0;
end
if B2<(pi/2);
FDf1=(1/Ct);
else
FDf1=(1/Ct+cos(Sr))*(1/2);

```

```

end
Id1=Idp*cos(tetasol)*FD1;
Idf1=Idfp*FDf1;
I1=Id1+Idf1;
%no se considera radiacion reflejada del suelo

%orientacion N-S (con rastreamiento)
K21=((cos(tetasolz))^2+(cos(dr))^2*(sin(Wr))^2)^0.5;
tetasol4=acos(K21);
tetasol=tetasol4;
FD4=1;
if vs>0
    vr=(pi/2);
else
    vr=-(pi/2); %acimut superficie
end
Sr4=atan(tan(tetasolz)*abs(cos(vr-vs))); %Inclinacion en radianes
Sr=Sr4;
if B2<(pi/2)
    FDF4=(1/Ct);
else
    FDF4=(1/Ct+cos(Sr4))*(1/2);
end
Id4=Idp*cos(tetasol4)*FD4;
Idf4=Idfp*FDf4;
I4=Id4+Idf4;

%calculo de la transferencia de calor dentro del colector solar

Gb=5.670E-8; %constante de Stefan Boltzman
Ec=0.90; %emisividad cubierta %tomado kreith vidrio
Ea=0.98; %emisividad absorbedor incropera pintura negra
Er=0.18; %emisividad reflector kreith acero inoxidable pulido
Eai=0.87; %emisividad del aislante fibra de vidrio kreith
Fac=0.5; %Factor de forma absorbedor cubierta pdf cilindro sup. plana
Far=1; %Factor de forma absorbedor reflector tubos concentricos kreith
Frc=1; %Factor de forma reflector - cubierta no hay informacion
ai=0.05; %longitud del aislante
V=1; %velocidad del viento

Ac=L*Wt; %area cubierta
Ar=longparabolat*L; %area reflector
Aa=2*pi*r*L; %area absorbedor
Ae1=(ai+Ht+2*r)*L; %area aislante vertical
Ae2=(2*ai+Wt)*L; %area aislante horizontal
Ae=2*Ae1+Ae2; %area del aislante
Tamb=20;
Tam=Tamb+273; %temperatura del ambiente
%temperaturas supuestas
Ta=Tam+10; %temperatura ambiente
Tr=Tam+9; %temperatura reflector
reflect=0.88; %reflectancia del reflector acero inoxi ESPOL
nr=1-1/Ct; %numero de reflexiones C=2 tomado Duffie-Rabl
Tranr=reflect^nr; %transmitancia del reflector
Tranc=0.78; %transmitancia de la cubierta tomado cengel (6mm espesor)
alfa=0.94; %absorbancia absorbedor pintura tesis inoxi pulido cengel
Iglobal=I1;
S=(Iglobal*Ac)*Tranc*Tranr*alfa;
e=2.7182818;

```

```

espt=0.0015; %espesor del tubo (m)
Vt=pi*L*(r^2-(r-espt)^2); %volumen del tubo (m3)
dentubo=7900; %densidad del tubo (kg/m3)
mtubo=Vt*dentubo; %masa del tubo (kg)
Cptubo=477; %calor especifico tubo (J/(kg*K))
Ac=L*Wt; %area cubierta
Tam1=20+273;
%calculo temperatura calentamiento
Req3=0.3887;
A31=-Req3*mtubo*Cptubo;
Ta=Tam1+Req3*S*(1-e^(t/A31));
Tw=Ta-273;
Kca=0.79;
h=15.1;
pl = 0;
ql = 1;
pr = -h*(Tw-ur);
qr = Kca;

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
global TB Tc Pc L
Tc=20+273;
Pc=exp(18.67-3473/Tc-167800/Tc^2);
m=1;
R1=handles.edit2;
R2=handles.edit1;
nnodos=handles.edit5;
tinicial=handles.edit4;
TB=handles.edit3;
x=linspace(R1,R2,nnodos);
t=linspace(tinicial+28800,43000,10474);
sol = pdepe(m,@ecuapde2,@inicialic2,@borde2bc2,x,t);
u = sol(:,:,1);
D=3.48e-4;
Wo=0.137;
Dmetliq1=(2.288./(0.2685.^(1+(1-(u+273)./512.64).^0.2453))).*32.042;
Xol=Wo*Dmetliq1/1000;
n=1.18;
Psat2=exp(18.67-3473./(u+273)-167800./(u+273).^2);
Xcal=Xol.*exp(-D.*((u+273).*log(Psat2/Pc)).^n);

Dca=666.67;
L=handles.edit10;
mca=3.5196; %Kg
Dpc=Pc.*u./u;
    semilogy(u,Dpc)

i=0;
j=0;
for i=0:1:10472
    i=i+1;
    for j=0:1:(nnodos-1)
        j=j+1;
        a=u(i,j);
        i;
        Dk=Xcal(i,j);

        set(handles.text8,'string',a)
        set(handles.text9,'String',Dk)
    end
end

```

```

end
end
D=3.48e-4;
Wo=0.137;
n=1.18;
Te=-10+273;
TA=20+273;
Dmetliq=(2.288/(0.2685^(1+(1-(TA)/512.64)^0.2453)))*32.042;
Xo=Dmetliq*Wo/1000;
Pe=exp(18.67-3473/Te-167800/Te^2);
Psat=exp(18.67-3473/TA-167800/TA^2);
Xmax=Xo*exp(-D*(TA*log(Psat/Pe))^n);
fmcond=mca*(Xmax-Dk);
Cpmetvap=(19+0.09152.*(u+273)-0.0000122.*(u+273).^2-
0.000000008039.*(u+273).^3)*1000/32.042;
LTc=1200000;
Q=fmcond.*(-LTc+Cpmetvap.*(Tc-u-273));
%propiedades evaluadas a 70.0515 °C
hairecond=1.65/0.17612; %w/m^2K
dengas=0.1592; %kg/m^3
denliq=742.726; %kg/m^3
gravedad=9.8; %m/seg^2
kliqmet=0.18744; %w/mk
Cpliomet=2812.33; %j/kgk
uliqmet=307.7; %Pa seg
Tsupcond=(u+Tc+273)./2;
hfgcorre=LTc+3.*Cpliomet.*(Tsupcond-Tc)./8;
Dextecond=handles.edit15;
espesortuberia=handles.edit16;
Dinteriorcond=Dextecond-espesortuberia;
hmet=0.555.*(((9.8.*denliq.*(denliq-
dengas).*kliqmet^3.*hfgcorre)./(uliqmet.*(Tsupcond-
Tc).*Dinteriorcond)).^(1/4));
Ucond=1./(1./hairecond+1./hmet);
Dtmlcond=((120.103+273-Tc)-1)./log((120.103+273-Tc)./1);
Ltubcond=(Q./(Ucond.*3.1416.*Dtmlcond.*Dinteriorcond))./3600;
figure;
plot(u,-Ltubcond)
title('Temperatura de la cama Vs Longitud del condensador ');
xlabel('Temperatura de la cama (°C)');
ylabel('Longitud de la tubería del condensador (m)');
figure;
surf(x,t,u);
title('Cambio de temperatura con respecto al tiempo y al radio');
xlabel('Radio');
ylabel('Tiempo');
zlabel('Temperatura CA');
figure;
plot(t,Xcal)
title('Simulacion');
xlabel('Tiempo Segundos');
ylabel('X(kg met/kg C-A)');
grid
figure;
plot(t,-Q)
title('Simulacion');
xlabel('Tiempo Segundos');
ylabel('Calor del condensador (J)');
grid

```

```

function [c,f,s] = ecuapde2(x,t,u,DuDx)
global Tc Pc
Dca=666.67;
Cpca=800;
D=3.48e-4;
Wo=0.137;
Dmetliq=(2.288/(0.2685^(1+(1-(u+273)/512.64)^0.2453)))*32.042;
Xo=Wo*Dmetliq/1000;
n=1.18;
Cpmet=(105800-362.223*(u+273)+0.93790*(u+273)^2)/32.04;
Kca=0.79;
CDC=0.00149;
R=8.314472; %J/(mol*K)
Psat2=exp(18.67-3473/(u+273)-167800/(u+273)^2);
Lfg=1200000; %J/Kg
Pmca=32.04;
H=Lfg+R*Pmca*(u+273)*log(Psat2/Pc)+R*Pmca*(u+273)*CDC*((u+273)*log(Psat2/Pc))^(1-n))/(n*D);
Xca=Xo*exp(-D*((u+273)*log(Psat2/Pc))^n);
b=Xca*n*D*log(Psat2/Pc)^(n-1)*(u+273)^n;
c = Dca*Cpca+Dca*Xca*Cpmet+b*Dca*H^2/(R*Pmca*(u+273)^2);
f = Kca*DuDx;
s = 0;

```

```

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global TG Xmin L
Xmin=handles.edit7;
TG=handles.edit6;
m=1;
R1=handles.edit2;
R2=handles.edit1;
nnodos=handles.edit5;
x=linspace(R1,R2,nnodos);
t=linspace(0,1500,1501);
sol = pdepe(m,@ecuapde3,@inicialic3,@borde2bc3,x,t);
u = sol(:,:,1);
Psat1=exp(18.67-(3473./(u+273))-167800./(u+273).^2);
D=3.48e-4;
Wo=0.137;
Dmetliq=(2.288./(0.2685^(1+(1-(u+273)./512.64).^0.2453)))*32.042;
Xo=Wo*Dmetliq/1000;
n=1.18;
Te=-10+273;
Pe=exp(18.67-3473/Te-167800/Te^2);
Tc=20+273;
Pc=exp(18.67-3473/Tc-167800/Tc^2);
P=exp((log(Psat1)-((log(Xo./Xmin)./D).^(1/n))./(u+273))));
i=0;
j=0;
for i=0:1:1199
    i=i+1;
    for j=0:1:(nnodos-1)
        j=j+1;
        if P(i,j)>=Pe
            a=u(i,j);
            i;
            P(i,j);
            semilogy(u(i,j),P(i,j))
            set(handles.text12,'string',u(i,j))
            set(handles.text13,'String',i)

```



```

        hold on
        end
        end

end

figure;
surf(x,t,u);
title('Cambio de temperatura con respecto al tiempo y al radio');
xlabel('Radio');
ylabel('Tiempo');
zlabel('Temperatura CA');
figure;
plot(t,P)
title('Simulacion');
xlabel('Tiempo (seg)');
ylabel('Presión (mBar)');
grid

function [c,f,s] = ecuapde3(x,t,u,DuDx)
global Xmin
Xmin;
Dca=666.67;
Cpca=800;
Cpmet=(105800-362.223*(u+273)+0.93790*(u+273)^2)/32.04;
Kca=0.79;
c = Dca*Cpca+Dca*Xmin*Cpmet;
f = Kca*DuDx;
s = 0;

function u0 = inicialic3(x)
global TG
u0 = TG;

function [pl,ql,pr,qr] = borde2bc3(xl,ul,xr,ur,t)
global TG r L
L;
e=2.7182818;
espt=0.0015; %espesor del tubo (m)
Vt=pi*L*(r^2-(r-espt)^2); %volumen del tubo (m3)
dentubo=7900; %densidad del tubo (kg/m3)
mtubo=Vt*dentubo; %masa del tubo (kg)
Cptubo=477; %calor especifico tubo (J/(kg*K))

%Calculo temperatura enfriamiento
Tam2=20+273;
Req2=0.66;
Tain=TG+273; %temperatura inicial del enfriamiento
A30=-Req2*mtubo*Cptubo;
Ta=Tam2+e^(t/A30+log(Tain-Tam2));
Tw=Ta-273;
Kca=0.79;
h=15.1;
pl = 0;
ql = 1;
pr = -h*(Tw-ur);
qr = Kca;

```

```

function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global TD Tc Pe L
Te=-10+273;
Pe=exp(18.67-3473/Te-167800/Te^2);
m=1;
R1=handles.edit2;
R2=handles.edit1;
nnodos=handles.edit5;
tinicial=handles.edit9;
TD=handles.edit8;
x=linspace(R1,R2,nnodos);
t=linspace(tinicial,8600,8601);
sol = pdepe(m,@ecuapde4,@inicialic4,@borde2bc4,x,t);
u = sol(:,:,1);
D=3.48e-4;
Wo=0.137;
Dmetliq1=(2.288./((0.2685.^(1+(1-(u+273)./512.64).^0.2453))))*32.042;
Xol=Wo.*Dmetliq1./1000;
n=1.18;
Psat3=exp(18.67-3473./(u+273)-167800./(u+273).^2);
Xcal=Xol.*exp(-D.*((u+273).*log(Psat3./Pe)).^n);
Dpc=Pe.*u./u;
semilogy(u,Dpc)

%calculo de la carga del cuarto frío
%Calor de perdidas
Acuarto=handles.edit11;
Bcuarto=handles.edit12;
Ccuarto=handles.edit13;
AparedAB=2*Acuarto*Bcuarto;
AparedAC=2*Acuarto*Ccuarto;
AparedBC=2*Bcuarto*Ccuarto;
%Interior de la camara fria se considero aire tranquilo y sus exteriores
%y la velocidad promedio de los exteriores estara a 7.5mph
%Tomado de la Ashrae
haireext=4/0.17612; %w/m^2*k
haireint=1.65/0.17612; %w/m^2*k
eplancha=0.003; %m
eaislante=0.05; %m
kaislante=0.022/0.17612; %w/m^2*k
kplancha=0.040; %w/m*k
Ucuarto=1/(1/haireint+2*eplancha/kplancha+eaislante/kaislante+1/haireext)
;
Tcuarto=273.15; %K
Tambiente=293.15;%K
Dtempera=(Tambiente-Tcuarto);
QperdidaAB=Ucuarto*AparedAB*Dtempera;
QperdidaAC=Ucuarto*AparedAC*Dtempera;
QperdidaBC=Ucuarto*AparedBC*Dtempera;
Factordeseguridad=0.10;
Qperdidas=(QperdidaAB+QperdidaBC+QperdidaAC)*0.1+(QperdidaAB+QperdidaBC+Q
perdidaAC);

%Calculo del tiempo de estabilizacion del Aguay calculo del calor del
%producto
D=3.48e-4;
Wo=0.137;
n=1.18;
TA=20+273;
Dmetliq=(2.288/((0.2685^(1+(1-(TA)/512.64)^0.2453))))*32.042;

```

```

Xo=Wo*Dmetliq/1000;
Psat=exp(18.67-3473/TA-167800/TA^2);
Xmax=Xo*exp(-D*(TA*log(Psat/Pe))^n);
Xmin123=handles.edit7;
Dca=500;
L=handles.edit10;
mca=3.5196;
LTe=1200000;
    fMevp=mca*(Xmax-Xmin123)/(7200);
    magua=0.25;
    Qe=fMevp*(LTe-2500*(-20-273+Te));
    Cpagua=4180;
    DTagua=20;
    hif=333700; %J/kg
    Qagua=magua*hif+magua*Cpagua*DTagua;
    maire=Acuarto*Bcuarto*Ccuarto*1.225;
    Cpaire=1007;
    Dtaire=30;
    Qaire=maire*Cpaire*Dtaire;

    testa=(Qaire+Qagua)/((Qe-Qperdidas)*3600);
    SCP=Qe/mca;
    set(handles.text28,'string',SCP)
    set(handles.text25,'string',testa)
%Calculo de los coeficientes de transferencia de calor por conveccion del
% el metanol...

%se va a considerar como tuberia horizontal
Tsuperficie=(293+263.15)/2;
Dexteev=handles.edit15;
espesortuberia=handles.edit16;
Dinteriorev=Dexteev-espesortuberia;

%Para el metanol Tenemos
Pesomolemet=32; %g/mol
Cpmetliq=2487.33; %J/(kgk)
Denliq=819.068;%J/kg
uliq=0.00081485; %Kg/mseg
kliq=0.2192; %W/mK
Prliq=9.48;
Tsupliq= 0.0768;%N/m %tension superficial del metanol
Rgas= 83.14472; %LitromBar/mol k
Denvapor=Pe*Pesomolemet/(Rgas*Te); %kg/m^3
Csf= 0.0130; %coeficiente superficial (los resultados son muy sensibles
a este parámetro.
%Sería mejor si se tuberia datos propios de ebullicion del metanol en
cobre. en vez de este
%dato tomares el Csf para cobre en agua
nhev=1.7; % n=1 para agua, n=1.7 para todos los demas fluidos
%calculo Delta Tx
gravedad=9.8;
DTx=(Tsuperficie-Te);
gcc=1;
qh=(Cpmetliq*DTx/(Csf*LTe*Prliq))^3*uliq*LTe*(gravedad*(Denliq-
Denvapor)/(Tsupliq*gcc))^(1/2);%W/m^2
hcammet=qh/DTx;
qhmax=(3.1416*Denvapor^(1/2)*LTe*(Tsupliq*gravedad*(Denliq-
Denvapor))^(1/4))/24;
if qhmax>qh

```

```

Raire=1/(haireint*3.1416*Dexteev);
Rmetev=1/(hcammet*3.1416*Dinteriorev);
Rtotal=Raire+Rmetev;
Utotal=1/(Rtotal*3.1416*Dexteev);
DTml=((293-Te)-(273-Te))/log((293-Te)/(273-Te));
Aev=Qe/(Utotal*DTml);
LTubeev=Aev/(3.1416*Dexteev);
set(handles.text35,'string',LTubeev)
end
i=0;
j=0;
for i=0:1:8599
    i=i+1;
    for j=0:1:(nnodos-1)
        j=j+1;
        a=u(i,j);
        i;
        Dk=Xcal(i,j);
        set(handles.text16,'string',a)
        set(handles.text17,'String',Dk)
    end
end

end

figure;
surf(x,t,u);
title('Cambio de temperatura con respecto al tiempo y al radio');
xlabel('Radio');
ylabel('Tiempo');
zlabel('Temperatura CA');
figure;
plot(t,Xcal)
title('Simulacion');
xlabel('Tiempo (Seg)');
ylabel('X (kg met/Kg C-A)');
grid
figure;
plot(t,Qe)
title('Calor de evaporador en el tiempo');
xlabel('Tiempo (Seg)');
ylabel('Calor de evaporador(w)');
grid

function [pl,ql,pr,qr] = borde2bc4(xl,ul,xr,ur,t)
global TD r L
L;
e=2.7182818;
espt=0.0015; %espesor del tubo (m)
Vt=pi*L*(r^2-(r-espt)^2); %volumen del tubo (m3)
dentubo=7900; %densidad del tubo (kg/m3)
mtubo=Vt*dentubo; %masa del tubo (kg)
Cptubo=477; %calor especifico tubo (J/(kg*K))

%Calculo temperatura enfriamiento
Tam2=20+273;
Req2=0.66;
Tain=TD+273; %temperatura inicial del enfriamiento
A30=-Req2*mtubo*Cptubo;
Ta=Tam2+e^(t/A30+log(Tain-Tam2));

```

```

Tw=Ta-273;
Kca=0.79;
h=15.1;
pl = 0;
ql = 1;
pr = -h*(Tw-ur);
qr = Kca;

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
global gct Wt Ct Ht longparabolat r
%geometría del colector
r2=handles.edit1;%radio del tubo absorbedor %diametro dos pulgadas
r=r2;
g=handles.edit17; %semiángulo de aceptación en grados
gr=g*pi/180; %semiángulo de aceptación en radianes
C=1/sin(gr); %factor de concentración
rangol=gr+(pi/2); %limite de la evolvente
rango2=(1.5*pi)-gr; %limite de la parabola

xp=0; %iniciacion de las variables
yp=0;
dch3=0;

for teta2=0:(rango2*1000)%procedimiento para que teta tome mas valores
    teta=teta2/1000;
    if teta<rangol %parte de la evolvente
        x4=xp;
        y4=yp;
        p=r*teta;
        xp=r*sin(teta)-p*cos(teta);
        yp=-1*r*cos(teta)-p*sin(teta);
        xneg=-xp; %grafica del lado izquierdo
        dch=((x4-xp)^2+(y4-yp)^2)^0.5;
        dch3=dch3+dch;

        %parte de la parabola
        else p=r*(teta+gr+(pi/2)-cos(teta-gr))/(1+sin(teta-gr));
            x4=xp;
            y4=yp;
            xp=r*sin(teta)-p*cos(teta);
            yp=-1*r*cos(teta)-p*sin(teta);
            xneg=-xp; %grafica del lado izquierdo
            dch=((x4-xp)^2+(y4-yp)^2)^0.5;
            dch3=dch3+dch;
        end
    end

longparabola=(dch3-r)*2;

Hc=yp; %altura medida desde el centro
Wc=2*xp; %ancho del colector

%Truncamiento
teta3=rangol;
p6=r*teta3;
x6=r*sin(teta3)-p6*cos(teta3);%coordenadas del foco
y6=-1*r*cos(teta3)-p6*sin(teta3);

```

```

pt=handles.edit18; %porcentaje de truncamiento
Ht=pt*Hc; %altura truncada

xA=-xp; %punto A, punto ultimo del perfil
yA=Hc; %punto C, punto focal de la parabola
xC=x6;
yC=y6;

J5=xC-xA;
J6=((xA-xC)^2+(yA-yC)^2)^0.5;
gc=asin(J5/J6); %calculo del semiangulo de aceptancia calculado
gr=gr; %semiangulo de aceptancia en radianes

xB=xA; %punto B, punto de truncacion
yB=Ht;
J8=xC-xB;
J9=((xB-xC)^2+(yB-yC)^2)^0.5;
gct=asin(J8/J9); %semiangulo de aceptancia truncado radianes
gtrunc=gct*180/pi; %semiangulo de aceptancia truncado en grados
Ct=1/sin(gct); %factor de concentracion truncado
Rtrunc=(C-Ct)*100/C; %porcentaje perdida por truncamiento

xp=0; %iniciacion de las variables
yp=0;
dch7=0;

%calculo y grafico del perfil truncado
for teta2=0:(rango2*1000)%procedimiento para que teta tome mas valores
    teta=teta2/1000;
    if teta<rangol %parte de la evolvente
        x4=xp;
        y4=yp;
        p=r*teta;
        xp=r*sin(teta)-p*cos(teta);
        yp=-1*r*cos(teta)-p*sin(teta);

        if yp<=yB
            xneg=-xp; %grafica del lado izquierdo
            dch6=((x4-xp)^2+(y4-yp)^2)^0.5;
            dch7=dch7+dch6;
            end

        %parte de la parabola
        else p=r*(teta+gr+(pi/2)-cos(teta-gr))/(1+sin(teta-gr));
            x4=xp;
            y4=yp;
            xp=r*sin(teta)-p*cos(teta);
            yp=-1*r*cos(teta)-p*sin(teta);

            if yp<=yB
                xneg=-xp; %grafica del lado izquierdo
                dch6=((x4-xp)^2+(y4-yp)^2)^0.5;
                dch7=dch7+dch6;
                Wt2=xp;
                end
            end
        end
    end
end

```

ANEXO XI: FOTOS Y COSTOS DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN SOLAR CONSTRUIDO



ESTRUCTURA METÁLICA



SOPORTE DE MADERA



ACCESORIOS



TUBERÍA DE COBRE FLEXIBLE



CAJA TÉRMICA



TUBOS DE ACERO INOXIDABLE



PLACA PERFORADA



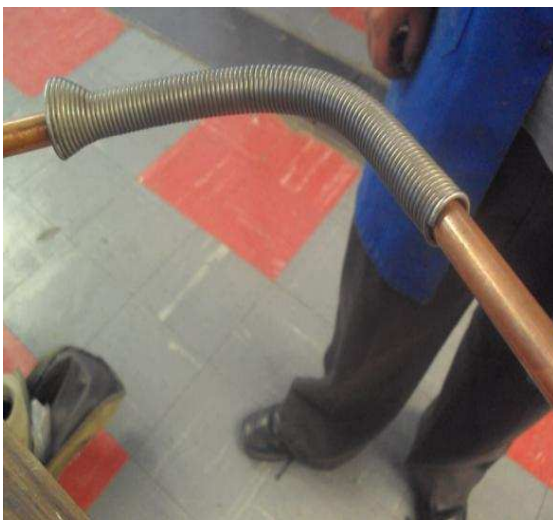
LANA DE VIDRIO



PLANCHA DE ACERO INOXIDABLE



CARBÓN ACTIVADO



DOBLADO DE TUBERÍA DE COBRE





CONDENSADOR



CAMA ADSORBEDORA



COLECTOR SOLAR



ENSAMBLE DE ACCESORIOS



EVAPORADOR

FOTOS DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN SOLAR



INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN



PIRANÓMETRO



SICROMETRO



TERMOMETRO DIGITAL



TARJETA DE ADQUISICIÓN Y LAPTOP



MULTÍMETRO

COSTOS DE FRABICACIÓN DEL EQUIPO

CANT.	DESCRIPCIÓN	COSTO (USD)
3	Silicon rojo 30 onz.	6
4	Ruedas 3 pulgadas 100 Kg	2.03
1	Plancha de acero inoxidable	46.61
1	Sellador 1/4 litro	5.5
1	Válvula de bola gas de media	27.5
2	Neplos polimex 1/2 por 10 cm	0.26
15	Tubo de cobre flexible 1/2	50.89
1	Teflon amarillo	0.45
1	Caja térmica Azul	45.54
1.32	Tubo inox 304L Sch 3 pulgadas	59.78
1.5	Tubo inox 304L SCH 40 1/2 pulgada	13.61
2	Ace. Inox Codo Rosc 90 NPT 1/2 pulgada	4.84
0.75	Ace. Inox Plancha retazo 4 mm	6.6
2	Ac inox Neplo roscado 1/2x100 SCH 40	6.9
0.2	Tubo inox 3004L SCH 40 1/2 pulgada	2.13
2	Papel aluminio	2.8
1	pintulax verde esmeralda	4.73
90	tornillos punta broca 1 por 8	1.6
2	broca titanium 2.5 mm	0.54
2	brocas titanium 4.5 mm	0.9
1	lija madera	0.14
1	lija para hierro	0.53
1	cinta ductos	5.09
3	conexiones CuMb 66 BR ½ por ½ macho	19.75
1	conexión CuMb 66 BR ½ por ½ hembra	5.68
5.5	Tubería de cobre Tipo k	25.14
3	neplo conexión B-122 1/2	8.49
2	bush HG 1/2 *1/4	0.58
2	TEE HG	0.7
1	boquilla mangera MRCFB-3 1/2 por 3/8	3.84
1	Estructura de madera	130
1	Electrodos E3018	25
1	Vidrio	25
TOTAL		539.315

COSTOS DE INSTRUMENTACIÓN

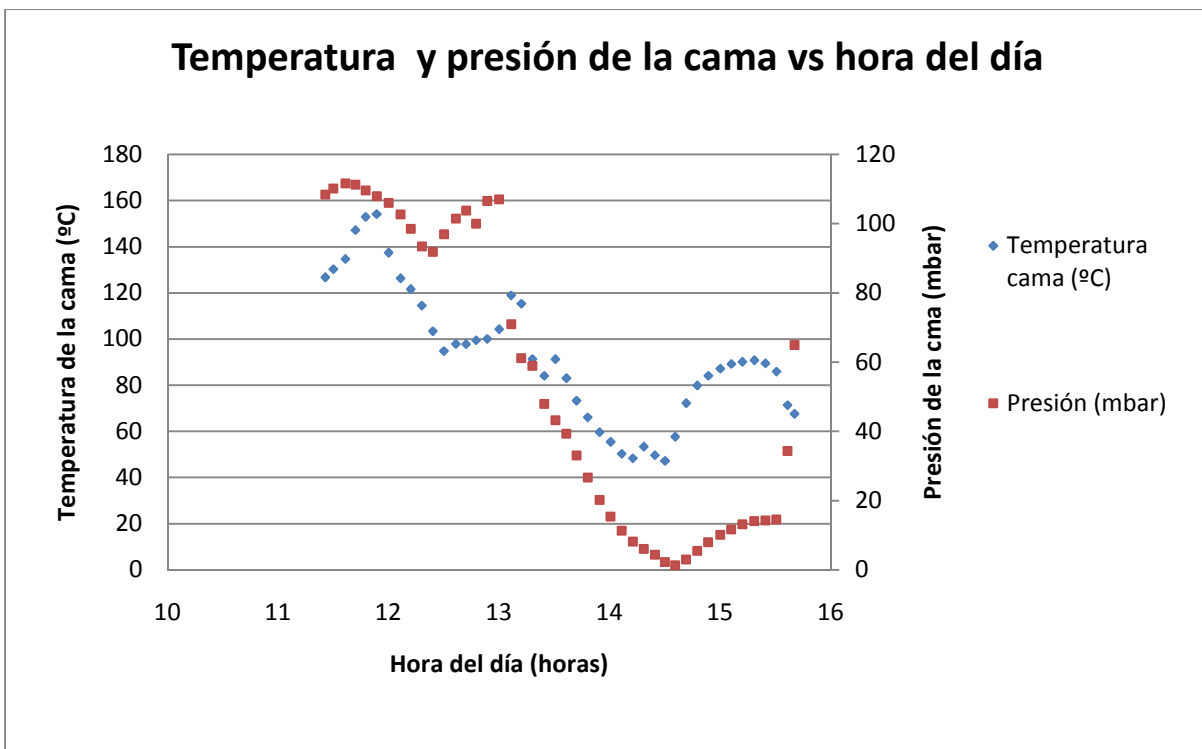
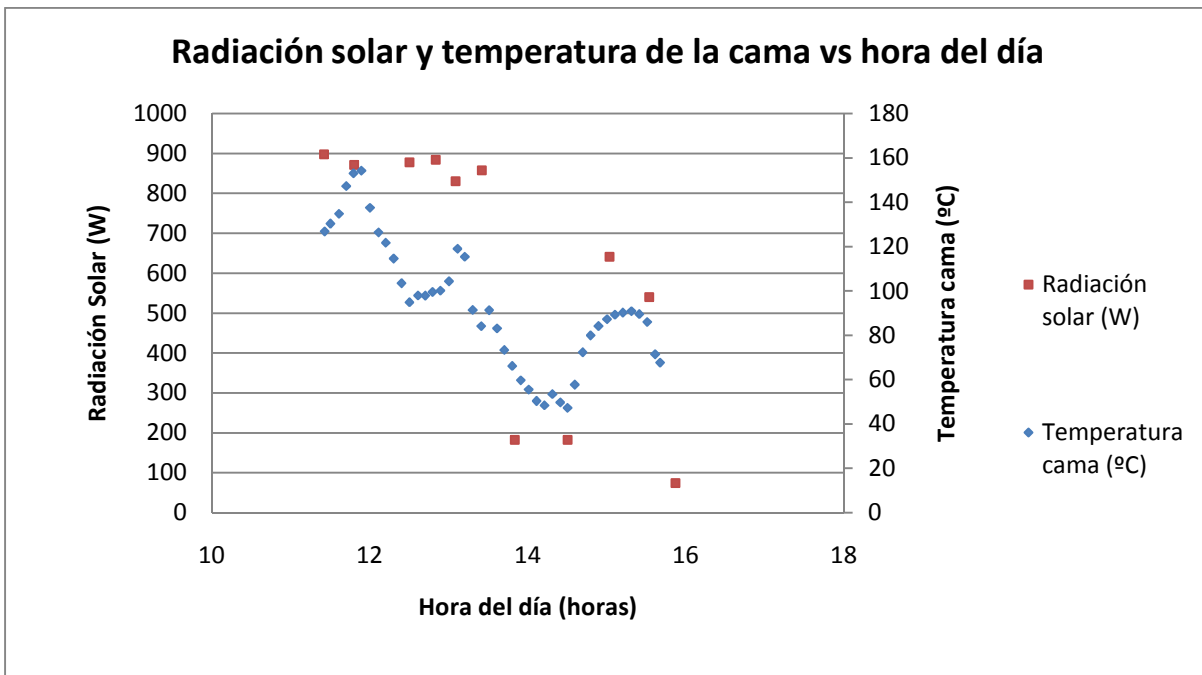
CANT.	DESCRIPCIÓN	COSTO (USD)
1	Kit Tarjeta de adquisición de datos USB 6009 y LabView Student Edition	409,92
1	Transmisor de presión de -1 a 5 Bar, 4-20mA.	188,16
1	Manómetro Reed con glicerina de 0-30 PSI	33,78
TOTAL		631.86

COSTO TOTAL 1171.18 USD

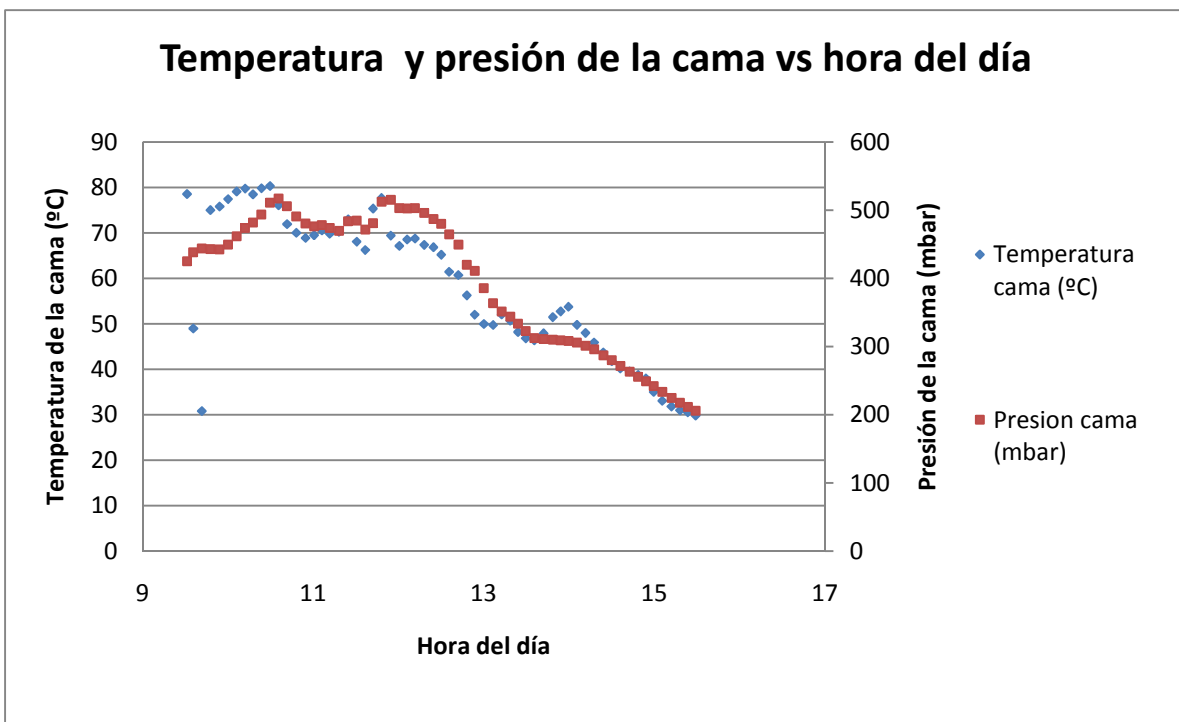
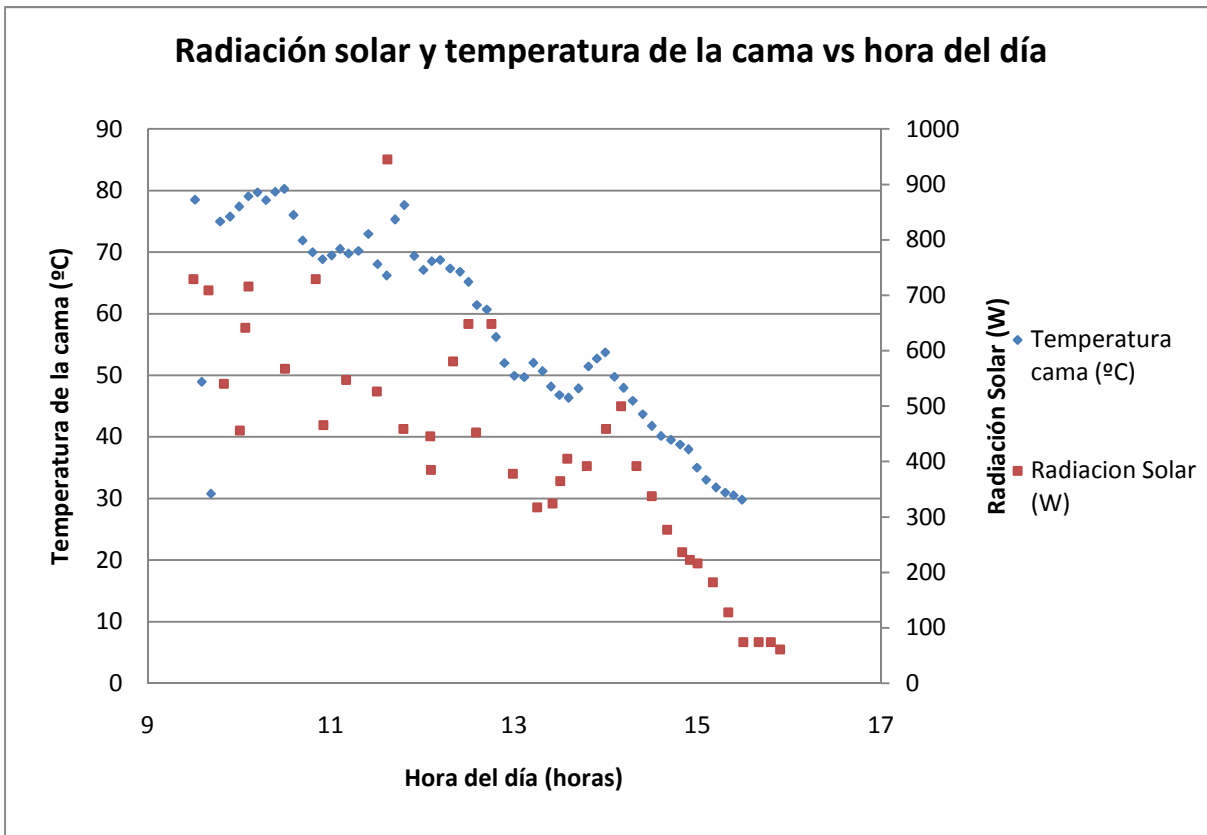
Hay que tomar en cuenta que el costo total del equipo no representa los valores de la mano de obra de la soldadura TIG ni la SMAW, el costo de la bomba de vacío, la lana de vidrio las termocuplas y la realización de las perforaciones de media por que nos colaboro el laboratorio de soldadura, fluidos, operaciones unitarias, termodinámica y máquinas herramientas.

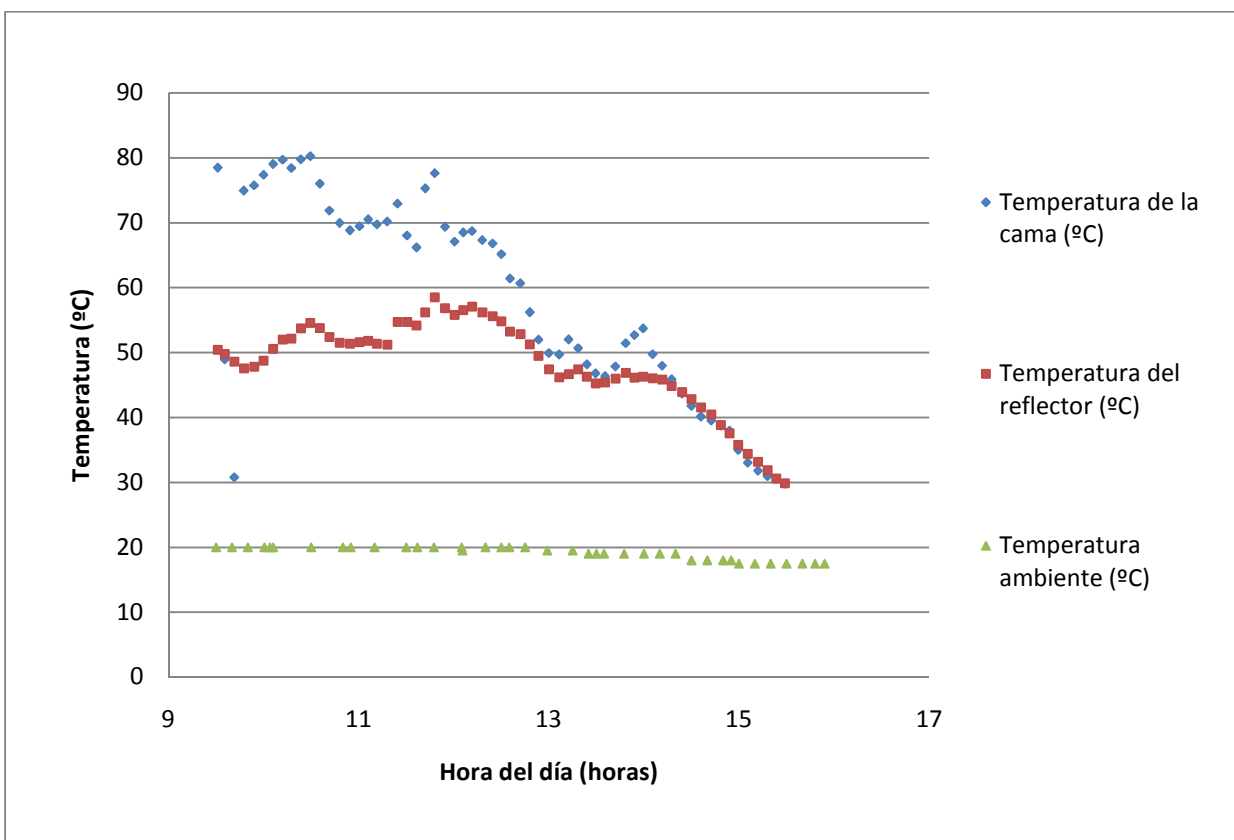
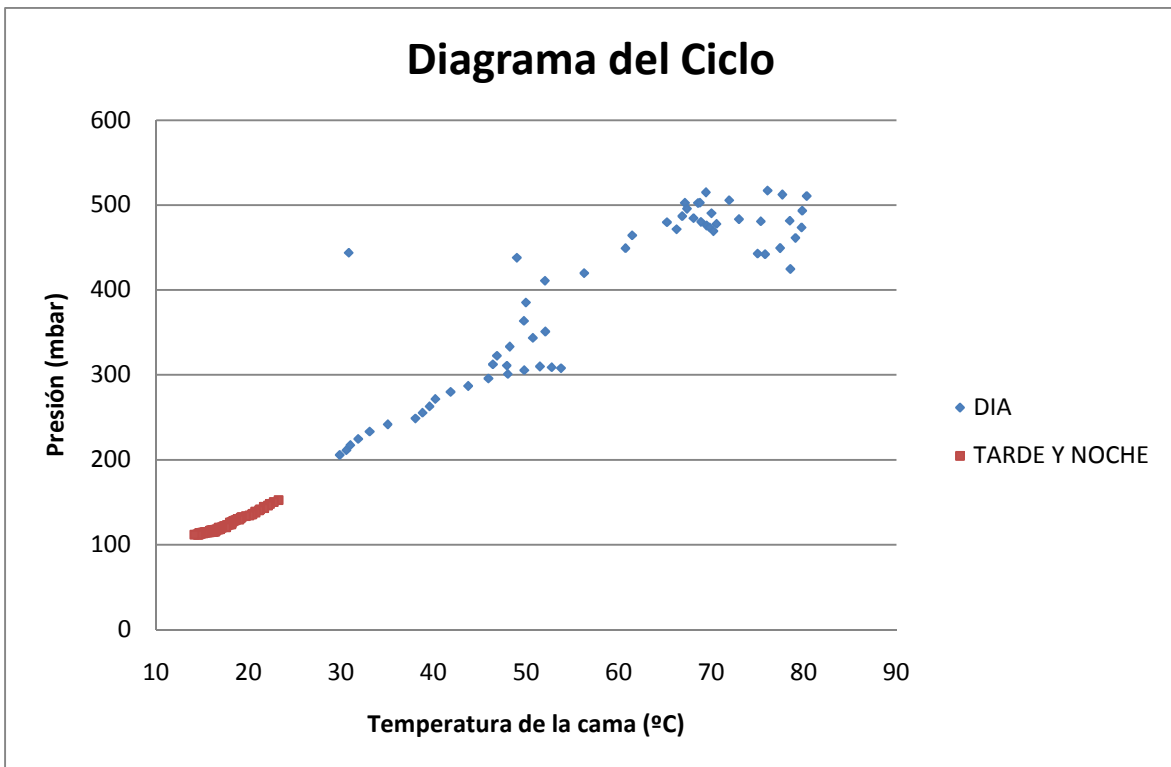
ANEXO XII: PRUEBAS REALIZADAS

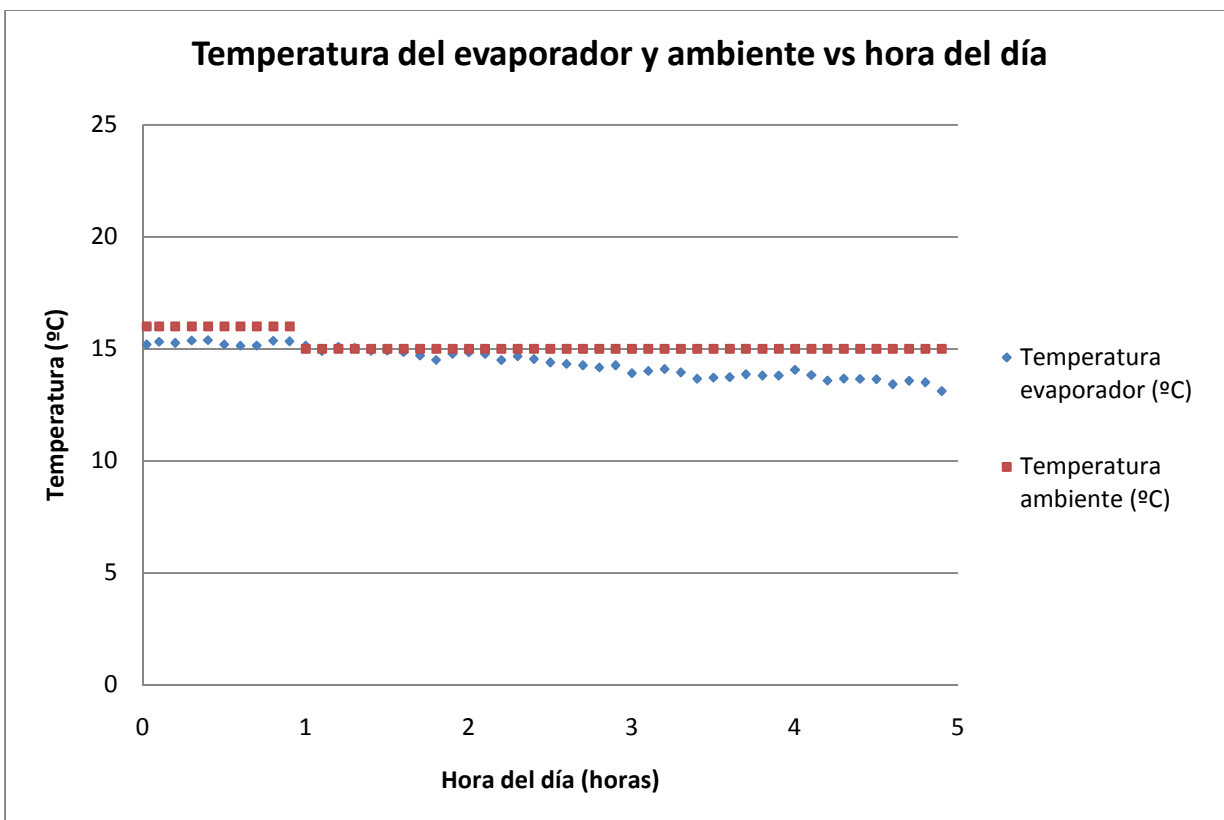
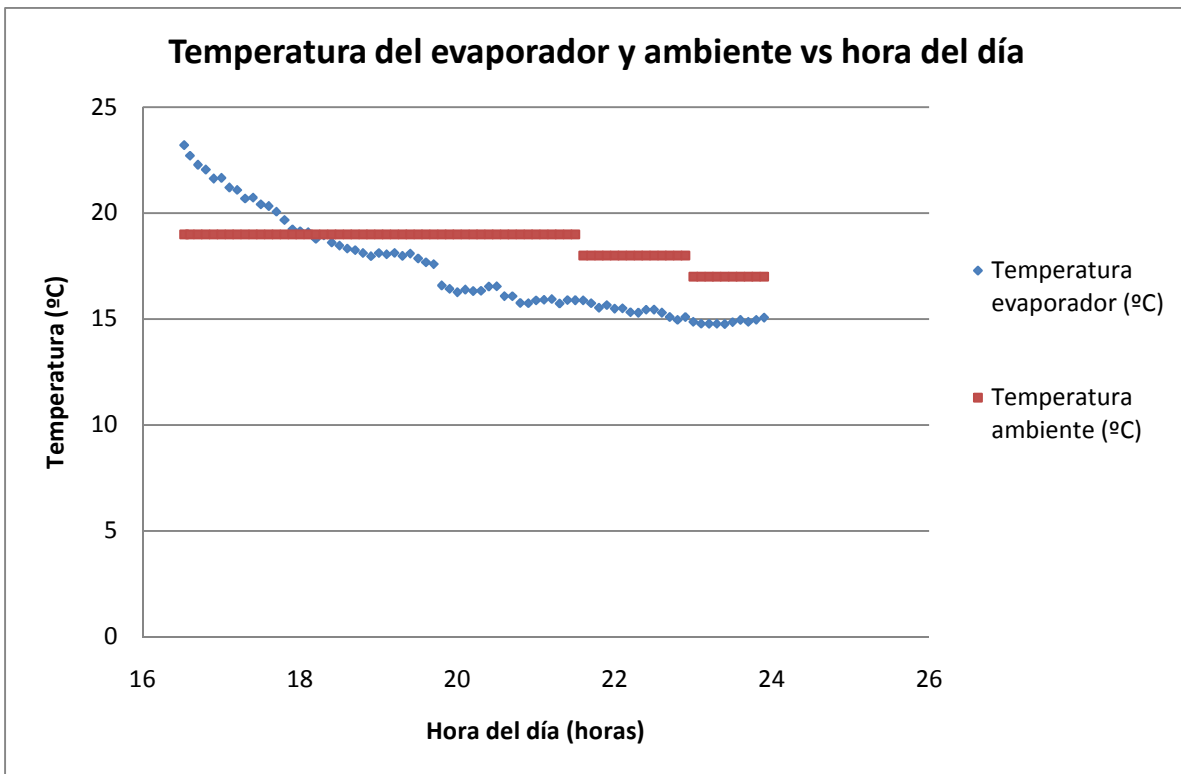
REGENERACIÓN DEL CARBÓN (25 DE MAYO DEL 2010)



CICLO DE REFRIGERACIÓN CON DÍA NUBLADO (31 DE MAYO)







ANEXO XIII: PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL METANOL SATURADO

Pressure, bar	Temp., K	$v_f, \text{m}^3/\text{kg}$	$v_g, \text{m}^3/\text{kg}$	$h_f, \text{kJ/kg}$	$h_g, \text{kJ/kg}$	$s_f, \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$s_g, \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$c_{pf}, \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$\mu_f, 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$k_f, \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Pr_f
$4 \times 10^{-6}^t$	175.6	0.001 057	1700000	0.0	1303.1	2.8114	10.2328				
0.1	288.4	0.001 257	7.309	261.0	1440.3	3.9383	8.0281	2.531	625	0.204	7.75
0.2	301.7	0.001 276	3.801	293.9	1455.4	4.0493	7.9032	2.554	525	0.196	6.84
0.5	320.7	0.001 307	1.599	345.0	1476.2	4.2117	7.7386	2.669	401	0.193	5.55
1.013	337.7	0.001 336	0.819	391.7	1492.1	4.3516	7.6104	2.777	329	0.189	4.83
1.5	348.0	0.001 356	0.5632	421.0	1500.3	4.4361	7.5379	2.845	288	0.186	4.41
2.0	356.0	0.001 371	0.4276	444.2	1505.8	4.5014	7.4836	2.894	268	0.184	4.22
2.5	362.5	0.001 385	0.3443	463.6	1509.8	4.5536	7.4398	2.946	242	0.182	3.92
3.0	368.0	0.001 396	0.2893	479.8	1512.4	4.5992	7.4051	2.984	227	0.181	3.74
4.0	377.1	0.001 417	0.2188	507.8	1515.9	4.6728	7.3474	3.050	204	0.179	3.48
5	384.5	0.001 434	0.17569	529.7	1517.4	4.7307	7.2992	3.117	187	0.178	3.27
6	390.8	0.001 450	0.14683	549.6	1518.4	4.7836	7.2624	3.176	174	0.177	3.12
8	401.3	0.001 479	0.11015	582.7	1518.0	4.8678	7.1988	3.265	156	0.175	2.91
10	409.8	0.001 504	0.08783	610.3	1516.1	4.9366	7.1471	3.349	141	0.173	2.73
15	426.3	0.001 560	0.05761	665.8	1507.9	5.0708	7.0461	3.540	117	0.171	2.42
20	438.9	0.001 611	0.04224	710.5	1553.8	5.1744	6.9677	3.72	102	0.169	2.25
25	449.3	0.001 666	0.03290	749.0	1486.4	5.2605	6.9017	3.91	92	0.167	2.15
30	458.2	0.001 710	0.02661	783.8	1474.7	5.3355	6.8435	4.12	84	0.165	2.10
40	472.9	0.001 814	0.01863	846.7	1450.1	5.4650	6.7409	4.67	72	0.160	2.10
50	484.9	0.001 934	0.01373	905.2	1423.2	5.5793	6.6475	5.55	63	0.154	2.27
60	495.1	0.002 086	0.01032	963.3	1391.8	5.6889	6.5543				
80	508.1	0.002 507	0.00642	1065.3	1318.7	5.8803	6.3791				
80.95 ^c	512.6	0.003 715	0.00372	1186.8	1186.8	6.0979	6.0979				

t = triple point; c = critical point. v , h , s , and c_p interpolated and converted from Goodwin, R. D., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 16, 4 (1987): 799–891.

Tomato de: PERRY R., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7ma edición, McGraw-Hill, pg. 2-254I

**ANEXO XIV: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE
REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN SOLAR**