



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales
No Renovables

Tema:

Diseño y Construcción de un Secador Solar
por Convección de Aire Caliente
Automatizado de Pequeña Escala, para el
Secado de café para la Universidad Nacional
de Loja.

AUTORES:

Germán Leonardo Roa Marín.

Diego Bladimir Ortega Torres.

DIRECTOR:

Ing. Marco Vinicio Rojas Moncayo.

CERTIFICACIÓN

Ing. Mg. Sc. Marco Vinicio Rojas Moncayo.

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación, bajo el tema “Diseño y Construcción de un Secador Solar por Convección de Aire Caliente Automatizado de Pequeña Escala, para el Secado de café para la Universidad Nacional de Loja”, previa la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por los señores egresados: Roa Marín Germán Leonardo y Ortega Torres Diego Bladimir, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, Marzo del 2011.

Ing. Mg. Sc. Marco Vinicio Rojas Moncayo.

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, son de exclusivo responsabilidad de los autores que firman a continuación, quienes a su vez, autorizamos al Área de la Energía, las Industrias y Recursos Naturales no Renovables; hacer uso del presente documento en lo conveniente.

.....
Germán Leonardo Roa Marín
Egdo. Ingeniería Electromecánica

.....
Diego Bladimir Ortega Torres
Egdo. Ingeniería Electromecánica

DEDICATORIA

A nuestros Padres, que gracias a su sacrificio y abnegación, nos apoyaron incondicionalmente para culminar la carrera universitaria pese a todas las adversidades. A nuestros hermanos que han sido un apoyo fundamental.

A nuestros amigos y amigas, a todas las personas que de una u otra manera supieron apoyarnos en esta etapa, difícil pero muy apasionada y hermosa.

LOS AUTORES

AGRADECIMIENTOS

Dejamos constancia de nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja, al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, personalizada en cada uno de los docentes que en su momento nos brindaron sus conocimientos y apoyo para la formación como futuros profesionales. De manera especial:

Al Ing. Marco Rojas, Director de Tesis, por haber contribuido a la realización del presente proyecto.

Al Ing. Edwin Paccha, Docente de la Carrera, por su ayuda, paciencia y colaboración en el presente proyecto.

A nuestros familiares, compañeros y amigos que con su apoyo y ánimo nos impulsaron a la culminación de nuestro Proyecto de Tesis.

INDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN.....	2
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
INDICE GENERAL.....	6
INDICE DE FIGURAS	12
INDICE DE TABLAS.....	13
SIMBOLOGÍA	14
1. RESUMEN	16
2. INTRODUCCIÓN.....	17
3. REVISIÓN DE LITERATURA	19
CAPÍTULO I.....	19
1.1 PRODUCCIÓN DE CAFÉ.....	19
1.1.1 El café en el Ecuador.....	19
1.1.2 Calidad del Producto	21
1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	22
1.3.1 Principio de Funcionamiento.....	23
1.4 CONTEXTO GENERAL DE LA CIUDAD DE LOJA.....	24
1.4.1 Generalidades	24
CAPÍTULO II.....	26
2.1 ENERGÍA SOLAR	26
2.1.1 El sol.....	26
2.1.2 Flujos solares	26
2.1.3 Altitud, Zenit y azimut solar.....	27
2.1.4 Radiación solar.	28
2.1.5 Medición de la radiación solar	30
2.1.6 Registros de radiación solar en la ciudad de Loja.	31
2.2 REGISTROS DE LA RADIACIÓN SOLAR PUBLICADOS POR LA NASA	34
2.2.1 SSE HRZ.	34
2.2.2 Índice de claridad (K).....	35

2.2.3	Difusa	35
2.2.4	Directa Normal	35
2.2.5	Inclin. 0, 4, 19, 90. (Grados).....	35
2.2.6	OPT.....	35
2.2.7	ANG OPT (Grados).....	35
2.3	TECNOLOGÍA Y USOS DE LA ENERGÍA SOLAR	36
2.3.1	Energía solar térmica.....	36
2.4	SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO TÉRMICO	37
2.4.1	Sistemas Pasivos.....	37
2.4.2	Sistemas activos.....	37
2.4.2.1	Instalaciones de Baja temperatura	38
2.4.2.2	Instalaciones de Media y Alta Temperatura	39
CAPÍTULO III		41
3.1	SECADORES.....	41
3.2	SECADORES SOLARES	44
3.2.1	Tipos de Circulación.....	44
3.2.1.1	Circulación forzada:	44
3.2.1.2	Circulación por convección natural:.....	44
3.2.2	Tipos de Secadores Solares:	45
3.2.2.1	Secador Indirecto.....	45
3.2.2.2	Secador Directo.	46
3.2.2.3	Secador Mixto.	47
CAPÍTULO IV		49
4.1	TEORÍA DEL SECADO.....	49
4.2	PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL SECADO	49
4.2.2	Contenido de humedad de equilibrio. Actividad del agua. Isotermas de Sorción..	50
4.2.3	Calor latente de vaporización.	52
4.3	RATIOS DE SECADO	53
4.3.1	Curvas de secado	53
4.4	PROPIEDADES PSICROMÉTRICAS.....	55
4.4.1	Temperatura de bulbo seco (BS)	55

4.4.2	Temperatura de bulbo húmedo (BH).....	55
4.4.3	Relación de humedad (W).....	56
4.4.4	Humedad Relativa.....	56
4.4.5	Volumen específico.....	56
4.4.6	Entalpia.....	56
4.5	EVOLUCIONES TÍPICAS DEL AIRE EN UN PROCESO DE SECADO.....	56
4.6	PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE HÚMEDO	61
CAPÍTULO V		63
5.1	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	63
5.2	CONDUCCIÓN	63
5.2.1	Flujo de calor a través de una pared compuesta	65
5.3	CONVECCIÓN	66
5.3.1	Números Adimensionales.....	67
5.4	RADIACIÓN.....	68
5.4.1	Superficies para Absorción.....	68
CAPÍTULO VI.....		70
6.1	COLECTORES SOLARES PLACA PLANA	70
6.1.1	Caja Aislada.....	70
6.1.2	Placa de Absorción.....	71
6.1.3	Cubierta	71
6.2	FUNCIONAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.....	71
6.2.1	Ecuaciones de energía	71
6.2.2	Radiación proveniente del sol.....	72
6.2.3	Pérdidas de calor del colector.....	72
6.2.4	Coefficiente total de transferencia de calor	73
6.2.4.1	Conductancia por la parte superior <i>U_t</i>	74
6.2.4.2	Conductancia por la parte inferior <i>U_b</i>	75
6.2.4.3	Conductancia por la parte lateral <i>U_{lad}</i>	75
6.2.4.4	Número de Reynoldos (Re).....	76
6.2.4.5	Número de Nusselt (Nu).....	76
6.2.4.6	Coefficientes convectivos en el interior <i>h</i>	76

6.2.4.7	Coeficiente de Radiación entre la cubierta y la placa (<i>hrad</i>).....	76
6.2.4.8	Coeficiente Total de pérdidas de calor (<i>UL</i>).....	76
6.2.4.9	Factor de Eficiencia del Colector(<i>F'</i>).....	77
6.2.4.10	Flujo Másico (<i>ma</i>)	77
6.2.4.11	Factor de Flujo (<i>F''</i>).....	77
6.2.4.12	Factor de Remoción de Calor <i>FR</i>	77
6.2.4.15	Energía Absorbida por La Placa <i>S</i>	78
6.2.4.16	Calor Útil en el Colector <i>Qu</i>	78
6.2.4.17	Calculo de laTemperatura media del Fluido <i>Tfm2</i> y la Temperaturas de la Placa <i>Tpm2</i>	78
6.2.4.18	Temperatura de salida del Aire del Colector.....	78
6.3	EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE	79
6.4	EFICIENCIA DEL SECADOR SOLAR POR CONVECCIÓN NATURAL	79
CAPÍTULO VII.....		80
7.1	SISTEMA DE CONTROL DEL SECADOR SOLAR	80
7.2	SENSOR DE TEMPERATURA LM35.....	81
7.2.1	Características.....	82
7.3	SENSOR DE HUMEDAD HIH4000.....	83
7.3.1	Características:.....	84
7.4	CIRCUITO DE ACOUPLE	85
7.4.1	Amplificadores operacionales.	85
7.5	COMPORTAMIENTO EN CORRIENTE CONTINUA (DC)	86
7.5.1	Lazo abierto	86
7.5.2	Lazo cerrado o realimentado	86
7.5.3	Configuraciones.....	87
7.5.3.1	Amplificador Inversor	87
7.5.3.2	Amplificador no Inversor.	88
7.5.3.3	Seguidor de Tensión.	89
7.6	MICROCONTRLADOR PIC16F877A	89
7.6.1	Características.....	91
7.6.2	Descripción de los pines.....	91

7.7	COMUNICACIÓN SERIAL.....	94
7.7.1	Comunicación - MAX232 - Conversor TTL-RS232.....	94
7.8	LABVIEW.....	95
7.8.1	Principales usos	96
7.8.2	Principales Características.....	96
7.8.3	Programa en LabVIEW	98
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	99
4.1	MATERIALES.....	99
4.2	MÉTODOS.....	100
4.2.1	Promedio de Radiación Solar.	100
4.2.2	Dimensionamiento y análisis del balance energético.....	100
4.2.3	CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN	103
4.2.4	PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE HÚMEDO	103
4.2.5	DISEÑO DEL COLECTOR.....	105
4.2.6	ANALISIS MATEMÁTICO DEL COLECTOR.....	105
4.2.6.1	Datos.....	106
4.2.6.2	Coeficiente de pérdidas de calor hacia arriba del colector [Ut]	106
4.2.6.3	Coeficiente de pérdidas de calor hacia abajo del colector[Ub]	107
4.2.6.4	Coeficiente de pérdidas totales en el colector [UL]	107
4.2.6.5	Numero de Reynolds [Re].....	108
4.2.6.6	Número de Nusselt [Nu].....	108
4.2.6.7	Coeficientes convectivos en el interior del colector [W/m ² K].....	108
4.2.6.8	Coeficientes de radiación entre la cubierta y la placa [W/m ² K].....	108
4.2.6.9	Coeficiente Global de pérdidas de Calor UL [W/m ² K].....	108
4.2.6.10	Factor de Eficiencia del Colector	109
4.2.6.11	Flujo másico de aire [Kg/s]	109
4.2.6.12	Factor de Flujo.....	109
4.2.6.13	Factor de Remoción de Calor	109
4.2.6.14	Energía Absorbida por la Placa [W/m ²]	109
4.2.6.15	Calor útil en el colector[W].....	110
4.2.6.16	Eficiencia Instantánea del Colector	110

4.2.6.17	Temperatura de Salida del aire	110
4.2.7	EFICIENCIA DEL SECADOR SOLAR POR LIBRE CONVECCIÓN.....	111
4.2.8	PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC 16F877A	112
4.2.9	SIMULACIÓN DEL MONITOREO AUTOMÁTICO DEL SECADOR.....	115
4.2.10	EXPORTACIÓN DE LOS DATOS POR LABVIEW	117
4.3	Valoración Económica.	118
5.	RESULTADOS	119
5.1	Diseño, construcción y automatización.	119
5.2	Promedio de Radiación Solar (Mayo – Julio)	119
5.3	Colector solar.....	120
5.3.1	Eficiencia del colector solar	121
5.4	Curvas de Secado.....	122
6.	DISCUSIÓN	126
7.	CONCLUSIONES.....	127
8.	RECOMENDACIONES	128
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	129
10.	ANEXOS	131

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Esquema del Secador Solar por Convección Natural	23
Fig. 2: Movimiento de la tierra alrededor del sol	26
Fig. 3: Declinación solar.....	27
Fig. 4: Altitud, Zenit y azimut solar	28
Fig. 5: Diferentes tipos de radiación solar incidente en la superficie de la Tierra	30
Fig. 6: Piranómetros	31
Fig. 7: Mapa de irradiación solar en Ecuador, CONELEC 2008	32
Fig. 8: Promedio de Insolación en la Provincia de Loja, CONELEC 2008.	33
Fig. 9: Izq. Colector solar de placa común. Der. Colector solar plano para aire.....	38
Fig. 10: Colector solar de tubos de vacío y sus componentes	39
Fig. 11: Colectores de concentración: Izq. Concentración lineal Der. Concentración puntual	39
Fig. 12: Secador Solar Indirecto	46
Fig. 13: secador solar directo.....	47
Fig. 14: secador solar mixto	48
Fig.15: Isotermas de Sorción a diferentes temperaturas.....	52
Fig. 16 Curvas de secado.....	54
Fig. 17: Carta psicrométrica.	55
Fig. 18: Evolución del aire en los procesos de secado (aire ambiente o aire precalentado). 58	
Fig. 19: Transferencia de calor a través de una pared plana.....	64
Fig. 20: Circuito térmico equivalente de una pared compuesta en serie	65
Fig. 21: Evolución del aire en los procesos de secado.	70
Fig. 22: Evolución del aire en los procesos de secado.	73
Fig. 23: Esquema térmico de un colector solar de placa plana con dos cubiertas.....	73
Fig. 24: Diagrama de Bloques del Circuito	80
Fig. 25: Esquema del Sistema.....	81
Fig. 26: Circuito de Acondicionamiento de Señal.....	83
Fig. 27: Sensor de Humedad HIH4000	84
Fig. 28: Circuito de Adaptación HIH4000	85
Fig. 29: Amplificador Inversor.....	88
Fig. 30: Amplificador No Inversor	88
Fig. 31: Seguidor de Tensión.....	89
Fig. 32: Diagrama de Pines Microcontrolador Pic 16F877A	90
Fig. 33: Diagrama de pines del Circuito Integrado Max232	95
Fig. 34: Carta Psicométrica para el cálculo de las propiedades del aire de secado	101
Fig. 35: Ventana Principal de Microcode.....	112
Fig. 36: Diagrama Esquemático del Monitoreo del Secador Solar.	115
Fig. 37: Diagrama Circuitual del Monitoreo del Secador Solar.	116
Fig. 38: Diagrama Circuitual del Monitoreo del Secador Solar.	116
Fig. 39: Programación de Labview Panel Frontal.	117
Fig. 40: Temperaturas del Secador Diagrama de Bloques.	117

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: números de upas y superficie en has., por cultivo de café solo (arábigo y robusta) y asociados, según regiones y provincias	20
Tabla 2: Parámetros climáticos promedio de Loja	25
Tabla 3: Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación	30
Tabla 4: Promedios de Radiación Solar en la ciudad de Loja	34
Tabla 5: Comparación de las ventajas y desventajas de los colectores solares.....	40
Tabla 6: Grupos adimensionales más comunes	67
Tabla 7: Características Microcontrolador Pic 16F877A	91
Tabla 8: Descripción de Pines	92
Tabla 9: Propiedades del Aire Empleado	101

SIMBOLOGÍA

A_c	Área del colector
C_{pas}	Calor específico del aire
F'	Factor de remoción de calor
F''	Factor de Flujo
FR	Factor de Remoción de Calor
h	Coefficiente convectivo en el interior del colector
hrad	Coefficientes de radiación entre la cubierta y la placa
H_o	Humedad inicial
H1	Entalpia del aire del ambiente
H2	Entalpia del aire de secado
Hf	Humedad final
HT	Radiación horaria incidente sobre la superficie inclinada del colector
IT	Radiación Solar
K_v	Conductividad térmica
L_w	Calor latente de vaporización del agua
m	Consumo de aire seco
ma	Flujo másico
m_{As}	Cantidad de aire de secado
M_{as}	Peso molecular del aire seco
Mh	Masa de materia humedad
M_{H_2O}	Masa de agua a evaporar
M_s	Masa de materia seca al final del proceso
M_w	Peso molecular del agua
Nu	Número de Nusselt
p_{as}	Peso parcial del aire seco
p_T	Presión absoluta total
p_v	Presión parcial del vapor de agua
p_{vs}	Presión parcial de saturación del agua
q	Caudal de aire
Q	Flujo de calor
Q_a	Energía Consumida
Q_u	Energía Útil
R	Constante de los gases
Re	Número de Reynolds
S	Energía Absorbida por la Placa
t	Tiempo
T_a	Temperatura ambiente
T_{fi}	Temperatura del aire a la salida del colector
T_{fo}	Temperatura del aire a la entrada del colector
T_{fm}	Temperatura media del fluido
T_{pm}	Temperatura de la placa
T_s	Temperatura de Salida del aire del colector
U_b	Coefficiente de pérdidas de calor hacia abajo en el colector
UL	Coefficiente de pérdidas de calor total en el colector

U_t	Coeficiente de pérdidas de calor hacia arriba en el colector
V_a	Volumen específico del aire
W	Poder de evaporización
W_1	Contenido de humedad del aire de secado
W_2	Contenido de humedad del aire de salida

CARACTERES GRIEGOS

α	Absortancia de la placa
β	Coeficiente de expansión térmica
β_i	Inclinación
ΔH	Disminución de humedad
Δx	Tasa de evaporación
ϵ_p	Emitancia de la placa
ϵ_c	Emitancia de la cubierta
η	Rendimiento
η_i	Rendimiento instantáneo
η_s	Eficiencia del secador solar
μ	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad del aire
σ	Constante de Stefan-Boltzman
τ	Transmitancia de la cubierta de vidrio
ν	Viscosidad dinámica
ν_c	Viscosidad cinemática
ϕ	Humedad relativa

1. RESUMEN

El secado al aire libre es una práctica típica en el Ecuador, que se realiza exponiendo principalmente los productos directamente al sol colocándolos sobre el piso.

Este proceso de secado produce pérdidas y disminuye la calidad del producto seco. Frente a esta problemática, el Secador Solar por convección de aire caliente, es una eficiente solución a este problema que posibilita la conservación de las propiedades de los productos agrícolas, protección contra la contaminación ambiental y del ataque de insectos durante el proceso de secado. Este funcionamiento se basa en la utilización de un colector placa plana, el cual incrementa la temperatura del aire, para que se produzca la deshidratación del producto en la cámara de secado

El presente trabajo de tesis define los parámetros de diseño, automatización y operación de un secador solar por convección de aire caliente, luego se lo ha construido y monitoreado.

SUMMARY

Drying outdoors is a typical practice in Ecuador, conducted mainly by exposing their products to the sun by placing them on the floor.

This drying process produces losses and decreases the quality of dried product. Faced with this problem, the solar dryer hot air convection is an efficient solution to this problem that allows the conservation of the properties of agricultural products, protection against environmental pollution and insect attack during the drying process. It bases its operation using a flat plate collector, which allows air circulation by the temperature difference between the various pieces of equipment that promote thermal convection of air.

This thesis defines the parameters of design, automation and operation of solar dryer hot air convection, then it has been built and monitored.

2. INTRODUCCIÓN

En la sociedad actual la agricultura es una actividad económica primordial para la economía mundial, dedicándose a ella gran parte de la población, constituyéndose para los agricultores como su única fuente de ingreso. Varios productos agrícolas necesariamente requieren un secado post-cosecha, para mantener sus características naturales, incluso en los productos que se pueden comercializar en forma fresca, el secado es una excelente opción para el agricultor, concretamente si hay una sobreproducción del producto la cual hace que se devalué el precio del producto fresco.

En este caso tenemos el café que es un producto que necesariamente necesita el secado post-cosecha como primer paso de su elaboración, hasta llegar al proceso de comercialización. En nuestro país el secado del café se lo realiza mayoritariamente de la forma empírica, es decir exponiendo el producto directamente al sol sobre el suelo el cual el tiempo de secado es demasiado largo por no contar con algún mecanismo para realizar dicho proceso de manera más eficiente.

En la actualidad existen secadores mecánicos los cuales son muy costosos, los mismos que funcionan a electricidad, combustibles fósiles como el carbón y productos derivados del petróleo los cuales emanan el dióxido de carbono CO₂ el cual produce el efecto invernadero que causa el calentamiento global, razón por la cual estamos convencidos que las energías renovables no convencionales son una alternativa verdadera a nivel artesanal e industrial, por lo cual una elección de un secador que funcione con energía solar que sea eficiente y que ayude a proteger el medio ambiente sería una alternativa adecuada.

El secador solar de productos agrícolas tiene dos elementos básicos, un colector solar donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que circula, además de esto son más económicos que los convencionales, y solo requieren calor a bajos niveles de temperatura, donde la eficiencia de los colectores es mayor, y además, no es indispensable la acumulación de energía. Su precio fluctúa entre 1000 y 2000 dólares, dependiendo de su capacidad.

Por las bondades que nos ofrece el secador solar por convección de aire caliente nos hemos planteado los siguientes objetivos:

OBJETIVOS:

- Sistematizar la información que permita seleccionar el secador solar más adecuado para la deshidratación de café.
- Diseñar un secador solar por convección de aire caliente para la deshidratación de café.
- Construir un secador solar por convección de aire caliente para la deshidratación de café.
- Automatizar el secador solar por convección de aire caliente para la deshidratación de café.
- Validar la investigación a base de pruebas experimentales que prueben la eficiencia de los secadores solares por convección de aires caliente para la deshidratación de café.
- Socializar los resultados obtenidos en la investigación.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

CAPÍTULO I

1.1 PRODUCCIÓN DE CAFÉ

1.1.1 El café en el Ecuador.

La caficultura en el Ecuador, se inicia a fines del siglo XVIII, como se registra en las exportaciones realizadas al Perú, en las postrimerías de la época colonial.

No se conoce con fidelidad donde se iniciaron las primeras plantaciones, aunque mediante investigaciones históricas se sabe que en la zona de Jipijapa se cultivaba por el año 1860, en los recintos El Mamey y Las Maravillas.

El crecimiento de la superficie bajo cultivo, rebasó los límites climáticos indicados para la variedad Típica de la especie Arábica, que fue la originalmente cultivada, ocupando, por lo tanto, zonas ecológicamente marginales.

El café es el sector que ocupa el primer lugar en la generación de empleo en el campo. La necesidad de su cultivo en terrenos de determinada topografía, hace imposible que estos se puedan mecanizar, por lo que toda la cosecha tiene que ser manual.

En 1986, el café fue el primer producto de nuestras exportaciones no petroleras por un valor de 299 millones de dólares por café en grano más 29 millones por café industrializado, para un total de 328 millones de dólares, más que el camarón y el banano en ese orden.

A continuación en la tabla 1 según el censo agropecuario 2000 ANECAFE se detalla la producción de café en unidades de producción agropecuarias (UPAs) y superficie en has, por cultivo de café solo (arábigo y robusta) y asociados, según regiones y provincias.

Tabla 1: números de upas y superficie en has., por cultivo de café solo (arábigo y robusta) y asociados, según regiones y provincias

PROVINCIAS	CULTIVO SOLO	CULTIVO SOLO	CULTIVO ASOCIADO	CULTIVO ASOCIADO
	UPAs	Has.	UPAs.	Has.
REGIÓN SIERRA				
Azuay	160	89	753	567
Bolívar	293	487	1975	11900
Cañar	96	124	109	329
Carchi	*	*	*	*
Cotopaxi	322	780	1046	6079
Chimborazo	129	141	653	994
Imbabura	96	220	*	*
Loja	5247	6088	15434	23464
Pichincha	1428	3381	2098	8592
Tungurahua	*	*	*	*
TOTAL	7790	11353	22139	52008
REGION COSTA				
El Oro	4635	11650	1269	3126
Esmeraldas	1104	2933	2377	13399
Guayas	1927	5518	3604	15562
Los Ríos	2028	4709	5191	30213
Manabí	22547	58637	8758	40930
TOTAL	32241	83447	21200	103230
REGION AMAZONICA				
Morona Santiago	1298	1552	301	578
Napo	2036	3943	816	1556
Pastaza	518	610	284	545
Zamora Chinchipe	2141	4450	1493	3604
Sucumbíos	5919	26361	752	3050
Orellana	4707	18051	614	1927
TOTAL	16619	54967	4260	11260
REGIÓN INSULAR				
Galápagos	227	1669	29	71
TOTAL	227	1669	29	71
ZONAS NO ASIGNADAS				
Las Golondrinas	*	*	*	*
La Concordia	92	123	201	774
Manga del Cura	157	313	273	1504
El Piedrero	*	*	*	*
TOTAL	249	436	473	2278
GRAN TOTAL NACIONAL	57153	151941	48117	168970

Fuente: censo agropecuario 2000 ANECAFE

1.1.2 Calidad del Producto

El principal factor que influye en la calidad del café almacenado es la humedad. Los granos húmedos constituyen un medio ideal para el desarrollo de microorganismos e insectos que dañan al producto, además de deteriorar su aspecto, el cual es fundamental para algunos mercados, especialmente el europeo, por lo que el secado es una etapa importante en el proceso de producción del café.

El secado en patio es el más típico y generalizado de los sistemas de secado de café el cual consiste en exponer los granos húmedos durante varios días a los rayos directos del sol sobre una superficie de cemento o madera, removiéndolos periódicamente hasta que la humedad se reduzca. Se necesita extraer aproximadamente de 43 a 48% de agua en relación con su peso total; una humedad mayor a 12% favorece la generación de hongos y otros microorganismos. Este sistema implica tener que proteger los granos de lluvias repentinas, del polvo, basura y animales, así como guardarlos durante las noches.

Existen otras tecnologías basadas en el uso de combustibles fósiles: secadoras con quemadores de diesel o de gas natural, o con gases de combustión de la cascarilla de café. Éstas presentan inconvenientes de tipo económico y ecológico debido a los insumos que requieren, por lo que no representan una alternativa propicia para pequeños y medianos productores.

Los daños asociados a un proceso de secado deficiente, que son reconocidos por los productores, afectan la calidad tanto en apariencia como en sabor. Un secado insuficiente produce granos de color gris oscuro, propicios para el desarrollo de microorganismos; cuando hay sobresecamiento se presentan granos vitrificados de color gris azulado opaco que no permiten un tostado uniforme; el rehumedecimiento después del secado ocasiona granos descoloridos veteados y coloración blanca; y el almacenamiento con contenido alto de humedad origina daños de origen fungoso, granos blanqueados y con sabor a moho.

En general, el procedimiento de secado en patio es simple y barato, pero si el aire tiene una temperatura baja y una humedad relativa alta, la cantidad de grano que se podrá secar será baja.

Una forma de lograr que los materiales tengan un mayor grado de sequedad es calentar el aire y ponerlo en contacto con el material; la cantidad de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura.

Entre más seco y caliente esté el aire, mayor será la velocidad de secado eliminándose por medio del mismo aire el vapor de agua formado.

La energía solar ha sido aprovechada en secadores para diversos productos agrícolas –maíz (*Zea mays*), aguacate (*Persea americana*), jitomate (*Lycopersicon esculentum*), ciruela (*Prunus domestica*), manzana (*Malus sp.*) y mango (*Mangifera indica*), entre otros; éstos requieren temperaturas menores a 80 °C para una deshidratación que va desde 80 hasta 8% de humedad. Este indicador muestra que el secado del café puede lograrse mediante un proceso solar, ya que no debe exponerse a más de 60 °C y se requiere un contenido de humedad final de 12%.

Si bien los secadores solares pueden parecer una tecnología muy simple, señalan que no sólo deben tomarse en cuenta las consideraciones relativas al proceso productivo, naturaleza del cultivo, periodo de cosecha, latitud y clima local, sino también el contexto cultural y la condición socioeconómica de los usuarios.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Se representa esquemáticamente el diseño del sistema del secador solar operando por convección natural, esto es por medios naturales, así, el aire al pasar por el colector gana energía, la que se traduce en un incremento de temperatura, la que causa una diferencia de densidades dentro del sistema que es en definitiva la causa de la circulación. El fenómeno de calentamiento del aire se da por un fenómeno de convección natural. El fluido circula del colector a la cámara de secado y sube hasta salir por la chimenea.

El componente principal del sistema es el colector, que consta de un cajón metálico aislado, con una cubierta de vidrio en su parte superior. El colector se dispone con una inclinación respecto a la horizontal para una mejor captación de la radiación solar.

Otro elemento constitutivo es la cámara de secado cuyo objetivo es la deshidratación del producto, mediante la circulación del aire caliente previamente calentado en el colector.

En la figura 1, podemos observar el esquema del secador solar por convección de aire caliente.

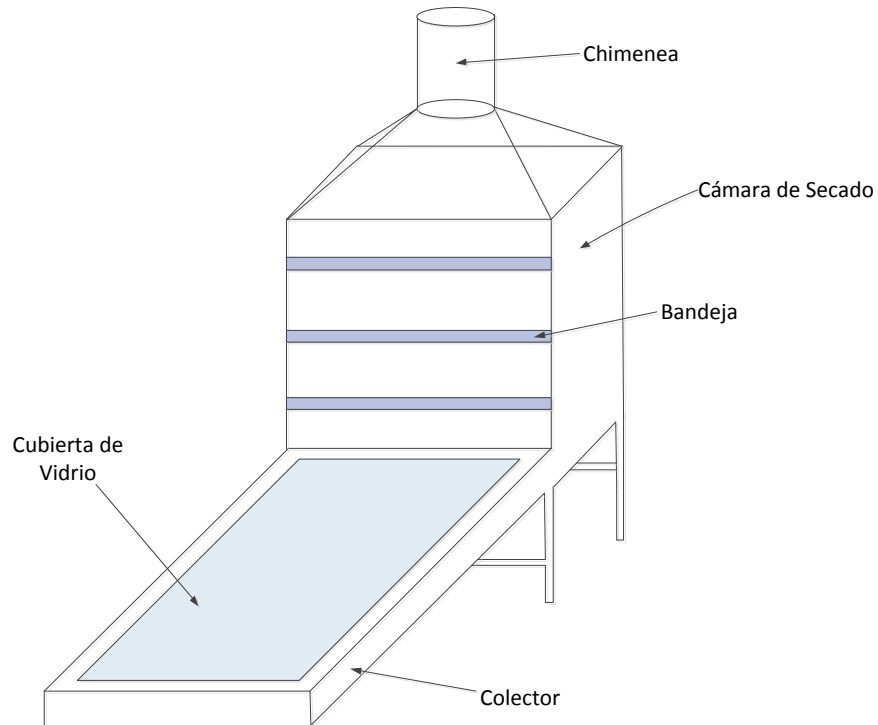


Fig. 1: Esquema del Secador Solar por Convección Natural

1.3.1 Principio de Funcionamiento

El secador solar por convección de aire caliente consiste de un sistema combinado constituido de un colector donde es previamente calentado el aire y una cámara de secado donde se colocan los productos a secar. El colector, donde ingresa el aire por uno de sus lados a temperatura ambiente y sale por el otro lado a una mayor temperatura, este colector está previamente aislado para mantener el calor dentro de él y minimizar las pérdidas de calor.

Utiliza un cobertor de vidrio para retener el calor de la energía solar por el efecto invernadero. La radiación solar atraviesa la cubierta de vidrio e impide que la radiación que se refleja escape fuera del colector, calentando la placa negra y las paredes del colector. La

cámara de secado está diseñada de tal manera que haya un flujo de aire interrumpido dentro de este teniendo una entrada en la parte inferior que está conectada al colector y una salida en la parte superior a través de una chimenea; el aire caliente que ingresa se encuentra a su paso con el producto fresco y por efecto del intercambio de calor lo va deshidratando el producto.

1.4 CONTEXTO GENERAL DE LA CIUDAD DE LOJA

1.4.1 Generalidades

Ubicación	3°59'S79°12'O / -3.983, -79.2
Altitud	2.060 msnm
Población	215.000 hab. (2010)
Densidad	3357,7 hab/km ²

La ciudad de Loja está ubicada en una de las regiones más ricas del Ecuador, en las faldas de la cordillera occidental, a 2060 metros sobre el nivel del mar.

El clima de Loja es temperado-ecuatorial subhúmedo. Con una temperatura media del aire de 16 °C. La oscilación anual de la temperatura lojana es de 1,5 °C, generalmente cálido durante el día y más frío y húmedo a menudo por la noche.

Junio y julio, trae una llovizna oriental con los vientos alisios, y se conoce como la "temporada de viento." Los meses de menor temperatura fluctúan entre junio y septiembre, siendo julio el mes más frío.

De septiembre a diciembre se presentan las temperaturas medias más altas, sin embargo en esos mismos meses se han registrado las temperaturas extremas más bajas. Particularmente en el mes de noviembre se registra el 30% de las temperaturas más bajas del año.

Según datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Censos, del último censo del 28 de Noviembre del 2010, la población del cantón Loja es de 215.000 habitantes, con una densidad de 3,38 hab/km².

Para mayor referencia podemos observar la tabla 2

Tabla 2: Parámetros climáticos promedio de Loja

AÑO	TEMPERATURA MAXIMA °C	FECHA	TEMPERATURA MÍNIMA °C	FECHA
2000	27,0	23-oct	2,0	13-nov
2001	27,8	16-oct	5,3	01-nov
2002	26,8	25-sep	5,4	24-sep
2003	28,0	09-nov	4,4	09-nov
2004	28,0	18-ene	4,0	18-ene
2005	28,4	24-sep	1,0	27-nov
2006	27,6	28-oct	2,0	20-oct
2007	28,4	13-feb	5,0	06-oct
2008	26,4	27-mar	5,4	05-jun
2009	27,0	09-nov	4,0	07-nov

Fuente: Estación Meteorológica La Argelia

CAPÍTULO II

2.1 ENERGÍA SOLAR

2.1.1 El sol

El sol es la estrella más cercana a la Tierra y su distancia promedio es de 150 millones de kilómetros, distancia llamada como Unidad Astronómica (UA). El sol es la principal fuente primaria de luz y calor para la Tierra, proporciona el 99,7% de la energía usada para todos los procesos naturales. Un análisis de su composición en función de su masa establece que contiene un 71% de Hidrógeno, un 27% Helio, y un 2% de otros elementos más pesados.

2.1.2 Flujos solares

Para efecto del manejo de la energía solar, el Sol puede considerarse de manera simplificada como un cuerpo negro a una temperatura de 5.762K. A dicha temperatura el Sol emite energía que se propaga por el espacio a la velocidad de la luz y recorriendo la distancia media Sol-Tierra en 8 minutos 18 segundos.

La energía transmitida por las ondas electromagnéticas no fluye en forma continua sino en forma de pequeños paquetes de energía. A estos conjuntos discretos de energía se les denominan fotones. La cantidad de energía de los fotones es menor o mayor según la longitud de la onda electromagnética. La energía de los fotones de las ondas largas, como las de radio y televisión es muy pequeña. En cambio, la energía de los fotones de las ondas muy cortas, como los rayos X es grande.

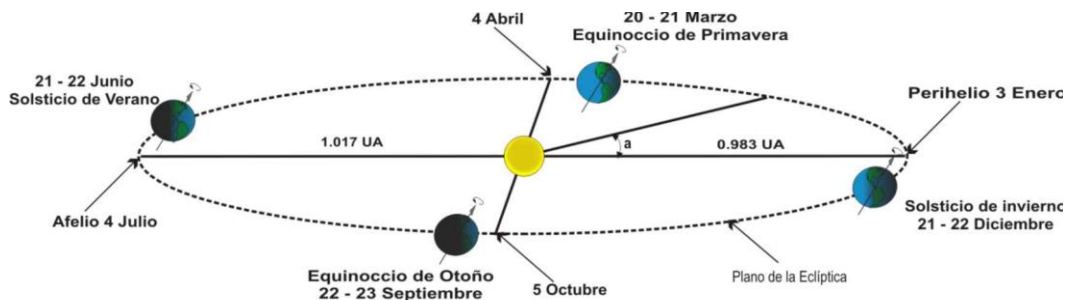


Fig. 2: Movimiento de la tierra alrededor del sol

En la Figura 2, se muestra la posición angular (a) de la Tierra en la órbita. Cuando $a = 0^\circ$ la Tierra se encuentra más cerca del Sol (Perihelio), esto ocurre en enero, en julio, cuando $a = 180^\circ$, la Tierra se encuentra en la posición más alejada del Sol (Afelio).

Cuando se analiza el movimiento de rotación y translación de la Tierra se encuentra que su eje de rotación, con respecto al plano de translación alrededor del sol, tiene una inclinación de aproximadamente $23,45^\circ$.

Los patrones climáticos de las estaciones se originan principalmente por la inclinación del eje de rotación. El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la Tierra y la línea Tierra-Sol se denomina declinación solar (δ), ver Fig. 3 El signo de la declinación es positivo (+) cuando el sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur.

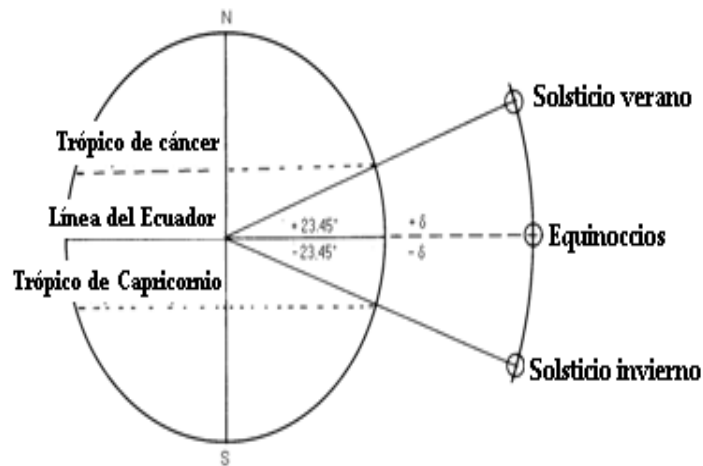


Fig. 3: Declinación solar

2.1.3 Altitud, Zenit y azimut solar

Observando la Figura 4, la posición relativa del Sol en el espacio respecto a un punto de la superficie terrestre se puede definir por dos ángulos: la altitud solar, que es el ángulo entre la línea que pasa por el punto y el Sol y la línea tangente a la superficie terrestre y el azimut solar, que es el ángulo entre la proyección del Sol en el horizonte y la línea norte-sur (toma valores positivos hacia el este y negativo hacia el oeste en ambos hemisferios).

El ángulo complementario a la altitud solar se denomina zenit solar. La posición del Sol en el firmamento dependerá, pues, de la situación del punto en la Tierra, de la época del año y del momento del día.

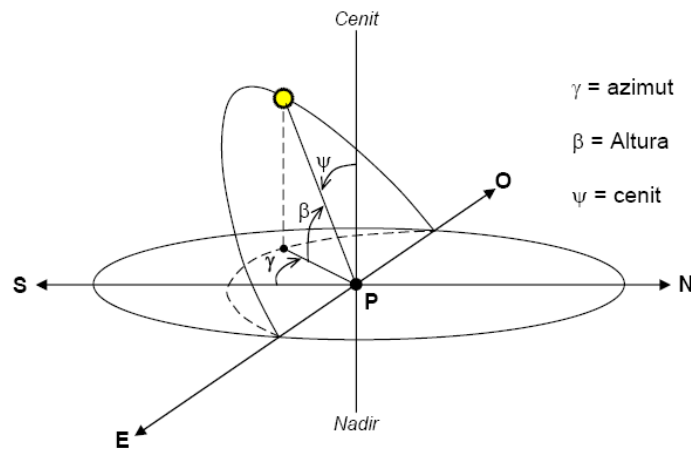


Fig. 4: Altitud, Zenit y azimut solar

Por todo ello, para vencer los efectos que la declinación tiene sobre el ángulo de incidencia de la radiación solar y conseguir interceptar esta radiación de la forma más perpendicularmente posible, los captadores solares tienen que estar inclinados un cierto ángulo respecto al suelo, y a la vez orientados lo más al sur posible cuando estamos en el hemisferio norte y hacia el norte cuando estamos en el hemisferio sur.

2.1.4 Radiación solar.

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol.

El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro que emite energía siguiendo la Ley de Planck, a una temperatura de unos 6000K. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono.

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiación o insolación, que mide la energía que por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado).

La radiación importante para las aplicaciones de energía solar, está constituida por las emisiones entre el ultravioleta visible y la región del infrarrojo. De esta forma, para este tipo de aplicaciones, las longitudes de ondas importantes van desde el $0.15\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$.

Como se mencionó la radiación solar es absorbida por la atmosfera, nubes y partículas suspendidas en la atmósfera, cierta cantidad de radiación es reflejada y devuelta al espacio, y, parte de esta es absorbida por la superficie de la Tierra.

La Tierra también refleja parte del espectro de la radiación solar. Se estima que cerca del 50% de la radiación total permanece en la superficie y en la atmósfera de la Tierra.

La presencia de la atmósfera y los efectos climáticos causan atenuación y cambian la naturaleza de los recursos de energía solar. La combinación de la reflexión, la absorción (filtrado), refracción, y, el resultado de la dispersión, afecta a los niveles de radiación en diferentes lugares sobre la Tierra.

Como resultado de la influencia de la cubierta de nubes y de la dispersión de la luz solar, la radiación recibida en cualquier punto es la combinación de radiación directa, reflejada, y, difusa (Fig.5).

La radiación solar directa es la que viaja en línea recta desde el Sol a la superficie de la Tierra. Los valores del día solar despejado se miden en muchas localidades en el mundo. Para este modelo, se requiere el conocimiento de las intensidades y la dirección en diferentes momentos del día.

La radiación directa como su nombre indica es la cantidad de radiación solar recibida en cualquier lugar de la Tierra directamente del Sol, sin ningún tipo de perturbaciones.

La radiación solar directa puede ser también reflejada y dispersada por la superficie de la Tierra o en la atmósfera.

La radiación difusa es la proveniente del cielo como resultado de la dispersión de la radiación solar por la atmósfera.

Esta energía podría suponer aproximadamente un 15% de la insolación en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la insolación directa es muy baja, la insolación difusa supone un porcentaje mucho mayor.

Por otra parte, las superficies horizontales son las que más insolación difusa reciben, ya que "ven" toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales reciben menos porque sólo "ven" la mitad de la semiesfera celeste.

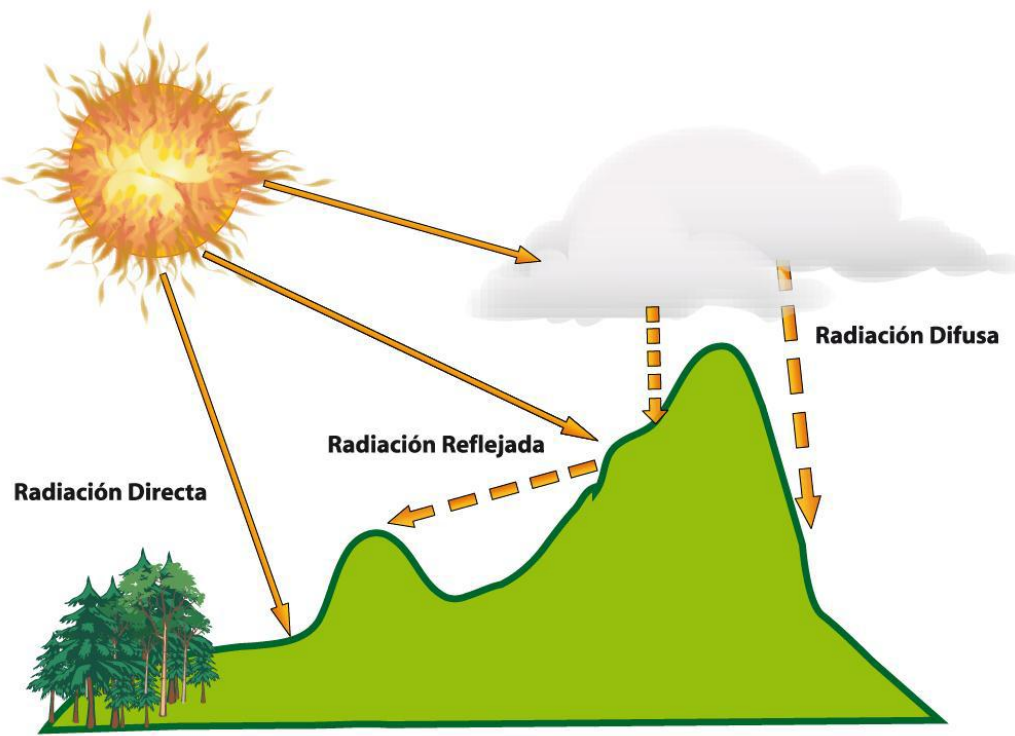


Fig. 5: Diferentes tipos de radiación solar incidente en la superficie de la Tierra

2.1.5 Medición de la radiación solar

La radiación solar es medida en forma directa utilizando instrumentos que reciben el nombre de radiómetros (Tabla 3) y de forma indirecta mediante modelos matemáticos de estimación que correlacionan la radiación con el brillo solar.

Los radiómetros se pueden clasificar según diversos criterios: el tipo de variable que se pretende medir, el campo de visión, la respuesta espectral, el empleo principal a que se destina, etc.

Tabla 3: Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación

Tipo de Instrumento	Parámetro de Medida
Piranómetro	i) Radiación Global, ii) Radiación directa, iii) Radiación difusa iv) Radiación solar reflejada. (usado como patrón nacional)
Piranómetro Espectral	Radiación Global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro Absoluto	Radiación Directa (usado como patrón nacional)
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación Directa (usado como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación Directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación Global
Pirgeómetro	Radiación Difusa
Radiómetro neto ó piranómetro diferencial	Radiación Neta
Heliógrafo	Brillo Solar

Fuente: Enciclopedia Multimedia Wikipedia

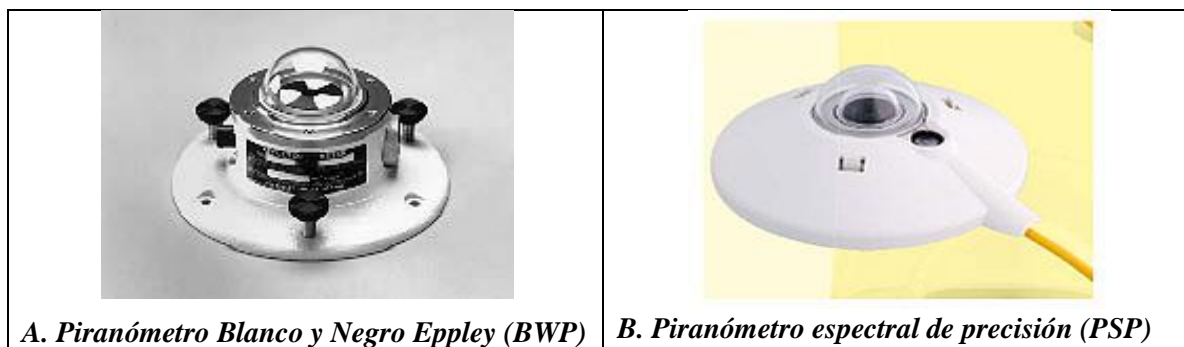


Fig. 6: Piranómetro

En la Figura 6, se muestran algunos tipos de Piranómetros de precisión

Otro método alternativo práctico para medir de la radiación solar cuando no exista la disposición de un radiómetro es una celda fotoeléctrica con compensación por temperatura, la cual genera una corriente eléctrica. La precisión de este medidor es un poco menor que la del Piranómetro y solo mide la radiación global.

2.1.6 Registros de radiación solar en la ciudad de Loja.

El Ecuador es un país con características topográficas muy variadas, de gran diversidad climática, y, condiciones únicas que le confieren un elevado potencial de energías

renovables y limpias, las cuales no pueden quedar al margen del Inventario de los Recursos Energéticos para generación de cualquier otro tipo de energía.

El Atlas Solar del Ecuador, elaborado por el Consejo Nacional de Electrificación CONELEC (AÑO 2008) Fig. 7, demuestra el alto potencial de la energía solar en nuestro país y en especial en nuestra provincia.

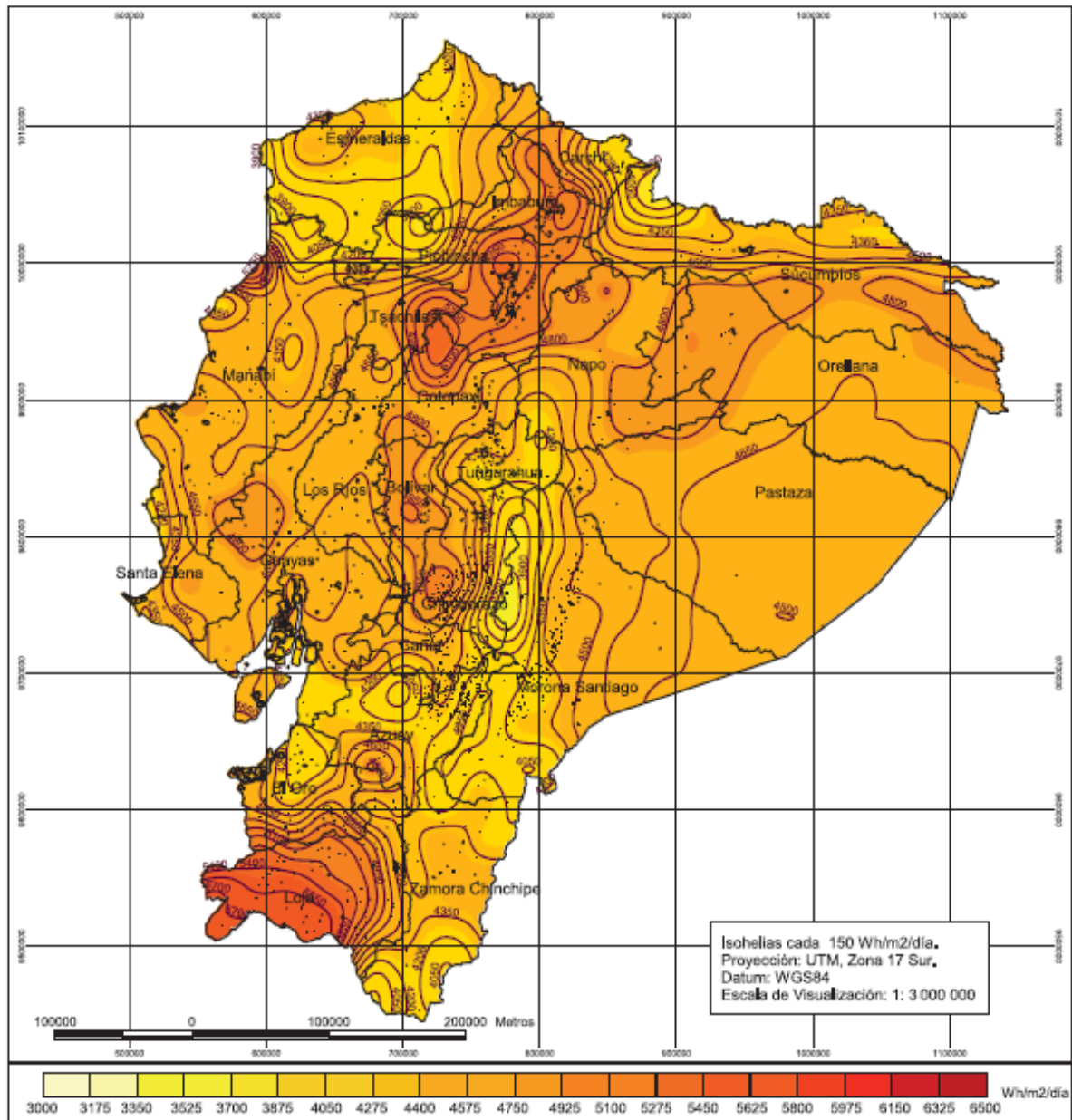


Fig. 7: Mapa de irradiación solar en Ecuador, CONELEC 2008

En la Fig. 8, se muestran los niveles de insolación total promedio según el Atlas Solar del Ecuador, elaborado por el Consejo Nacional de Electrificación CONELEC (AÑO 2008), en el cual se muestran los niveles de insolación total promedio en la provincia de Loja (Insolación: directa+difusa+reflejada). Para el sector de la ciudad de Loja la insolación alcanza los 4500W/m²/día. Un promedio alto que ratifica que este sector es el idóneo para la implementación del Secador Solar por Convección Natural para el secado de café.

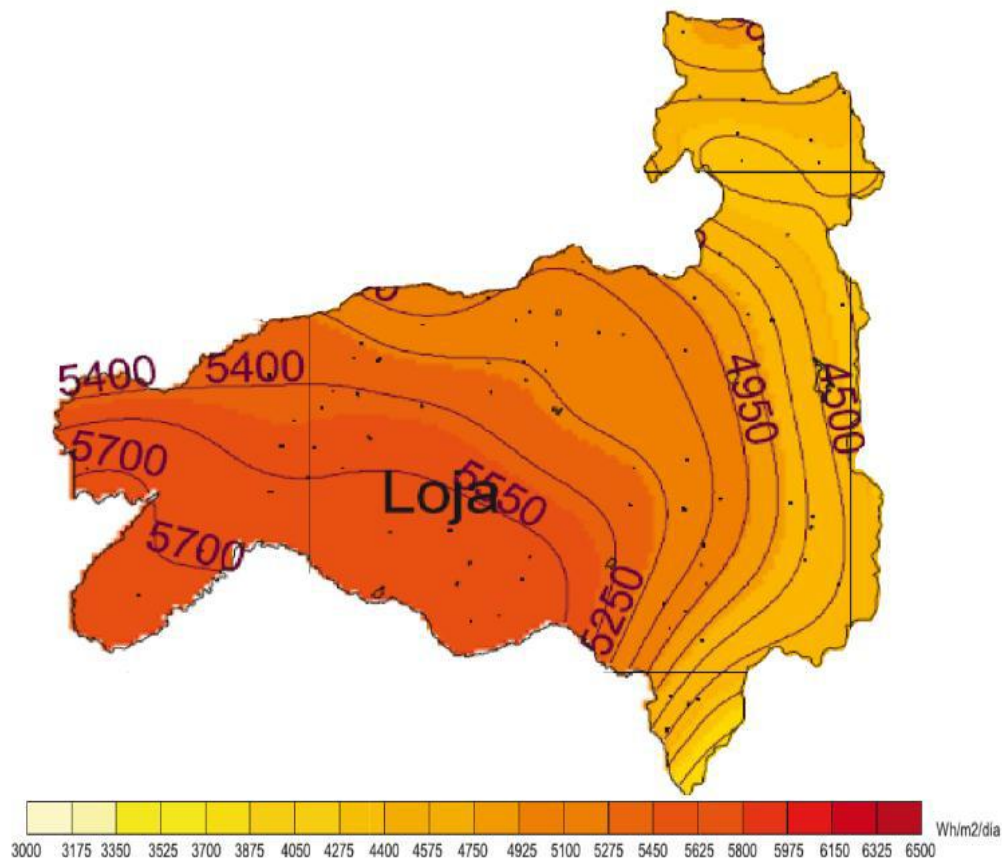


Fig.8. Promedio de insolación en la Provincia de Loja, CONELEC 2008

Para el diseño de sistemas que aprovechen la energía solar, es fundamental el cálculo del Promedio de Radiación. La Radiación se define como la cantidad de energía recibida en un área de un metro cuadrado durante el día solar o el número de horas de cielo despejado de la región de interés. Así, para el Ecuador, la duración del día solar es de 5 a 6.5 horas.

Para nuestro caso tomaron el valor de Insolación de $4100 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$, que es lo promedio de julio de 2010 a junio del 2011, según la Estación Meteorológica del Área de Energía de la Universidad Nacional de Loja y para el día solar tomaremos el valor de 5.5 horas.

Con ayuda de la expresión (1) encontramos el promedio de radiación (IT), para la ciudad de Loja.

$$IT = \frac{\text{Insolación}}{\text{dia Solar}} \quad (1)$$

2.2 REGISTROS DE LA RADIACIÓN SOLAR PUBLICADOS POR LA NASA

Periodo de Registro 22 años (1983-2005)

Tabla 4: Promedios de Radiación Solar en la ciudad de Loja

Prom. Men. de radiación incidente en una superficie inclinada hacia el Ecuador ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$)													
Lat -4 Lon -79	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
SSE HRZ	4.17	3.97	4.17	4.05	4.01	3.98	3.90	4.20	4.41	4.55	4.76	4.41	4.21
K	0.39	0.37	0.39	0.40	0.43	0.44	0.42	0.43	0.43	0.43	0.45	0.42	0.42
Difusa	2.24	2.30	2.33	2.16	1.97	1.86	1.91	2.07	2.25	2.33	2.25	2.21	2.16
Directa N	2.85	2.38	2.59	2.74	3.10	3.34	3.09	3.14	3.05	3.17	3.68	3.29	3.04
Inclin. 0	4.11	3.91	4.11	4.01	3.96	3.93	3.86	4.15	4.35	4.50	4.70	4.34	4.16
Inclin.4	4.14	3.93	4.11	4.04	4.03	4.02	3.93	4.20	4.36	4.51	4.74	4.39	4.20
Inclin.19	4.16	3.88	3.98	4.05	4.17	4.24	4.10	4.27	4.28	4.42	4.77	4.45	4.23
Inclin. 90	2.13	1.82	1.60	2.02	2.45	2.70	2.51	2.27	1.81	1.87	2.31	2.32	2.15
OPT	4.18	3.93	4.11	4.07	4.18	4.27	4.12	4.27	4.36	4.51	4.78	4.45	4.27
ANG OPT	13.0	7.00	1.00	12.0	23.0	28.0	25.0	17.0	5.00	5.00	13.0	16.0	13.7

Fuente: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

En la Tabla 4 se encuentran los datos acuerdo a la latitud y longitud geográfica del lugar así como en función a índices de nubosidad o claridad, considerando los siguientes parámetros:

2.2.1 SSE HRZ.

Es el promedio mensual de la radiación total incidente sobre una superficie horizontal a la superficie de la tierra, promediado en un periodo de 22 años (Jul 1983 - Jun 2005).

2.2.2 Índice de claridad (K)

Es el promedio mensual de la radiación total incidente sobre una superficie horizontal a la superficie de la tierra dividida para el promedio mensual de la radiación que ingresa a la parte superior de la atmosfera, promediado en un periodo de 22 años (Jul 1983 –Jun 2005). (Adimensional)

2.2.3 Difusa

Es el promedio mensual de la radiación incidente en una superficie horizontal a la superficie de la tierra bajo todas las condiciones atmosféricas, con la radiación directa de los rayos solares bloqueada por una sombra, promediado en un periodo de 22 años.

2.2.4 Directa Normal

Es el promedio mensual de la radiación normal directa incidente sobre una superficie orientada normal a la radiación solar, promediado en un periodo de 22 años.

2.2.5 Inclín. 0, 4, 19, 90. (Grados)

Es el promedio mensual de la radiación total incidente sobre una superficie inclinada relativa a la horizontal y apuntando hacia el ecuador, promediado en un periodo de 22 años (Jul 1983 - Jun 2005). Note que las diferencias entre los valores de Inclín. 0 y los valores de SSE HRZ son debido a las aproximaciones en los ingresos de datos e imprecisiones al procesar las ecuaciones. Los datos de cada inclinación han ido determinados utilizando el método RETScreen Isotopic Diffuse Method.

2.2.6 OPT

Es el promedio de la radiación total incidente en una superficie inclinada el ángulo optimo relativo a la horizontal y apuntando hacia el ecuador.

2.2.7 ANG OPT (Grados)

Es el ángulo relativo a la horizontal para en cual el promedio de radiación mensual es máximo.

2.3 TECNOLOGÍA Y USOS DE LA ENERGÍA SOLAR

Clasificación por tecnologías y su correspondiente uso más general:

- **Energía solar térmica:** Para producir agua caliente de baja temperatura para uso sanitario y calefacción.
- **Energía solar fotovoltaica:** Para producir electricidad mediante placas de semiconductores que se excitan con la radiación solar.
- **Energía solar termoeléctrica:** Para producir electricidad con un ciclo termodinámico convencional a partir de un fluido calentado a alta temperatura (aceite térmico). Este tipo de energía es derivado de la energía térmica.
- **Energía solar híbrida:** Combina la energía solar con la combustión de biomasa, combustibles fósiles, Energía eólica o cualquier otra energía alternativa.
- **Energía eólico solar:** Funciona con el aire calentado por el sol, que sube por una chimenea donde están los generadores.

2.3.1 Energía solar térmica

En la energía solar térmica o energía termo solar se transforma la radiación solar en energía calorífica. Se puede aprovecharse para cocinar alimentos o para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción, o para producción de energía mecánica y a partir de ella, de energía eléctrica.

Adicionalmente puede emplearse para alimentar una máquina de refrigeración por absorción, que emplea calor en lugar de electricidad para producir frío con el que se puede acondicionar el aire de los locales.

En función de la forma de captación de la radiación y la energía contenida en la misma, habrá de diferenciarse entre sistemas activos y sistemas pasivos.

2.4 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO TÉRMICO

2.4.1 Sistemas Pasivos

Para el aprovechamiento pasivo de la energía solar no requiere ningún dispositivo para captarla, por ende los costes de mantenimiento son muy bajos. Un ejemplo típico de un sistema solar pasivo sería una chimenea solar para mejorar la ventilación natural de una vivienda. Se incluyen también los sistemas de calentamiento de agua mediante circulación natural o termosifón.

2.4.2 Sistemas activos

Los sistemas solares activos se aplican para ventilación o refrigeración o para almacenar el calor para uso futuro, por medio de equipamientos mecánicos o eléctricos tales como bombas y ventiladores.

En los sistemas de calentamiento de agua, excepto los basados en termosifón, se utilizan bombas o ventiladores para hacer circular el agua, una mezcla anticongelante o aire a través de los colectores solares, motivo por el cual se clasifican dentro de la tecnología solar activa. Los colectores solares pueden ser planos o con algún sistema de concentración.

La mayoría de los colectores solares térmicos suelen situarse sobre soportes fijos, pero tendrían un rendimiento superior si pudieran seguir al Sol en su recorrido.

Las instalaciones térmicas activas para el calentamiento de fluidos se dividen en:

- **Baja temperatura** (captación directa, la temperatura del fluido es por debajo del punto de ebullición.)
- **Media temperatura** (captación de bajo índice de concentración, la temperatura del fluido es más elevada de 100°C.)
- **Alta temperatura** (captación de alto índice de concentración, la temperatura del fluido es más elevada de 300°C)

2.4.2.1 Instalaciones de Baja temperatura

Para el aprovechamiento térmico a baja temperatura se realiza a través de colectores planos (ver Figura 9), cuya principal característica es que no tienen poder de concentración, es decir, la relación entre la superficie externa del colector y la superficie captadora, la interior, es prácticamente la unidad. Más adelante hablaremos más detenidamente de ellos.

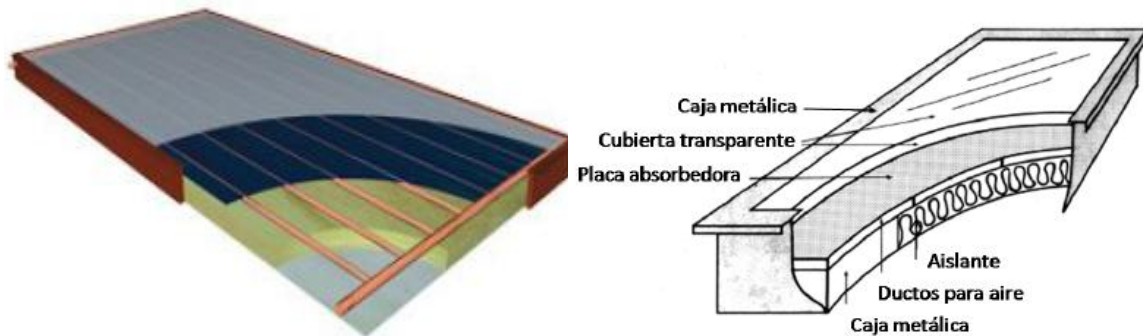


Fig. 9: Izq. Colector solar de placa común. Der. Colector solar plano para aire

Existen otros tipos de colectores planos que no encajan en esta descripción.

- **Colectores para piscinas.** Son colectores sin cubierta, sin aislante y sin caja, solamente están compuestos por la placa absorbente, que por lo general es de un material plástico.

Aumenta la temperatura del agua de 2 – 5°C, y solo funciona en la época de verano ya que tiene grandes pérdidas, por eso se usa para calentar el agua de las piscinas.

- **Colectores de vacío.** Este tipo de colectores están compuestos de una doble cubierta envolvente, herméticamente cerrada, en la cual se ha hecho el vacío, de esta forma las pérdidas por convección se reducen considerablemente (ver Figura. 10).

El precio elevado de estos colectores y la pérdida de vacío con el tiempo son el principal problema de estos colectores.



Fig. 10: Colector solar de tubos de vacío y sus componentes

2.4.2.2 Instalaciones de Media y Alta Temperatura

Para obtener elevadas temperaturas se requiere recurrir a colectores especiales, ya que con los planos no es posible, estos colectores son los colectores de concentración, cuya función no es más que aumentar la radiación por unidad de superficie (ver Figura 11).

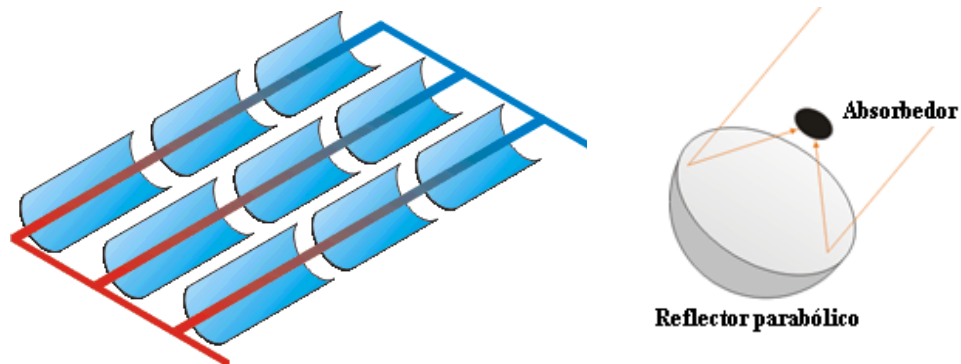


Fig. 11: Colectores de concentración: Izq. Concentración lineal Der. Concentración puntual

Hay varias formas y sistemas, pero la parte común a todos es que necesitan orientación.

Podemos observar a continuación en la Tabla 5, las ventajas y desventajas de cada tipo de colector solar:

Tabla 5: Comparación de las ventajas y desventajas de los colectores solares.

Tipo de Colector	Ventajas	Desventajas
Sin cubierta	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño muy simple • Son los más fáciles de construir. • Más baratos en su construcción. 	<ul style="list-style-type: none"> • No calientan los fluidos hasta la temperatura necesaria para usos domésticos
De placa plana	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño simple. • Fácil de construir. • Costo de construcción relativamente barato. • Calientan el fluido térmico hasta temperaturas adecuadas para su uso doméstico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precaución con la cubierta adecuada. • Un poco más caros que los colectores sin cubierta.
De Tubos de Vacío	<ul style="list-style-type: none"> • Alcanzan temperaturas bastantes altas. • Eficiencia alta para temperaturas elevadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muy caros en su construcción. • Muy difíciles de construir sin el equipo apropiado.
De Concentración	<ul style="list-style-type: none"> • Alcanzan muy altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado costo de construcción. • Difíciles de construir • Requiere un sistema de seguimiento electrónico para seguir el sol.

Fuente: Enciclopedia Multimedia Wikipedia.

CAPÍTULO III

3.1 SECADORES

La clasificación de los secadores se lo puede hacer atendiendo a diferentes parámetros. Todos los sistemas de secado, en primer lugar, se pueden clasificar de acuerdo al rango de temperatura con que operan en secaderos de alta y baja temperatura.

Para la industria y de forma general, los secadores de alta temperatura utilizan combustibles convencionales, en tanto que los de baja temperatura utilizan combustibles biomásicos o energía solar. Así mismo, los secadores de alta temperatura se utilizan cuando se requiere un secado muy rápido, de forma que el material a secar permanece un periodo corto de tiempo en contacto con el agente desecante.

A su vez, éstos pueden ser de flujo continuo o discontinuo.

Además, habitualmente los secadores se clasifican según la fuente energética utilizada, teniendo así secadores de combustibles fósiles, comúnmente llamados secadores convencionales, y secadores de fuentes renovables (combustible biomásico, energía solar, sistemas híbridos solar-biomasa, etc.).

Otras clasificaciones menos habituales son:

- Según el tipo de propagación de calor: convección, conducción y radiación.
- Según la presión utilizada en el proceso: vacío o normal (atmosférica).
- Según el agente desecante: aire, vapor sobrecalentado o gases procedentes de un proceso anterior.
- Según la disposición de corrientes: paralela, contracorriente y transversal.
- Según la forma de aportación de calor: continua o discontinua.
- Según disposiciones especiales: bandejas, cilindros, tambores, túneles, cintas, etc.

Existen nuevas tecnologías de secado (secadores de lecho fluido, combinación de lecho fluido-spray, de lecho fluidizado con vapor sobrecalentado, de eyección, solares, etc.) que intentan paliar alguno de los inconvenientes del uso de los sistemas de secado convencionales: disminución del consumo de energía, disminución del impacto ambiental, mejora de la calidad de los productos, aumento de la seguridad de la operación, etc.

Los sistemas más habituales para el secado son los secadores rotativos, secadores flash, secadores de discos, secadores de cascada, secadores de vapor sobrecalentado y secadores solares.

A continuación se describen las principales características de cada uno de ellos.

- **Secadores Rotativos:** Consiste en la rotación de un tambor dotado con palas mezcladoras, mejorando éstas la transferencia de calor entre el agente desecante y el producto. Estos sistemas pueden ser de contacto directo o indirecto, siendo los primeros utilizados en el caso de que el contacto de los gases calientes con el producto no suponga un problema de contaminación para este último (por ejemplo, para su utilización como combustible). Por otro lado, pueden ser equicorrientes o contracorrientes. En los sistemas equicorrientes la biomasa y el aire caliente fluyen en el mismo sentido, entrando en contacto los gases calientes a mayor temperatura con los productos más húmedos, disminuyendo la pérdida de volátiles y el riesgo de incendio. El sistema contracorriente tiene la ventaja de conseguir mayores reducciones de humedad en el producto, ya que los sólidos más secos entran en contacto con los gases más calientes; sin embargo, su inconveniente fundamental es el aumento de riesgo de incendio. Existen otras variantes como el doble o triple paso, con las que se consiguen disminuir la longitud del secador entre dos y tres veces. La temperatura de entrada de los gases oscila entre 200 y 1000 °C, con temperaturas de salida habitualmente superiores a los 110 °C.

Los tiempos de permanencia necesarios se encuentran entre unos pocos minutos para partículas pequeñas y 10-30 minutos para partículas de tamaño mayor.

- **Secadores Flash:** En este tipo de secador, el material a secar es mezclado con una corriente de gases calientes a alta velocidad, produciéndose un secado muy rápido. Debido a los cortos tiempos de secado de los secadores flashes, el equipo es más compacto que el de los secadores rotativos y con temperaturas de los gases ligeramente más bajas; sin embargo, su consumo eléctrico es mayor. El tiempo de retención de sólidos es habitualmente inferior a 30 segundos, minimizando, por tanto, el riesgo de incendio.
- **Secadores de Discos:** Este secador consta con sistemas de contacto indirecto que se utilizan para pequeños flujos de material. En ellos, el material se seca mediante el contacto con un conducto con aletas por cuyo interior fluye vapor procedente de una caldera.

Los tiempos de residencia son muy variables dependiendo de las características del vapor y del producto a secar (2-30 minutos).

- **Secadores de Cascada:** Este secador se lo emplea habitualmente para el secado de grano, pero también se pueden utilizar para otros tipos de biomasa. Es una concepción similar al secador flash. El producto se introduce en una cámara cerrada hacia una corriente de aire caliente que fluye de abajo a arriba en la misma. Los materiales secos se extraen por un lateral de la cámara, controlando en todo momento el tiempo de residencia y la cantidad de secado. Los tiempos de secado típicos en estos dispositivos son, aproximadamente, de 2 minutos.
- **Secadores de vapor Sobrecalentado (SSD):** En este secador, a diferencia de los secadores flash, el agente desecante es vapor sobrecalentado, siendo así las propiedades de transferencia de calor mediante el vapor sobrecalentado superiores a las obtenidas para el aire a la misma temperatura. La corriente de gases atraviesa una placa perforada (perforaciones 1,5-5 % del área de la placa) creando torbellinos en la materia a secar (fluidificación) que se desplaza en sentido horizontal. Es un proceso indicado para materiales de pequeño tamaño o lodos. Los dispositivos pueden ser estáticos o vibrantes. Generalmente, se utiliza este procedimiento con el vibrado del secadero mediante agitadores mecánicos, de manera que se consiguen

una serie de ventajas: evitar que se produzcan acumulaciones fijas del material, proporcionar la dirección de transporte del producto, conseguir la fluidificación incluso con velocidades bajas del vapor y el tiempo de residencia del material se controla más fácilmente.

En el presente trabajo se propone la sustitución de los sistemas de secado convencionales por el secado solar, como propuesta frente a los sistemas de secado y sumamente ventajosa desde el punto de vista medioambiental y energético.

3.2 SECADORES SOLARES

Dos son los elementos básicos de un secador solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire caliente que la atraviesa. Dichos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar.

3.2.1 Tipos de Circulación

El aire circula dentro del secador con el objetivo de eliminar la humedad del producto. Esta circulación se logra por los siguientes métodos:

3.2.1.1 Circulación forzada:

En este tipo de circulación el aire es movido por un ventilador que se alimenta por energía mecánica o eléctrica. En este tipo de circulación se facilita el diseño en el caso de los equipos de tamaño grande, además de facilitar el control del proceso de secado. Utilizando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0.5 y 1 m/s. La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica.

3.2.1.2 Circulación por convección natural:

En este tipo de circulación el aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. En este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar con equipos grandes. En equipos pequeños o

medianos se puede lograr velocidades de aire de 0.4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0.1 a 0.3 m/s.

3.2.2 Tipos de Secadores Solares:

3.2.2.1 Secador Indirecto.

En este tipo de secador, el colector y la cámara de secado están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar. Este secador es esencialmente un secador convectivo convencional sobre el cual el sol actúa como fuente energética. Los secadores directos difieren de los indirectos en la transmisión de calor y la separación de vapor. A continuación se dan varias características de operación que definen a este tipo de secadores.

Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son, en general, económicos desde el punto de vista del consumo de calor, ya que suministran calor sólo de acuerdo con la demanda hecha por el material que se está secando.

- El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de naturaleza metálica.
- Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación, hasta mayores de 550°C, en el caso de secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.
- Su funcionamiento se caracteriza por algún método de agitación para aumentar el contacto entre el material húmedo y la superficie metálica caliente, así como para efectuar un cambio continuo de material húmedo en la superficie caliente. La naturaleza de dicho contacto determina la velocidad de secado total de los secadores indirectos. Los materiales granulares pesados dan mayor coeficiente de transferencia de calor de contacto que los materiales sólidos voluminosos.

A continuación en la figura 12 se muestra un secador solar indirecto.

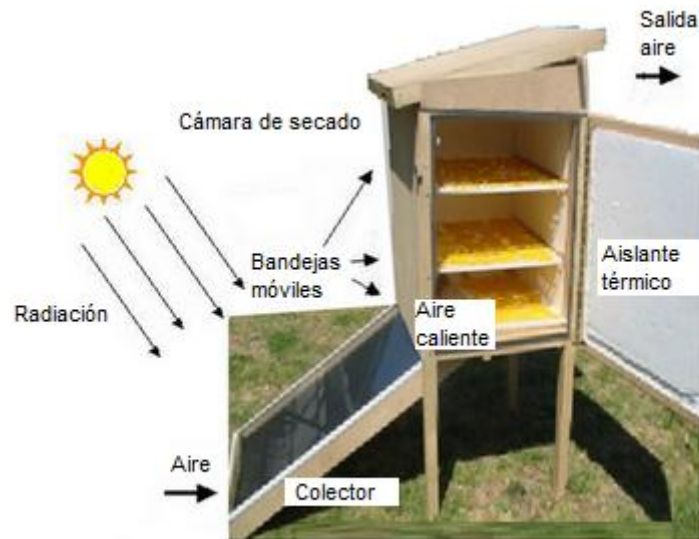


Fig. 12: Secador Solar Indirecto

3.2.2.2 Secador Directo.

En esta variedad de secador, el colector y la cámara de secado, pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar.

En los secadores solares directos la radiación solar es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua. Esto se debe a que la presión de vapor en la superficie del producto crece por la absorción de radiación solar. Por lo tanto el gradiente de presiones de vapor entre producto y aire se hace mayor y se acelera el secado. La combinación de colector y cámara en una sola unidad puede ser más económica en muchos casos, especialmente en los secadores de menor tamaño. Este tipo de secadores es casi siempre con circulación de aire por convección natural. Esto hace que a veces el control del proceso sea poco confiable. Para algunos productos la acción de la radiación solar puede destruir algún compuesto orgánico que lo compone y que tiene interés comercial. Las características generales de operación de los secadores directos son:

- El agente de secado puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, gas inerte calentado (nitrógeno por ejemplo), o vapor de agua sobrecalentado.

- El secado se efectúa por transferencia de calor por convección entre los gases calientes y el sólido mojado, en donde el flujo de gases extrae el líquido vaporizado y separa el vapor.
- Un secador directo consume más combustible por kilogramo de agua evaporada, mientras más bajo sea el contenido de humedad.
- La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada a una temperatura de salida constante.

A continuación en la figura 13 se muestra un secador solar directo.



Fig. 13: secador solar directo

3.2.2.3 Secador Mixto.

Son aquellos donde la colección de radiación se realiza tanto en el colector solar previo a la cámara de secado como en la misma cámara de secado. El Secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire). Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. El tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma

conveniente productos que se puedan dañar o perder su calidad de aspecto por una exposición directa al sol. Una desventaja de este tipo de secadores es el hecho de que al añadir el colector previo a la cámara para recolectar energía solar, el tamaño del equipo y sus costos aumentan. Una segunda desventaja es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos.

A continuación en la figura 14 se muestra un secador solar mixto.



Fig. 14: secador solar mixto

CAPÍTULO IV

4.1 TEORÍA DEL SECADO.

El secado generalmente se lo consigue mediante la aplicación de calor a una substancia con un determinado porcentaje de humedad.

Es muy importante conocer el comportamiento en el secado, así como también las condiciones y propiedades del sólido, pues en base a esto se podrá diseñar el secador según las necesidades requeridas. También el estudio del secado comprende un cumulo de problemas como son las de aéreas, mecánica de fluidos, transferencia de calor, estructuras de masas, etc. Fenómeno que llega a ser tan complicados y lo que hace que el diseño de secadores no sea tarea tan sencilla.

Tomando en cuenta la complicación presentada se ha establecido un comportamiento general para el secado, es por eso que es muy importante analizar y definir los parámetros que se toman en cuenta para el diseño.

4.2 PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL SECADO

Como ya lo anunciamos anteriormente, la reducción del porcentaje de agua que poseen los granos es esencial para su almacenamiento seguro. Al secar los granos se disminuye la cantidad de humedad hasta niveles preestablecidos. La disminución requerida de humedad (ΔH) sirve de base para determinar la cantidad de agua que será evaporada.

$$\Delta H = \frac{H_o - H_f}{100 - H_f} * 100 \quad (2)$$

ΔH = Disminución de la humedad, %

H_o = Humedad inicial, %

H_f = Humedad final, %

Entonces la masa q se debe evaporar es:

$$M_{H_2O} = \frac{M_s * \Delta H}{100 - \Delta H} \quad (3)$$

M_{H_2O} = Masa de agua a evaporar, Kg

M_s = Masa materia seca al final del proceso, Kg

La masa del grano húmedo (M_h) que se debe colocar en el secador solar está definido como:

$$M_h = M_s + M_{H_2O} \quad (4)$$

4.2.2 Contenido de humedad de equilibrio. Actividad del agua. Isotermas de Sorción.

El agua que se encuentra contenida en los productos no se encuentra incorporada de la misma forma. En algunos casos está relativamente libre, en otros está muy ligada a la estructura del producto, etc. Según la naturaleza de la unión entre el agua y la materia seca se distinguen.

- **Líquido adherente:** forma una película sobre la superficie exterior de la materia seca.
- **Líquido capilar:** queda retenido por los intersticios de la materia porosa (superficie interna del producto).
- **Líquido de hinchado:** forma parte integral de la fase del producto (unión coloidal).

El concepto de actividad del agua en un material permite expresar el grado de libertad que tiene el agua contenida en él. Así, un producto intercambia agua con el ambiente que lo rodea hasta que se establece una situación de equilibrio. En estas condiciones, el valor de la humedad relativa del aire (en tanto por uno) recibe el nombre de actividad de agua del producto a_w . De esta forma, la humedad relativa de equilibrio del aire en contacto con el agua libre es del 100 % y, por tanto, su actividad es 1.

La actividad del agua o el contenido de humedad de equilibrio están determinados por el tipo de material a tratar, su temperatura y su humedad. Así, un producto tiene una presión de vapor característica para cada temperatura y humedad contenida. Esto determina si el material adsorberá o emitirá humedad en su exposición al aire.

El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico es el valor de la humedad que tiene después de haber sido expuesto, durante un largo periodo de tiempo, a unas condiciones particulares de un medio ambiente.

Para ese contenido de humedad, la presión de vapor ejercida por la humedad del producto se iguala con la presión de vapor del aire circundante a su alrededor. De este modo, para la medida de la actividad del agua de un material, es necesario tener una pequeña muestra de producto en contacto con aire a una temperatura constante y con una humedad relativa controlada (p.ej. con soluciones saturadas de sales o ácidos).

Para un valor determinado de la temperatura se puede encontrar para cada producto, experimentalmente, una correspondencia entre la actividad de agua y el contenido de humedad de equilibrio de éste. A estas relaciones se las denomina isothermas de sorción del material. Las curvas pueden representarse a partir del estado inicial húmedo del producto (proceso de desorción) o del producto seco (proceso de adsorción).

Los puntos de una curva de sorción indican para cada material, a una determinada temperatura, el contenido de humedad en el producto que se encuentra en equilibrio con aire a una humedad relativa.

Las isothermas de sorción son importantes en el análisis del comportamiento en el secado de los materiales. Aportan información sobre los contenidos de humedad que deben alcanzarse a fin de conseguir una actividad adecuada para la conservación, almacenamiento, etc.

De los productos, y además, permiten conocer cuál es el contenido de humedad mínimo que puede lograrse en un proceso donde el material se expone a una corriente de aire con una temperatura y humedad relativa determinada.

Como ejemplo, en la figura 15, se muestra el efecto que usualmente tiene la temperatura en las isothermas de sorción, de manera que conforme aumenta la temperatura a una determinada humedad relativa, disminuye el contenido de humedad de equilibrio. Varios autores han presentado para diferentes productos estas relaciones con la temperatura

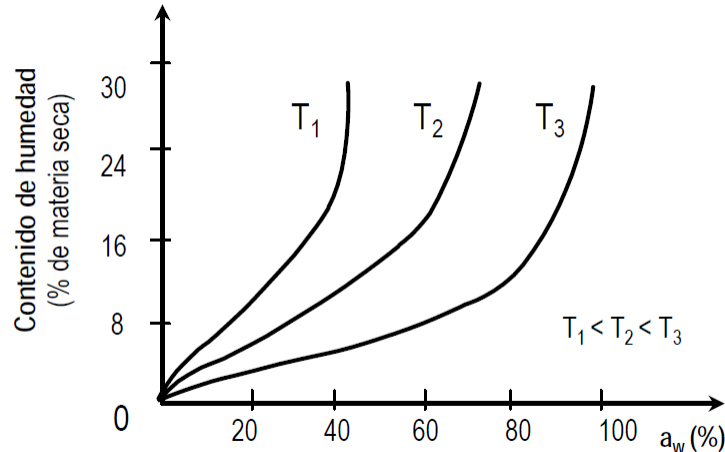


Fig.15: Isotermas de Sorción a diferentes temperaturas.

4.2.3 Calor latente de vaporización.

La demanda térmica para secar un producto se denomina calor latente de vaporización L_w , y es la cantidad de energía que tiene que absorber el producto para vaporizar su humedad, esto es, la energía necesaria para evaporar 1 kg de agua.

En el agua libre, este valor depende exclusivamente de la temperatura y es del orden de los 2450 kJ / kg a 20°C. Su valor en función de la temperatura se puede determinar mediante la expresión 7.

$$L_w = \frac{R}{M_w} (6547.1 - 4.23(T_a + 273,16)) \quad (5)$$

Siendo L_w el calor latente de vaporización del agua pura (J / Kg), R la constante de los gases ($8314 J / kmol.K$), M_w el peso molecular del agua ($18,01 Kg / Kmol$), y T_a la temperatura ambiente(°C).

Si el agua no está libre, como ocurre habitualmente, el calor latente de vaporización es mayor y los factores de los que depende son el tipo de producto, su humedad y la temperatura. De esta manera, conforme aumenta el contenido de humedad y la temperatura, menor es el calor latente de vaporización necesario.

La variación de este parámetro con la temperatura y el contenido de humedad ha sido estudiada por diversos autores para diferentes materiales.

Por otro lado, si el ambiente en el que se encuentra el producto tiene una humedad relativa mayor que la actividad de agua que le corresponde a su contenido de humedad, éste absorbe humedad. Por lo tanto, para secar el material no es suficiente con suministrar calor sino que es necesario que la humedad relativa del ambiente en el que se encuentra sea lo suficientemente baja.

4.3 RATIOS DE SECADO

4.3.1 Curvas de secado

Generalmente, el secado se caracteriza por tres fases en las cuales se observa todo el desarrollo del proceso de secado:

Primera Fase: Periodo de velocidad de secado creciente. Periodo corto transitorio (habitualmente despreciable) en el que se produce un calentamiento inicial del producto y la velocidad de secado aumenta.

Segunda Fase: Periodo de velocidad de secado constante. En este periodo el secado tiene lugar sólo en la superficie, produciéndose exclusivamente la evaporación de la humedad superficial. La extracción de humedad en este periodo depende principalmente de las condiciones del aire circundante y prácticamente es independiente de la naturaleza del producto. El movimiento del agua en el material es lo suficientemente rápido como para mantener las condiciones de saturación en la superficie, de manera que durante todo el intervalo el producto se encuentra saturado de humedad a una temperatura prácticamente constante y aproximadamente igual a la temperatura de bulbo húmedo. El proceso es similar a la evaporación de un líquido. (En los materiales no higroscópicos todo el proceso de secado tiene lugar en el régimen de secado constante).

Tercera Fase: Periodo de velocidad de secado decreciente. Este periodo empieza al finalizar el periodo constante (contenido de humedad crítico del producto). La resistencia interna del material se hace más importante, dificultando el paso de humedad; ya no existen condiciones de saturación en la superficie y se produce la eliminación de la humedad interna. Este periodo depende fundamentalmente de la difusión de humedad del interior del producto hacia la superficie, así como de la evaporación superficial. A su vez, está dividido

en dos estados , un primer periodo decreciente, en el que tiene lugar el secado de la superficie no saturada, y un segundo periodo decreciente en el que la difusión de humedad a la superficie se hace más lenta y es el factor determinante. En general, la duración de estos regímenes depende del contenido de humedad inicial del material.

En la figura 16 observamos las curvas del secado que ocurren en la deshidratación de alimentos.

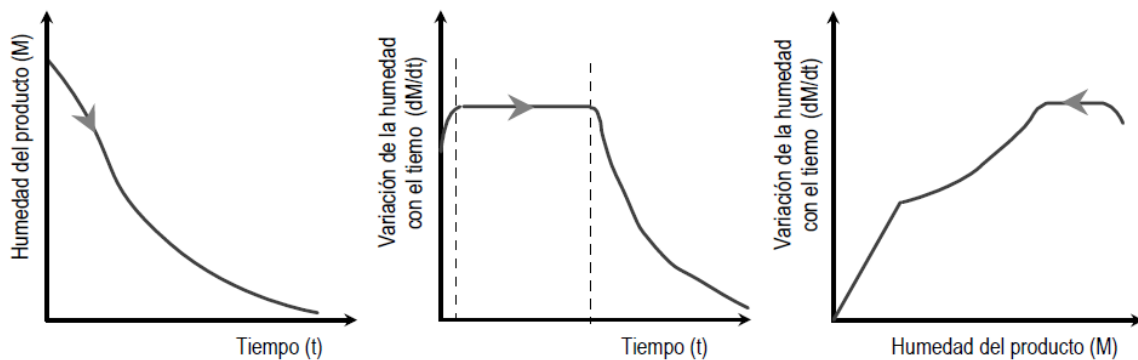


Fig. 16 Curvas de secado

Fuente: Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos.

En los materiales agrícolas la humedad contenida está usualmente “atrapada” en pequeños capilares cerrados, siendo imposible llegar hasta valores de humedad iguales a cero y por tanto, siempre existe un contenido de humedad residual.

Cuando un producto es calentado con contenido de humedad constante, su presión del vapor aumenta, dando lugar a un movimiento de humedad hacia el ambiente que se encuentra a un presión de vapor inferior. El ratio de humedad es sólo aproximadamente proporcional a la diferencia de presiones de vapor entre el producto y el ambiente, ya que existe una resistencia del material al flujo de humedad.

De esta forma, se puede hablar para los productos agrícolas, en general, de dos regímenes de secado: el periodo de velocidad de secado constante y el periodo de velocidad de secado decreciente. Sin embargo, dependiendo del tipo de producto y del proceso de secado, en ocasiones no existe periodo de velocidad de secado constante. Por tanto, resulta

fundamental realizar ensayos experimentales de secado para cada tipo de producto, mediante el registro de peso a diferentes intervalos, para poder establecer de manera correcta sus curvas de secado.

4.4 PROPIEDADES PSICROMÉTRICAS.

El aire atmosférico que nos rodea es una mezcla de aire seco y vapor de agua, a la que se le llama aire húmedo. Debido a que esta mezcla de gases es la que se acondiciona en los sistemas de secado o sistemas de control ambiental, es necesario comprender como se comporta cuya información se encuentra organizada en las conocidas cartas psicrométricas de la figura 17.

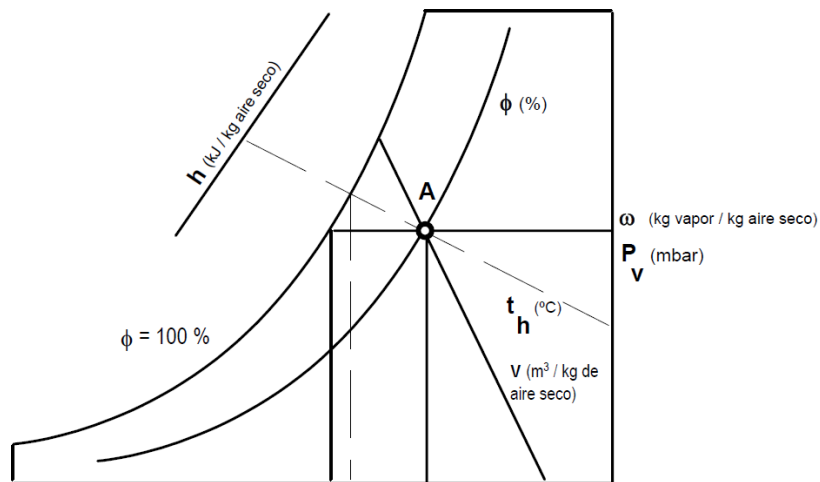


Fig. 17: Carta psicrométrica.

El aire se caracteriza por algunas propiedades físicas como la temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de punto de rocío, relación de humedad, humedad relativa, volumen específico, y, entalpía específica.

4.4.1 Temperatura de bulbo seco (BS)

Es la temperatura del aire tal como indica un termómetro. Las palabras temperatura y temperatura de bulbo seco se emplean para designar lo mismo, tratándose del aire.

4.4.2 Temperatura de bulbo húmedo (BH)

Es la temperatura que indica un termómetro cuyo bulbo está envuelto en un paño empapado en agua, en medio de la corriente de aire. Al proporcionarle una corriente de aire, el agua se

evapora más o menos rápidamente dependiendo de la humedad relativa del ambiente, enfriándose más cuanto menor sea ésta, debido al calor latente de evaporación del agua.

4.4.3 Relación de humedad (W)

También denominada humedad específica. Es el peso de vapor de agua por kilogramo de aire seco, expresado en g/Kg de aire seco.

4.4.4 Humedad Relativa.

Es la relación de la presión real de vapor de agua en el aire con la presión de vapor de agua si el aire estuviera saturado a la misma temperatura de bulbo seco y es expresada en porcentaje (%). Así la humedad relativa es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental

4.4.5 Volumen específico.

Es el volumen del aire por unidad de peso de aire seco. Es inverso a la densidad. No dependen de la cantidad de materia. En el sistema internacional de medidas (SI) es expresado en m^3/Kg

4.4.6 Entalpía.

En general, la entalpía es la propiedad que poseen los cuerpos de almacenar energía en forma de temperatura y presión. La entalpía específica del aire (ha), es el contenido de calor del aire, por unidad de peso

4.5 EVOLUCIONES TÍPICAS DEL AIRE EN UN PROCESO DE SECADO.

En el proceso de secado el objetivo es la extracción de humedad de un producto, que puede realizarse por diferentes técnicas, siendo las más usuales el contacto natural o forzado del aire (precalentado o a temperatura ambiente) con dicho producto.

Este flujo de aire que pasa sobre el material a secar, produce la transferencia de calor del aire al producto que da lugar a la vaporización de la humedad del producto al aire (proceso simultáneo de transferencia de masa y energía) y el consecuente incremento de su humedad relativa con una disminución de la temperatura seca y una constante temperatura de bulbo húmedo.

La utilización de aire precalentado supone una optimización en un proceso de secado, mejorando el aumento de la temperatura la capacidad de arrastre de humedad.

En la figura 18 se muestra, de forma esquemática, la ventaja de aumentar la temperatura seca del aire.

Así, se considera un aire ambiente no saturado a temperatura T_1 , humedad relativa ϕ_1 , temperatura de bulbo húmedo T_{bh1} y humedad absoluta w_1 (sección A en la figura 18). Si el aire no es precalentado, éste seguirá la línea de enfriamiento adiabática T_{h1} (AB en la figura 18) y si idealmente el proceso continuara hasta la saturación, le correspondería una humedad absoluta w_2 , lo que implicaría una extracción máxima de humedad dada por $(w_2 - w_1)$.

Sin embargo, si el aire ambiente es precalentado (antes de usarse para el secado) a humedad absoluta constante w_1 , hasta una temperatura seca T_2 , con una humedad relativa ϕ_2 , (línea AC en la figura 18), el proceso de secado se correspondería con la nueva línea de enfriamiento adiabática T_{h2} (línea CD en la figura) que en condiciones de saturación le correspondería una humedad absoluta w_3 . En este caso, el máximo valor de extracción de humedad se correspondería con $(w_3 - w_1)$.

Se aprecia, por tanto, que un aumento relativamente pequeño de la temperatura del aire incrementa considerablemente la capacidad de arrastre de humedad de éste.

De manera aproximada, para el rango de temperaturas en el que tienen lugar los procesos de secado de productos agrícolas, cada $^{\circ}\text{C}$ de incremento de la temperatura seca del aire provoca un aumento de su capacidad de arrastre de $3,6 \times 10^{-4} \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{airehumednosaturado}}$.

Para condiciones ambiente habituales, por ejemplo, 20°C y 59 % de humedad relativa el cambio a aire precalentado a 35 °C con 25 % de humedad relativa, incrementa en más de tres veces la capacidad de arrastre del aire.

De esta forma, mediante el uso de captadores solares de aire en los sistemas de secado solar, se consigue aumentar la capacidad desecante del aire, mejorando la eficiencia del proceso.

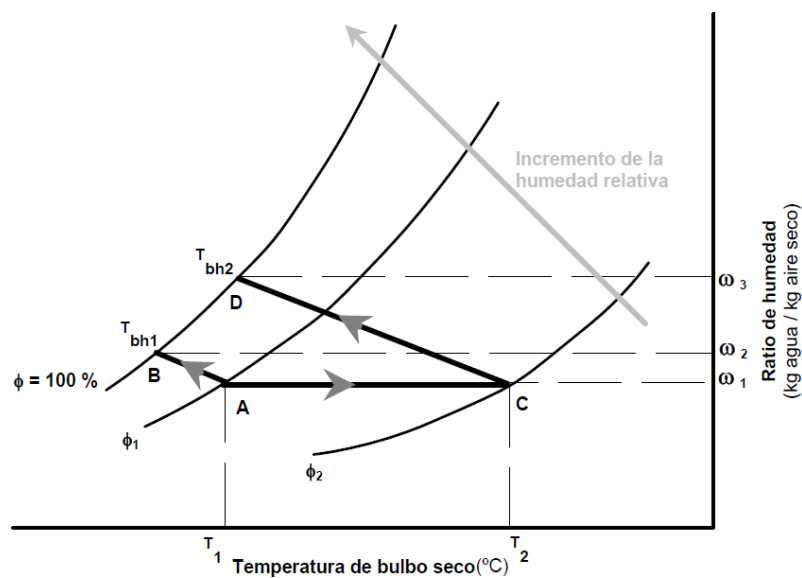


Fig. 18: Evolución del aire en los procesos de secado (aire ambiente o aire precalentado).

Por tanto, como se acaba de exponer, la capacidad deshidratante del aire depende principalmente de su humedad relativa, la cual es a su vez función de su temperatura. De esta forma, se pueden considerar tres posibles evoluciones del aire en el proceso desecado:

- Evolución adiabática: El sistema evoluciona sin intercambio de energía calorífica con el medio exterior. El producto a secar cede agua al aire, con lo que, desciende la temperatura de ambos hasta que se alcanza el equilibrio correspondiente a la saturación adiabática y la humedad relativa alcanza el valor del 100 %. Conseguido este límite es imposible extraer más agua del producto.
- Evolución del aire en un proceso de secado sin aporte calorífico exterior: Consiste en hacer pasar una corriente de aire, a temperatura ambiente y no

saturado a través de un producto, sin recibir aporte de energía calorífica exterior. De esta forma el aire en contacto con el producto, extrae de éste parte de su humedad, con lo que la temperatura inicial de ambos desciende. A lo largo de su recorrido, el aire aumenta su humedad relativa hasta alcanzar la saturación y además, si el recorrido es suficientemente largo y el caudal lo permite, la temperatura final será próxima a la de bulbo húmedo.

En un proceso eficiente y dado que la circulación forzada conlleva un costo, es necesario determinar el caudal de aire necesario para secar el producto en el menor tiempo posible. Aunque no existen fórmulas matemáticas exactas para obtener a priori este caudal, va a depender fundamentalmente de la naturaleza del producto y del tipo de secadero.

Sin embargo, existe la posibilidad de conocer si el proceso de secado se está efectuando en las condiciones adecuadas, mediante la medida de la temperatura a la salida del secador y en puntos intermedios de éste. Así, si en los puntos intermedios el aire tiene una temperatura próxima a la de saturación adiabática correspondiente a la temperatura del aire seco a la entrada, el caudal es insuficiente.

Por el contrario, si la temperatura disminuye progresivamente a lo largo del secador, pero a la salida no experimenta un descenso apreciable, respecto a la entrada, el caudal de aire está dimensionado en exceso.

Por último, si la temperatura se mantiene constante a lo largo del proceso, se puede asegurar que el aire no sirve para secar el producto ya que se encuentra en equilibrio con él, debiendo por tanto, aumentar la capacidad desecante del aire (aumentando su temperatura, conducirlo a través de un material higroscópico, someter el producto a un proceso de vacío, etc.).

- Proceso de secado con aporte energético directo: Se utiliza para mejorar la capacidad desecante del aire, que como se ha indicado, aumenta con su temperatura. Este sistema combinado con el anterior, es el sistema más habitual de secado (convección forzada y aporte de energía calorífica).

Las cartas psicométricas permiten calcular la energía que el sistema de calentamiento requiere. Para un secador solar la tasa de evaporización del agua está dada por:

$$\Delta x = \frac{Ms}{t} \left(\frac{Ho - Hf}{100} \right) \quad (6)$$

$\Delta x =$ Tasa de vaporización, g/s.

$Ms =$ Masa de materia Seca, g

$t =$ Tiempo de secado, s

$Ho =$ Humedad inicial, %

$Hf =$ Humedad final, %

El poder de vaporización del aire de secado estará definido por:

$$W = W2 - W1 \quad (7)$$

$W =$ Poder de evaporización (Relacion de humedad)

$W2 =$ Contenido de humedad del aire de salida

$W1 =$ Contenido de humedad del aire de secado

Estas tres variables son medidas en gramos de agua/kilogramos de aire de secado (g_{H2O}/Kg_{As}). La cantidad de aire de secado, necesaria para remover el vapor de agua del grano, se determina por la expresión:

$$m_{As} = \frac{\Delta x}{W} \quad (8)$$

$m_{As} =$ Cantidad de aire de secado, $\frac{Kg}{s}$

$\Delta x =$ Tasa de evaporización, $\frac{g_{h2o}}{s}$

$W =$ Poder de vaporización, $\frac{g_{h2o}}{Kg_{As}}$

El caudal de aire para el secado, se determina por la expresión:

$$q = m_{As} * Va \quad (9)$$

$q =$ Caudal de aire, m^3/s

$m_{As} =$ Cantidad de aire de secado, Kg/s

$Va =$ Volumen específico del aire, m^3/Kg

El volumen específico del aire, a una atmosfera de presión, es de $1m^3/Kg$. Este valor es utilizado para la mayoría de cálculos, ya que el cambio que este tiene en relación a la altura es mínimo.

La energía, que el sistema de secado requiere, se calcula con la expresión

$$Q = m_{As}(H_2 - H_1) \quad (10)$$

$Q =$ Flujo calor, KJ/s

$m_{As} =$ Cantidad de aire de secado, Kg/s

$H_1 =$ Entalpia del aire del ambiente, KJ/Kg

$H_2 =$ Entalpia del aire del secado, KJ/Kg

4.6 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE HÚMEDO

El comportamiento del aire húmedo no es constante con la temperatura.

A continuación se presenta la dependencia de sus principales propiedades físicas con la temperatura.

- **Calor específico** $C_{pas}(J / kg.K)$:

$$C_{pas} = 999,2 + 0,1434 * Tfm + 1,101 * 10^{-4} * Tfm^2 - 6,7581 * 10^{-8} * Tfm^3 \quad (11)$$

Siendo

Tfm : Temperatura media del fluido considerado ($^{\circ}C$).

- **Densidad**, $\rho(Kg/m^3)$

$$\rho = \frac{353,44}{Tfm + 273,15} \quad (12)$$

- **Viscosidad dinámica, $\mu(Ns/m^2)$**

$$\mu = 1,718 \times 10^{-5} + 4,62 \times 10^{-8} \cdot Tfm \quad (13)$$

- **Viscosidad cinemática , $vc(m^2/s)$**

$$vc = \mu/\rho \quad (14)$$

- **Conductividad térmica $K_v(W/m \cdot K)$**

$$K_v = 0,244 + 0,7673 * 10^{-4} * Tfm \quad (15)$$

- **Coefficiente de expansión térmica $\beta(K^{-1})$:**

$$\beta = \frac{1}{Tfm + 273,15} \quad (16)$$

CAPÍTULO V

5.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

Para secar un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado.

La transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas, es decir que siempre que exista una diferencia de temperatura entre diferentes cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Existen tres modos a través de los cuales el calor puede ser transferido desde un cuerpo hacia otro. Estos son conducción, convección y radiación.

5.2 CONDUCCIÓN

Es el flujo de calor a través de medios sólidos por medio de la vibración interna de las moléculas y de los electrones libres y por choques entre ellas.

Se puede cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Tales ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo.

En la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como la Ley de Fourier (ecuación 17).

Para la pared plana unidimensional que se muestra en la Figura 19, la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como:

$$\dot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (17)$$

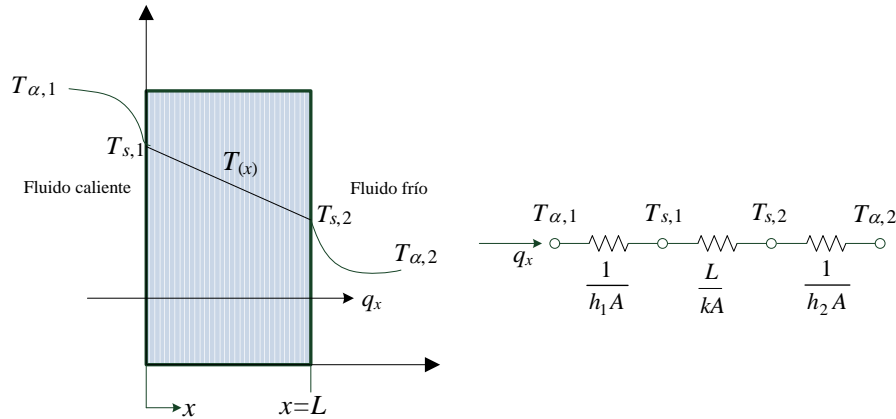


Fig. 19: Transferencia de calor a través de una pared plana.

El *flujo de calor* o *transferencia de calor por unidad de área* \dot{q}_x (W/m^2) (ecuación 19) es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria *perpendicular* a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La constante de proporcionalidad, k , es una propiedad de *transporte* conocida como *conductividad térmica* (W/mK) y es una característica del material de la pared. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente. En las condiciones de estado estable que se muestran en la Fig. 19, donde la distribución de temperatura es *lineal*, la transferencia de calor por conducción se expresa en la ecuación 18:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (18)$$

Tomando en cuenta que A es el área de la pared plana *normal* hacia la dirección de la transferencia de calor y, para la pared plana, es una constante independiente de x . El flujo de calor es entonces

$$\dot{q}_x = \frac{q_x}{A} = \frac{k}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (19)$$

Obsérvese que la ecuación 19, proporciona un *flujo de calor*, es decir la velocidad de calor transferido por *unidad de área*. El *calor transferido* por unidad de tiempo, q_x (W), a través de una pared plana de área A , es entonces el producto del flujo y el área $q_x = \dot{q}_x \times A$.

De acuerdo a la ecuación 18, puesto que kA/L es la conductancia, su recíproco R es la resistencia al flujo de calor, o $R = L/kA$ que tiene analogía a la resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, y se define como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor correspondiente.

La resistencia térmica para la convección es $R=1/hA$, donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección y, A el área respectiva. Más adelante describiremos la convección.

5.2.1 Flujo de calor a través de una pared compuesta

Los circuitos térmicos se los acopla para formar sistemas más complejos, como las paredes compuestas. Estas paredes incluyen número infinito de resistencias en serie y en paralelo debido a capas de diferentes materiales.

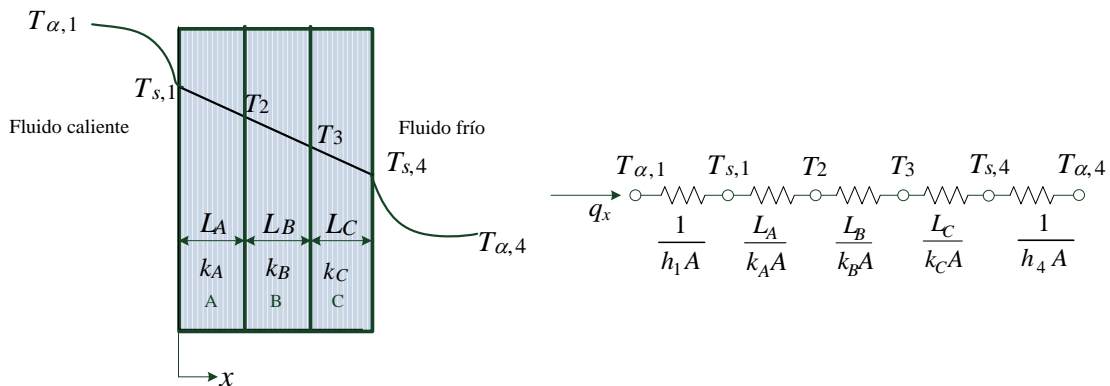


Fig. 20: Circuito térmico equivalente de una pared compuesta en serie

Con sistemas compuestos suele ser conveniente trabajar con un **Coefficiente global de transferencia de calor**, U , que se define con una expresión análoga a la ley de enfriamiento de Newton. En consecuencia se obtiene la ecuación 20:

$$q_x = UA\Delta t \quad (20)$$

Donde Δt es la diferencia total de temperatura. El coeficiente global de transferencia de calor se relaciona con la resistencia térmica total de tal modo que $UA = 1/R_{tot}$. De aquí en general para una pared compuesta como la de la Fig. 20.

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \frac{1}{(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_4)} \quad (21)$$

En general, se puede escribir

$$R_{tot} = \Sigma R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \quad (22)$$

Es importante reconocer que, en los sistemas compuestos, la caída de temperatura a lo largo de la interfaz entre los materiales puede ser grande. Este cambio se atribuya a lo que se conoce como *resistencia térmica de contacto*, $R_{t,C}$, se debe principalmente a efectos de rugosidad en la superficie.

5.3 CONVECCIÓN

La convección se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Supóngase que un recipiente con un líquido se coloca sobre una llama caliente. El líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica. El líquido adyacente al fondo también es menos denso que la porción superior fría y asciende a través de ella, transmitiendo su calor por medio de mezcla conforme asciende. La transferencia de calor del líquido caliente del fondo del recipiente al resto, es *convección natural* o *convección libre*. Si se produce cualquiera otra agitación, tal como la provocada por un agitador, el proceso es de *convección forzada*.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación 23, es el modelo apropiado.

$$\dot{q} = hA (T_s - T_\infty) \quad (23)$$

Donde \dot{q} , el flujo de calor por convección (W/m^2), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, y la constante de proporcionalidad h ($\text{W/m}^2\text{K}$) se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección. Este depende de las condiciones de la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la

naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte.

5.3.1 Números Adimensionales.

En el análisis de la convección es práctica común quitar las dimensiones a las expresiones físico-matemáticas que modelan el mecanismo y agrupar las variables, dando lugar a los números adimensionales. Entre las propiedades del fluido se encuentran: la viscosidad dinámica μ , la conductividad térmica k , la densidad ρ . También se podría considerar que depende de la viscosidad cinemática ν , puesto que $\nu = \mu/\rho$. Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría y la aspereza. El tipo de flujo, laminar o turbulento, también influye en la velocidad de transferencia de calor por convección.

En convección se emplean con mayor frecuencia números adimensionales citados en la tabla 6:

Tabla 6: Grupos adimensionales más comunes

Símbolo	Nombre	Grupo	Interpretación
Gr	Número de Grashof	$L_C \rho^2 \beta g \Delta T / \mu^2$	Razón de las fuerzas de empuje a las viscosas
Nu	Número de Nusselt	hD/k	Gradiente de temperatura adimensional en la superficie
Pr	Número de Prandtl	$c\mu/k$	Razón de las difusividades de momento y térmica
Re	Número de Reynolds	VD/ν	Razón de las fuerzas de inercia y viscosas

Fuente: <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla1.pdf>

En esta tabla 6 se mencionan algunos parámetros no citados anteriormente como lo son: la longitud característica L_C , para una placa vertical del longitud L , $L_C = L$; para un cilindro de diámetro D , $L_C = D$ (para un tubo no circular este diámetro es equivalente al Diámetro Hidráulico). Tenemos también el valor de la constante gravitacional g , el coeficiente de

expansión volumétrica para un gas ideal $\beta = 1/T$ (T es la temperatura absoluta en K). Para el número de Reynolds tenemos además el parámetro V , que es la velocidad del fluido.

5.4 RADIACIÓN

En la Radiación las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío, la transferencia de calor se da por medio de ondas electromagnéticas. La energía irradiada se mueve a la velocidad de la luz.

Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña a T_S y una superficie isotérmica mucho más grande que rodea por completo a la pequeña. Los alrededores podrían ser, por ejemplo, las paredes de un cuarto o un horno cuya temperatura T_{alr} es diferente de la de una superficie rodeada ($T_{alr} \neq T_S$). Para tal condición la irradiación se aproxima con la emisión de un cuerpo negro a T_{alr} , caso en el que $G = \sigma T_{alr}^4$ ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ Constante de Stefan-Boltzman). Si se supone que la superficie es tal que $\alpha = \varepsilon$ (Superficie gris) (absorbancia=emitancia), la velocidad neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie, expresada por unidad de área de la superficie se expresa en la ecuación 24:

$$\dot{q} = \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{alr}^4) \quad (24)$$

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación.

La emisividad $[\varepsilon]$, es la relación entre la energía que emite la superficie a cierta temperatura y la que emite un cuerpo negro a la misma temperatura, $\varepsilon = \varepsilon(T)/\varepsilon_b(T)$.

La energía que radia un cuerpo negro a cierta temperatura es $\varepsilon_b(T) = \sigma T^4$

5.4.1 Superficies para Absorción

Cuando la energía radiante llega a una superficie, parte es reflejada, parte es absorbida por el material y parte se transmite a través de él. Estas fracciones de energía son coeficientes que dependen del material, además de la longitud de onda y del ángulo de incidencia de

radiación. Cuando no se especifica longitud de onda se supone que el coeficiente al que se refiere es global.

Estos coeficientes son los siguientes:

Coeficiente de absorción o absorbancia (α): Fracción de la energía que es absorbida por el material.

Coeficiente de transmisión o transmitancia (τ): Fracción de energía que se transmite a través del material.

Coeficiente de reflexión o reluctancia (ρ): Fracción de energía que se refleja desde el material.

La suma de los coeficientes debe ser igual a la unidad:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (25)$$

Los cuerpos sólidos opacos en equilibrio térmico no transmiten la radiación, su transmitancia es cero

$$\alpha + \rho = 1 \quad (26)$$

CAPÍTULO VI

6.1 COLECTORES SOLARES PLACA PLANA

El colector solar convierte la energía solar incidente en otro tipo de energía útil. Carece de un intercambiador de calor convencional en que en éstos se realizan intercambios térmicos entre fluidos con elevados coeficientes de transferencia térmica.

En el análisis de los colectores solares se implica problemas particulares de flujos de energía, bajos y variables, así como una gran relevancia de los fenómenos de radiación. En los colectores de placa plana, la superficie que absorbe la radiación solar es igual a la superficie que la capta. Se pueden diseñar colectores de placa plana para trabajar con temperaturas de placa absorbente comprendidas entre 40°C y 130°C. Estos colectores utilizan tanto la radiación solar directa como la difusa, no requieren de sistemas de seguimiento solar y prácticamente no precisan de mantenimiento. Sus aplicaciones van enfocadas a sistemas de calentamiento de agua, calefacción de edificios y aire acondicionado.

En la Fig. 21 se muestra un colector solar de placa plana y sus componentes:

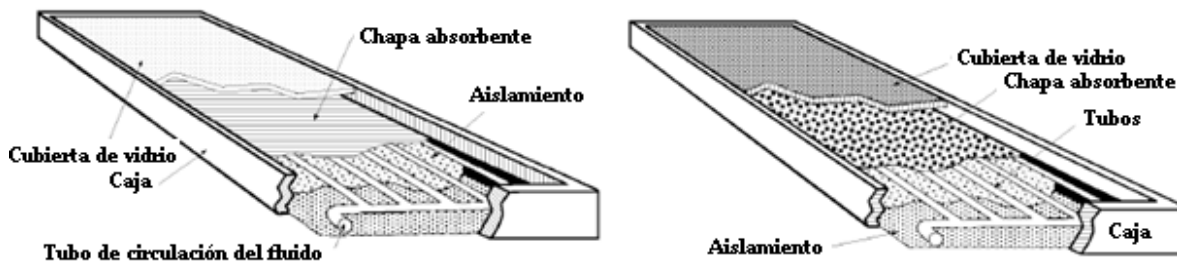


Fig. 21: Evolución del aire en los procesos de secado.

6.1.1 Caja Aislada

Es la que provee aislamiento hacia la parte de atrás y a los lados del colector. La caja puede ser hecha de aluminio, acero inoxidable o madera. El aislamiento previene las pérdidas de calor hacia el exterior del colector. La caja también provee la estructura al colector.

6.1.2 Placa de Absorción

Es el elemento principal del colector. La placa de absorción debe cubrir la apertura total de colector. Cumple tres funciones principales:

- Absorber la máxima cantidad de irradiación solar.
- Emitir la menor cantidad de calor posible hacia sus alrededores.

6.1.3 Cubierta

Se la utiliza para reducir las pérdidas de calor por convección desde placa de absorción, se emplea una cubierta transparente. Esta cubierta tiene dos funciones principales: la primera es que el viento desde el exterior no enfríe la cubierta, la otra es permitir que la radiación pase a través de esta hacia la placa de absorción y reflejar la radiación térmica emitida por la placa.

6.2 FUNCIONAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

El colector convierte la energía solar en calor el cual es luego transferido por convección hacia el aire y mediante convección natural circula en el interior del colector hacia la cámara de secado. La energía que proviene del sol es denominada radiación.

Se detalla a continuación el modelo matemático, el cual hace referencia a lo descrito por DUFFIE y BECKMAN, Solar Engineering and Thermal Process. (1980)

6.2.1 Ecuaciones de energía

Se determina el funcionamiento del colector se determina por la ecuación de balance de energía.

De esta manera el balance se basa en que a energía que entra al colector es igual la energía que sale del colector, dicho en términos semejantes:

$$\text{Energía útil} = \text{Energía solar absorbida por la placa} - \text{Pérdidas de energía calorífica.}$$

6.2.2 Radiación proveniente del sol

La cantidad de energía que el recibe el colector desde el sol, depende del ángulo de incidencia del colector y de las propiedades de la placa de absorción y de la cubierta transparente.

La ecuación 27, es la que se utiliza para el cálculo de la energía incidente E_{inc} [W]:

$$E_{inc} = \tau \alpha I A_a \quad (27)$$

Dónde:

τ es la transmitancia de la cubierta.

α es la absorbancia de la placa.

I es la irradiación solar que ingresa al colector [W/m^2]

A_a es el área de apertura del colector [m^2]

6.2.3 Pérdidas de calor del colector

La pérdida de calor $Q_{pérd}$ [W] (ecuación 28), se pueden poner en función del *coeficiente global* de transmisión de calor de las pérdidas de calor del colector U_L .

Si se conoce U_L y si la placa del colector se sabe está a una temperatura media T_p , el valor de $Q_{pérd}$ se puede poner, siendo T_a la temperatura ambiente, en la forma:

$$Q_{pérd} = U_L A_c (T_p - T_a) \quad (28)$$

El coeficiente total de transferencia de calor U_L se establece a partir de la temperatura promedio de la placa de absorción.

En la figura 22, se puede apreciar de mejor manera la evolución del aire en los procesos de secado.

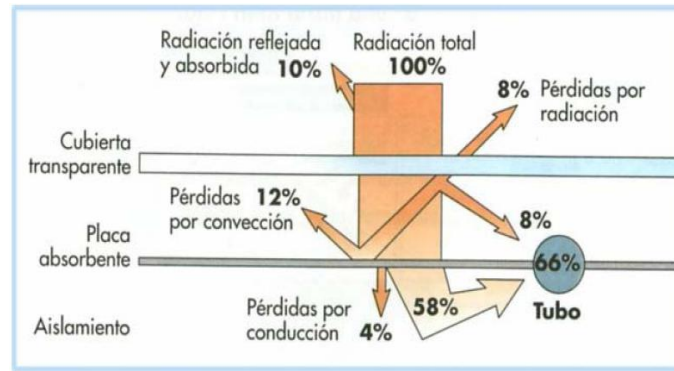


Fig. 22: Evolución del aire en los procesos de secado.

6.2.4 Coeficiente total de transferencia de calor

Para determinar el coeficiente total de transferencia de calor U_L requiere encontrar las conductancias inferior, superior y lateral en el colector solar.

En la Figura 23, se esquematiza el circuito térmico de un colector solar plano de dos cubiertas que ayuda a visualizar los fenómenos físicos que se producen en el colector solar y así, a partir de este circuito se plantean las ecuaciones de las conductancias.

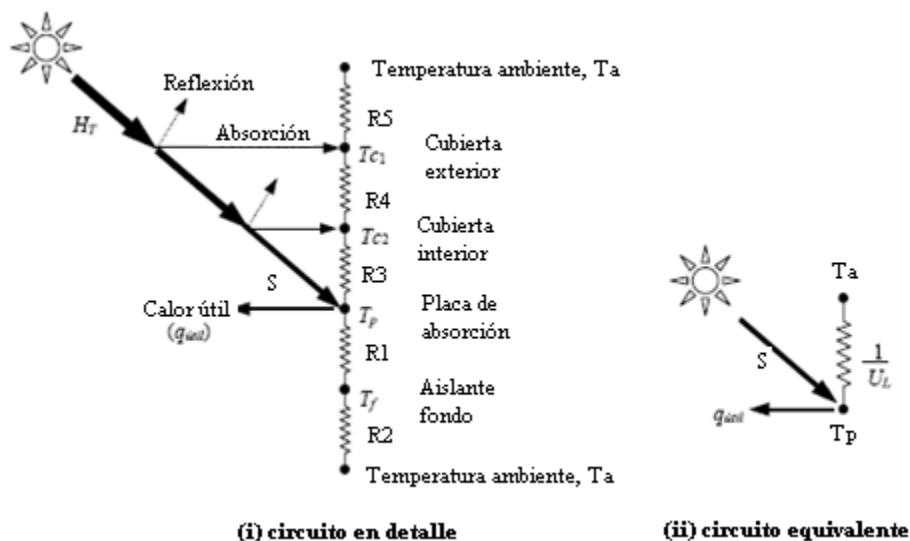


Fig. 23: Esquema térmico de un colector solar de placa plana con dos cubiertas

Las resistencias del circuito de la Fig. 23 están dadas así:

R_1 está dado por la conductividad del aislante ka , y la longitud transversal del mismo.

R_2 está dado por el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre la placa de absorción y el ambiente.

R3: Resistencia térmica entre la placa de absorción y la cubierta interior:

R4: Resistencia térmica entre la cubierta exterior y la cubierta interior:

R5: Resistencia térmica entre la cubierta exterior y el ambiente

6.2.4.1 Conductancia por la parte superior U_t

Se evalúa la conductancia determinando las resistencias térmicas R_3 , R_4 , y R_5 , las cuales se muestran. El calor se transfiere entre la placa de absorción y la cubierta interior por convección y radiación en forma paralela; esto mismo, también ocurre entre las dos cubiertas, interior y exterior. Los mismos mecanismos de transferencia son igualmente importantes en la disipación de calor por parte de la cubierta exterior hacia el ambiente. Para encontrar la conductancia por la parte superior se utiliza la ecuación 29.

$$U_t = \frac{1}{R_3 + R_4 + R_5} \quad (29)$$

El proceso de cálculo de R_3 , R_4 y R_5 es iterativo, además requiere de datos como las temperaturas de las cubiertas y los coeficientes convectivos de transferencia de calor, que por lo general son difíciles de evaluar; esto hace que el cálculo de estas resistencias térmicas sea complicado.

La ecuación empírica, desarrollada por Klein (1979) luego del procedimiento básico de Hottel y Woertz (1942) y Klein (1975), es utilizada para el cálculo de la conductancia por la parte superior del colector simplifica el procedimiento mediante resistencias térmicas. Esta ecuación 30, se utiliza para temperaturas de la placa de absorción entre 25 y 225 °C, con un margen de error aproximado de $\pm 0,3 \text{ W/m}^2$.

$$U_t = \frac{1}{\frac{N}{\frac{c}{T_{pm}} \left[\frac{T_{pm} - T_a}{N+f} \right]^e} + \frac{1}{h_{viento}}} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon p + 0.00591 N h_{viento}} + \frac{2N+f-1+0.133\varepsilon p}{\varepsilon c} - N} \quad (30)$$

Dónde:

N = Número de cubiertas

T_{pm} = Temperatura de la placa [K]

$T_a = \text{Temperatura ambiente [K]}$

$\varepsilon_p = \text{Emitancia de la placa}$

$\varepsilon_c = \text{Emitancia de la cubierta de cristal}$

$u = \text{velocidad del viento [m/s]}$

$\theta = \text{Inclinación del colector}$

$\sigma = 5.76 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ (Coeficiente de radiación de Stefan-Boltzmann)}$

$h_{viento} = 5.7 + 3.8u \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} \right] \text{ (Coeficiente de transferencia de calor del viento)}$

$f = (1 + 0.089hv - 0.1166hv \times \varepsilon_p)(1 + 0.07866N) \text{ constante}$

$C = 520(1 - 0.000051\theta^2) \text{ constante}$

$e = 0.430 \left(1 - \frac{100}{T_p} \right) = 0.313 \text{ constante}$

6.2.4.2 Conductancia por la parte inferior U_b

Se evalúa la conductancia conociendo la resistencia térmica conductiva R_1 y la resistencia térmica convectiva, $U_b = 1/(R_1 + R_2)$.

R_1 está dado por la conductividad del aislante k_{ais} , y la longitud transversal del mismo e_{ais} ; R_2 está dado por el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre la placa de absorción y el ambiente, el cual en colectores bien aislados es despreciable.

Si $R_2 < R_1$, entonces R_2 se desprecia; por lo que la conductancia en la parte inferior está representada en la ecuación 31:

$$U_b = \frac{1}{R_1} = \frac{k_{ais}}{e_{ais}} \quad (31)$$

6.2.4.3 Conductancia por la parte lateral U_{lad}

Las pérdidas de calor a través de los lados, son despreciables según el modelado matemático descrito por DUFFIE y BECKMAN, Solar Engineering and Thermal Process. (1980).

6.2.4.4 Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds relaciona la densidad en este caso el aire ρa , viscosidad dinámica ν , velocidad del viento u , y el radio hidráulico Dh , como se expresa en la ecuación 32.

$$Re = \frac{\rho a \cdot u \cdot Dh}{\nu} \quad (32)$$

6.2.4.5 Número de Nusselt (Nu)

El número de nusselt se lo calcula mediante la ecuación 33.

$$Nu = 0.0158 \cdot Re^{0.8} \quad (33)$$

6.2.4.6 Coeficientes convectivos en el interior (h)

El coeficiente convectivo en el interior del colector relaciona el número de nusselt Nu , la conductividad térmica del aire ka , y el diámetro hidráulico Dh , como se expresa en la ecuación 34, debemos aclarar que para esta caso $h1 = h = h2$ según DUFFIE y BECKMAN, Solar Engineering and Thermal Process.

$$h = \frac{Nu \cdot ka}{Dh} \quad (34)$$

6.2.4.7 Coeficiente de Radiación entre la cubierta y la placa ($hrad$)

El coeficiente de radiación entre la cubierta y la placa relaciona el coeficiente de Stefan-Boltzmann σ , la temperatura media del fluido Tfm , la emitancia de la placa ϵp y la emitancia de la cubierta del vidrio ϵc , como se expresa en la ecuación 35.

$$hrad = \frac{4 \cdot \sigma \cdot Tfm^3}{\frac{1}{\epsilon p} + \frac{1}{\epsilon c} - 1} \quad (35)$$

6.2.4.8 Coeficiente Total de pérdidas de calor (UL)

La evaluación del coeficiente total de transferencia de calor [W/m^2K] para todo el colector está dada por la sumatoria de las tres conductancias indicadas anteriormente; es decir, inferior, superior y lateral y se indica en la ecuación 36.

$$UL = \frac{(Ub + Ut). (h1. hrad + h2. hrad + h1. h2) + [Ub. Ut. (h1 + h2)]}{h1. hrad + Ut. h2 + h2. hrad + h1. h2} \quad (36)$$

6.2.4.9 Factor de Eficiencia del Colector (F')

El factor de eficiencia del colector relaciona $h1$, y $h2$ que para nuestro caso es igual a $hrad$, según DUFFIE y BECKMAN, Solar Engineering and Thermal Process, el coeficiente de pérdidas de calor hacia arriba Ut y el coeficiente de pérdidas de calor hacia abajo, que para nuestro caso es despreciable según el mismo autor, como se expresa en la ecuación 37.

$$F' = \frac{h1. hrad + Ut. h2 + h2. hrad + h1. h2}{(Ut + hrad + h1)(Ub + h2 + hrad) - hrad^2} \quad (37)$$

6.2.4.10 Flujo Másico (ma)

Flujo másico es la magnitud que expresa la variación de la masa en el tiempo, en la cual ρa es la densidad del aire, Af es el área transversal del colector, y u es la velocidad del viento, tal como se expresa en la ecuación 38.

$$ma = \rho a. Af. u \quad (38)$$

6.2.4.11 Factor de Flujo (F'')

El Factor de flujo relaciona el flujo másico ma , el calor específico del aire Cpa , área del colector Ac , el coeficiente total de pérdidas en el colector UL y el factor de eficiencia del colector F' , tal como se indica en la ecuación 39.

$$F'' = \frac{ma. Cpa}{Ac. UL. F'} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(Ac. UL. F')}{ma. Cpa} \right] \right\} \quad (39)$$

6.2.4.12 Factor de Remoción de Calor (FR)

El Factor de remoción de calor es el producto entre el factor de eficiencia del colector F' y el factor de flujo F'' , tal como se observa en la ecuación 40.

$$FR = F'. F'' \quad (40)$$

6.2.4.15 Energía Absorbida por La Placa (S)

La energía absorbida por la placa es resultado del producto de la Radiación IT , la transmitancia de la cubierta de vidrio τ y la absorptancia de la placa α , tal como se observa en la ecuación 41.

$$S = IT \times 1.02 \times \tau \times \alpha \quad (41)$$

6.2.4.16 Calor Útil en el Colector (Qu)

El Calor útil en el colector relaciona el área del colector A_c , la energía absorbida por la placa S , el coeficiente total de pérdidas en el colector la temperatura de la placa T_{pm} y la temperatura ambiente T_a , tal como se indica en la ecuación 42.

$$Qu = A_c[S - UL(T_{pm} - T_a)] \quad (42)$$

6.2.4.17 Cálculo de la Temperatura media del Fluido (T_{fm2}) y la Temperaturas de la Placa (T_{pm2})

Para el cálculo de las temperaturas media del fluido y la temperatura de la placa, según DUFFIE y BECKMAN, Solar Engineering and Thermal Process, se lo realiza con las ecuaciones 43 y 44, estas temperaturas deben coincidir con los valores iniciales asumidos de esta manera se puede continuar con la evaluación de los demás parámetros.

$$T_{fm2} = T_a + \frac{Q_u}{A_c \cdot FR \cdot UL} (1 - F'') \quad (43)$$

$$T_{pm2} = T_a + \frac{Q_u}{A_c \cdot FR \cdot UL} (1 - FR) \quad (44)$$

6.2.4.18 Temperatura de salida del Aire del Colector.

Para el cálculo de la temperatura del aire a la salida del colector, se relaciona la temperatura ambiente T_a , el calor útil en el colector Qu , el flujo másico ma , y el calor específico del aire C_{pa} , tal como se muestra en la ecuación 45.

$$T_s = T_a + \frac{Q_u}{ma \cdot Cpa} \quad (45)$$

6.3 EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE

Una variable habitual para controlar en los dispositivos de secado dotados de calentadores solares de aire. Valores comunes para calentadores de placa plana en convección natural se encuentran en el rango del 40-60 %, siendo mayores para convección forzada con el caudal másico de aire adecuado.

La eficiencia del calentador de aire se define según se muestra en la ecuación 46.

$$\eta = \frac{Q_u}{IT * Ac} \quad (46)$$

Siendo: Ac la superficie de captación (m^2), IT la radiación total incidente sobre la superficie inclinada del colector (w/m^2) y Q_u el calor útil que desplaza el aire a su paso por el colector (W).

6.4 EFICIENCIA DEL SECADOR SOLAR POR CONVECCIÓN NATURAL

La eficiencia del secadero evalúa conjuntamente el funcionamiento térmico del sistema de secado, incluyendo la eficiencia del colector y de la cámara de secado. Es una medida de la efectividad de la energía incidente, esto es, cómo la radiación solar se utiliza en el secado de los productos. Valores habituales de este parámetro se encuentran en el rango 10-50 %, dependiendo del modo de funcionamiento y del tipo de secadero.

Mediante ecuación 47, se obtiene la eficiencia del secador solar por convección natural.

$$\eta_s = \frac{(W_o - W_t) \cdot L_w}{H_T \cdot A_c} \quad (47)$$

Siendo: Ac la superficie de captación (m^2), HT la radiación horaria incidente sobre la superficie inclinada del colector (kJ/m^2) y L_w el calor latente de vaporización del agua para la temperatura del aire de salida (kJ/kg)

CAPÍTULO VII

7.1 SISTEMA DE CONTROL DEL SECADOR SOLAR

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados.

En nuestro trabajo de investigación se ha propuesto un sistema de control en donde, se pueda adquirir de una manera organizada los datos necesarios para el monitoreo tales como temperatura, humedad, a continuación en la figura 24 presentamos el diagrama de bloques del circuito.

Los sensores de humedad y temperatura entregan una señal de voltaje dependiendo de las condiciones atmosféricas en las que se encuentren, esta señal esta recibida por un circuito de acople o también llamado amplificador operacional LM358, cuyo trabajo es acoplar las impedancias de los sensores con la impedancia del convertidor A/D.

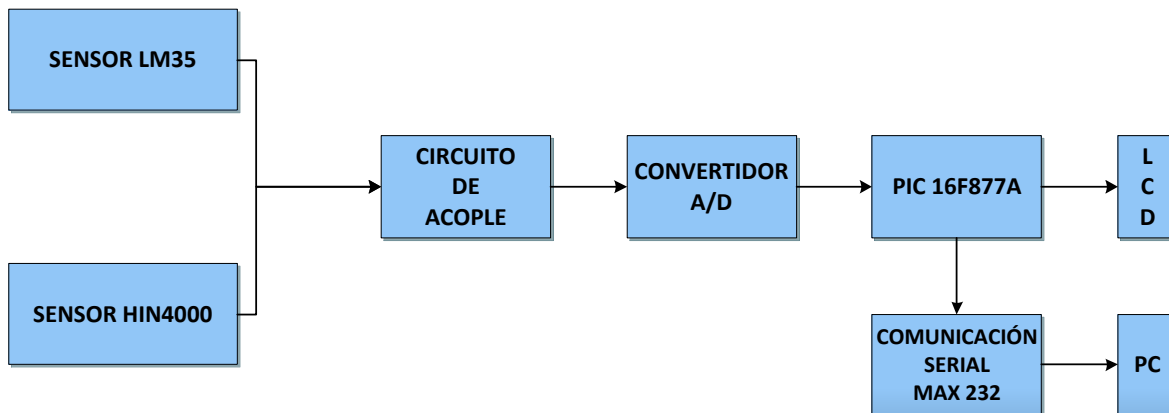


Fig. 24: Diagrama de Bloques del Circuito

El PIC16F877A recibe una señal analógica del convertidor y lo hace digital, este dato digital lo visualizamos en el LCD y lo guardamos en la memoria EEPROM del PIC para luego descargarlo a la PC mediante una comunicación serial MAX 232.

La etapa de adquisición de datos, control de temperatura e interface con la computadora se diseñó en base a microcontroladores PIC. Esta incluye el desarrollo de los circuitos

electrónicos necesarios para el acondicionamiento de las distintas señales provenientes de los sensores, en la figura 25 se muestra un esquema del sistema desarrollado y construido en base a las necesidades planteadas por el proyecto de tesis en el secado de café.

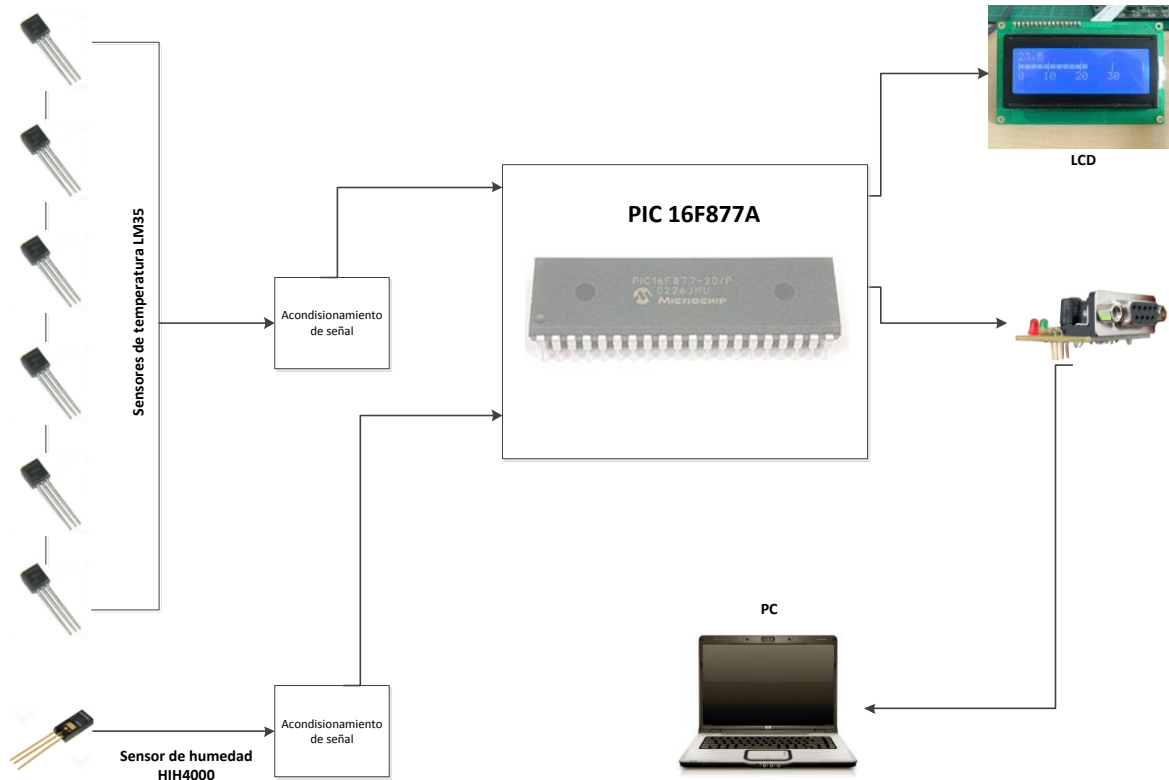


Fig. 25: Esquema del Sistema

7.2 SENSOR DE TEMPERATURA LM35.

El LM35 es un sensor de temperatura integrado de precisión, cuya tensión de salida es linealmente proporcional a temperatura en °C (grados centígrados).

El LM35 por lo tanto tiene una ventaja sobre los sensores de temperatura lineal calibrada en grados Kelvin: que el usuario no está obligado a restar una gran tensión constante para obtener grados centígrados.

El LM35 no requiere ninguna calibración externa o ajuste para proporcionar una precisión típica de ± 1.4 °C a temperatura ambiente y ± 3.4 °C a lo largo de su rango de temperatura (de -55 a 150 °C).

El dispositivo se ajusta y calibra durante el proceso de producción. La baja impedancia de salida, la salida lineal y la precisa calibración inherente, permiten la creación de circuitos de lectura o control especialmente sencillos. El LM35 puede funcionar con alimentación simple o alimentación doble (+ y -)

Requiere sólo 60 μA para alimentarse, y bajo factor de auto-calentamiento, menos de 0,1 $^{\circ}\text{C}$ en aire estático.

El LM35 está preparado para trabajar en una gama de temperaturas que abarca desde los -55 $^{\circ}\text{C}$ bajo cero a 150 $^{\circ}\text{C}$, mientras que el LM35C está preparado para trabajar entre -40 $^{\circ}\text{C}$ y 110 $^{\circ}\text{C}$ (con mayor precisión).

En nuestro trabajo hemos elegido este dispositivo por su tamaño y economía, y porque tiene una salida por tensión.

7.2.1 Características

- Calibrado directamente en grados Celsius (Centígrados)
- Factor de escala lineal de +10 mV / $^{\circ}\text{C}$
- 0,5 $^{\circ}\text{C}$ de precisión a +25 $^{\circ}\text{C}$
- Rango de trabajo: -55 $^{\circ}\text{C}$ a +150 $^{\circ}\text{C}$
- Apropiado para aplicaciones remotas
- Bajo costo
- Funciona con alimentaciones entre 4V y 30V
- Menos de 60 μA de consumo
- Bajo auto-calentamiento (0,08 $^{\circ}\text{C}$ en aire estático)
- Baja impedancia de salida, 0,1W para cargas de 1Ma

Mediante 6 sensores de temperatura LM35 que se calibran directamente en grados Celsius y que tienen una escala lineal de +10mV/ $^{\circ}\text{C}$, se efectúan las lecturas de temperatura dentro del secador.

Para poder leerlas con el microcontrolador se necesita una etapa de acople y acondicionamiento de la señal, el circuito se muestra en la figura 26.

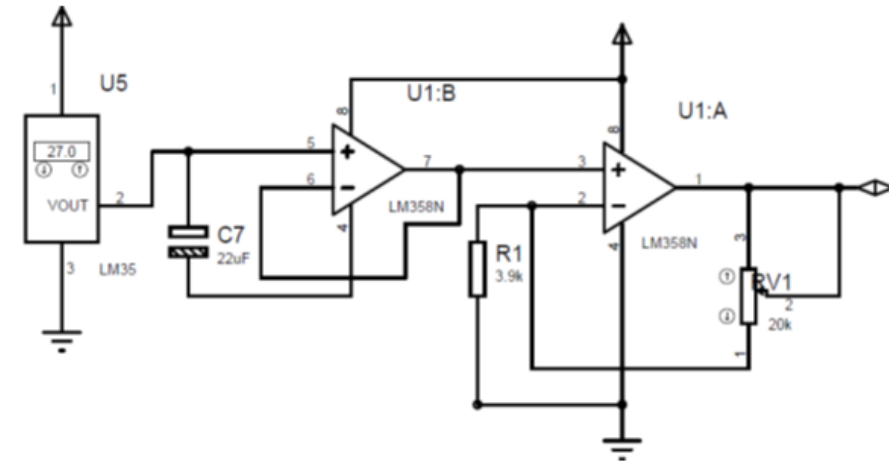


Fig. 26: Circuito de Acondicionamiento de Señal.

El sensor 1 está ubicado en la entrada del colector, nos ayudara a medir la temperatura a la entrada del colector, el sensor 2 está ubicado a la salida del colector medirá la temperatura a la salida del colector o entrada de la cámara de secado, el sensor 3, 4, 5, estarán ubicados en las bandejas dentro de la cámara secado correspondientemente y finalmente el sensor 6 estará ubicado en la chimenea lo que nos medirá la temperatura de la salida del secador.

7.3 SENSOR DE HUMEDAD HIH4000.

El sensor de humedad utilizado es el HIH-4000, de tipo capacitivo. Tiene un comportamiento lineal en tensión como el sensor anterior (el LM35).

Consta de tres pines, dos de ellos para alimentar el sensor y un tercero con salida de voltaje proporcional a la humedad medida, que es lineal.

El sensor de humedad HIH4000 permite realizar la lectura de la humedad relativa del secadero. La elección de este sensor en particular se debe a la linealidad, su accesible precio y al hecho que se encuentra disponible en el mercado.

El HIH400 otorga valores de voltaje que van de los 0,8V con lo cual pueden ser conectados directamente unas de las entradas analógicas del microcontrolador, pasando solo por una etapa de adaptación de impedancia y un filtro pasabajos.

Se hace uso del sensor de humedad HIH4000 para medir la humedad relativa del aire que sale a la salida del secador. En la figura 27 se observa el sensor de Humedad HIH4000.



Fig. 27: Sensor de Humedad HIH4000

7.3.1 Características:

- Moldeado de plástico termoestable vivienda
- La salida de tensión lineal a la humedad relativa
- Diseño de bajo poder
- Alta precisión
- Rápido tiempo de respuesta
- Estable
- Químicamente resistente

El sensor de humedad HIH4000, permite realizar la lectura de la humedad relativa del secador. La elección de este sensor en particular se debe a su linealidad, accesible precio y al hecho de que se encuentra disponible en el mercado.

El HIH4000 otorga valores desde los 0.8V hasta los 3.8V, con lo cual pueden ser conectados directamente a una de las entradas analógicas del microcontrolador, pasando solo por una etapa de adaptación de impedancias y un filtro pasabajos, el circuito de adaptación para el sensor de humedad se muestra en la figura 28.

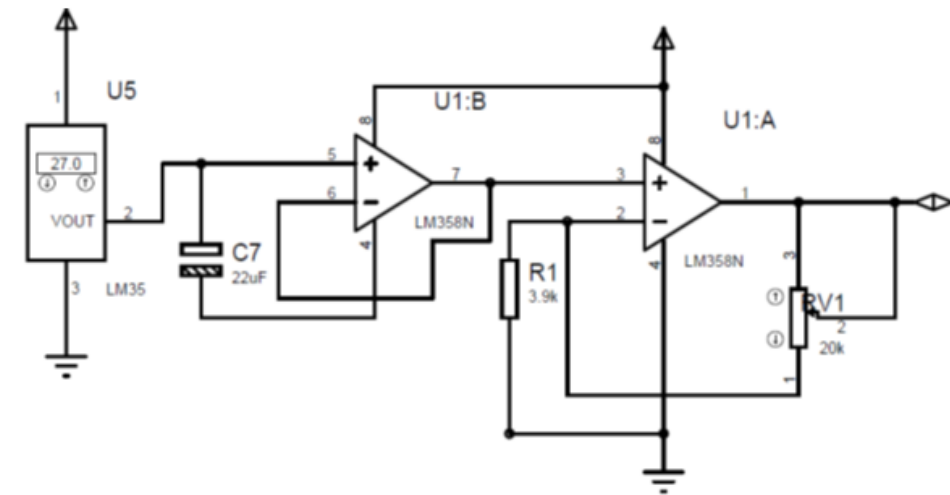


Fig. 28: Circuito de Adaptación HIH4000

7.4 CIRCUITO DE ACOUPLE

7.4.1 Amplificadores operacionales.

Presentes en casi todo circuito moderno, ya se trate de un dispositivo de electrónica digital o analógica, el amplificador operacional es el pilar de la mayoría de los diseños electrónicos.

Podemos definir de manera informal a un amplificador operacional como un circuito electrónico, generalmente se obtiene en forma de circuito integrado o chip, que consta de dos entradas ($V+$ y $V-$) y una sola salida (V_{out}). Esta salida es la diferencia entre las dos entradas, multiplicada por un factor de potencia, que a lo largo de estas páginas llamaremos

G. Por lo tanto:

$$V_{out} = G \times (V+ - V-)$$

En los esquemas electrónicos se presenta al amplificador operacional como una caja negra con características ideales, lo que simplifica mucho su interpretación. Sin embargo, es importante entender la forma en que funciona, de esta forma se podrá entender mejor las limitaciones que presenta.

Los diseños varían entre cada fabricante y cada producto, pero todos los amplificadores operacionales tienen básicamente la misma estructura interna, que consiste en tres etapas:

Amplificador diferencial: es la etapa de entrada que proporciona una baja amplificación del ruido y gran impedancia de entrada. Suelen tener una salida diferencial.

Amplificador de tensión: proporciona una ganancia de tensión.

Amplificador de salida: proporciona la capacidad de suministrar la corriente necesaria, tiene una baja impedancia de salida y, usualmente, protección frente a cortocircuitos

7.5 COMPORTAMIENTO EN CORRIENTE CONTINUA (DC)

7.5.1 Lazo abierto

Si no existe realimentación la salida del Amplificador Operacional será la resta de sus dos entradas multiplicada por un factor. Este factor suele ser del orden de 100.000 (que se considerará infinito en cálculos con el componente ideal). Por lo tanto si la diferencia entre las dos tensiones es de 1V la salida debería ser 100.000 V. Debido a la limitación que supone no poder entregar más tensión de la que hay en la alimentación, el Amplificador Operacional estará saturado si se da este caso. Esto será aprovechado para su uso en comparadores, como se verá más adelante. Si la tensión más alta es la aplicada a la patilla + la salida será la que $n V_{S+}$, mientras que si la tensión más alta es la del pin - la salida será la alimentación V_S .

7.5.2 Lazo cerrado o realimentado

Se conoce como lazo cerrado a la realimentación en un circuito. Aquí aparece una realimentación negativa. Para conocer el funcionamiento de esta configuración se parte de las tensiones en las dos entradas exactamente iguales, se supone que la tensión en la pata + sube y, por tanto, la tensión en la salida también se eleva.

Como existe la realimentación entre la salida y la pata -, la tensión en esta pata también se eleva, por tanto la diferencia entre las dos entradas se reduce, disminuyéndose también la salida. Este proceso pronto se estabiliza, y se tiene que la salida es la necesaria para mantener las dos entradas, idealmente, con el mismo valor.

Siempre que hay realimentación negativa se aplican estas dos aproximaciones para analizar el circuito:

- $V_+ = V_-$ (lo que se conoce como *principio del cortocircuito virtual*).
- $I_+ = I_- = 0$

Cuando se realimenta negativamente un amplificador operacional, al igual que con cualquier circuito amplificador, se mejoran algunas características del mismo como una mayor impedancia en la entrada y una menor impedancia en la salida. La mayor impedancia de entrada da lugar a que la corriente de entrada sea muy pequeña y se reducen así los efectos de las perturbaciones en la señal de entrada. La menor impedancia de salida permite que el amplificador se comporte como una fuente eléctrica de mejores características. Además, la señal de salida no depende de las variaciones en la ganancia del amplificador, que suele ser muy variable, sino que depende de la ganancia de la red de realimentación, que puede ser mucho más estable con un menor coste. Asimismo, la frecuencia de corte superior es mayor al realimentar, aumentando el ancho de banda.

Asimismo, cuando se realiza realimentación positiva (conectando la salida a la entrada no inversora a través de un cuadripolo determinado) se buscan efectos muy distintos. El más aplicado es obtener un oscilador para el generar señales oscilantes.

7.5.3 Configuraciones

Los amplificadores operacionales se pueden conectar según dos circuitos amplificadores básicos: las configuraciones (1) *inversora* y (2) *no inversora*.

Casi todos los demás circuitos con amplificadores operacionales están basados, de alguna forma, en estas dos configuraciones básicas.

Además, existen variaciones estrechamente relacionadas de estos dos circuitos, más otro circuito básico que es una combinación de los dos primeros: el amplificador diferencial.

7.5.3.1 Amplificador Inversor

La figura 29 ilustra la primera configuración básica del Amplificador Operacional. El amplificador inversor. En este circuito, la entrada (+) está a masa, y la señal se aplica a la entrada (-) a través de R1, con realimentación desde la salida a través de R2.

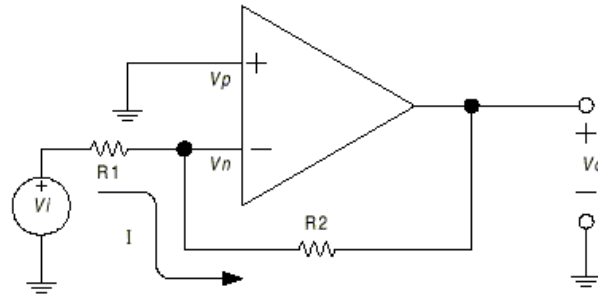


Fig. 29: Amplificador Inversor

7.5.3.2 Amplificador no Inversor.

La segunda configuración básica del Amplificador Operacional ideal es el amplificador no inversor, mostrado en la figura 30. En este circuito, la tensión V_i se aplica a la entrada (+), y una fracción de la señal de salida, V_o , se aplica a la entrada (-) a través del divisor de tensión $R_1 - R_2$. Puesto que, no fluye corriente de entrada en ningún terminal de entrada, y ya que $V_d = 0$, la tensión en R_1 será igual a V_i .

También se pueden deducir propiedades adicionales para esta configuración. El límite inferior de ganancia se produce cuando $R_2 = 0$, lo que da lugar a una ganancia unidad.

En el amplificador inversor, la corriente a través de R_1 siempre determina la corriente a través de R_2 , independientemente del valor de R_2 , esto también es cierto en el amplificador no inversor. Luego R_2 puede utilizarse como un control de ganancia lineal, capaz de incrementar la ganancia desde el mínimo unidad hasta un máximo de infinito. La impedancia de entrada es infinita, puesto que se trata de un amplificador ideal.

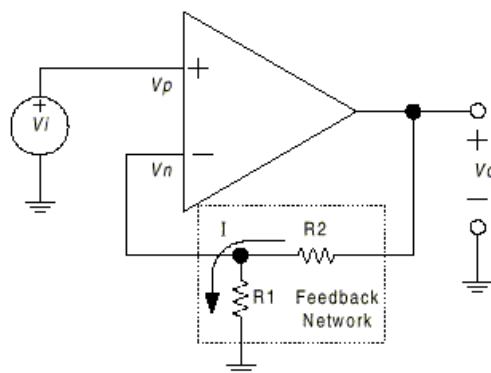


Fig. 30: Amplificador No Inversor

7.5.3.3 Seguidor de Tensión.

Una modificación especial del amplificador no inversor es la etapa de ganancia unidad mostrada en la figura 31. En este circuito, la resistencia de entrada se ha incrementado hasta infinito, y R_F es cero, y la realimentación es del 100%. V_0 es entonces exactamente igual a V_i , dado que $E_s = 0$. El circuito se conoce como "seguidor de emisor" puesto que la salida es una réplica en fase con ganancia unidad de la tensión de entrada. La impedancia de entrada de esta etapa es también infinita.

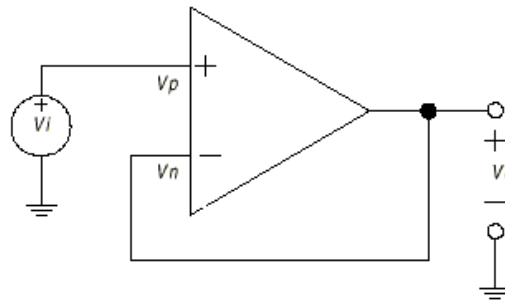


Fig. 31: Seguidor de Tensión.

7.6 MICROCONTRLADOR PIC16F877A

Se denomina microcontrolador a un dispositivo programable capaz de realizar diferentes actividades que requieran del procesamiento de datos digitales y del control y comunicación digital de diferentes dispositivos.

Los microcontroladores poseen una memoria interna que almacena dos tipos de datos; las instrucciones, que corresponden al programa que se ejecuta, y los registros, es decir, los datos que el usuario maneja, así como registros especiales para el control de las diferentes funciones del microcontrolador.

Los microcontroladores se programan en La interface Microcode y cada microcontrolador varía su conjunto de instrucciones de acuerdo a su fabricante y modelo. De acuerdo al número de instrucciones que el microcontrolador maneja se le denomina de arquitectura RISC (reducido) o CISC (complejo).

Los microcontroladores poseen principalmente una ALU (Unidad Lógico Aritmética), memoria del programa, memoria de registros, y pines I/O (entrada y/o salida). La ALU es

la encargada de procesar los datos dependiendo de las instrucciones que se ejecuten (ADD, OR, AND), mientras que los pines son los que se encargan de comunicar al microcontrolador con el medio externo; la función de los pines puede ser de transmisión de datos, alimentación de corriente para el funcionamiento de este o pines de control específico.

En este proyecto se utilizó el PIC 16F877A. Este microcontrolador es fabricado por Microchip familia a la cual se le denomina PIC. El modelo 16F877A posee varias características que hacen a este microcontrolador un dispositivo muy versátil, eficiente y práctico. En la figura 32 se observa el diagrama de pines del microcontrolador 16F877A.

Algunas de estas características se muestran a continuación:

- Soporta modo de comunicación serial, posee dos pines para ello.
- Amplia memoria para datos y programa.
- Memoria reprogramable: La memoria en este PIC es la que se denomina FLASH; este tipo de memoria se puede borrar electrónicamente (esto corresponde a la "F" en el modelo).
- Set de instrucciones reducidas (tipo RISC), pero con las instrucciones necesarias para facilitar su manejo.

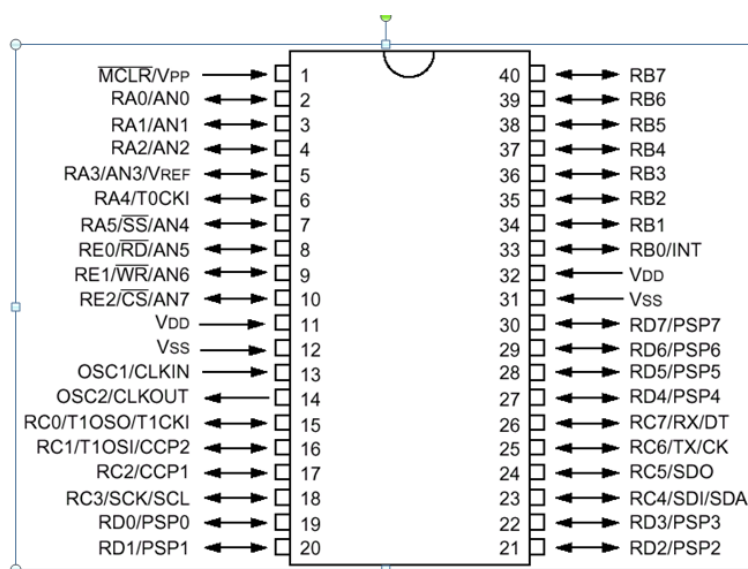


Fig. 32: Diagrama de Pines Microcontrolador Pic 16F877A

7.6.1 Características

En la tabla 8 se pueden observar las características más relevantes del dispositivo:

Tabla 7: Características Microcontrolador Pic 16F877A

Frecuencia máxima	DX-20MHz
Memoria de programa flash palabra de 14 bits	8KB
Posiciones RAM de datos	368
Posiciones EEPROM de datos	256
Puertos E/S	A,B,C,D
Numero de pines	40
Interrupciones	14
Timers	3
Módulos CCP	2
Comunicaciones serie	MSSP, USART
Comunicaciones paralelo	PSP
Líneas de entrada de CAD de 10 bits	8
Juego de instrucciones	35 Instrucciones
Longitud de instrucción	14 bits
Arquitectura	Harvard
CPU	Risc
Canales Pwm	2
Pila harware	.
Ejecución en 1 ciclo maquina	.

Fuente: Microcontroladores Pic

7.6.2 Descripción de los pines.

En la tabla 8 se puede observar la descripción de los pines del microcontrolador pic 16F877A.

Tabla 8: Descripción de Pines

NOMBRE DEL PIN	PIN	TIPO	TIPO DE BUFFER	DESCRIPCIÓN
OSC1/CLKIN	13	I	ST/MOS	Entrada del oscilador de cristal / Entrada de señal de reloj externa
OSC2/CLKOUT	14	O	-	Salida del oscilador de cristal
MCLR/Vpp/THV	1	I/P	ST	Entrada del Master clear (Reset) o entrada de voltaje de programación o modo de control high voltaje test
RA0/AN0	2	I/O	TTL	<p>PORTA es un puerto I/O bidireccional</p> <p>RA0: puede ser salida analógica 0</p> <p>RA1: puede ser salida analógica 1</p> <p>RA2: puede ser salida analógica 2 o referencia negativa de voltaje</p> <p>RA3: puede ser salida analógica 3 o referencia positiva de voltaje</p> <p>RA4: puede ser entrada de reloj el timer0.</p> <p>RA5: puede ser salida analógica 4 o el esclavo seleccionado por el puerto serial síncrono.</p>
RA1/AN1	3	I/O	TTL	
RA2/AN2/ Vref-	4	I/O	TTL	
RA3/AN3/Vref+	5	I/O	TTL	
RA4/T0CKI	6	I/O	ST	
RA5/SS/AN4	7	I/O	TTL	
RBO/INT	33	I/O	TTL/ST	<p>PORTB es un puerto I/O bidireccional. Puede ser programado todo como entradas</p> <p>RB0 puede ser pin de interrupción externo.</p> <p>RB3: puede ser la entrada de programación de bajo voltaje</p> <p>Pin de interrupción</p> <p>Pin de interrupción</p>
RB1	34	I/O	TTL	
RB2	35	I/O	TTL	
RB3/PGM	36	I/O	TTL	
RB4	37	I/O	TTL	

RB5	38	I/O	TTL	Pin de interrupción. Reloj de programación serial
RB6/PGC	39	I/O	TTL/ST	
RB7/PGD	40	I/O	TTL/ST	
RCO/T1OSO/T1C KI	15	I/O	ST	PORTC es un puerto I/O bidireccional RCO puede ser la salida del oscilador timer1 o la entrada de reloj del timer1
RC1/T1OS1/CCP2	16	I/O	ST	RC1 puede ser la entrada del oscilador timer1 o salida PMW 2
RC2/CCP1	17	I/O	ST	RC2 puede ser una entrada de captura y comparación o salida PWN
RC3/SCK/SCL	18	I/O	ST	RC3 puede ser la entrada o salida serial de reloj síncrono para modos SPI e I2C
RC4/SD1/SDA	23	I/O	ST	RC4 puede ser la entrada de datos SPI y modo I2C
RC5/SD0	24	I/O	ST	RC5 puede ser la salida de datos SPI
RC6/Tx/CK	25	I/O	ST	RC6 puede ser el transmisor asíncrono USART o el reloj síncrono.
RC7/RX/DT	26	I/O	ST	RC7 puede ser el receptor asíncrono USART o datos síncronos
RD0/PSP0	19	I/O	ST/TTL	PORTD es un puerto bidireccional paralelo
RD1/PSP1	20	I/O	ST/TTL	
RD2/PSP2	21	I/O	ST/TTL	
RD3/PSP3	22	I/O	ST/TTL	
RD4/PSP4	27	I/O	ST/TTL	
RD5/PSP5	28	I/O	ST/TTL	
RD6/PSP6	29	I/O	ST/TTL	
RD7/PSP7	30	I/O	ST/TTL	
REO/RD/AN5	8	I/O	ST/TTL	PORTE es un puerto I/O bidireccional REO: puede ser control de lectura para el

RE1/WR/AN	9	I/O	ST/TTL	puerto esclavo paralelo o entrada analógica 5 RE1: puede ser escritura de control para el puerto paralelo esclavo o entrada analógica 6
RE2/CS/AN7	10	I/O	ST/TTL	RE2: puede ser el selector de control para el puerto paralelo esclavo o la entrada analógica 7.
Vss	12.3 1	P	-	Referencia de tierra para los pines lógicos y de I/O
Vdd	11.3 2	P	-	Fuente positiva para los pines lógicos y de I/O
NC	-	-	-	No está conectado internamente

Fuente: Microcontroladores Pic

7.7 COMUNICACIÓN SERIAL

7.7.1 Comunicación - MAX232 - Conversor TTL-RS232

El MAX232 es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. Lo interesante es que sólo necesita una alimentación de 5V, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232. Otros integrados que manejan las líneas RS232 requieren dos voltajes, +12V y -12V. El MAX232 soluciona la conexión necesaria para lograr comunicación entre el puerto serie de una PC y cualquier otro circuito con funcionamiento en base a señales de nivel TTL/CMOS.

El circuito integrado posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL.

Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie del PC, que son TX, RX, RTS y CTS.

TX es la señal de transmisión de datos, RX es la de recepción, y RTS y CTS se utilizan para establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos. En la figura 33 se observa el diagrama de pines del circuito integrado MAX232

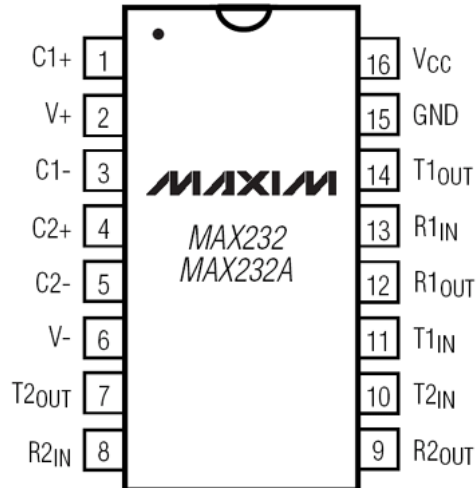


Fig. 33: Diagrama de pines del Circuito Integrado Max232

7.8 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 GNU/Linux. La última versión es la 2010. Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o *VI*s, 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 las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resume las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.

- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

7.8.1 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.

7.8.2 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.

7.8.3 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 tú le pones 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 e indicadores, donde estos elementos serán las entradas y salidas que interactuaran con la terminal del VI.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIALES

Para el análisis del secador solar por convección de aire caliente se requirió la revisión de libros y de páginas web relacionadas con el tema, logrando así obtener los conocimientos suficientes y proceder al diseño del sistema.

Enfocándonos en el diseño se procedió a la construcción del secador solar, por lo que para la elaboración del colector solar de placa plana, se utilizó tol galvanizado para la carcasa, lana de vidrio para el aislamiento, vidrio para la cubierta y una placa de aluminio para la placa de absorción. Para la cámara de secado así mismo se utilizó tol galvanizado para las paredes, tubos de $\frac{3}{4}$ para la estructura y ángulos para los marcos de las bandejas.

En tanto que utilizamos el microcontrolador PIC 16F877, el sensor de temperatura LM35 y el sensor de humedad HIH4000 para el monitoreo de las diferentes temperaturas en el secador.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Promedio de Radiación Solar.

$$IT = \frac{\text{Insolación}}{\text{día Solar}} \quad (1)$$

$$IT = \frac{4100}{5.5}$$

$$IT = 745 \text{ W/m}^2$$

4.2.2 Dimensionamiento y análisis del balance energético.

Para encontrar la necesidad energética del secador propuesto, primero calculamos la disminución de humedad que el grano experimentará durante el proceso de secado, así:

$$\Delta H = \frac{H_o - H_f}{100 - H_f} * 100 \quad (2)$$

$$\Delta H = \frac{49 - 12}{100 - 12} * 100$$

$$\Delta H = 42\%$$

Hay que tomar en cuenta que los 6.98Kg de producto seco se obtuvieron mediante pruebas de secado, la masa de agua a evaporar es:

$$M_{H_2O} = \frac{6.98 * 42}{100 - 42} \quad (3)$$

$$M_{H_2O} = 5.06 \text{ kgH}_2\text{O}$$

La masa del material húmedo q se debe colocar al inicio del proceso de secado es:

$$M_h = 6,98Kg + 5.06Kg \quad (4)$$

$$M_h = 12.04Kg \cong 12Kg$$

A continuación se calculan las propiedades del aire empleado para el secado. Para esto se debe realizar un análisis psicrométrico, utilizando la carta psicrométrica. El software

CYTSOFT Psychrometric Chart, es una herramienta que, de forma sencilla, permite el cálculo de las propiedades del aire que se requiere (ver Tabla 9). En la Fig.34, se muestra la variación de estados que experimenta el aire que se empleará en el secado.

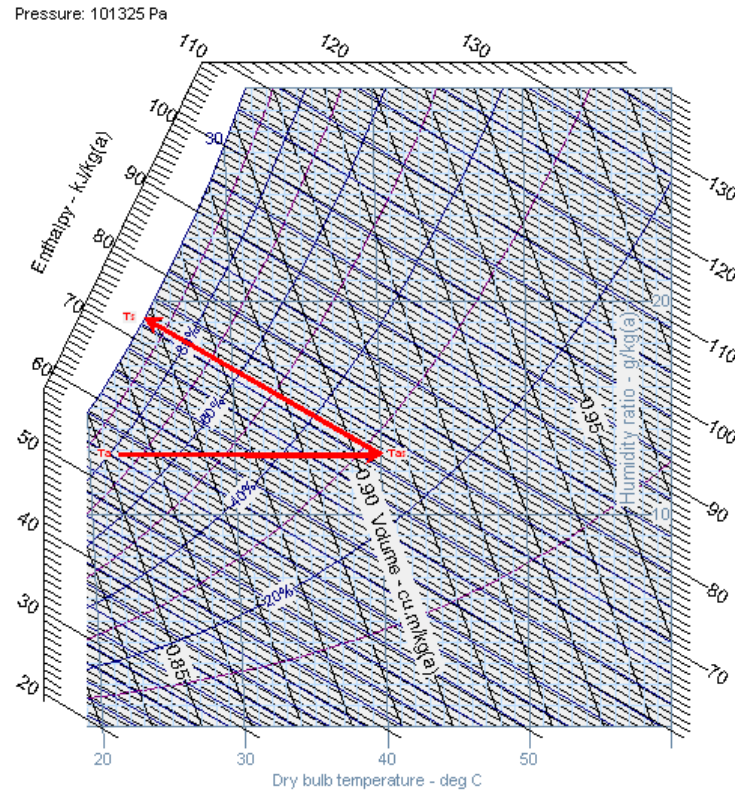


Fig. 34. Carta Psicométrica para el cálculo de las propiedades del aire de secado

Tabla 9: Propiedades del Aire Empleado

ESTADOS DEL AIRE	TEMPERATURA DE BULBO SECO (°C)	TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO (°C)	CONTENIDO DE HUMEDAD (g_{H2O}/kg_{As})	ENTALPIA (KJ/kg)
Aire de entrada	22	19,16	12,81	54,6741
Aire de secado	40	24,4	12,81	73,2160
Aire de salida	24.23	24,23	19,23	73,0394

La tasa de evaporización de agua que se requiere es de:

$$\Delta x = \frac{Ms}{t} * \left(\frac{Ho - Hf}{100} \right) \quad (6)$$

$$\Delta x = \frac{6980}{57600} * \left(\frac{49 - 12}{100} \right)$$

$$\Delta x = 0.0448 \text{ g/s}$$

El poder de vaporización del aire de secado requerido es:

$$W = 19,23 - 12,81 \quad (7)$$

$$W = 6,42 \text{ g}_{H_2O}/Kg_{As}$$

El flujo másico del aire de secado necesario es:

$$m_{As} = \frac{\Delta x}{W} \quad (8)$$

$$m_{As} = \frac{0.0448}{6.42}$$

$$m_{As} = 6.978 \times 10^{-3} \text{ Kg/s}$$

Por lo que el caudal de aire necesario será:

$$q = m_{As} * Va \quad (9)$$

$$q = 6.978 \times 10^{-3} * 1 = 6.978 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Así la energía que se necesita para secar el café (en las cantidades indicadas), está dada por:

$$Q = m_{As}(H_2 - H_1) \quad (10)$$

$$Q = 6.798 \times 10^{-3} \text{ Kg/s}(73,0394\text{KJ/Kg} - 54,6741\text{KJ/Kg})$$

$$Q = 0.13 \frac{KJ}{s} = 130 W$$

El sistema de secado debe poseer la capacidad de entregar por lo menos **130 W** de energía. A partir de esto, se dimensiona el sistema solar.

4.2.3 CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN

Para el cálculo del calor latente de vaporización se lo hará para una temperatura de 40 °C.

$$L_w = \frac{R}{M_w} (6547.1 - 4.23(Ta + 273,16)) \quad (5)$$

$$L_w = \frac{8314}{18.01} (6547.1 - 4.23(40 + 273,16))$$

$$L_w = 2410.784 KJ/Kg$$

4.2.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE HÚMEDO

A continuación se presenta la dependencia de sus principales propiedades físicas a una temperatura media del fluido Tfm de 22°C.

- **Calor específico:**

$$C_{pas} = 999,2 + 0,1434 * Tfm + 1,101 * 10^{-4} * Tfm^2 - 6,7581 * 10^{-8} * Tfm^3 \quad (11)$$

$$C_{pas} = 999,2 + 0,1434 * 22 + 1,101 * 10^{-4} * 22^2 - 6,7581 * 10^{-8} * 22^3$$

$$C_{pas} = 1002.41 J/kg.K$$

- **Densidad:**

$$\rho = \frac{353,44}{Tmf + 273,15} \quad (12)$$

$$\rho = \frac{353,44}{22 + 273,15}$$

$$\rho = 1.1975 \text{ kg/m}^3$$

- **Viscosidad Dinámica:**

$$\mu = 1,718 * 10^{-5} + 4,62 * 10^{-8} * Tmf \quad (13)$$

$$\mu = 1,718 * 10^{-5} + 4,62 * 10^{-8} * 22$$

$$\mu = 1.82 * 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

- **Viscosidad Cinemática:**

$$vc = \frac{\mu}{\rho} \quad (14)$$

$$vc = \frac{1.82 * 10^{-5}}{1.1975} = 1.52 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

- **Conductividad Térmica:**

$$K_v = 0,244 + 0,7673 * 10^{-4} * Tfm \quad (15)$$

$$K_v = 0,244 + 0,7673 * 10^{-4} * 22$$

$$K_v = 0.246 \text{ W/m.K}$$

- **Coefficiente de Expansión Térmica:**

$$\beta t = \frac{1}{Tmf + 273,15} \quad (16)$$

$$|\beta t = \frac{1}{22 + 273,15} = 3.388 * 10^{-3} K^{-1}$$

4.2.5 DISEÑO DEL COLECTOR

4.2.6 ANALISIS MATEMÁTICO DEL COLECTOR

Algunas consideraciones hechas para el modelado matemático de los colectores solares de placa plana son las siguientes:

- ❖ El colector opera en un estado estable.
- ❖ El gradiente de temperatura a través de la cubierta es insignificante.
- ❖ El flujo de calor se puede considerar unidimensional, tanto a través de las cubiertas, como de los aislamientos laterales.
- ❖ El gradiente de temperatura alrededor a través de la placa de absorción es insignificante.
- ❖ En el cálculo de la eficiencia instantánea, la radiación está incidiendo sobre el colector solar con un ángulo de incidencia previamente determinado
- ❖ El área de la placa de absorción es considerada la misma en comparación con el área frontal transparente.
- ❖ La radiación, sobre la placa plana absorbente del colector es uniforme
- ❖ Los efectos del polvo y la suciedad sobre el colector son insignificantes.

Para obtener valores promedio de los parámetros de funcionamiento del colector solar, se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Suponer una temperatura promedio de la placa de absorción (T_{pm}).
2. Calcular el coeficiente global de pérdidas de transferencia de calor (UL)
3. Evaluar el factor de eficiencia del colector F' para la configuración geométrica.
4. Determinar el factor de remoción de calor F'' .
5. Calcular el calor útil (Q_u) en el colector y la eficiencia instantánea del mismo (η_i)
6. Verificar el valor de la temperatura de la placa (T_{pm})
7. Repetir los pasos anteriores hasta que la temperatura de la placa supuesta y calculada sean iguales

4.2.6.1 Datos

Área del colector	1.5m ²
Temperatura ambiente [Ta]	22 °C (295K)
Temperatura de la placa [Tpm]	52C (325K)
Temperatura media del fluido [Tfm]	23.7C (296.7K)
Emitancia de la placa [εp]	0.95
Emitancia de la cubierta de vidrio [εc]	0.88
Número de cubiertas [N]	1
Velocidad del viento [u]	1.8m/s
Inclinación del colector [β]	20°
Conductividad térmica del Aislante (lana de vidrio) [kais]	0.04W/m°C
Espesor del aislante del fondo [eais]	0.05m
Espesor del aislante lateral [eais 2]	0.03m
Área lateral [Ae]	0.4m ²

El valor de la temperatura de entrada del fluido al colector lo tomamos en función a un promedio de la diferencia de temperaturas entre el fluido a la entrada al colector y el ambiente.

4.2.6.2 Coeficiente de pérdidas de calor hacia arriba del colector [Ut]

Para hallar las pérdidas de calor hacia arriba del colector nos basamos en la ecuación 7.5:

$$U_t = \frac{1}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right]^e + \frac{1}{h_{viento}}} + \frac{\sigma (T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.00591 N h_{viento}} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p}{\varepsilon_c} - N} \quad (30)$$

Dónde:

$$h_{viento} = 2.8 + 3u = 2.8 + 3 * 2 = 8.2 W/m^2 \cdot ^\circ C$$

$$f = (1 + 0.089hv - 0.1166hv \times \varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$$

$$f = (1 + 0.089 * 8.8 - 0.1166 * 8.8 \times 0.95)(1 + 0.07866 * 1) = 0.886$$

$$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$$

$$C = 520(1 - 0.000051 * 20^2) = 509.392$$

$$e = 0.430 \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) = 0.298$$

$$\sigma = 5.61 \times 10^{-6} W/m^2 k^4 \quad \text{Coeficiente de Stefan - Boltzmann}$$

Sustituyendo los datos dados y factores f, C y e calculados, en la ecuación anterior, tenemos:

$$U_t = \frac{1}{\frac{509,392 \left[\frac{325-295}{325} \right]^{0,298}}{1+0,886}} + \frac{1}{8,2}} + \frac{5,76 \times 10^{-8} (325 + 295)(325^2 + 295^2)}{\frac{1}{0,95+0,00591 \times 1 \times 8,2} + \frac{2+0,886-1+0,133(0,95)}{0,88}} - 1$$

$$U_t = 5,447 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

4.2.6.3 Coeficiente de pérdidas de calor hacia abajo del colector[Ub]

Haciendo una relación de la conductividad térmica del aislante y el espesor del mismo en la parte inferior del colector, mediante la ecuación 7.6 tenemos:

$$U_b = \frac{k_{ais}}{e_{ais}} \quad (31)$$

$$U_b = \frac{k_{ais}}{e_{ais}} = \frac{0,04 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,05 \text{ m}} = 0,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

4.2.6.4 Coeficiente de pérdidas totales en el colector [UL]

Se considera $h_1 = h_2 = h$ (Coeficientes convectivos entre el aire interior y la cubierta y entre el aire interior y la placa respectivamente)

Propiedades termofísicas del aire a 30°C aproximadamente (tomados a 300K)

$$\rho_a = 1,1614 \text{ Densidad del aire [kg/m}^3]$$

$$\nu = 184,6 \times 10^{-7} \text{ Viscosidad dinámica [Ns/m}^2]$$

$$D_h = 2 * 0,1 \text{ Diametro hidraulico [m]}$$

$$k_a = 0,0263 \text{ Conductividad termica del aire [W/m} \cdot \text{°C]}$$

$$A_f = 1 * 0,1 \text{ Area de sección transversal del colector [m}^2]$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Coeficiente de Stefan – Boltzmann [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$$

$$IT = 745 \text{ Radiacion [W/m}^2]$$

$$C_{pa} = 1,010 \text{ Calor especifico del aire [KJ/Kg} \cdot \text{°C]}$$

$$\tau = 0,87 \text{ Transmitancia de la cubierta de vidrio}$$

Para una inclinación de 20°, según
ASHRAE 1999, pág. 366

$\alpha = 0.96$ Absortancia de la placa

4.2.6.5 Numero de Reynolds [Re]

$$Re = \frac{\rho a. u. Dh}{\nu} \quad (32)$$

$$Re = \frac{1.1614 * 1.8 * 0.2}{184.6 \times 10^{-7}} = 2.265 \times 10^4$$

4.2.6.6 Número de Nusselt [Nu]

$$Nu = 0.0158. Re^{0.8} \quad (33)$$

$$Nu = 48.161$$

4.2.6.7 Coeficientes convectivos en el interior del colector [W/m²k]

$$h = \frac{Nu. ka}{Dh} \quad (34)$$

$$h = \frac{48.161 \times 0.0263}{0.2}$$

$$h = 6.33$$

$$h1 = h = h2$$

4.2.6.8 Coeficientes de radiación entre la cubierta y la placa [W/m²k]

$$hrad = \frac{4. \sigma. Tfm^3}{\frac{1}{\epsilon p} + \frac{1}{\epsilon c} - 1} \quad (35)$$

$$hrad = \frac{4 \times (5.67 \times 10^{-8}) \times 296.7^3}{\frac{1}{0.95} + \frac{1}{0.88} - 1}$$

$$hrad = 4.982$$

4.2.6.9 Coeficiente Global de pérdidas de Calor UL [W/m²k]

$$UL = \frac{(Ub + Ut). (h1. hrad + h2. hrad + h1. h2) + [Ub. Ut. (h1 + h2)]}{h1. hrad + Ut. h2 + h2. hrad + h1. h2} \quad (36)$$

UL

$$= \frac{(0.8 + 5.447) \cdot (6.33 \cdot 4.982 + 6.33 \cdot 4.982 + 6.33 \cdot 6.33) + [0.8 \cdot 5.447(6.33 + 6.33)]}{6.33 \cdot 4.982 + 5.447 \cdot 6.33 + 6.33 \cdot 4.982 + 6.33 \cdot 6.33}$$

$$UL = 5.083$$

4.2.6.10 Factor de Eficiencia del Colector

$$F' = \frac{h1 \cdot hrad + Ut \cdot h2 + h2 \cdot hrad + h1 \cdot h2}{(Ut + hrad + h1)(Ub + h2 + hrad) - hrad^2} \quad (37)$$

$$F' = \frac{6.33 \cdot 4.982 + 5.447 \cdot 4.982 + 6.33 \cdot 4.982 + 6.33 \cdot 6.33}{(5.447 + 4.982 + 6.33)(0.8 + 6.33 + 4.982) - 4.982^2}$$

$$F' = 0.773$$

4.2.6.11 Flujo másico de aire [Kg/s]

$$ma = \rho a \cdot Af \cdot u \quad (38)$$

$$ma = 1.1614 \cdot 0.1 \cdot 1.8 = 0.209$$

4.2.6.12 Factor de Flujo

$$F'' = \frac{ma \cdot Cpa}{Ac \cdot UL \cdot F'} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(Ac \cdot UL \cdot F')}{ma \cdot Cpa} \right] \right\} \quad (39)$$

$$F'' = \frac{0.209 \cdot 1.010}{1.5 \cdot 5.083 \cdot 0.773} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(1.5 \cdot 5.083 \cdot 0.773)}{0.209 \cdot 1.010} \right] \right\}$$

$$F'' = 0.986$$

4.2.6.13 Factor de Remoción de Calor

$$FR = F' \cdot F'' \quad (40)$$

$$FR = 0.773 \times 0.986 = 0.762$$

4.2.6.14 Energía Absorbida por la Placa [W/m²]

$$S = IT \times 1.02 \times \tau \times \alpha \quad (41)$$

$$S = 745 \times 1.02 \times 0.87 \times 0.96 = 634.668$$

4.2.6.15 Calor útil en el colector [W]

$$Q_u = A_c[S - UL(T_{pm} - T_a)] \quad (42)$$

$$Q_u = 1.5[634.668 - 5.083(325 - 295)]$$

$$Q_u = 723.261$$

A continuación se deben calcular las temperaturas T_{fm} y T_{pm}

$$T_{fm2} = T_a + \frac{Q_u}{A_c \cdot FR \cdot UL} (1 - F'') \quad (43)$$

$$T_{fm2} = 295 + \frac{723.261}{1.5 * 0.762 * 5.083} (1 - 0.986)$$

$$T_{fm2} = 296.726 \text{ K}$$

$$T_{pm2} = T_a + \frac{Q_u}{A_c \cdot FR \cdot UL} (1 - FR) \quad (44)$$

$$T_{pm2} = 295 + \frac{723.261}{1.5 * 0.762 * 5.083} (1 - 0.762)$$

$$T_{pm2} = 324.656 \text{ K}$$

4.2.6.16 Eficiencia Instantánea del Colector

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c \cdot IT} \quad (46)$$

$$\eta_i = 0.647$$

4.2.6.17 Temperatura de Salida del aire

$$T_s = T_a + \frac{Q_u}{ma \cdot C_{pa}} \quad (45)$$

$$T_s = 298.436$$

El aire ingresa a 22°C y sale a 25°C en el colector

4.2.7 EFICIENCIA DEL SECADOR SOLAR POR LIBRE CONVECCIÓN

Establecemos primeramente H_T que es la Irradiancia durante el periodo de secado inclinada del colector, para un periodo de 16 horas que es el tiempo estimado para la deshidratación del producto, así tenemos:

$$\text{Energía} = \text{Potencia} \times \text{tiempo}$$

$$H_T = IT \cdot t = 745 \text{ W/m}^2 \times 16 \text{ horas} = 11920 \text{ Wh/m}^2$$

$$11920 \text{ Wh/m}^2 = 42912 \text{ KJ/m}^2$$

$$\eta_s = \frac{(W_o - W_t) \cdot L_w}{H_T \cdot A_c} \quad (67)$$

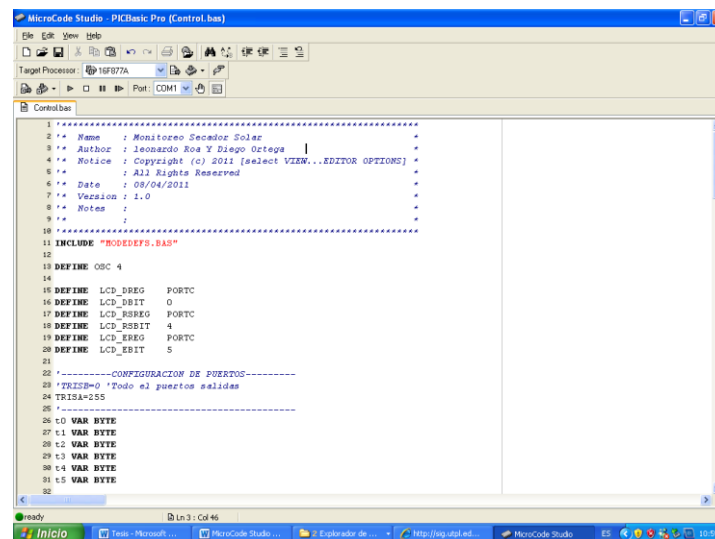
$$\eta_s = \frac{(12 - 6.98) \cdot 2410.784}{42912 \times 1.5}$$

$$\eta_s = 0.1837 = 18.37\%$$

4.2.8 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC 16F877A

Para la programación en primer lugar se requiere de un software de ambiente agradable en entorno Windows donde poder realizar y simular el programa para el diseño del monitoreo automatizado, para esto se tiene la interfaz conocida como microcode, en el cual se escribe el código del programa, corrige errores de sintaxis, ordena visualmente las subrutinas. El Microcode queda enlazado con el PCBASIC y el IC-PROG, de manera que una vez que termina el programa, compila y genera el archivo *.HEX, los programas los guarda en formato Picbasic *.BAS.

En las figuras35 se observa la ventana principal del programa microcode, en el cual se programó el microcontrolador pic F16F877A



```

1: *****
2: ** Name : Monitoreo Secador Solar
3: ** Author : leonardo Roa Y Diego Ortega
4: ** Notice : Copyright (c) 2011 [select VIEW...EDITOR OPTIONS]
5: ** : All Rights Reserved
6: ** Date : 08/04/2011
7: ** Version : 1.0
8: ** Notes :
9: **
10: *****
11: INCLUDE "MODEDEFS.BAS"
12:
13: DEFINE OSC 4
14:
15: DEFINE LCD_DREG PORTC
16: DEFINE LCD_DBIT 0
17: DEFINE LCD_RSREG PORTC
18: DEFINE LCD_RSBIT 4
19: DEFINE LCD_EREG PORTC
20: DEFINE LCD_EBIT 5
21:
22: '-----CONFIGURACION DE PUERTOS-----
23: 'TRISA=0 'Todo el puertos salidas
24: TRISA=255
25: '-----
26: t0 VAR BYTE
27: t1 VAR BYTE
28: t2 VAR BYTE
29: t3 VAR BYTE
30: t4 VAR BYTE
31: t5 VAR BYTE
32:

```

Fig. 35: Ventana Principal de Microcode

La programación que se utilizó para el monitoreo del secador Solar es la siguiente:

```
INCLUDE "MODEDEFS.BAS"
```

```

define OSC 4
define LCD_DREG PORTC
DEFINE LCD_DBIT 0
DEFINE LCD_RSREG PORTC
DEFINE LCD_RSBIT 4
DEFINE LCD_EREG PORTC
DEFINE LCD_EBIT 5
'-----CONFIGURACION DE PUERTOS-----
'TRISB=0 'Todo el puertos salidas
TRISA=255
t0 VAR BYTE
t1 VAR BYTE

```



```
t2 VAR BYTE
t3 VAR BYTE
t4 VAR BYTE
t5 VAR BYTE
```

```
p0 VAR BYTE
p1 VAR BYTE
p2 VAR BYTE
p3 VAR BYTE
p4 VAR BYTE
p5 VAR BYTE
dato VAR BYTE
```

```
i VAR WORD
j VAR WORD
k VAR WORD
adcon1=%0000      ;Todo el puerto A y E es analógico
```

```
LCDOUT $FE,1      ;limpia pantalla y ubica el cursor en posicion 1
LCDOUT $FE,1,"SECADOR DE CAFE"
LCDOUT $FE,$C0,"ENERGIA SOLAR"
LOW portb.0
PAUSE 2000
LCDOUT $FE,1,"H1 T1T2T3T4T5"
LCDOUT $FE,$C0,"11 22334455"
i=0
j=0
```

```
inicio:
temp0:
    ADCON0=%01000001      'Canal 0
    gosub medir
t0=ADRESH
```

```
temp1:
    ADCON0=%01001001      'Canal 1
    GOSUB medir
t1=ADRESH
t1=t1/2
```

```
temp2:
    ADCON0=%01010001      'Canal 2
    GOSUB medir
t2=ADRESH
```

```
temp3:
    ADCON0=%01011001      'Canal 3
    GOSUB medir
t3=ADRESH
```

```
t3=t3+6
temp4:
    ADCON0=%01100001      'Canal 4
    GOSUB medir
```

```

t4=ADRESH

temp5:
  ADCON0=%01101001    'Canal 5
  GOSUB medir
  t5=ADRESH
LCDOUT $FE,$C0,#t1
LCDOUT $FE,$C3,#t0
LCDOUT $FE,$C5,#t2
LCDOUT $FE,$C7,#t3
LCDOUT $FE,$C9,#t4
LCDOUT $FE,$CB,#t5
i=i+1
pause 1000
SERIN2 portc.7,84,20,nx,[dato]

IF dato="Z" THEN

  SEROUT2 portc.6,84,[DEC3 p1,"-",DEC3 p0,"-",DEC3 p2,"*"]
  PAUSEUS 100
  SEROUT2 portc.6,84,[DEC3 p3,"-",DEC3 p4,"-",DEC3 p5,"*"]
ENDIF

IF i=1800 THEN
  LCDOUT $FE,$1,"dato grabado"
  WRITE j,t1
  ' read j,p1
  j=j+1
  WRITE j,t0
  ' read j,p0
  j=j+1
  WRITE j,t2
  ' read j,p2
  j=j+1
  WRITE j,t3
  ' read j,p3
  j=j+1
  WRITE j,t4
  ' read j,p4
  j=j+1
  WRITE j,t5
  ' read j,p5
  j=j+1

PAUSE 1000
LCDOUT $FE,1,"H1 T1T2T3T4T5"
LCDOUT $FE,$C0,#p1
LCDOUT $FE,$C3,#p0
LCDOUT $FE,$C5,#p2
LCDOUT $FE,$C7,#p3
LCDOUT $FE,$C9,#p4
LCDOUT $FE,$CB,#p5
PAUSE 100

```

```

LCDOUT $FE,$1,"dato PRObado"
  PAUSE 1000
LCDOUT $FE,1,"H1 T1T2T3T4T5"
i=0
ENDIF
GOTO inicio
medir:
PAUSEUS 50
adcon0.2=1
  PAUSEUS 50
  RETURN

```

nx: GOTO inicio

END

4.2.9 SIMULACIÓN DEL MONITOREO AUTOMÁTICO DEL SECADOR

Para la simulación del monitoreo del secador solar se utilizó una de las herramientas más importantes disponibles en la actualidad que es el simulador de circuitos PROTEUS de Labcenter Electronics, dispone de una gran variedad de microcontroladores de la familia PIC, INTEL, ATMEL, ZILOG y MOTOROLA, además de una gran variedad de elementos electrónicos como displays de 7 segmentos, LCD, LCD gráficos, teclados, pulsadores, leds, diodos, resistencias, motores PAP, etc. A continuación en las figuras 36 se observa el diagrama esquemático del monitoreo del secador solar y en la figura 37 y 38 se observara el diagrama circuital del monitoreo del secador solar.

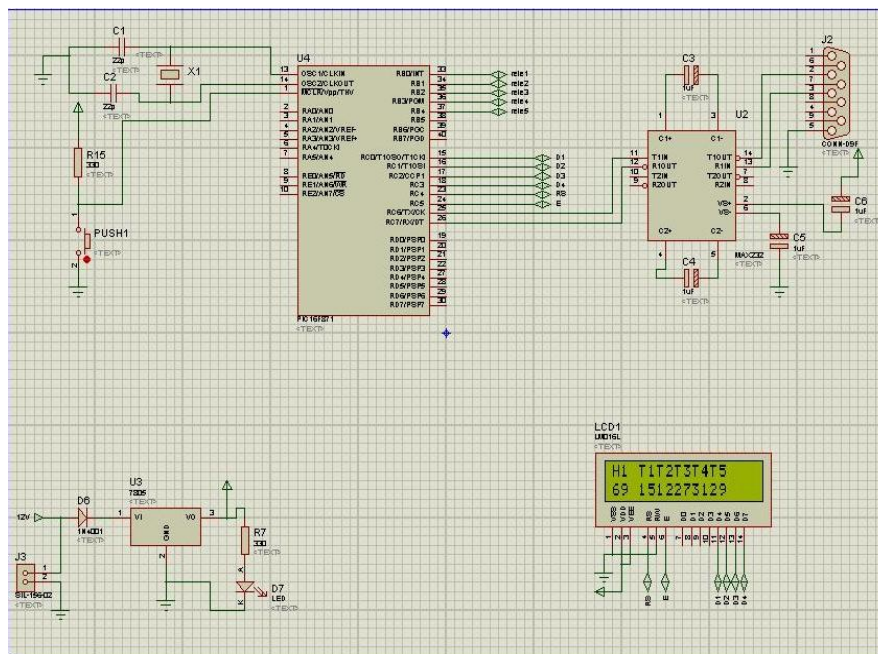


Fig. 36: Diagrama Esquemático del Monitoreo del Secador Solar

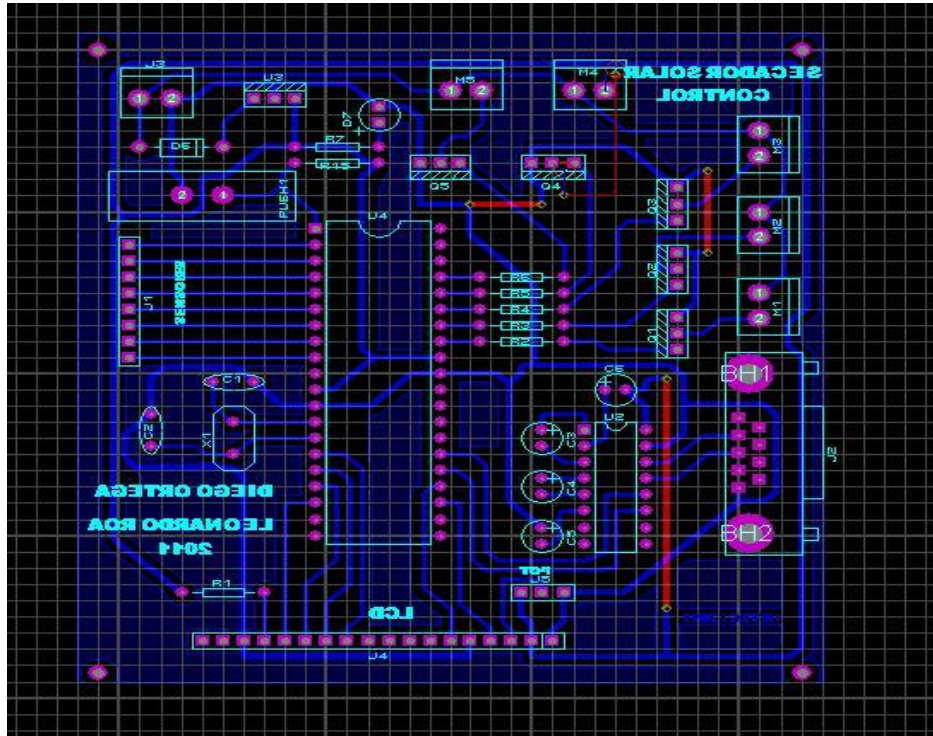


Fig. 37: Diagrama Circuital del Monitoreo del Secador Solar

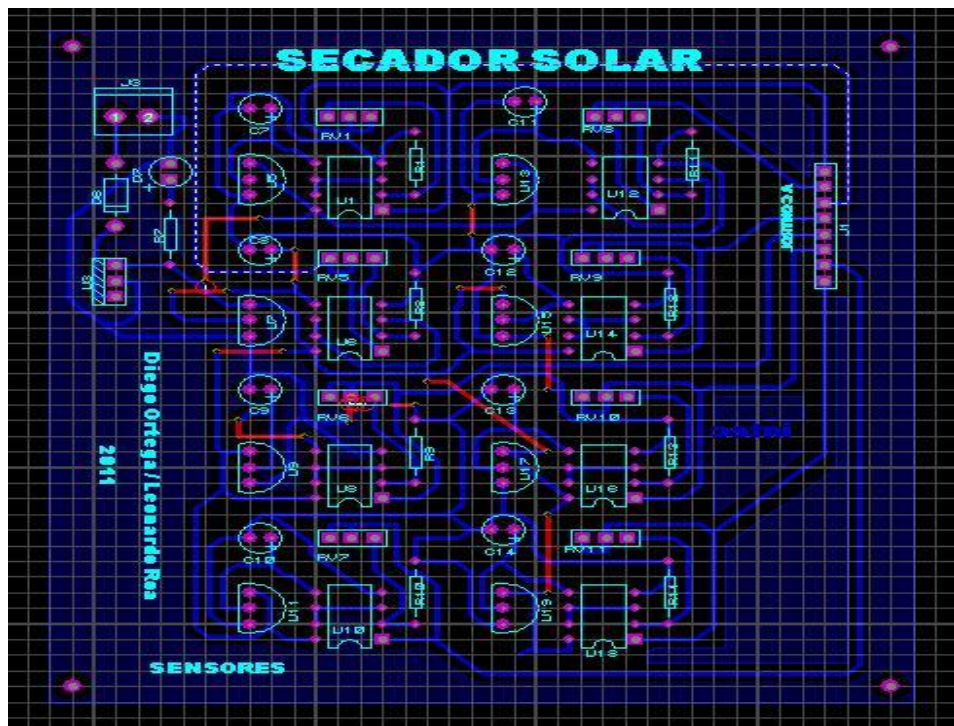


Fig. 38: Diagrama Circuital del Monitoreo del Secador Solar

4.2.10 EXPORTACIÓN DE LOS DATOS POR LABVIEW

Para la exportación de las diferentes temperaturas que se han obtenido durante las horas de radiación en el secador, las cuales se encuentran almacenados en la memoria del microcontrolador pic 16F877A, se lo hace mediante la herramienta grafica Labview, la cual transfiere los datos de la memoria del microcontrolador hacia un archivo de Excel en el computador. En las figuras 39 y 40 se observa la programación realizada en para la adquisición de datos.

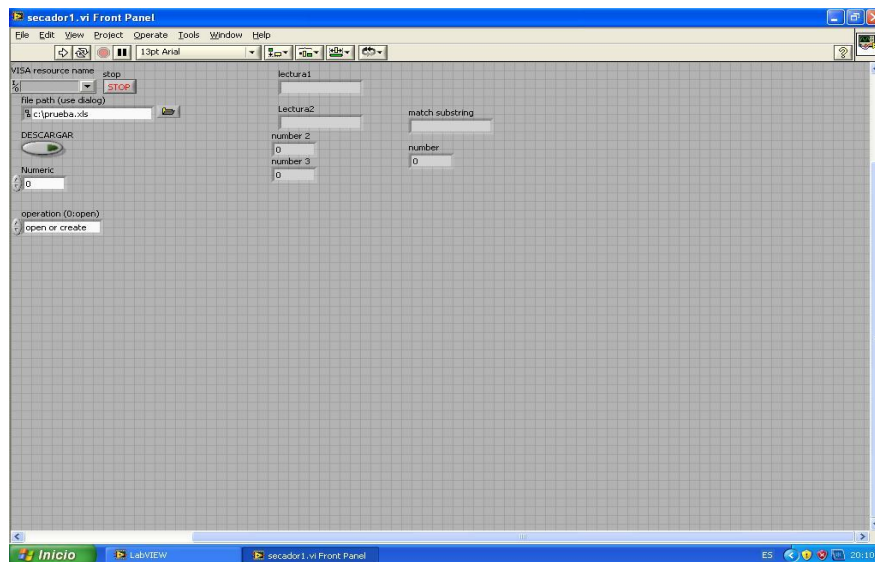


Fig. 39: Programación de Labview Panel Frontal

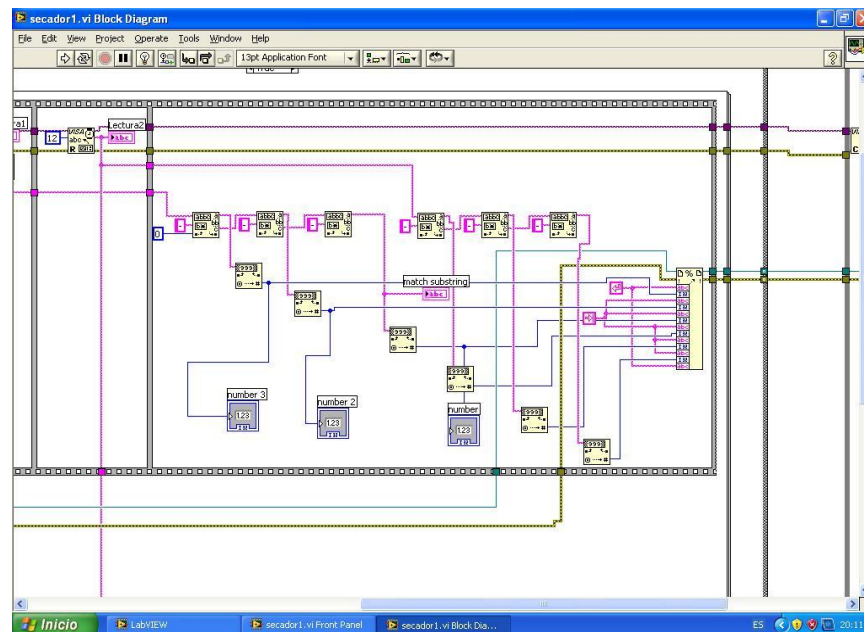


Fig. 40: Programación de Labview Diagrama de Bloques

4.3 Valoración Económica.

La viabilidad económica es clave para que un secador solar sea competitivo frente a otro tipo de secaderos. Sin embargo, en el caso que nos ocupa para la utilización en el secado de café, donde además se busca una valorización medioambiental, esta viabilidad económica debería contener otras externalidades no contempladas en un análisis económico habitual.

Un estudio económico general incluiría: costes del equipo, costes de funcionamiento. Así, la utilización de un secador solar está condicionada por una combinación adecuada entre coste, eficiencia energética y precio del producto final.

Cantidad	Descripción del material	Valor unit	Total
4	Tubos cuadrados 1 1/5*1.5	15	60
2	PG 1/25*0.90	26	51,786
2	PG 1/4*0.45	13,17	26,34
4	Libras de suelda	1,339	5,356
1	AL 1 1/2*1/8	10,714	10,714
5	TC 1 1/2*1.5	16,8	84
2	Discos 9`` de corte srinding	6	12
3	Litros de diluyente	5	15
1	Plancha de aluminio	45	45
3	Tubos sicaflex	8	24
3	Tubos de silicon frio	3,5	10,5
5	Lana de vidrio (m)	2,5	12,5
1	Caja de remaches	4,7	4,7
1	1/4 Pintura negro mate	6,2	6,2
1	1 galón de pintura anticorrosiva	22	22
1	1.5m2 de vidrio	12	12
1	Caja impermeable para tarjeta	8,2	8,2
5	Sensores LM35	5	25
1	Sensor HIH4000	35	35
1	LCD	4,2	4,2
1	Tarjeta	15	15
3	Canaletas	1	3
1	Varios (copias, impresiones etc.)	50	50
			542,496
INSTRUMENTACION			
1	Multímetro digital con termocupla	35	35
	Sub total		577,496
	Iva		69,29952
	TOTAL		646,79552

5. RESULTADOS

5.1 Diseño, construcción y automatización.

Se diseñó un secador solar por convección de aire caliente, considerando una demanda secado de 12 kilogramos de café húmedo. Necesitándose para este efecto un colector de 1.5 m² debidamente aislado para evitar pérdidas de calor, y la cámara de secado en la cual se deshidrata el producto.

El monitoreo automatizado lo realizamos con el microcontrolador PIC16F877 al mismo que se le acoplo los sensores de temperatura LM35 para medir las temperaturas a la entrada y salida del colector, temperatura a la entrada de la cámara de secado, la temperatura de las bandejas y la temperatura en la chimenea, además también se le acoplo al microcontrolador un sensor de humedad HIH4000 para determinar la humedad en la cámara de secado.

5.2 Promedio de Radiación Solar (Mayo – Julio)

Las pruebas de secado se las realizo en los meses de mayo, junio y julio de 2011, desde 9:00 hasta las 15:00, en las figuras 41,42 y 43, se encuentra los promedios de radiación de dichos meces, según la estación meteorológica de la Universidad Técnica.

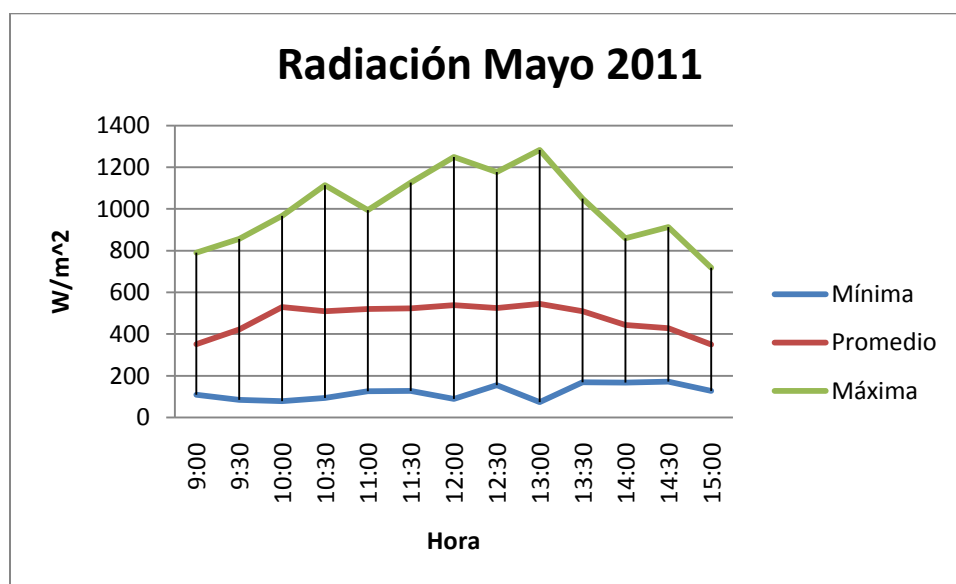


Fig. 41: Promedio de Radiación mayo 2011.

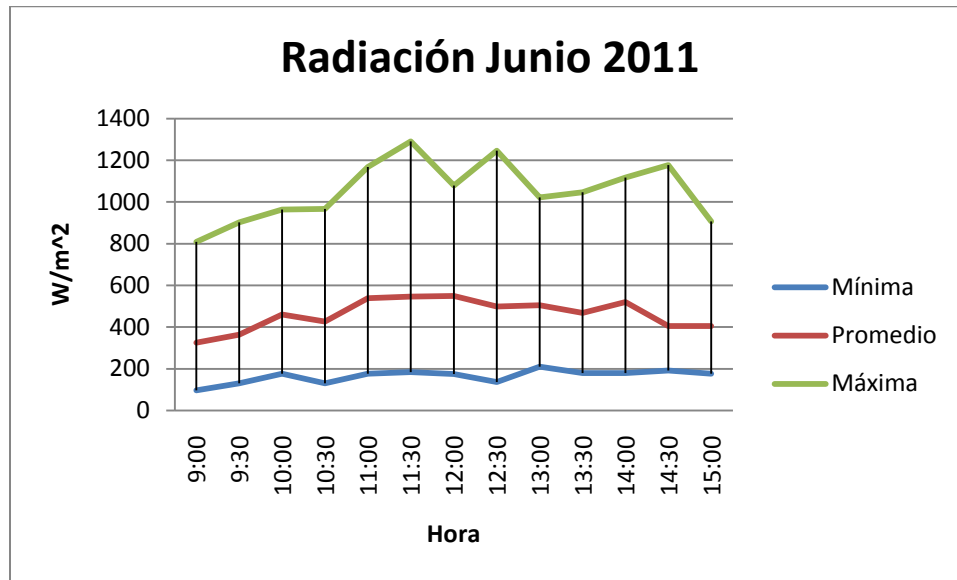


Fig. 42: Promedio de Radiación junio 2011.

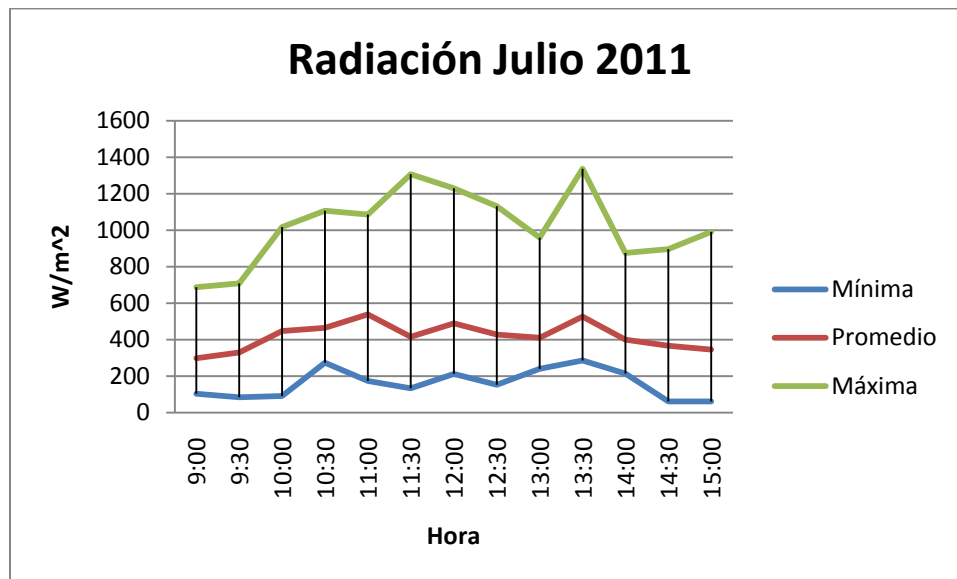


Fig. 43: Promedio de Radiación Julio 2011

5.3 Colector solar

En la figura 44, se muestra que al inicio de la puesta en marcha del colector tiende a ser un poco baja; sin embargo, a lo largo de la operación esta tiende a aumentar hasta el punto que al final de la toma de datos (14:00 PM) con un incremento de temperatura de 12C.

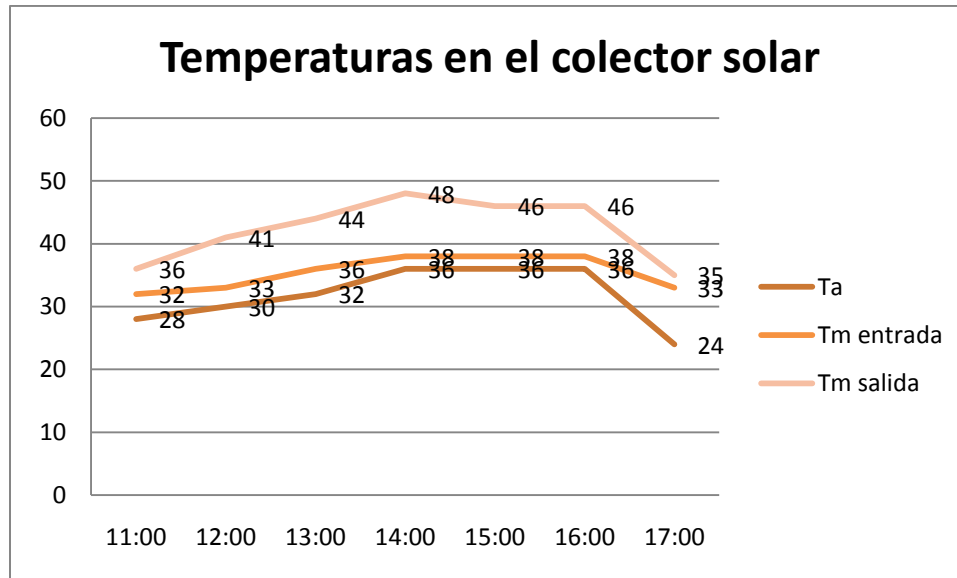


Fig.44: Temperaturas en el colector

Las inconsistencias de estos resultados radican en la limitación inherente que tiene el hecho de comparar un análisis en estado estable con uno completamente dinámico, como es la realización de pruebas al aire libre, donde las condiciones meteorológicas son tan fluctuantes, especialmente si se tiene en cuenta que la época del año en la cual se hicieron las mediciones en la ciudad de Loja se caracteriza por los súbitos cambios de clima.

5.3.1 Eficiencia del colector solar

Se observa que el día de pruebas en el secado del café hubo una mayor temperatura y se obtuvo una mayor eficiencia del colector. Se debe tener en cuenta también que un mayor flujo másico y una mayor eficiencia de secado no implica que se tenga una mayor pérdida de humedad en el secado debido a que el aumento de flujo másico de aire depende de la velocidad del viento; al aumentar la velocidad del mismo disminuye la temperatura a la salida del colector solar que es la temperatura de inicio en la cámara de secado.

En la figura 45 observamos notablemente el incremento del Q útil en función de la radiación solar teniendo los valores más altos alrededor de 14:00 y 15:00 PM.

En la figura 46 tenemos el rendimiento del secador solar con un valor de 47,4% que se encuentran en los rangos permitidos para este tipo de colector con fluido de aire

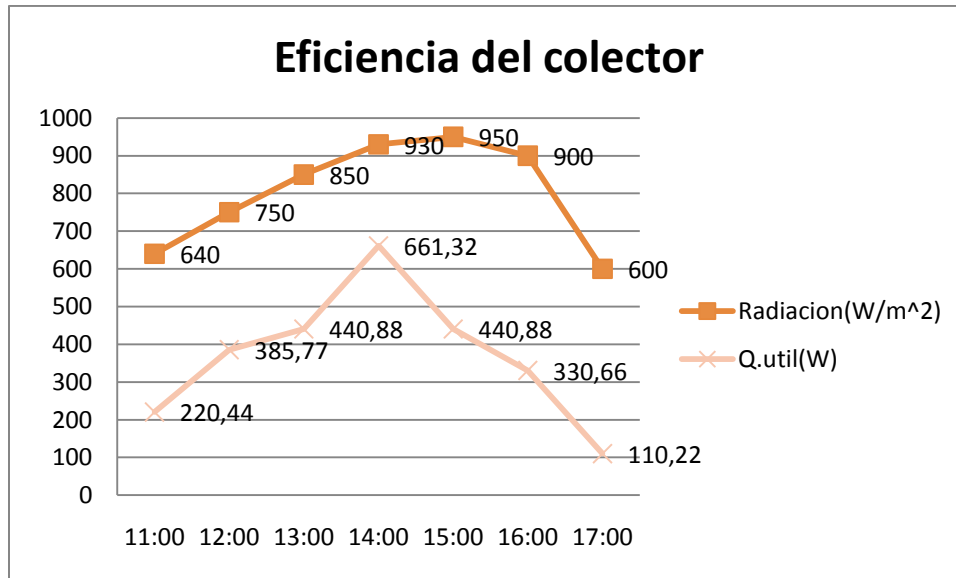


Fig.45: Eficiencia del colector

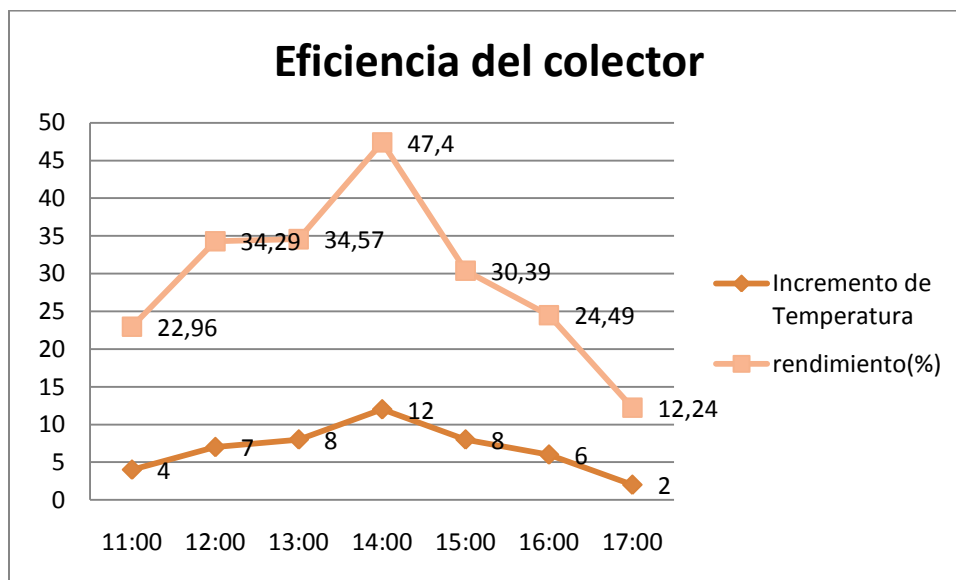
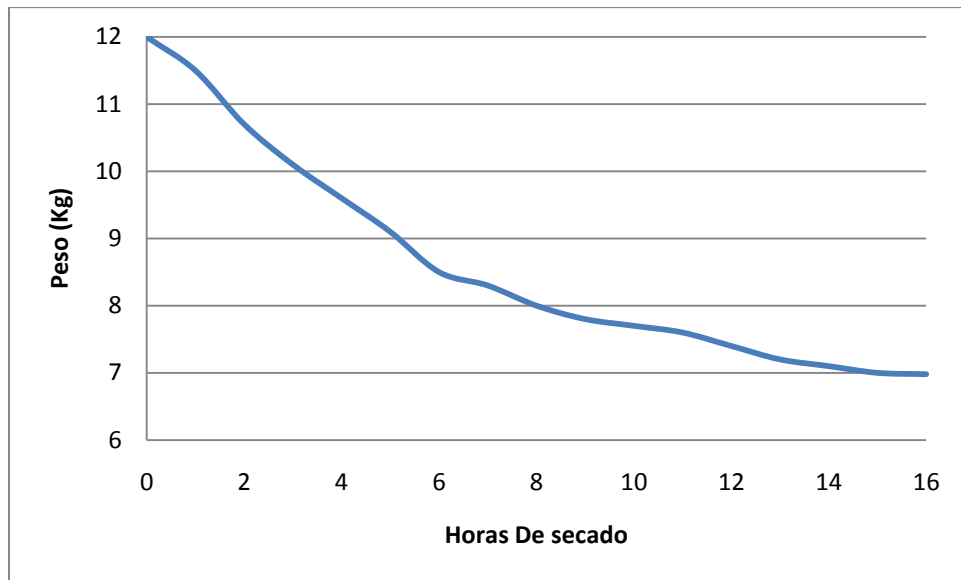
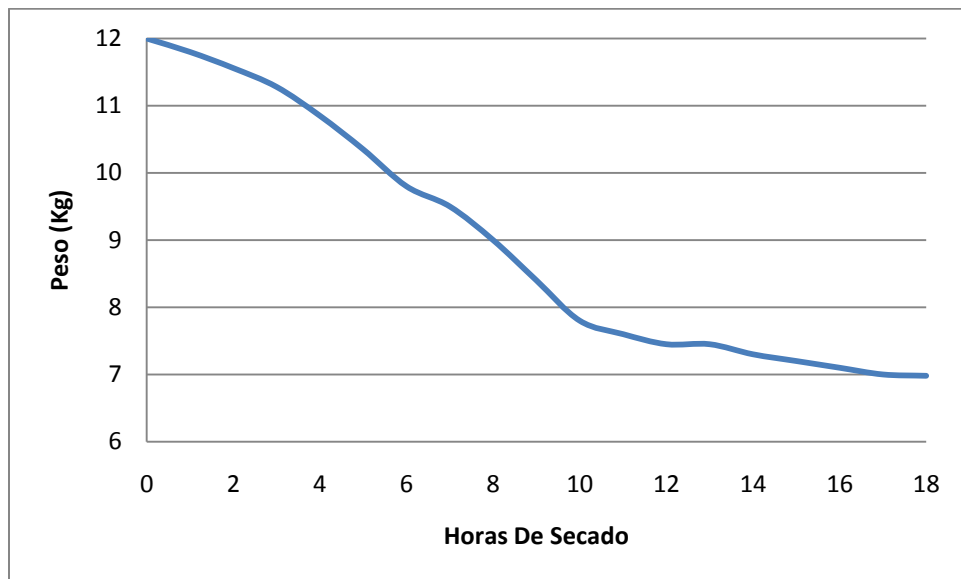
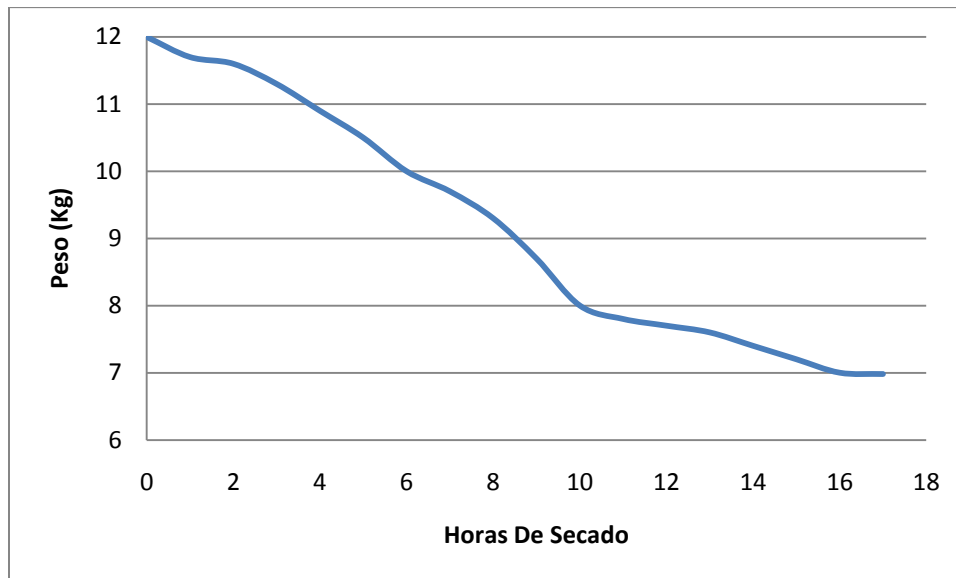
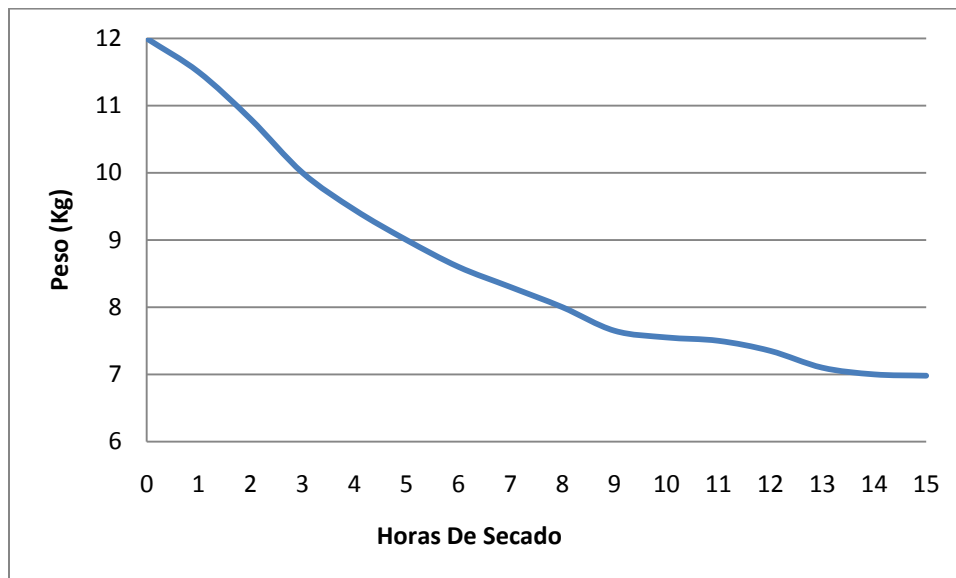


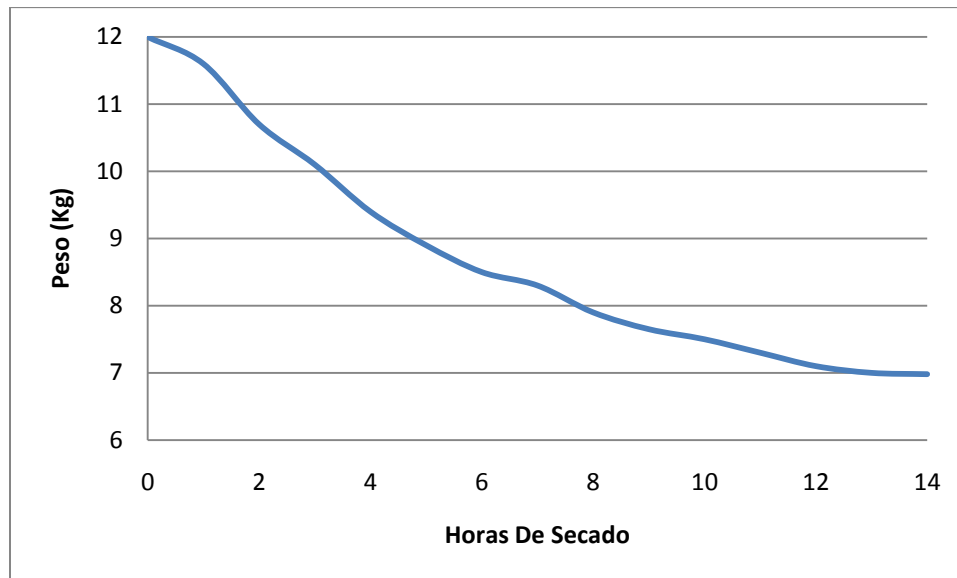
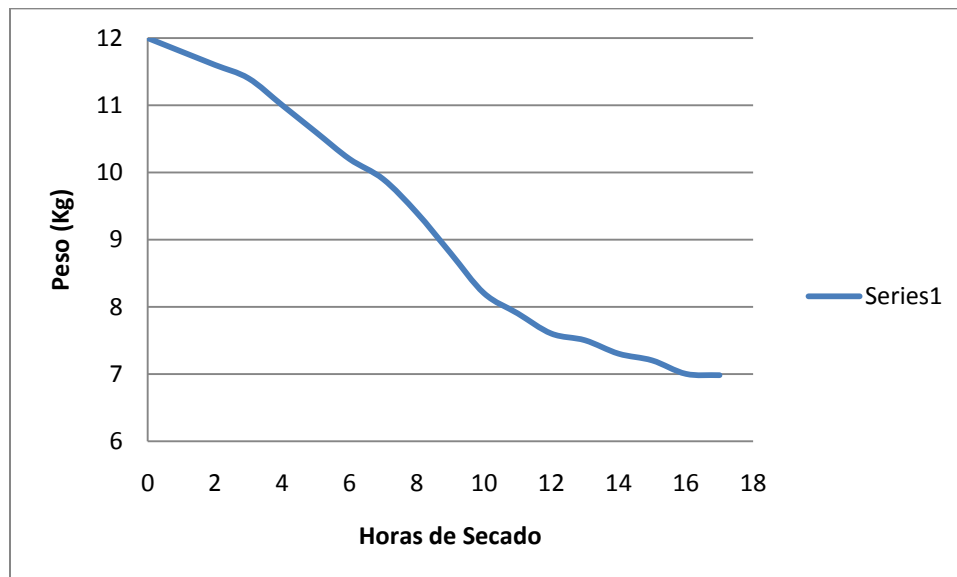
Fig.46: Eficiencia del colector

5.4 Curvas de Secado

En las figuras (47-52) observamos las curvas de secado las cuales se las obtuvo mediante pruebas de secado, analizando el peso del producto frente las horas de secado, las pruebas se las realizo desde las 9:00 hasta las 15:00.

PRUEBA 1 (02 al 04 de mayo, 2011)**Fig. 47: Curva de Secado de Café****PRUEBA 2 (15 al 17 de mayo, 2011)****Fig. 48: Curva de Secado de Café**

PRUEBA 3 (28 al 30 de mayo, 2011)**Fig. 49: Curva de Secado de Café****PRUEBA 4 (19 al 21 de junio, 2011)****Fig. 50: Curva de Secado de Café**

PRUEBA 5 (24 al 26 de junio, 2011)**Fig. 51: Curva de Secado de Café****PRUEBA 6 (19 al 21 de julio, 2011)**

6. DISCUSIÓN

El diseño y el cálculo se lo realizo en el periodo programado, no obstante el mayor inconveniente que se presentó es que la mayoría de la información se encuentra en inglés y la información de vital importancia es pagada, asimismo las correlaciones de transferencia de calor son aplicables a condiciones muy particulares, por lo que la revisión literaria es demasiado extensa.

La construcción del secador solar duro aproximadamente 6 meses, para el monitoreo automatizado tuvimos muchos inconveniente ya que no teníamos conocimiento de la automatización por circuitos integrados y nos tomó algo de tiempo obtener los conocimientos necesarios, además algunos integrados y sensores son difíciles en obtener ya que no se venden en la localidad. Sin embargo se lo realizo aplicando todos los parámetros de diseño.

En lo respecto a la temperatura de salida del colector en nuestro secador por convección natural se consiguieron incrementos de temperatura de 12 °C, en comparación con los secadores solares por convección forzada, en los cuales se logran incrementos de temperatura de 4°C.

En lo correspondiente al secado del producto, se lo realiza en un promedio de 3 días, tomándose valores de peso del producto, desde las 9h00 a las 15h00, deshidratándose el producto al 12% de humedad en un promedio de 16 horas sol.

7. CONCLUSIONES

- Mediante la vasta revisión teórica y el análisis del sistema propuesto se ha realizado el diseño del secador solar por convección natural de aire caliente, para luego proceder a la construcción del mismo. Obteniéndose un incremento de temperatura entre la entrada y la salida del colector de 12 °C.
- Se presenta una marcada influencia por parte de la radiación solar y el flujo másico en la temperatura del aire y la eficiencia del colector. Variando los valores de este último entre 40 y 70%.
- El cálculo para el diseño del secador solar, se lo realizo tomando como consideración una demanda de 12 kg. Requiriéndose para esto un colector solar de placa plana de 1.5 m² de área, y una cámara de secado de 1 m³ la cual nos sirve para deshidratar el café.
- Apoyándonos en el diseño se procedió a realizar la construcción del secador solar, con un colector solar placa plana de carcasa de tol galvanizado apropiadamente aislado con lana de vidrio, placa de absorción de aluminio pintada de negro, cubierta de vidrio. Para la cámara de secado la estructura se la construyo con tubos ¾", mientras que las paredes son tol galvanizado.
- Para el monitoreo automatizado se utilizó un microcontrolador PIC16F877, al cual se lo programo con microcode para que almacene las temperaturas, a la entrada y salida del colector, a la entrada de la cámara de secado, en las bandejas y en la chimenea mediante sensores de temperatura LM35, en tanto que se utilizó un sensor de humedad HIH4000 para medir la humedad en la cámara de secado, el microcontrolador almacena los datos de los sensores cada 30 minutos y los mismos son exportados a una computadora, visualizándose Excel mediante labview.

8. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de secado para otro tipo de productos como: maíz, frejol, plantas medicinales, etc., para comparar los resultados de secado de los mismos, ya que para producto posee características de secado específicas.
- Se podría avanzar con la presente tesis por medio de una investigación que se proponga realizar el monitoreo el peso del producto durante el proceso de secado mediante una balanza Ohaus Traveler u otra similar, además con la utilización de anemómetros para medir la velocidad del aire en el colector y la cámara de secado.
- Para una mayor eficiencia del colector se podría adaptar láminas reflectoras planas a los lados.
- En caso de lluvia es necesario cubrir el colector para evitar posibles filtraciones de agua hacia el aislamiento. Además es de suma importancia tapar la caja del control del monitoreo automatizado, ya que la placa podría sufrir un corto circuito.
- En el momento de introducir o extraer las bandejas de la cámara de secado, es necesario hacerlo con mucho cuidado ya que se podría desconectar los sensores ahí ubicados.
- La caja del control del monitoreo automatizado, se recomienda tenerla ubicada en un lugar seguro, y conectarla al secador únicamente en el momento de realizar pruebas de secado, ya que por motivos de seguridad se la diseño para que se ensamble a los sensores por medio de un conector.

9. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- ASHRAE. 2001. Fundamental Handbook. EUA. Atlanta. Cap III, Pp 11-12.
- COLMENAR. M. Biblioteca Multimedia de las Energías Renovables: 2002.30p.Compacto en Régimen de Carga. Editorial; Karem; Cuba: 1989.200p
- DUFFIE, Jhon; BECKMAN. William. 1980. Solar Engineering of Thermal Process. Segunda edición. EUA. New York. Wiley and Sons. Cap VI.
- FERNANDEZ, Pedro. 2000. Procesos Termosolares en Baja, Media y Alta Temperatura. Departamento de IngenieríaEléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria. España. Pp 1-2.
- GRASSIK, Bruce. Design and construction of a solar collector for teaching purposes (Tesis: Bachelor of Mechanical Enginnering). University of Southern Queensland. Faculty of Engineering and Surveying. EUA.2006. Cap. III y VII.
- INCROPERA, Frank; DEWITT, David. 1999. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4a ed. México. Prentice Hall. Cap VII.
- KERN, Donald. 1965. Procesos de Transferencia de Calor. México. Cecs. Pp 714-719. Pp 90, 112, 113.
- MAUPOEY, Pedro; ANDRES, Ana; BARAT, José; ALBORS, Ana. 2001. Introducción Al Secado De Alimentos Por Aire Caliente. Valencia, UPV, 211 p.
- MUÑOZ, Felipe; ALMANZA Rafael. 2003. Ingeniería de La Energía Solar. Segunda edición. México, CROMOCOLO S.A., 417 P.

SITIOS WEB

- Energía Solar. [en línea]
[http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar], [Consulta: 13 marzo, 2010].
- NASA. EEUU. Registros de Radiación solar. [<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>], [Consulta: 25 Agosto 2008].
- Irradiación Solar. [en línea]
[<http://www.inamhi.gov.ec/html/inicio.htm>], [Consulta: 25 Marzo, 2010].

- Datos de Radiación. [http://meteorologia.cieree.org/?page_id=30], [Consulta: 30 Marzo, 2010].
- Microcontroladores. [en línea]
[<http://www.neoteo.com/microcontroladores>], [Consulta: 12 Junio 2010].
- Colector Solar. [en línea]
[http://www.procobre.org/procobre/aplicaciones_del_cobre/energia_solar_detalle2.html], [Consulta: 18 Marzo, 2010].
- Secado Solar. [en línea]
[<http://www.quimica.urv.es/~w3siiq/DALUMNES/99/siiq51/Seca.html>], [Consulta: 13 Marzo, 2010].
- NASA. EEUU. Registros de Radiación solar. [<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>], [Consulta: 25 Agosto 2008].

10. ANEXOS



Sensor para medir la humedad



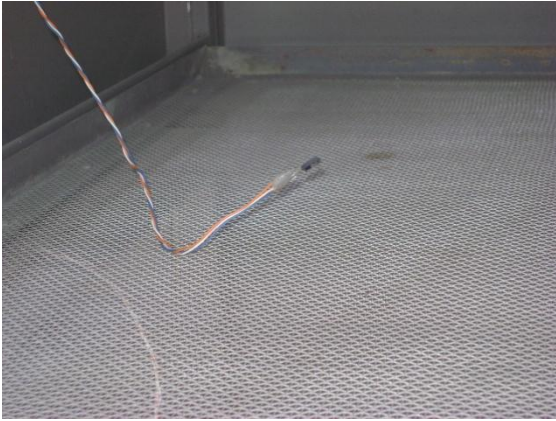
Muestras del café seco



Secador solar para café



Parte interna del secador



Sensor de temperatura en bandeja LM35



Producto en bandejas



Sensor de temperatura LM35 a la salida



Sensor de humedad HIH4000



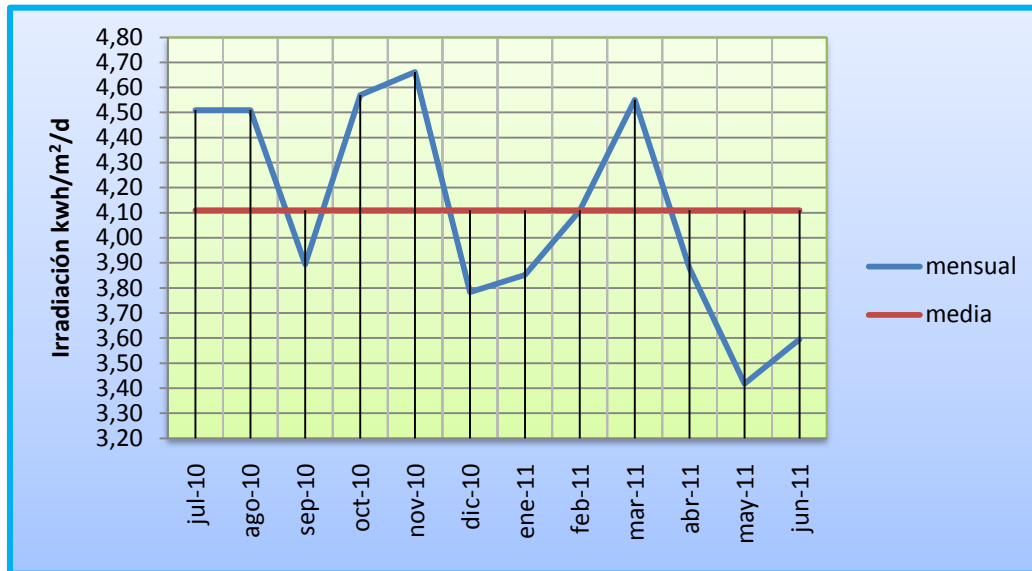
Multímetro



Balanza

PROMEDIO DE INSOLACIÓN EN LA CIUDAD DE LOJA

A Continuación tenemos el promedio de insolación ($\text{KWh/m}^2\text{día}$) desde el Julio del 2010 hasta Junio del 2011, obteniéndose un promedio de $4.1 \text{ KWh/m}^2\text{día}$, para nuestra ciudad según la estación meteorológica del Área de Energía, Las Industrias y Los Recursos Naturales No Renovables de La Universidad Nacional de Loja.



PROPIEDADES DEL AIRE

Temperatura (K)	Densidad ρ (Kg/m^3)	Calor específico c_p ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)	Conductividad térmica k ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^5$ ($\text{Kg/m} \cdot \text{seg}$)	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6$ (m^2/seg)
100	3,6010	1,027	0,0092	0,692	1,92
150	2,3675	1,010	0,0137	1,028	4,34
200	1,7684	1,006	0,0181	1,329	7,49
250	1,4128	1,005	0,0223	1,488	10,53
300	1,1774	1,006	0,0262	1,983	16,84
400	0,8826	1,014	0,0336	2,286	25,90
500	0,7048	1,030	0,0404	2,671	37,90
600	0,5879	1,055	0,0466	3,018	51,34
700	0,5030	1,075	0,0523	3,332	66,25
800	0,4405	1,098	0,0578	3,625	82,29
900	0,3925	1,121	0,0628	3,899	99,30
1000	0,3524	1,142	0,0675	4,152	117,80
1200	0,2947	1,179	0,0782	4,690	159,10
1400	0,2515	1,214	0,0891	5,170	205,50
1600	0,2211	1,248	0,1000	5,630	254,50
1800	0,1970	1,287	0,1110	6,070	308,10
2000	0,1762	1,338	0,1240	6,500	369,00
2500	0,1394	1,688	0,1750	7,570	543,50