

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO CON COLECTORES SOLARES PLANOS MEDIANTE CONVECCIÓN FORZADA PARA UNA CAPACIDAD DE 500 Kg

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JUAN PABLO MAUREIRA POVEDA

DIRECTOR: ING. ERNESTO SORIA

CODIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA

Sangolquí, 2006- 07-24

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO CON COLECTORES SOLARES PLANOS MEDIANTE CONVECCIÓN FORZADA PARA UNA CAPACIDAD DE 500 Kg” fue realizado en su totalidad por Juan Pablo Maureira Poveda, como requerimiento previo para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Ernesto Soria

DIRECTOR

Ing. José Guasumba

CODIRECTOR

Sangolquí, 2006- 07- 24

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO CON
COLECTORES SOLARES PLANOS MEDIANTE CONVECCIÓN FORZADA
PARA UNA CAPACIDAD DE 500 Kg”**

ELABORADO POR:

Juan Pablo Maureira Poveda

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

EL DECANO

Sangolquí, 2006- 07- 24

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a Katrien Boonen.

Una mujer incomparable, llena de virtudes.

Quien día a día me motiva a ser un mejor hombre,
a amar lo que hago y a cuidar del planeta en el que vivo.

AGRADECIMIENTOS

Los seres humanos a lo largo de nuestras vidas nos encontramos con personas que de una u otra manera influyen en nosotros y nos ayudan en determinadas circunstancias.

El disfrutar de las cosas que hacemos nos permite reconocer los sacrificios de terceros, por eso mi agradecimiento en primer lugar a Dios por haberme dado este regalo tan hermoso que es la vida, a mi Madre por su gran ejemplo, dedicación y amor; a mis Hermanos por su comprensión y cariño inmutables, a mis Maestros por los invaluable conocimientos que me entregaron, a mis amigos por serlo y a todas las personas que supieron escuchar mis dudas y guiarme por el camino de la verdad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	II
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
NOMENCLATURA	XVII
RESUMEN	XXIII
CAPITULO 1	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 GENERAL.....	2
1.3.2 ESPECÍFICOS	3
1.4 ALCANCE	3
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	3
CAPITULO 2	5
EL CACAO.....	5
2.1 HISTORIA DEL CACAO EN EL ECUADOR	5
2.2 VARIEDADES DE CACAO	6
2.2.1 CACAOS CRIOLLOS	7
2.2.2 CACAOS FORASTEROS.....	7
2.3 ZONAS PRODUCTORAS EN EL ECUADOR	8
2.3.1 ZONA NORTE.....	8
2.3.2 ZONA CENTRAL.....	9
2.3.3 ZONA SUR.....	9
2.3.4 ZONA ORIENTAL	9
2.4 SUPERFICIE SEMBRADA CON CACAO EN EL ECUADOR	9
2.5 FACTORES CLIMÁTICOS EN EL CULTIVO.....	10

2.5.1 ESTACIONES	11
2.5.2 TEMPERATURA	11
2.5.3 LUMINOSIDAD	11
2.5.4 PRECIPITACIONES.....	12
2.5.5 HUMEDAD RELATIVA.....	12
2.5.6 VIENTO.....	13
2.6 TRATAMIENTOS DEL FRUTO.....	13
2.6.1 COSECHA	13
2.6.2 EXTRACCIÓN DEL GRANO.....	14
2.6.3 FERMENTACIÓN.....	15
2.6.4 SECADO	16
2.6.5 ALMACENAJE	17
2.7 CARACTERÍSTICAS DE LAS ALMENDRAS BENEFICIADAS	18
2.8 NORMAS TÉCNICAS ECUATORIANAS RELACIONADAS.....	18
CAPITULO 3	19
DETERMINACIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE SECADO.....	19
3.1 MÉTODOS DE SECADO.....	19
3.2 SECADO NATURAL.....	19
3.3 SECADO NATURAL EN TENDALES.....	20
3.3.1 TENDAL ECONÓMICO – INIAP.....	22
3.3.2 TENDAL RODANTE – ANECACAO.....	22
3.4 SECADO ARTIFICIAL	23
3.4.1 HORNO A GAS.....	23
3.5 MATRIZ DE DECISIÓN	25
3.5.1 CONFIABILIDAD.....	26
3.5.2 ENERGÍA UTILIZADA.....	27
3.5.3 FUNCIONAMIENTO.....	27
3.5.4 SEGURIDAD.....	28
3.5.5 DISPONIBILIDAD.....	29
3.5.6 MANTENIBILIDAD	30
3.5.7 DURABILIDAD	30
3.5.8 COSTOS DE PRODUCCIÓN	31
3.5.9 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA - MATRIZ DE DECISIÓN.....	33
CAPITULO 4	34
RADIACIÓN SOLAR LOCAL.....	34

4.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	37
4.1.1 HELIÓGRAFO.....	37
4.1.2 PIRHELIÓMETRO ÁNGSTROM	38
4.1.3 PIRANÓMETRO.....	39
4.1.4 TERMÓMETRO DE BULBO SECO.....	40
4.1.5 PSICRÓMETROS	41
4.1.6 PLUVIÓMETRO	41
4.1.7 EVAPORÍMETRO PICHE.....	42
4.1.8 EVAPORÍMETROS DE CUBETA Y TANQUES DE EVAPORACIÓN.....	42
4.1.9 VELETA	43
4.1.10 ANEMÓGRAFO	43
4.2 HELIOFANÍA EN LA PROVINCIA DE GUAYAS.....	44
4.3 RADIACIÓN SOLAR EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS	46
4.3.1 RADIACIÓN FUERA DE LA ATMÓSFERA SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL.....	48
4.3.2 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	50
4.4 PARÁMETROS METEOROLÓGICOS TABULADOS PARA LA PROVINCIA DE GUAYAS.....	55
4.5 GRAFICAS	58
CAPITULO 5	593
DISEÑO DE LOS COLECTORES SOLARES	60
5.1 CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR	60
5.2 COLECTORES SOLARES PLANOS	60
5.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	61
5.2.2 COLECTORES SOLARES PLANOS PARA EL CALENTAMIENTO DE AIRE ...	61
5.2.3 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.....	62
5.3 BALANCE ENERGÉTICO	68
5.4 APLICACIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO.....	77
5.4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL COLECTOR	77
5.4.2 CÁLCULOS.....	80
5.4.3 PLANOS CONSTRUCTIVOS	97
5.4.4 MONTAJE	97
5.4.5 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN.....	100
5.4.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	102
5.5 ALMACENAMIENTO.....	107
5.5.1 SISTEMAS ACTIVOS.....	107

5.5.2 ALMACENAMIENTO DE CALOR EN LECHO DE ROCAS	108
5.5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL LECHO DE ROCAS.....	112
5.5.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	115
CAPITULO 6	116
DISEÑO ESTRUCTURAL	116
6.1 MATERIALES.....	116
6.1.1 ACERO	116
6.1.2 MADERA.....	118
6.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	118
6.2.1 DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR.....	119
6.2.2 NÚMERO DE BANDEJAS.....	120
6.2.3 DISEÑO DE BANDEJAS	122
6.2.4 DISEÑO DE LA COLUMNA DE LA CÁMARA DE SECADO.....	127
6.2.5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO DE COLECTORES SOLARES .	131
6.2.6 DISEÑO DE LA PLACA BASE	143
6.2.7 DISEÑO DE LAS SECCIONES DE TRANSICIÓN	160
6.2.8 DISEÑO DE LA SOLDADURA	162
6.2.9 DISEÑO DE UNIONES A CORTANTE.....	166
6.2.10 DISEÑO DEL SOPORTE DE LOS COLECTORES SOLARES.....	171
6.2.11 DISEÑO DEL TECHO DE LA CÁMARA DE SECADO	175
6.3 PLANOS CONSTRUCTIVOS	176
6.4 MONTAJE	176
6.5 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN	177
6.5.1 MANTENIMIENTO	177
6.5.2 OPERACIÓN.....	178
CAPITULO 7	179
DISEÑO DEL SECADOR.....	179
7.1 EL VOLUMEN DE CONTROL.....	179
7.2 DISEÑO TÉRMICO	182
7.2.1 CONDUCCIÓN.....	183
7.2.2 CONVECCIÓN	184
7.2.3 RADIACIÓN	184
7.2.4 DISEÑO TÉRMICO DEL SECADOR.....	185
7.3 PROCESO DE SECADO	193
7.4 GRAFICAS	196

7.5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	197
CAPITULO 8	199
SIMULACIÓN Y CONTROL	199
8.1 SOLIDWORKS – COSMOS.....	199
8.2 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN	200
8.2.1 APLICACIONES.....	200
8.3 MÉTODO Y FORMA DE TRABAJO DEL SOFTWARE.....	200
8.4 SIMULACIÓN	201
8.4.1 SIMULACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA CÁMARA DE SECADO.....	201
8.4.2 SIMULACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEL BANCO DE COLECTORES SOLARES.....	208
8.5 EL SISTEMA DE CONTROL.....	211
8.5.1 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA CÁMARA DE SECADO	212
8.5.2 MEDICIÓN APROXIMADA DE LA HUMEDAD DEL CACAO	212
8.5.3 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL CACAO.....	214
8.5.4 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CACAO	215
8.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	215
CAPITULO 9	217
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	217
9.1 CONCLUSIONES.....	217
9.2 RECOMENDACIONES.....	218
REFERENCIAS.....	220
ANEXOS	222

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 PAISES PRODUCTORES DE CACAO FINO Y DE AROMA	6
TABLA 2.2 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LA SUPERFICIE DE CACAO POR PROVINCIAS	10
TABLA 2.3 PORCENTAJE DE MAZORCAS ENFERMAS.....	13
TABLA 2.4 CAJAS DE FERMENTACIÓN	15
TABLA 2.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS ALMENDRAS BENEFICIADAS	16
TABLA 2.6 HUMEDAD DE EQUILIBRIO.....	17
TABLA 3.1 CONFIABILIDAD DEL SECADOR.....	26
TABLA 3.2 ENERGÍA UTILIZADA	27
TABLA 3.3 FUNCIONAMIENTO.....	28
TABLA 3.4 SEGURIDAD.....	29
TABLA 3.5 DISPONIBILIDAD.....	29
TABLA 3.6 MANTENIBILIDAD.....	30
TABLA 3.7 DURABILIDAD	31
TABLA 3.8 COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	32
TABLA 4.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE GUAYAQUIL	34
TABLA 4.2 HELIOFANÍA EFECTIVA MENSUAL. E. GUAYAQUIL-RADIO SONDA	45
TABLA 4.3 HELIOFANÍA EFECTIVA MENSUAL. E. MILAGRO (INGENIO VALDEZ).....	46
TABLA 4.4 DÍA ^A PROMEDIO PARA CADA MES Y VALOR DE N POR MESES	48
TABLA 4.5 PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN SOLAR. E. RADIO SONDA	54
TABLA 4.6 PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN SOLAR. E. MILAGRO.....	55
TABLA 4.7 PRECIPITACIÓN MENSUAL (MM). E. RADIO SONDA	56
TABLA 4.8 PRECIPITACIÓN MENSUAL (MM). E. MILAGRO.....	56
TABLA 4.9 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C). E. RADIO SONDA.....	57
TABLA 4.10 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C). E. MILAGRO	57
TABLA 5.1 COMPARACIÓN DE DIVERSOS TIPOS DE CUBIERTAS	64
TABLA 5.2 TEMPERATURA. ESTACIÓN MILAGRO – INGENIO VALDEZ.....	78
TABLA 5.3 TEMPERATURA. ESTACIÓN GUAYAQUIL – RADIO SONDA	78
TABLA 5.4 TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE	95
TABLA 5.5 RESULTADOS ALCANZADOS EN CADA ARREGLO DE COLECTORES	96
TABLA 5.6 RESULTADOS ALCANZADOS PARA EL BANCO DE COLECTORES SOLARES... ..	96

TABLA 5.7 DENSIDAD Y CALOR ESPECÍFICO.....	109
TABLA 6.1 CATETO REQUERIDO PARA FILETES	165
TABLA 7.1 PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE HENDERSON MODIFICADA PARA EL CACAO.....	181
TABLA 7.2 CARACTERÍSTICAS DEL VOLUMEN DE CONTROL.....	181
TABLA 7.3 PARÁMETROS INMERSOS EN EL SECADO	193
TABLA 7.4 COEFICIENTES DE DILATACIÓN LINEAL.....	198
TABLA 8.1 HUMEDAD APROXIMADA DEL CACAO	214

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 CACAO NACIONAL	5
FIGURA 2.2 PRINCIPALES ZONAS CACAOTERAS DEL ECUADOR.....	8
FIGURA 2.3 IMPLEMENTOS UTILIZADOS PARA LA COSECHA DEL CACAO	14
FIGURA 3.1 CACAO APILADO EN LOS TENDALES DE NESTLÉ ECUADOR	21
FIGURA 3.2 CACAO ESPARCIDO EN LOS TENDALES DE NESTLÉ ECUADOR.....	21
FIGURA 3.3 TENDAL ECONÓMICO – INIAP	22
FIGURA 3.4 VISTA FRONTAL TENDAL RODANTE - ANECACAO	23
FIGURA 3.5 COMBUSTIBLE USADO POR EL SECADOR ARTIFICIAL DE NESTLÉ ECUADOR	23
FIGURA 3.6 HORNO A GAS 1- NESTLÉ ECUADOR.....	24
FIGURA 3.7 HORNO A GAS 2 – NESTLÉ ECUADOR	25
FIGURA 3.8 CONFIABILIDAD DEL SECADOR ILUSTRACIÓN	26
FIGURA 3.9 ENERGÍA UTILIZADA	27
FIGURA 3.10 FUNCIONAMIENTO	28
FIGURA 3.11 SEGURIDAD	28
FIGURA 3.12 DISPONIBILIDAD	29
FIGURA 3.13 MANTENIBILIDAD	30
FIGURA 3.14 DURABILIDAD.....	31
FIGURA 3.15 COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	31
FIGURA 4.1: CURVA IDEAL DEL NIVEL DE RADIACIÓN SOLAR	36
FIGURA 4.2 HELIÓGRAFO - INAMHI	38
FIGURA 4.3 CARTULINA GRADUADA	38
FIGURA 4.4 PIRHELIÓMETRO - INAMHI	39
FIGURA 4.5 PIRANÓMETRO - INAMHI	39
FIGURA 4.6 TERMÓMETROS - INAMHI	40
FIGURA 4.7 TERMÓMETROS DE MÁXIMA Y DE MÍNIMA -INAMHI	40
FIGURA 4.8 PLUVIÓMETRO - INAMHI	42
FIGURA 4.9 EVAPORÍMETRO PICHE – INAMHI.....	42
FIGURA 4.10 TANQUE DE EVAPORACIÓN – INAMHI.....	43
FIGURA 4.11 ANEMÓGRAFO - INAMHI	44
FIGURA 4.12 ANEMÓGRAFO Y VELETA - INAMHI.....	44

FIGURA 4.13 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	47
FIGURA 4.14 PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN E. RADIO SONDA.....	55
FIGURA 4.15 PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN E. MILAGRO.....	55
FIGURA 4.16 PRECIPITACIÓN MENSUAL (MM). E. RADIO SONDA.....	58
FIGURA 4.17 PRECIPITACIÓN MENSUAL (MM). E. MILAGRO.....	58
FIGURA 4.18 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C). E. RADIO SONDA.....	59
FIGURA 4.19 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C). E. MILAGRO.....	59
FIGURA 5.1 ESQUEMA DE UN COLECTOR SOLAR.....	61
FIGURA 5.2 VOLUMEN DE CONTROL - COLECTOR SOLAR.....	68
FIGURA 5.3 ANALOGÍA ELÉCTRICA DEL COLECTOR SOLAR.....	71
FIGURA 5.4 ANALOGÍA ELÉCTRICA DESARROLLADA DEL COLECTOR SOLAR.....	72
FIGURA 5.5 RESISTENCIA EQUIVALENTE.....	72
FIGURA 5.6 BANCO DE COLECTORES SOLARES.....	83
FIGURA 5.7 COLECTOR CON PLACA CORRUGADA EN V.....	84
FIGURA 5.8 CAÍDA DE PRESIÓN VS ESPACIO DE FLUJO.....	102
FIGURA 5.9 TEMPERATURA DE SALIDA FLUIDO VS ESPACIO DE FLUJO.....	103
FIGURA 5.10 PERDIDAS TOTALES VS ESPACIO DE FLUJO.....	104
FIGURA 5.11 PERDIDAS TOTALES VS ESPESOR DEL AISLAMIENTO POSTERIOR.....	104
FIGURA 5.12 CALOR ÚTIL VS ESPESOR DEL AISLAMIENTO POSTERIOR.....	105
FIGURA 5.13 TEMPERATURA DE SALIDA VS ESPESOR DEL AISLAMIENTO POSTERIOR.....	105
FIGURA 6.1 ESTRUCTURA DE ACERO.....	117
FIGURA 6.2 MADERA UTILIZADA PARA LA CONSTRUCCIÓN.....	118
FIGURA 6.3 ESQUEMA DEL SECADOR.....	119
FIGURA 6.4 ESQUEMA DE LA CÁMARA DE SECADO.....	120
FIGURA 6.5 ESQUEMA DEL MARCO DE LA BANDEJA.....	122
FIGURA 6.6 CARGA DISTRIBUIDA EN LA BANDEJA.....	124
FIGURA 6.7 REACCIONES EN LA VIGA - BANDEJA.....	124
FIGURA 6.8 DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE - BANDEJA.....	125
FIGURA 6.9 DIAGRAMA MOMENTO FLECTOR - BANDEJA.....	125
FIGURA 6.10 ÁREA COLABORANTE – CÁMARA DE SECADO.....	127
FIGURA 6.11 ESTRUCTURA BANCO DE COLECTORES SOLARES.....	131
FIGURA 6.12 VIGAS DEL BANCO DE COLECTORES SOLARES.....	135
FIGURA 6.13 CARGA APLICADA A LA VIGA.....	136
FIGURA 6.14 REACCIONES EN LA VIGA.....	137

FIGURA 6.15 DIAGRAMA FUERZA CORTANTE - VIGA	137
FIGURA 6.16 DIAGRAMA MOMENTO FLECTOR - VIGA	138
FIGURA 6.17 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA VIGA.....	138
FIGURA 6.18 ÁREA COLABORANTE – ESTRUCTURA COLECTORES SOLARES.....	140
FIGURA 6.19 PLACA BASE DE LA COLUMNA	144
FIGURA 6.20 NOMENCLATURA PARA ROSCAS DE TORNILLOS	147
FIGURA 6.21 JUNTA EMPERNADA - SHIGLEY.....	148
FIGURA 6.22 CARGA APLICADA SOBRE LAS COLUMNAS - BANCO COLECTORES	151
FIGURA 6.23 CARGA APLICADA A LA COLUMNA CÁMARA DE SECADO	160
FIGURA 6.24 SECCIÓN DE TRANSICIÓN - FAO.....	161
FIGURA 6.25 SOLDADURA DE FILETE.....	163
FIGURA 6.26 CATETO Y GARGANTA DE LA SOLDADURA DE FILETE.....	164
FIGURA 6.27 ESQUEMA DE LA UNIÓN A CORTANTE.....	167
FIGURA 6.29 COMPONENTES DE LA CORTANTE PRINCIPAL.....	169
FIGURA 6.30 ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DEL SOPORTE	171
FIGURA 6.31 ESQUEMA DE LA FORMACIÓN DEL SOPORTE	172
FIGURA 6.32 SOLDADURA DEL SOPORTE A LA VIGA.....	173
FIGURA 7.1 ESQUEMA DEL VOLUMEN DE CONTROL	179
FIGURA 7.2 VOLUMEN DE CONTROL – CÁMARA DE SECADO.....	181
FIGURA 7.3 TRANSFERENCIA DE CALOR DENTRO DE LA CÁMARA DE SECADO.....	189
FIGURA 7.4 CIRCUITO TÉRMICO EQUIVALENTE PARA UNA PARED COMPUESTA EN SERIE	191
FIGURA 7.5 DEMANDA Y OFERTA ENERGÉTICA	196
FIGURA 7.6 TEMPERATURA DE SECADO	197
FIGURA 7.7 TIEMPO DE SECADO	197
FIGURA 8.1 SOLIDWORKS	199
FIGURA 8.2 COLUMNA Y PLACA BASE DE LA CÁMARA DE SECADO	202
FIGURA 8.3 CIMENTACIÓN	202
FIGURA 8.4 PLACA BASE Y ARANDELAS DE LA CÁMARA DE SECADO	203
FIGURA 8.5 ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA CÁMARA DE SECADO.....	203
FIGURA 8.6 RESTRICCIONES Y FUERZA EXISTENTES	204
FIGURA 8.7 MALLADO UTILIZADO PARA EL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.....	205
FIGURA 8.8 RESULTADO DE ESFUERZOS.....	205
FIGURA 8.9 RESULTADO DE TENSIONES.....	206

FIGURA 8.10 RESULTADO DE DESPLAZAMIENTOS	206
FIGURA 8.11 RESULTADO DE VERIFICACIÓN DE DISEÑO.....	207
FIGURA 8.12 RESULTADO DE DESPLAZAMIENTOS	207
FIGURA 8.13 RESULTADO DE DEFORMACIÓN.....	208
FIGURA 8.14 RESULTADO DE ESFUERZOS.....	208
FIGURA 8.15 RESULTADO DE TENSIONES.....	209
FIGURA 8.16 RESULTADO DE DESPLAZAMIENTOS	209
FIGURA 8.17 RESULTADO DE VERIFICACIÓN DE DISEÑO.....	210
FIGURA 8.18 RESULTADO DE DESPLAZAMIENTOS	210
FIGURA 8.19 RESULTADO DE DEFORMACIÓN.....	211
FIGURA 8.20 TERMÓMETRO DIGITAL.....	212
FIGURA 8.21 CELDAS DE SUSPENSIÓN TRU-TEST	213

NOMENCLATURA

- A1 área de la placa base, fuerza de reacción en las vigas,
- A2 área de la sección transversal de concreto que soporta a la placa base,
- A área, área de colector solar aproximada, área de contacto para el análisis de conducción, área de la sección transversal de la columna, fuerza de reacción en las vigas,
- a coeficiente de la regresión lineal de Armstrong modificada por Page, ancho,
- B fuerza de reacción en las vigas,
- B1 fuerza de reacción en las vigas,
- Bi número de Biot,
- b espacio por donde fluye el aire en el colector solar, coeficiente de la regresión lineal de Armstrong modificada por Page
- bf longitud del lado de la placa base de la columna
- C constante de rigidez de la junta, carga de la ceniza para el método de diseño por factor de carga y resistencia, peso total de los elementos que forman a los colectores solares, distancia al centro de gravedad de la sección,
- Cp calor específico,
- Cs carga por longitud de filete de soldadura,
- Ct carga aplicada sobre el soporte de los colectores solares,
- Cv capacidad volumétrica,
- c acompañada de los numerales 1, 2, y 3 son parámetros de la ecuación de Henderson modificada
- D diámetro del tornillo, diámetro promedio de las rocas, carga muerta para el método de diseño por factor de carga y resistencia,
- Dh diámetro hidráulico,
- E módulo de elasticidad,

E_c	cantidad de energía solar que tendrá que llegar a la superficie del colector solar, para producir el calentamiento medio diario deseado
E_d	energía demandada por el proceso de secado,
E_o	energía ofertada por el banco de colectores solares,
e_p	espesor de la placa base,
esp	espesor,
F	fuerza, fuerza aplicada sobre el soporte de los colectores solares,
F'	factor de eficiencia del colector solar, fuerza cortante primaria,
F''	factor de flujo del colector solar, fuerza cortante secundaria
F_b	esfuerzo admisible de flexión en la placa base,
F_c	esfuerzo admisible de aplastamiento del concreto,
F_{cp}	fuerza aplicada en cada perno,
F_{cr}	limite crítico para el método de diseño por factor de carga y resistencia,
FG	factor de conversión de $^{\circ}$ a radianes,
F_i	fuerza de precarga inicial,
F_{pp}	fuerza total en los pernos,
F_r	factor de remoción de calor,
FS	factor de seguridad,
F_t	fuerza total aplicada a las placas,
F_u	resistencia de tensión mínima del perno,
F_y	resistencia a la cedencia del acero,
f	factor de fricción,
f'_c	resistencia a la compresión del concreto,
f_a	flujo de aire,
f_p	esfuerzo actual de aplastamiento sobre la placa base, esfuerzo de aplastamiento en el perno,
G	velocidad másica superficial, centro de gravedad de la soldadura,
G_{sc}	constante solar,
G_{on}	constante solar para un día específico,
G_o	constante solar para un punto fuera de la atmósfera terrestre,
g	gravedad, garganta del filete de soldadura,
H	altura de la cabeza del perno, altura de la tuerca, radiación solar sobre la superficie de la tierra,
H_{bh}	humedad en base húmeda,

He	humedad de equilibrio higroscópico,
Hf	contenido de humedad final del cacao,
Hfg	entalpía de vaporización del agua,
Ho	energía proyectada por el sol fuera de la atmósfera terrestre,
h	espesor de la capa de cacao, coeficiente de transferencia de calor por unidad de área, cateto del filete de soldadura,
hf	coeficiente de transferencia de calor en los colectores solares,
ho	coeficiente de convección,
hv	coeficiente de transferencia de calor volumétrico,
hw	coeficiente de transferencia de calor del viento,
I	radiación solar absorbida por el colector, inercia,
Ix	inercia respecto al eje x,
i	día mas representativo para los análisis de energía solar para cada mes,
K	conductividad térmica, constante de sujeción de la columna,
Kb	constante de rigidez del perno,
Km	constante de rigidez de las placas,
Kt'	factor de superficie,
L	longitud, carga viva,
Lmin	distancia mínima en el diseño de los pernos de anclaje,
l	longitud,
M	momento flector,
Ma	caudal másico de aire,
m	masa,
ma	flujo másico por unidad de superficie de colección,
N	número de horas de brillo solar teórico, cantidad de diferentes elementos,
Na	potencia necesaria del colector solar,
Nu	número de Nusselt,
n	heliofanía, valor de un día para determinado mes,
P1	presión atmosférica,
P2	presión calculada,
P	perímetro, peso,
Pr	número de Prandtl,
p	paso del tornillo,

Q	calor total requerido para el proceso de secado,
Q_c	calor por convección,
Q_{cd}	calor por conducción,
Q_i	calor requerido para iniciar el proceso,
Q_L	calor latente,
Q_p	calor perdido,
Q_R	calor por radiación,
Q_s	calor sensible,
Qu	calor útil,
Qv	caudal volumétrico,
q	carga distribuida aplicada sobre la viga,
R1	resistencia a la conducción del aislante,
R2	resistencia a la conducción del lecho,
R	radiación mínima registrada por el INAMHI, carga de la lluvia para el método de diseño por factor de carga y resistencia, longitud de los lados de la placa base,
Rc1	resistencia a la convección en la pared más externa de la cámara de secado,
Re	número de Reynolds, fuerza de reacción equivalente en las vigas,
Rn	resistencia nominal (fuerza),
Rt	resistencia total a las pérdidas de calor,
Ru	resistencia requerida, fuerza aplicada,
r	radio de giro, con los numerales 1 y 2 distancia desde el tornillo hasta el centroide,
S	módulo elástico de la sección, carga de la nieve para el método de diseño por factor de carga y resistencia,
Sb	resistencia mínima de prueba del tornillo,
Su	resistencia de tensión mínima del tornillo,
Sy	resistencia mínima de fluencia del tornillo,
T	temperatura,
Ta	temperatura mínima registrada por el INAMHI,
Ti	temperatura equivalente promedio entre la placa y el ambiente,

Tfl	temperatura final del lecho de rocas,
Til	temperatura inicial del lecho de rocas,
Tp	temperatura de la placa absorbadora,
Tra	torque de apriete requerido,
Ts	temperatura de secado, temperatura de salida del aire en los colectores solares,
T Φ	temperatura media ambiental,
tb	espesor de la bandeja,
ts	tiempo de secado,
tT	horas mínimas de sol efectivas registradas por el INAMHI,
Ub	pérdidas posteriores en el colector solar,
UI	pérdidas totales en el colector solar,
Ut	pérdidas superiores en el colector solar,
V	Volumen, fuerza cortante,
Vv	velocidad del viento,
W	distancia entre caras planas de la cabeza hexagonal de tuerca y tornillo, carga del viento para el método de diseño por factor de carga y resistencia, carga distribuida,
x	coordenada en el eje x del centro de gravedad de la soldadura,
y	coordenada en el eje y del centro de gravedad de la soldadura,

LETRAS GRIEGAS

α	Absortancia de la placa absorbadora, factor de forma superficial de área para el lecho de rocas,
β	ángulo de inclinación de los colectores solares, con los numerales 1 y 2 ángulos entre las fuerzas cortantes primarias y secundarias,
δ	densidad, ángulo de declinación,
ε	emitancia, fracción de agujeros de las rocas,
ϕ	latitud, humedad relativa, factor de resistencia para el método de diseño por factor de carga y resistencia,
γ	ángulo de azimuth,
η_c	eficiencia del colector solar,
η_{cs}	eficiencia de la cámara de secado,

λ_c	parámetro de esbeltez,
μ	viscosidad dinámica,
θ	ángulo de incidencia,
θ_z	ángulo de zenit,
σ	constante de radiación de Stefan Boltzmann, esfuerzo admisible,
σ_{eq}	esfuerzo equivalente (TECM)
σ^F	tensión admisible,
σ^f	esfuerzo de flexión debido al momento,
σ^i	esfuerzo de precarga,
σ^t	esfuerzo de tracción,
τ	transmitancia del vidrio, con los numerales 1 y 2 esfuerzo cortante producido en los tornillos,
τ_{eq}	esfuerzo cortante equivalente,
τ^v	esfuerzo cortante debido a la fuerza cortante,
τ^m	esfuerzo cortante debido al momento flector,
ω	ángulo horario,
ω_s	ángulo de ocaso,

RESUMEN

El Ecuador es un país cacaotero por historia, se encuentra entre los 10 principales exportadores de cacao en el mundo. Este producto se lo siembra al rededor de todo el país. El 25 % de la producción nacional corresponde a la provincia de Guayas, más de 60000 familias a nivel nacional dependen de este importante producto.

Existen varios procesos a seguir después de la cosecha del cacao entre estos se encuentra la fermentación, que es un proceso en el cual el cacao adquiere sus características físico químicas, es decir alcoholes, ph y humedad.

La humedad alcanzada por el cacao en el proceso de fermentación es del 60 % aproximadamente. Posterior a la fermentación está el proceso de secado, cuyo objetivo principal es disminuir la cantidad de humedad del producto hasta un 7 %, que es la humedad de equilibrio del cacao, indispensable para ser exportado y procesado.

La gran mayoría de los productores ecuatorianos utilizan un proceso de secado natural el mismo que se realiza en áreas de terreno encementado a las que se denomina tendales.

Para el secado en tendales se requiere de grandes áreas de terreno, y una dependencia total a los factores climáticos ya que en el momento de lluvia el proceso debe detenerse, además el producto no se encuentra protegido de los ataques por parte de aves o insectos. El secado de cacao utilizando este proceso toma alrededor de 7 días.

Los grandes productores para satisfacer la demanda compran la producción a los pequeños además de tener la suya propia, producción que es secada en forma natural en los tendales y en forma artificial utilizando hornos a gas.

El gas utilizado en estos procesos es un derivado del petróleo y su energía es no renovable es decir que llegará un momento en que se agotará, sin olvidar que la quema de este tipo de combustible produce gases que destruyen el medio ambiente, siendo los principales causantes del calentamiento global, un problema que nos compete a todos los seres humanos. Sin olvidarnos de la inversión económica que se debe hacer para adquirir este combustible.

Al observar el proceso de secado actual en nuestro país, nace la idea de diseñar un sistema de secado que por sus características energéticas no sea nocivo para el medio ambiente, por su infraestructura no represente una gran inversión para los pequeños productores, reduzca el área de terreno actualmente ocupada por los tendales, disminuya el tiempo de secado y controle el proceso.

Se decidió diseñar un secador de granos de cacao que funcione con energía solar. Mediante la implementación de un sistema de colectores solares planos se transformará la energía solar en energía térmica. Con el propósito de alcanzar una temperatura de secado de 50° C los colectores solares poseen dos cubiertas transparentes.

Es importante tomar en cuenta que al secar cacao a temperaturas superiores a los 60° C se corre el riesgo de generar cambios internos en el producto que tienden a disminuir su calidad como el aumento de la acidez por ejemplo.

Un pequeño productor posee aproximadamente 10 hectáreas de terreno cultivado y de cada hectárea se puede extraer un promedio de 400 Kg de cacao, debido a esto el diseño propuesto tiene una capacidad de 500 Kg. Para secar en un tendal esta cantidad de cacao se requeriría cerca de 120 m² de terreno.

Gracias a la información contenida en los anuarios meteorológicos que posee el INAMHI se determinó los valores de Heliofanía (horas efectivas de sol) y posteriormente la radiación solar disponible en la provincia de Guayas, lugar hacia donde va dirigido el proyecto.

En el proceso de secado la transferencia de calor se da principalmente por conducción y convección, la convección es forzada ya que se utilizarán dos ventiladores. El aire impulsado por los ventiladores pasa a través de los colectores solares en donde aumentará su temperatura.

El aire caliente es guiado hacia la cámara de secado por medio de una sección de transición, cuyo objetivo principal es el de uniformar el flujo de aire en la cámara de secado.

La cámara de secado está construida de tubería metálica estructural a modo de columnas y las paredes son de madera que como sabemos es un aislante

térmico natural. Dentro de la cámara de secado estará un lecho de rocas el mismo que servirá como sistema de acumulación de calor para los momentos en que la radiación solar ya no este disponible (noche).

El cacao se colocará en la parte superior de la cámara de secado sobre unas bandejas perforadas construidas de acero. Las perforaciones permitirán el paso del aire caliente desde el interior de la cámara de secado hasta el producto y de ahí al medio ambiente.

El banco de colectores solares estará conformado por 8 arreglos, cada uno de estos se compone de tres colectores solares, y se encuentran soportados por una estructura metálica que posee 10° de inclinación. Debido a la inclinación se captará de mejor forma la radiación solar y además se facilitarán las actividades de mantenimiento.

Las columnas que soportarán a la cámara de secado, banco de colectores y techo del secador se han diseñado de acuerdo al método por factor de carga y resistencia (LRFD) por sus siglas en ingles.

Los elementos conectores, de anclaje y soldadura utilizados dentro del sistema se han diseñado de acuerdo a lo estipulado por el instituto americano de construcción de acero (AISC) y códigos de la sociedad americana de soldadura (AWS).

Para tener una idea más real de lo que sucede en el secador propuesto se simuló el funcionamiento de los elementos estructurales, de esta manera se ha confirmado la validez de los métodos de diseño utilizados.

Mediante la utilización de termómetros digitales y celdas de carga se podrán realizar curvas de secado para cada mes, además de controlar diariamente el proceso.

El secador propuesto reduce el tiempo de secado a un promedio de 3 días, así como también el área de terreno ocupada por el secador será de 60 m², lo que significa una reducción del 50 % del área actual destinada. Puesto que la energía solar es gratuita se logrará un ahorro de \$ 25000 anuales en comparación con el secador artificial que utiliza GLP. Se requiere una inversión de aproximadamente \$ 7000 para la construcción del secador.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad el cultivo de cacao ocupa una superficie de aproximadamente 263000 hectáreas distribuidas en las provincias de la Costa, Sierra y parte del Oriente.

Las provincias que tienen mayor extensión en los cultivos son la provincia de Los Ríos con el 35% del total sembrado, Guayas con el 25 %, Manabí con el 14%, Esmeraldas con el 8% y El Oro con el 5%. Entre las provincias de Pichincha, Cotopaxi, Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay y el Oriente se reparten el 13% restante.

En la provincia del Guayas para el año 2000 existían 72311 hectáreas sembradas de cacao¹, una hectárea sembrada produce de 300 a 400 Kg de cacao². A lo largo de todo el año se cosecha cacao existiendo meses pico de producción en los que se recolecta el 60% del total producido en el año, este porcentaje es específico para la provincia del Guayas³, ya que varía de acuerdo a las características geográficas y climáticas de cada provincia.

Actualmente el proceso de secado se lo realiza en forma natural y artificial. La forma natural consiste en secar el cacao al aire libre en tendales, para que el cacao esté seco mediante este método se requieren 6 días, ya que esto depende de las condiciones climáticas principalmente.

Los tendales son áreas de terreno planas encementadas o en su defecto el asfalto de las carreteras. Este sistema ocupa una superficie de terreno que podría ser utilizada para el cultivo del cacao o suele transformarse en una molestia y un peligro para nuestro sistema vial. Sin lugar a dudas presenta problemas para el mismo producto ya que al ser secado a la intemperie no está

¹ [23]

² [1]

³ Dpto. Agrícola Compras de Cacao. NESTLÉ del Ecuador

protegido del ataque de insectos, de los gases producto de la combustión de los vehículos y polvos del ambiente.

De manera artificial el secado se lo realiza en hornos a gas cuando el cacao es secado usando estos hornos se requiere que el producto haya perdido una cantidad considerable de humedad del 60% al 15% antes de que el producto ingrese a las cámaras de secado, esa parte de humedad se la pierde en los tendales. Ya que los hornos funcionan con gas licuado de petróleo los costos de producción son más altos.

Existen normas ecuatorianas que señalan las características del cacao para que sea considerado de buena calidad, entre los principales aspectos que en estas normativas se toman en cuenta está la humedad del cacao seco la misma que oscila entre el 6% y 8%; también se toma en cuenta el grano que ha sufrido deterioro en su estructura (perforaciones) debido a la acción de insectos, entre otras.

En vista del tiempo y espacio que se requieren para el secado de cacao utilizando los tendales se busca una alternativa que optimice estos dos parámetros.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Hoy en día en nuestro país se utilizan métodos de secado que no garantizan la calidad del producto y el tiempo requerido para este proceso es excesivo, por otro lado al realizarse el proceso en recintos cerrados como son los hornos de GLP los costos de producción aumentan sustancialmente, de aquí nace la necesidad de desarrollar un sistema para el secado de granos de cacao que funcione con energía solar y que cuente con un sistema de control que garantice la calidad del producto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

- Realizar el diseño y la simulación de un secador de granos de cacao que utilizará energía solar.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Disminuir el tiempo de secado
- Reducir el área de terreno utilizada durante el proceso
- Mejorar y controlar el sistema de secado de granos de cacao

1.4 ALCANCE

Al finalizar este proyecto, se aspira que el productor de cacao sienta la necesidad de implementar este sistema. De esta forma estaríamos contribuyendo con el desarrollo de un grupo de nuestra sociedad, generando fuentes de empleo y tecnificando un proceso que nos llevará a ser más competitivos.

Sin lugar a duda los conocimientos adquiridos en lo que a Energía Solar, Diseño estructural, Transferencia de Calor, Simulación y Control respectan, nos permitirá en el futuro seguir desarrollando proyectos para el engrandecimiento y desarrollo de la sociedad ecuatoriana.

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El sistema propuesto reduciría cerca de \$ 25000 anuales al costo de producción si lo comparamos con el proceso de secado realizado en hornos de GLP (NESTLÉ del Ecuador).

El diseño propuesto reduce el área destinada a tendales. Ya que se estima requerirá menos de 70 m² para secar 500 Kg de cacao.

Es importante proponer el aprovechamiento de la radiación solar como fuente de energía ya que a más de ser no contaminante, es gratuita.

En el secado natural no existe un sistema de control del proceso. El secador propuesto posee un sistema de control que nos permite identificar el momento en que el cacao ha alcanzado la humedad requerida, garantizando la calidad del producto.

La estructura del secador impide que los granos de cacao sean atacados por plagas, insectos, aves como sucede con los granos mientras se secan en los

tendales. Además los protege de los gases de combustión producto de la quema de GLP o gasolina puesto que de ninguna manera tendrá algún contacto con estos.

El secado de los granos de cacao se realizará a una temperatura de 50°C. La pérdida acelerada de humedad debida a alta temperatura provoca un aumento en la acidez de grano, como lo que sucede en los hornos de GLP en los que la temperatura durante el proceso de secado es 100 °C.

Se disminuirá el tiempo de secado a 3 días ya que el secado en tendales requiere 6 días, gozando de las mejores condiciones climáticas, para que el cacao tenga una humedad del 7 %.

Mediante el sistema de control se controlará el funcionamiento del secador, así como también la humedad del producto, lo cual lleva a mejorar su calidad.

Se reduce las horas hombre de trabajo ya que el área que el operador debe cubrir se reduce sustancialmente, a diferencia en los tendales se requiere que el trabajador camine en el tendal levantado con sus pies el cacao con una frecuencia de 2 horas. Esto no implica pérdida de plazas de trabajo, al contrario estas personas pueden dedicarse al cultivo, cosecha y a los restantes procesos postcosecha como son la extracción del grano y la fermentación.

Mediante la simulación y por medio de un software especializado en el cálculo de estructuras se representarán fenómenos reales. Permittiéndonos predecir el funcionamiento del sistema antes de implementarlo.

CAPITULO 2

EL CACAO

2.1 HISTORIA DEL CACAO EN EL ECUADOR

El Cacao es originario del Continente Americano, se tiene referencias de su existencia desde hace 2000 años, los Aztecas y los Mayas consumían una bebida preparada a base de cacao la misma que les proporcionaba gran energía, en el descubrimiento del nuevo Continente los indígenas ya cultivaban la planta. Se considera que su origen está en la cuenca del Alto Amazonas.

Mientras que en nuestro país se conoce sobre la existencia del cacao desde 1600 ya que había pequeñas siembras de cacao cerca de Guayaquil, a orillas del actual río Guayas y se incrementaron gradualmente a orillas de sus afluentes río arriba.

Existe una variedad especial y nativa de cacao que aún se cultiva en nuestro país es el cacao “Nacional” se cree proviene de los declives orientales de la cordillera de los Andes, en la hoya Amazónica del Ecuador¹, esto se comprueba al observar la similitud existente con el cacao de las plantaciones nativas de la selva.



Figura 2.1 Cacao Nacional

Los inicios del siglo XX fueron años de gran prosperidad para la producción de cacao en nuestro país, llegando a representar el 20% de las exportaciones mundiales de cacao en 1911.

¹ [1]

En la segunda década del siglo XX se produjo una disminución notable en la producción de cacao, la misma que se acrecentaría debido a la primera guerra mundial. Esto como era de esperarse trajo consigo la destrucción y quiebra de muchas haciendas dedicadas a la producción de cacao.

Posterior a esta época se ha visto una importante recuperación y crecimiento de nuestras exportaciones. En la actualidad, la mayor parte del cacao exportado por Ecuador corresponde a una mezcla de Nacional, trinitarios, y el recientemente introducido en nuestros cultivos CCN-51.

La calidad del cacao “Nacional” sigue permaneciendo ya que el Ecuador tiene las condiciones para su cultivo. Durante los últimos años se estima que la producción mundial de cacao fluctúa entre 2 278 000 y 2 916 000 Tm entre los años cacaoteros 89-90 y 98-99¹, nuestro país para al año 2000 tenía una producción de 105 000 Tm.

Tabla 2.1 Países productores de cacao fino y de aroma

Países	En toneladas métricas						
	Años cacaoteros						
	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98	1998/99	Partic.98/99
Colombia	13,000	13,000	13,000	13,000	13,000	13,000	17%
Costa Rica	750	750	750	750	750	750	1%
Dominica	0	100	100	200	200	200	0%
Ecuador	60,000	60,000	77,250	77,250	26,250	52,500	67%
Granada	800	800	900	1,000	1,100	1,100	1%
Jamaica	2,500	2,500	1,300	1,500	200	200	0%
Samoa	0	0	0	0	0	0	0%
Santa Lucía	0	0	0	0	0	0	0%
Trinidad	1,700	1,800	1,800	1,800	1,500	1,800	2%
Venezuela	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	11%
Total	87,750	87,950	104,100	104,500	52,000	78,550	100%

Fuente: ICCO-ITC

Elaboración: Proyecto SICA-BIRF/MAC-Ecuador (www.sica.gov.ec)

2.2 VARIEDADES DE CACAO

Al existir una gran variabilidad genética entre el color, forma y dimensiones del cacao era muy complejo realizar una clasificación, por lo que Cheesman (1994) lo separó en poblaciones, en donde cada una de estas tiene características por

¹ [23]

las que se les puede diferenciar entre si. Es importante señalar que el cacao comercial en su gran mayoría pertenece a la especie *Theobroma cacao*. De acuerdo a esta separación existen cacaos criollos y forasteros:

2.2.1 CACAOS CRIOLLOS

En los cacaos criollos se hallan los que mantienen características antiguas, provenientes de los antecesores criollos de Venezuela, y Centro América. Sus flores son de color rosado pálido, las mazorcas de color rojo tornándose amarillas al madurar, los cotiledones frescos son de color blanco o violeta pálido, para fermentar requieren de 3 días aproximadamente, por ser muy aromáticos se los denomina comercialmente como “cacao fino”, Hoy en día la producción de cacao criollo es tan reducida que tiene poca importancia en el comercio mundial.¹

2.2.2 CACAOS FORASTEROS

Entre los cacaos forasteros tenemos los forasteros amazónicos y los trinitarios. Los forasteros amazónicos están distribuidos en la cuenca del río Amazonas, son los cacaos de Brasil, Ecuador; en África Occidental existe este tipo de cacao también. Partes de las flores de este grupo son pigmentados de violeta, las mazorcas son amarillas al estar maduras, mientras que los cotiledones frescos son de color púrpura oscuro y para su fermentación requieren 5 días aproximadamente. En la actualidad representan la mayor parte de la producción mundial.

El cacao “Nacional” por mucho tiempo fue considerado como un forastero, pero debido a sus características de aroma y calidad se lo relaciona con los criollos.

Entre estas características tenemos los cotiledones ligeramente marrones, un aroma delicado, además de sabor floral, denominado comercialmente como sabor “Arriba”.

Los trinitarios son híbridos, producto del cruce entre forasteros y criollos. Son originarios de la isla de Trinidad, sus características genéticas y morfológicas

¹ [2]

son una combinación de las que poseen los forasteros y criollos. La producción de estos representa el 12% de la producción mundial aproximadamente.¹

Cabe recalcar que actualmente en nuestro país se han introducido nuevas variedades de cacao como el CCN-51, así como también las variedades de fino aroma (clones nacionales: EET-19, EET-96, EET-95, EET-62, EET-48 y el EET-103)².

2.3 ZONAS PRODUCTORAS EN EL ECUADOR

De acuerdo al Manual del cultivo de cacao, publicado por el Instituto Nacional Agrónomo de Investigaciones Pecuarias, los cultivos se encuentran distribuidos en la gran mayoría en la Costa ecuatoriana. Se identifican cuatro zonas distintas de producción: norte, centro, sur y oriental. Dentro de estas existen áreas de las estribaciones de la cordillera Occidental.



Figura 2.2 Principales zonas cacaoteras del Ecuador

¹ [1]
² [24]

2.3.1 ZONA NORTE

Comprende los cultivos existentes en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Pichincha y Cotopaxi, siendo estas dos últimas parte de las estribaciones occidentales de la cordillera.

2.3.2 ZONA CENTRAL

Abarca las provincias de Guayas, Los Ríos, un área significativa se localiza en la cordillera occidental de la provincia Bolívar. La zona central es de suma importancia en el aspecto económico, ya que su producción representa el 60% del total producido en el Ecuador¹.

2.3.3 ZONA SUR

Esta zona agrupa a la parte sur de la provincia del Guayas y a la provincia de El Oro, es considerada como una zona de alto potencial debido a sus condiciones climáticas, que aparentemente limitan el desarrollo de enfermedades del cacao.

2.3.4 ZONA ORIENTAL

Las áreas cacaoteras de la zona oriental se encuentran en las provincias de Sucumbíos, Napo, Pastaza, Morona Santiago, Zamora Chinchipe y Orellana. La producción de cacao en esta zona es baja a pesar de que el cacao es originario de ella.

2.4 SUPERFICIE SEMBRADA CON CACAO EN EL ECUADOR

En el litoral ecuatoriano se encuentra la mayor parte de los cultivos de cacao que existen en nuestro país, en la provincia de Los Ríos la extensión de terrenos cultivados representa un 35% del total sembrado, Guayas con el 25 %, Manabí el 14%, Esmeraldas el 8% y El Oro el 5%. El 13% restante se reparte entre las provincias de Pichincha, Cotopaxi, Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay y el Oriente, los cultivos de esta provincias pertenecen a los de la cordillera occidental andina². A continuación se muestra un cuadro referente a la

¹ [23]

² [23]

Superficie sembrada con cacao en el Ecuador. Los datos expresados en hectáreas de cacao sólo y superficie de cacao asociado. Año 2000.

Tabla 2.2 Distribución porcentual de la superficie de cacao por provincias

	Cultivo solo has.	Part. Prov. %	Cultivo asociado has.	Part. Prov. %
Total nacional	243,059	100%	190,919	100.00%
Sierra	19,067	7.84%	36,865	19.31%
Azuay	2,577	1.06%	708	0.37%
Bolívar	3,396	1.40%	14,588	7.64%
Cañar	4,017	1.65%	403	0.21%
Carchi	---	---	---	---
Cotopaxi	3,179	1.31%	8,953	4.69%
Chimborazo	---	---	884	0.46%
Imbabura	---	---	---	---
Loja	130	0.05%	152	0.08%
Fichincha	5,768	2.37%	11,177	5.85%
Tungurahua	---	---	---	---
Costa	205,414	84.51%	144,728	75.81%
El Oro	18,511	7.62%	2,627	1.38%
Esmeraldas	24,527	10.09%	30,460	15.95%
Guayas	51,227	21.08%	21,084	11.04%
Los Ríos	58,572	24.10%	42,134	22.07%
Manabí	52,577	21.63%	48,423	25.36%
Región Amazónica	9,374	3.86%	6,339	3.32%
Morona Santiago	876	0.36%	633	0.33%
Napo	2,930	1.21%	1,317	0.69%
Pastaza	459	0.19%	540	0.28%
Zamora Chinchipe	459	0.19%	747	0.39%
Sucumbios	2,304	0.95%	1,883	0.99%
Orellana	2,346	0.97%	1,219	0.64%
Región insular	---	---	---	---
Zonas no delimitadas	9,204	3.79%	2,987	1.56%

Fuente: Censo Nacional Agropecuario

Elaboración: Proyecto SICA-BIRF/MAC-Ecuador (www.sica.gov.ec)

2.5 FACTORES CLIMÁTICOS EN EL CULTIVO

De acuerdo a la zona en donde se asientan los cultivos cacaoteros se tiene diferencias climáticas las mismas que influyen directamente en el producto. Entre los principales factores climáticos que afectan a la producción de cacao

tenemos: Estaciones, Temperatura, Luminosidad, Precipitación, Humedad relativa, Viento, entre otros.

2.5.1 ESTACIONES

En el Ecuador existen dos periodos climáticos bien marcados, el invierno y el verano.

El invierno está caracterizado por las lluvias frecuentes, estas precipitaciones empiezan a fines de Diciembre y terminan entre Abril y Junio, una peculiaridad es que la época de lluvias es soleada y cálida. Mientras que el verano es un período seco que dura entre 5 y 7 meses, este período seco no produce condiciones adversas debido a que está, nublado, calmado y frío.

2.5.2 TEMPERATURA

La temperatura en las regiones donde se cultiva cacao varía entre un máximo de 30° a 32°C y un mínimo de 18° a 21°C, para el cultivo de cacao según los estudios realizados por Ernehlm (1948), se concluyó que la media mensual mínima es de 15°C y una mínima absoluta de 10°C¹.

En la zona central tenemos un época fría la misma que va de Julio a Noviembre y en la Zona Sur de Julio a Octubre.

Las áreas cercanas a las estribaciones de la cordillera andina, son mayormente afectadas por las bajas temperaturas en comparación con las otras zonas cacaoteras.

2.5.3 LUMINOSIDAD

La radiación solar influye directamente en el desarrollo de todos los seres vivos, en las plantas gracias a esta se produce la fotosíntesis.

Los factores que influyen en la radiación local son latitud, tiempo, nubosidad.

Se requiere un conocimiento claro en lo referente a Heliofanía u horas de brillo solar para lo cual en Ecuador el INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e

¹ [2]

Hidráulica, tiene varias estaciones en las cuales se registran una serie parámetros meteorológicos tales como la Heliofanía y la radiación Solar.

2.5.4 PRECIPITACIONES

Las lluvias son de mucha importancia para los cultivos de cacao, por lo que para el asentamiento de una finca cacaotera se debe conocer cuales son las condiciones referentes a precipitaciones del lugar, en los países cultivadores de cacao las precipitación anual es de 1200 a 2500 mm, con un mínimo de lluvia mensual promedio de 100 mm.

En la zona Central tenemos una media de precipitación anual que varía entre 1000 y 2500 mm repartidos en 6 meses, mientras que en la cuenca del río Guayas específicamente en la parte Noroccidental, la media anual de precipitaciones es de 2500 mm. En la zona Sur del litoral las precipitaciones llegan a tener una media de 1000mm correspondiendo a una formación climática seca tropical¹.

El régimen de precipitaciones está modificado por la altura, la cercanía al mar, y otras características locales, Wood (1982) dice que le 75% de la producción mundial de cacao, procede de una latitud de 8° del ecuador. En esta latitud existen 6 meses de lluvia y los otros meses restantes de estación seca.

2.5.5 HUMEDAD RELATIVA

El ambiente donde se desarrollen las plantas de cacao debe ser húmedo. Se conoce que una media provechosa de humedad relativa para el cultivo de cacao es de 75-80%.

La nubosidad alta existente en la zona central hace que la media se mantenga sobre el 80% durante los meses secos, permitiendo que el cultivo no sea amenazado críticamente durante este período.

Las altas temperaturas y humedad relativa, permiten que se desarrollen enfermedades que atacan al cacao, como escoba de bruja y monilla.

¹[1]

Estas enfermedades pueden ocasionar pérdidas superiores al 50% de la producción en diferentes zonas.

Tabla 2.3 Porcentaje de mazorcas enfermas

Zona (Provincia)	Humedad relativa	Mazorcas enfermas %	Rendimiento kg/ha
Viche (Esmeraldas)	85	51	467
Chone (Manabí)	86	37	381
Quevedo (Los Ríos)	85	41	335
Montalvo (Los Ríos)	—	56	222
Naranjito (Guayas)	82	33	356
Naranjal (Guayas)	82	53	843
Machala (El Oro)	80	31	1078

Fuente: Manual del cultivo del cacao - INIAP

2.5.6 VIENTO

Los fuertes vientos dañan a los árboles cultivados y el cacao no es una excepción. Los vientos de gran fuerza son raros en la mayoría de las áreas productoras de cacao, y solo es probable que ocurran en las Indias Occidentales y en algunas islas del Pacífico¹.

Según datos proporcionados por el INAMHI, las velocidades del viento en la Provincia del Guayas tienen una media de 3 m/s.

2.6 TRATAMIENTOS DEL FRUTO

2.6.1 COSECHA

En nuestro país la cosecha de cacao se realiza a lo largo de todo el año con meses pico en los que se recolecta hasta el 60% de la producción anual.

Cuando las mazorcas están maduras, cosa que podemos notar por los cambios de coloración en ellas, se procede a cortarlas del árbol, para luego abrirlas y

¹ [2]

extraer los granos de cacao, los mismos que tiene un alto porcentaje de humedad.

Existen algunas recomendaciones para la cosecha del cacao, según el Manual del Cultivo de Cacao del INIAP, se debe cosechar máximo cada 15 días durante la época de lluvias y cada 30 días en la época seca, teniendo en cuenta que la frecuencia con que se la realiza depende del agricultor. En los meses pico de producción la cosecha se la realiza semanalmente.

Los instrumentos apropiados para las labores de cosecha se los selecciona de acuerdo a la tarea a realizarse, así como también de acuerdo a la ubicación de la mazorca en la planta, a continuación se muestra algunos de estos implementos.

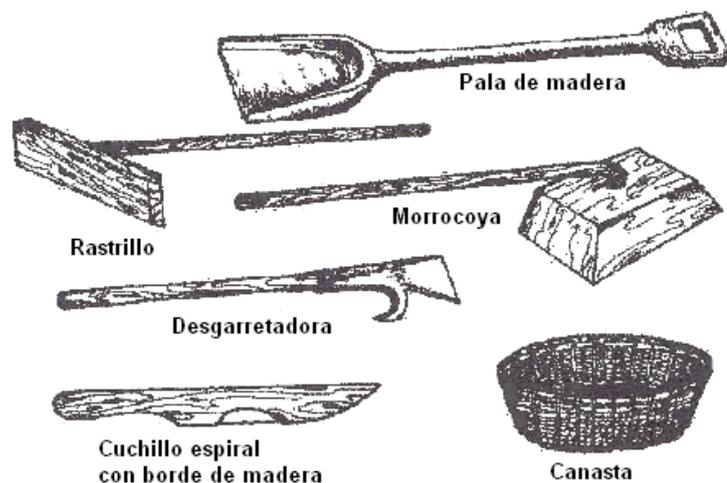


Figura 2.3 Implementos utilizados para la cosecha del cacao

2.6.2 EXTRACCIÓN DEL GRANO

Las mazorcas deben ser abiertas de tal manera que no se afecte a las almendras. Para extraerlas se debe utilizar los dedos o una cuchara hecha de madera o de hueso. Hay que eliminar el “magüey” (placenta), los fragmentos de cáscara y las almendras que no se encuentren en buen estado, ya sea esta deficiencia provocada por los insectos o por cualquier otra circunstancia.

2.6.3 FERMENTACIÓN

La fermentación consiste en conservar una cantidad de granos de cacao bien aislados, con el objeto de que conserven el calor, permitiendo el paso de una corriente de aire a través de las almendras. Esta operación es la combinación y balance de la temperatura, alcoholes, ph, y humedad, dura entre 3 y 7 días.

Los métodos de fermentación varían de acuerdo a cada país, en nuestro país se usan por ejemplo:

Los montones, consisten en ubicar los granos de cacao apilados sobre hojas de banano o plátano, estas hojas también se las utilizan para cubrir a los montones. Este tipo de fermentación es la más económica y la cantidad de cacao apilado depende de la cantidad cosechada.

Se suelen fabricar cajas, confeccionadas con madera de 2 cm de espesor, cuyo fondo es de la misma madera y con perforaciones cada 20 cm, con el objeto de facilitar el drenaje. A continuación se muestra algunas dimensiones de este tipo de cajas.

Tabla 2.4 Cajas de fermentación

LARGO (cm)	ANCHO (cm)	PROFUNDIDAD (cm)	CAPACIDAD CACAO FRESCO (kg)
50	40	40	60
80	40	40	100
100	50	60	220
150	50	60	300

Fuente: Manual del cultivo de cacao-INIAP

El recipiente para la fermentación más conocido es el fermentador trinitario, es una caja de madera con una división o separación en su parte central y con varias perforaciones en la base. Las dimensiones de estas cajas dependen del tamaño de la finca.

A continuación podemos ver las ventajas que se logran con el proceso de fermentación en comparación con almendras no fermentadas.

Tabla 2.5 Características de las almendras beneficiadas

Características	Almendras	
	Fermentada	Sin fermentar
Aroma	Agradable	Desagradable
Sabor	Medianamente amargo	Astringente
Forma	Hinchada	Aplanada
Color interno	Café oscuro	Café violáceo
textura	Quebradiza	Compacta
Separación de la testa	Fácil	Difícil

Fuente: Manual para el cultivo del cacao. Compañía Nacional de Chocolates

2.6.4 SECADO

Finalizado el proceso de fermentación los granos de cacao tienen un contenido de humedad del 60% aproximadamente. Para poder almacenar los granos de cacao deben tener 7% de humedad. Durante el proceso de secado no es lo único importante reducir la humedad que existe en las almendras fermentadas, sino garantizar que los cambios químicos que se venían dando continúen hasta detenerse por falta de humedad o la inactivación de las enzimas por otros medios.

Los métodos de secado pueden ser naturales o artificiales, dependiendo del método utilizado se encuentra la rapidez de secado. Según Wood (1982) si el proceso de secado se lo realiza demasiado rápido se pueden producir mohos en el exterior pudiendo penetrar en la cáscara, produciéndose también malos sabores, evitando esos inconvenientes si se seca la cáscara en un lapso de 24 horas.

Hay que tomar en cuenta que los granos secados utilizando métodos artificiales pueden resultar más ácidos que los secados naturalmente o al sol, para que el grado de acidez no afecte a la calidad del producto, se recomienda que el secado artificial se efectúe entre 24 y 48 horas, esto depende a su vez del grado de humedad que tengan las almendras de cacao antes de ingresar al secador artificial.

2.6.5 ALMACENAJE

Posterior al proceso de secado, los granos de cacao seco se guardan en sacos, debiendo estar fríos para ser ensacados. Durante este proceso se puede realizar un control de calidad en el que se toma muestras para determinar las características de las almendras así como también se pueden separar los granos quebrados o planos y eliminar los polvos que adquirieron los granos durante el secado.

Posteriormente al ensacado, se procede a pesar el producto. En varios países productores de cacao el peso neto del saco es de 63.5 kg, mientras que en los países donde se utiliza el Sistema Métrico, siendo este el caso del Ecuador se usa una aproximación de 67 kg.

La temperatura del ambiente y la humedad son de mucha importancia para el almacenamiento de los granos de cacao, ya que en los países localizados en los trópicos las altas temperaturas favorecen a la aparición de plagas y si la humedad también es alta aparecen hongos. Esto no sucede en los países templados ya que en estos se puede almacenar los granos por mucho más tiempo.

Una característica de los granos de cacao es que son higroscópicos, es decir que pueden absorber la humedad del medio ambiente, una forma para proteger al producto seco de la humedad del ambiente es utilizar forros de polietileno dentro del saco normal, ya que este polímero es impermeable e impide el paso de la humedad hacia los granos. El siguiente cuadro muestra el contenido de humedad de equilibrio con diversas humedades relativas.

Tabla 2.6 Humedad de equilibrio

Humedad relativa	Contenido de humedad
75	7.3
80	7.7
85	8.7
90	11.6
95	15.5

Fuente: G.A.R Wood, Cacao

La humedad del cacao seco es del 7%, los cacaos cuya humedad sea mayor al 8% se enmohecen, por lo que se recomienda que las bodegas de almacenaje tengan una humedad relativa de máximo 80%.

2.7 CARACTERÍSTICAS DE LAS ALMENDRAS BENEFICIADAS

- Los granos deben tener un semblante hinchado o grueso.
- La cáscara debe separarse con facilidad del grano.
- El color interno de los granos debe ser marrón claro.
- Posterior a un corte longitudinal, los granos deben presentar numerosas grietas y estrías.
- Las almendras deben quebrarse con facilidad al ser apretadas con la mano.
- Las almendras deben tener buen aroma.
- El sabor de las almendras debe ser levemente amargo.

Características organolépticas que describen una muestra de cacao¹

- Intensidad de sabor a cacao: Que integra el gusto y el aroma.
- Acidez: Olor picante y sabor avinagrado que se origina por un secado violento y retención de ácidos volátiles.
- Astringencia: Depende del tipo de cacao y su grado de fermentación.
- Amargor: Es el sabor que se aprecia al final del paladar y es provocado por un alto contenido de los alcaloides theobromina y cafeína.
- Crudeza: Es un defecto que se aprecia en los cacaos mal fermentados.
- Aroma: característica favorable que indica alta fragancia.
- Sabor a moho: Proviene de almendras que han sido afectadas por hongos o han pasado mucho tiempo almacenadas.

2.8 NORMAS TÉCNICAS ECUATORIANAS RELACIONADAS

Las normas mostradas en los Anexos A 2.8.1 y A 2.8.2 hay sido realizadas por los técnicos del INEN y son las que la Asociación de Exportadores de Cacao (ANECACAO) utilizan para el control del producto.

¹ [3]

CAPITULO 3

DETERMINACIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE SECADO

3.1 MÉTODOS DE SECADO

Existen distintos métodos de secado pudiendo ser natural, aprovechando la radiación solar y obteniéndose almendras con mayor aroma, o un secado artificial mediante el empleo de estufas o secadoras mecánicas haciendo pasar una corriente de aire seco y caliente por la masa del cacao.

En América Latina, una parte importante de la producción de granos se seca todavía en forma primitiva, es decir, se seca en el campo durante largos períodos. El uso de esta técnica acarrea elevadas pérdidas de producción, puesto que los granos quedan expuestos, durante lapsos prolongados, a condiciones adversas y a la acción de depredadores.

3.2 SECADO NATURAL

Desde los inicios de la civilización se han secado productos agrícolas. Originalmente no existía la preocupación por almacenar los productos y disminuir la humedad de los mismos, se realizaba en el campo propiamente dicho. El secado se realizaba de acuerdo a las condiciones ambientales del lugar, principalmente por la radiación solar incidente y el viento.

Durante el secado natural la acción de los vientos se encarga del movimiento del aire, y la evaporación de la humedad se deriva del potencial de secado del aire y de la influencia directa de la radiación solar. El secado natural, en tendales o en el campo, es un método ampliamente utilizado. El proceso comienza poco tiempo después de la fermentación.

En los países en desarrollo se explica el uso del secado natural, realizado hasta alcanzar el grado de humedad ideal para el almacenamiento, porque los agricultores, en su mayoría, desconocen las técnicas de secado más modernas. Además, las condiciones climáticas permiten el secado y exigen una inversión mínima.

La pérdida de calidad que puede ocurrir cuando se recurre al secado natural en el campo se debe al ataque de insectos, aves y roedores, la contaminación por microorganismos, el desgrane, las fisuras y la ocurrencia de condiciones meteorológicas adversas.

3.3 SECADO NATURAL EN TENDALES

El secado natural en tendales es un procedimiento en el cual el producto se esparce sobre un piso de concreto o de albañilería, con una ligera inclinación para facilitar el drenaje, o incluso sobre el asfalto de las carreteras, en una capa generalmente de 1 cm de espesor.

El intercambio de energía y de humedad, entre el aire y el producto, queda limitado casi exclusivamente a la superficie de la capa de producto, por lo que es necesario revolver el grano periódicamente.

El viento lleva la humedad perdida por el producto, a la capa de aire ubicada inmediatamente sobre él. Dos factores fundamentales para el secado de productos agrícolas son: la temperatura y la humedad relativa del aire ambiente, pues el aire posee una capacidad máxima para evaporar humedad.

La radiación solar genera energía térmica que provoca el calentamiento de los granos y el movimiento acelerado de la humedad, el flujo se da desde el interior hacia la superficie de los granos, facilitando el secado.

El uso tendales para el secado de granos de cacao está muy extendido en nuestro país y alrededor del mundo, por las facilidades que presentan para su construcción y funcionamiento, sin dejar a un lado su bajo costo inicial.



Figura 3.1 Cacao apilado en los tendales de Nestlé Ecuador

Este método de secado presenta algunas limitaciones entre estas tenemos: la baja capacidad de secado por unidad de superficie, la dependencia directa de las condiciones climáticas, mayor área de terreno necesaria y la mayor necesidad de mano de obra para la operación.

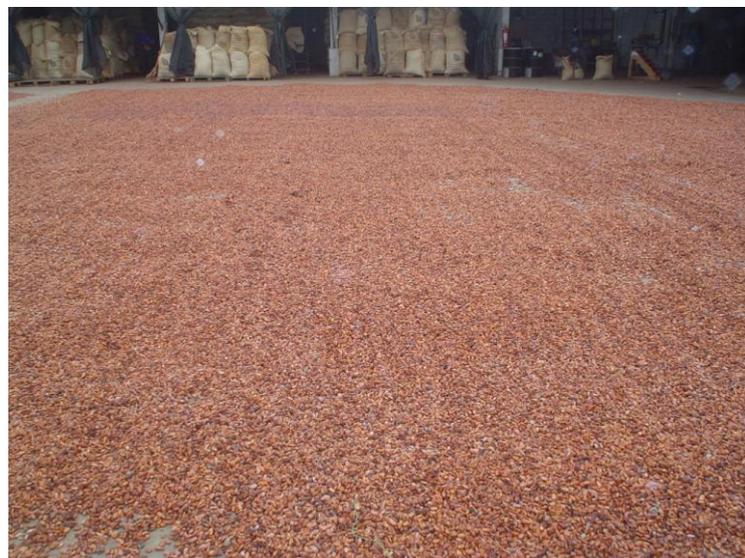


Figura 3.2 Cacao esparcido en los tendales de Nestlé Ecuador

Para secar 500 kg de cacao en un tendal se requiere aproximadamente 121 m^2 de terreno, bajo la suposición que la capa de capa cacao corresponde al espesor de cada grano, aproximadamente 1 cm.

3.3.1 TENDAL ECONÓMICO – INIAP

El Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) en su publicación “Manual del Cultivo de cacao”, muestra un tipo de secador natural. Este tendal se construye con madera o caña, generalmente estas construcciones económicas son de 15 m de largo, 1.8 m de ancho y 0.70 m de altura. El complemento es una cubierta de polietileno negro de 0.04 pulgadas de espesor, sostenida con un caballete de madera, para proteger las almendras de la lluvia¹.

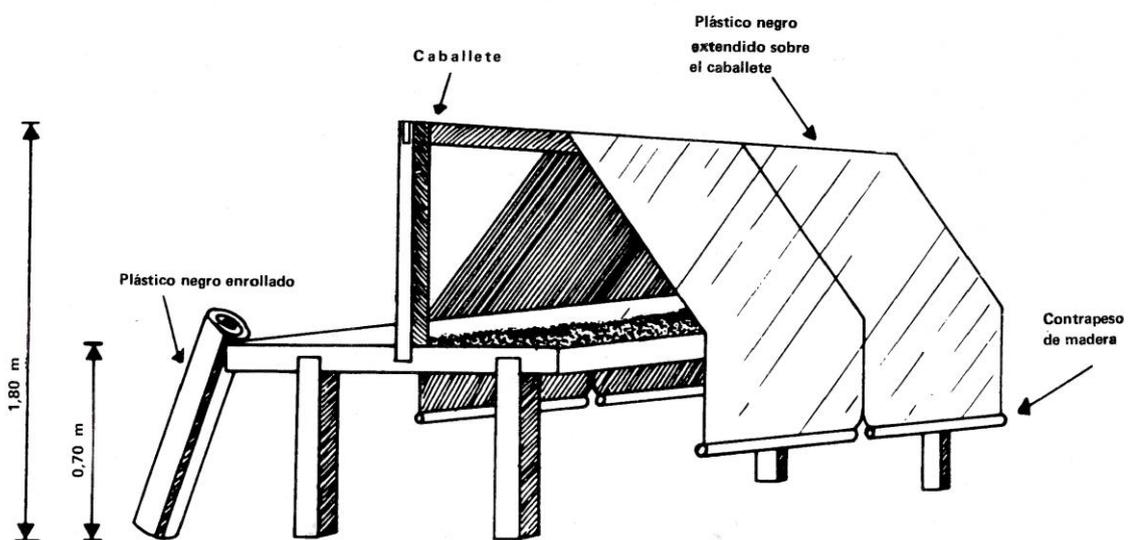


Figura 3.3 Tendal económico – INIAP

3.3.2 TENDAL RODANTE – ANECACAO

La Asociación Nacional de Exportadores de Cacao (ANECACAO), en su página web muestra un tendal rodante cuyo objetivo es el secado de los granos de cacao y cuenta con un mecanismo que le permite cubrir al producto en el momento de lluvia².

¹ [1]
² [23]

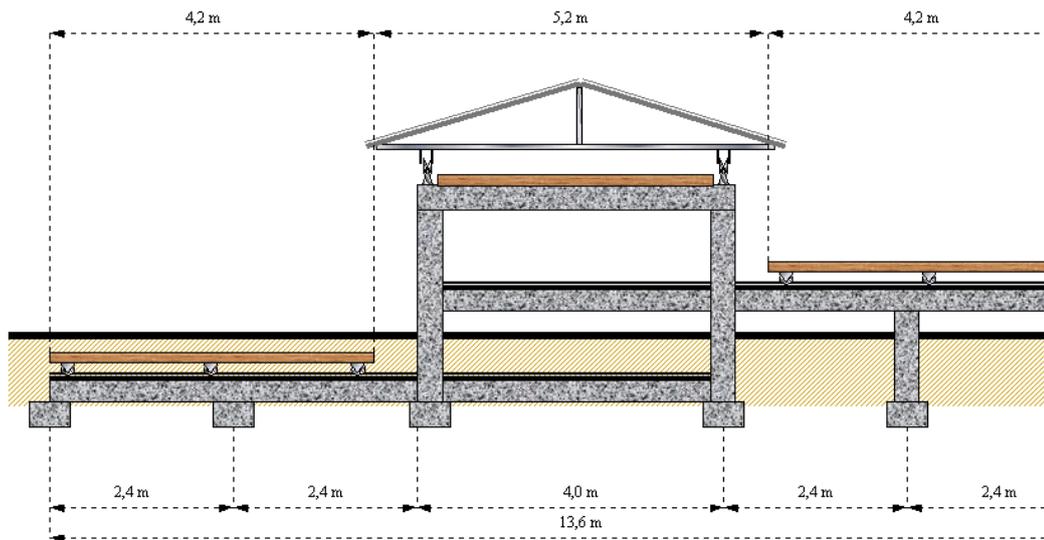


Figura 3.4 Vista frontal tendal rodante - ANECACAO

3.4 SECADO ARTIFICIAL

Los secadores artificiales son aquellos que utilizan madera, bagazo, GLP y otros derivados del petróleo como combustible. La transferencia de calor se realiza por medio de conducción y convección principalmente. En los secadores artificiales se realiza la convección en forma natural y forzada. Generalmente el proceso de secado se realiza en un recinto cerrado.

En la siguiente imagen se puede observar el combustible en este caso GLP utilizado durante el proceso de secado aquí en el Ecuador.



Figura 3.5 Combustible usado por el secador artificial de Nestlé Ecuador

3.4.1 HORNO A GAS

El Ing Omar Figueroa, jefe del Departamento Agrícola Compras de Cacao Nestlé Ecuador S.A, encargado del proceso de secado de los granos de cacao antes de ser exportados, dice “Cuando los granos de cacao están fermentados, tienen una humedad del 60% aproximadamente. El Secado de los granos de cacao se lo realiza en dos lugares, estos granos son depositados en los tendales para un secado natural, hasta que alcancen un valor de humedad del 15%, posteriormente se introduce el cacao (Humedad 15%), en los hornos que funcionan con GLP. Nestlé del Ecuador en sus instalaciones ubicadas en Pascuales (Guayas) posee dos hornos a GLP, la capacidad de estos hornos es de 100 y 150 sacos de cacao cada uno, es decir entre 1000 y 1500 lb; el cacao es ubicado en capas de hasta 25 cm (Humedad 15%), para reducir la humedad del cacao a un 7% los hornos funcionan a una temperatura de 100°C; para eliminar 8% de humedad en un quintal de cacao por medio de este método se requiere una inversión de \$ 1.0”, en este rubro se encuentran los costos del combustible y la mano de obra.



Figura 3.6 Horno a Gas 1- Nestlé Ecuador



Figura 3.7 Horno a Gas 2 – Nestlé Ecuador

3.5 MATRIZ DE DECISIÓN

Tomar una decisión muchas veces implica el análisis de diferentes alternativas, mediante la Matriz de decisión y siguiendo criterios de diseño se puede llegar a tomar una decisión acertada.

La matriz de decisión muestra en su lado izquierdo los criterios de diseño o parámetros que se van a evaluar, por ejemplo confiabilidad, seguridad, mantenibilidad, tipo de energía, costo de producción, en la parte superior se ubican las posibles alternativas, para nuestro caso se ubicarán los diferentes tipos de secadores (tendales y horno), y además se los comparará con el diseño propuesto, cada criterio de diseño tiene un factor de peso (WF) por sus siglas en ingles, pudiendo ser un valor entre 0-100%, sin olvidar que la sumatoria de todos estos debe ser igual al 100%. Además existe el factor de tipo (RF) por sus siglas en ingles, es un número entre 1-5, el mismo que indica la característica de la alternativa respecto del criterio de diseño, para dar un valor debemos especificar la escala de medición o la importancia, esta medición muchas veces refleja características cualitativas como bueno, malo, excelente.

Posterior a la ubicación de estos componentes dentro de la matriz, multiplicamos el RF de cada alternativa por el factor de peso, luego sumamos

estos valores obtenidos para cada alternativa. La mayor sumatoria nos indica que esa es la mejor alternativa¹.

A continuación se describen los criterios de diseño que serán tomados en cuenta dentro de la matriz de decisión.

3.5.1 CONFIABILIDAD

Se puede definir como la capacidad de un producto de realizar su función de la manera prevista. De otra forma, la confiabilidad se puede definir también como la probabilidad en que un producto realizará su función prevista sin incidentes por un período de tiempo especificado y bajo condiciones indicadas.

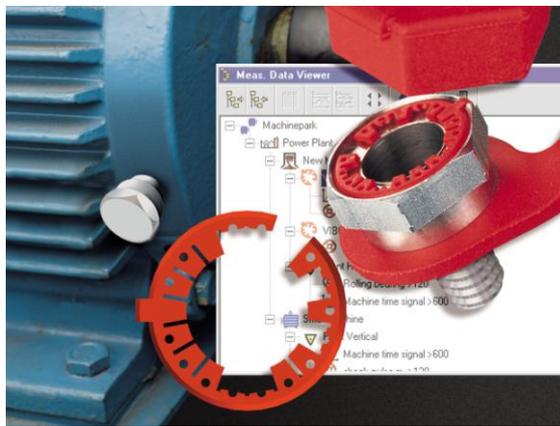


Figura 3.8 Confiabilidad del secador Ilustración

Se refiere a la operación entre parámetros, entendimiento de procesos y procedimientos, confiabilidad interna, equipos de trabajo.

Tabla 3.1 Confiabilidad del secador

CONFIABILIDAD				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
1	2	3	4	5

Fuente: J. P. Maureira

¹ [4]

3.5.2 ENERGÍA UTILIZADA

La energía se presenta en muchas formas, aunque por regla general las energías que más consumimos son de dos tipos, la química y la eléctrica.

El Sol calienta grandes masas de aire produciendo vientos que generan energía eólica. Evapora el agua de los mares para formar nubes que, al condensarse en las montañas generan ríos que son embalsados para producir energía hidroeléctrica. Hace que las plantas conviertan materia mineral extraída del suelo por las raíces en materia viva, capaz de formar leña, carbón y petróleos. Genera directamente energía térmica.

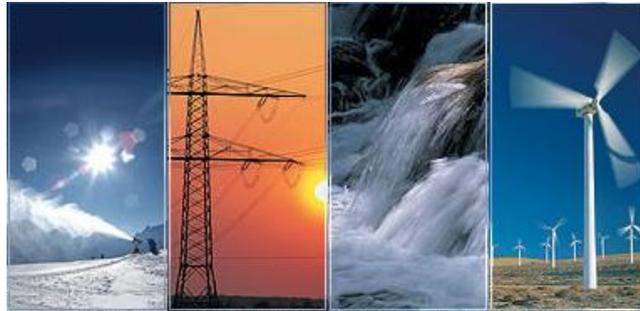


Figura 3.9 Energía Utilizada

Realizamos un análisis de las características que tiene la energía utilizada por los diferentes métodos de secado.

Tabla 3.2 Energía Utilizada

ENERGÍA UTILIZADA				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
Contaminante	Menos contaminante	Poco contaminante	Limpia	Limpia
Costosa	Menos costosa	Costo razonable	Bajo costo	Barata
1	2	3	4	5

Fuente: J.P.Maureira

3.5.3 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento es la ejecución de la función para la cual ha sido diseñado y construido el secador.



Figura 3.10 Funcionamiento

Lo relacionamos con la eficiencia del proceso, se encuentra directamente ligado al diseño del sistema de secado.

Tabla 3.3 Funcionamiento

FUNCIONAMIENTO				
Malo	Regular	Bueno	Muy Bueno	Excelente
Deficiente	Poca eficiencia	Eficiente	Más eficiencia	Gran eficiencia
1	2	3	4	5

Fuente: J.P.Maureira

3.5.4 SEGURIDAD

Se aplica a ciertos mecanismos que previenen algún riesgo o aseguran el buen funcionamiento de un sistema, precaviendo que falle



Figura 3.11 Seguridad

En este caso se analiza cuan seguro es el sistema, además de identificar el grado de seguridad que muestra durante su operación.

Tabla 3.4 Seguridad

SEGURIDAD				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
No es seguro	Muestra deficiencias	Existen normas	Riesgos Mínimos	Seguro
1	2	3	4	5

Fuente: J.P.Maureira

3.5.5 DISPONIBILIDAD

Para el secador representa el poder o no disponer libremente de el o que está listo para usarse o utilizarse en determinado momento.



Figura 3.12 Disponibilidad

Mediante el análisis de este parámetro, se puede determinar cual de los sistemas que forman parte de la matriz, es aquel que está disponible para su utilización durante la mayor cantidad de tiempo.

Tabla 3.5 Disponibilidad

DISPONIBILIDAD				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
Nunca	Pocas veces	Regularmente	Casi siempre	Siempre
1	2	3	4	5

Fuente: J.P.Maureira

3.5.6 MANTENIBILIDAD

El mantenimiento está relacionado muy estrechamente en la prevención de accidentes y lesiones en el trabajador ya que tiene la responsabilidad de mantener en buenas condiciones, la maquinaria y herramienta, equipo de trabajo, lo cual permite un mejor desenvolvimiento y seguridad evitando en parte riesgos en el área laboral.



Figura 3.13 Mantenibilidad

Este parámetro nos indica si el sistema cuenta con un plan en el que se encuentran los procedimientos que se deben seguir para garantizar el funcionamiento de nuestro sistema, además indica en que condiciones se realiza las operaciones de mantenimiento.

Tabla 3.6 Mantenibilidad

MANTENIBILIDAD				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
No mantenimiento	Mantenimiento ocasional	Plan mantenimiento	Planes de mantenimiento	Planes de mantenimiento
Rudimentario	Artisanal	Técnicamente	Sistema de control	Sistema de control-Predicción de fallas
1	2	3	4	5

Fuente: J.P.Maureira

Se sugiere dirigirse al anexo A 3.5.6 para ver MANTENIBILIDAD.

3.5.7 DURABILIDAD

Esta cualidad nos muestra el tiempo de vida que poseen los elementos que constituyen al secador y el sistema en conjunto.

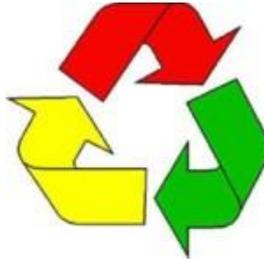


Figura 3.14 Durabilidad

Este criterio de diseño se refiere a la capacidad que tienen los materiales que constituyen al sistema para mantenerse en buenas condiciones a lo largo del tiempo.

Tabla 3.7 Durabilidad

DURABILIDAD				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
1	2	3	4	5

Fuente: J.P.Maureira

3.5.8 COSTOS DE PRODUCCIÓN

Costo en general es la suma de los gastos invertidos por la empresa. Para obtener los recursos utilizados en la producción y distribución del producto o servicio.



Figura 3.15 Costos de producción

Se relaciona con los valores económicos que representa para el productor el proceso de secado.

Tabla 3.8 Costos de producción

COSTOS DE PRODUCCIÓN				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
Costo muy alto	Costoso	Costo razonable	Bajo costo	Muy bajo
1	2	3	4	5

Fuente: J.P.Maureira

A continuación y por medio de una Matriz de decisión se determinara cual es la mejor de las alternativas existentes.

3.5.9 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA - MATRIZ DE DECISIÓN.

		ALTERNATIVAS											
		Tendal económico-INIAP			Tendal rodante-ANECACAO			Horno a Gas			Diseño propuesto		
Aspectos evaluados	WF%	Característica	RF	Puntuación	Característica	RF	Puntuación	Característica	RF	Puntuación	Característica	RF	Puntuación
Confiabilidad	20	Regular	2	40	Buena	3	60	Muy buena	4	80	Buena	3	60
Energía utilizada	18	Limpia, Barata	5	90	Limpia, Barata	5	90	Regular	2	36	Limpia, Barata	5	90
Fucionamiento	15	Poca eficiencia	2	30	Poca eficiencia	2	30	Más eficiencia	4	60	Eficiente	3	45
Seguridad	12	Riegos mínimos	4	48	Riegos mínimos	4	48	Existen normas	3	36	Riesgos mínimos	4	48
Disponibilidad	11	Regularmente	3	33	Regularmente	3	33	Casi siempre	4	44	Regularmente	3	33
Mantenibilidad	10	Artisanal	2	20	Artisanal	2	20	Muy buena	4	40	Muy buena	4	40
Durabilidad	8	Buena	3	24	Buena	3	24	Muy Buena	4	32	Buena	3	24
Costos de producción	6	Muy bajo	5	30	Muy bajo	5	30	Costoso	2	12	Muy bajo	5	30
Puntuación Total	100			315			335			340			370

ALTERNATIVA	Puntuación	Mejor
Diseño propuesto	370	↑
Horno a Gas - Nestle Ecuador s.a	340	
Tendal rodante - ANECACAO	335	
Tendal económico - INIAP	315	

Como se puede observar en la Puntuación la mejor alternativa es el diseño propuesto, la próxima alternativa es el horno a gas, a esta le sigue el Tendal rodante propuesto por ANECACAO y por último tenemos al Tendal económico propuesto por el INIAP.

CAPITULO 4

RADIACIÓN SOLAR LOCAL

Debido a que el 25% de la producción de cacao en el Ecuador pertenece a la provincia de Guayas, la investigación a continuación mostrada nos indica algunas características meteorológicas de esta Provincia que nos serán de mucha ayuda para el desarrollo del proyecto.

La Provincia de Guayas se encuentra en la parte suroeste del país, su población es superior a la existente en las otras provincias de la región de la Costa del Ecuador. Se encuentra limitada al norte con las provincias de Manabí y Pichincha, Al sur con la Provincia de El Oro, por el este se encuentra limitada por las Provincias de Los Ríos, Bolívar, Cañar y Azuay, al oeste y sur con el Océano Pacífico.

Su capital es la ciudad de Guayaquil, esta ciudad es a la vez el puerto fluvial marítimo más importante del país, Se ubica al oeste de Ecuador en la desembocadura del río Guayas.

Tabla 4.1 Situación geográfica de Guayaquil

Latitud Sur	2° 13' - 2° 24'
Longitud Oeste	79° 5' - 80° 12'
Superficie	20503 km ²
Altura	0 m s.n.m.

Fuente: Ministerio de Turismo del Ecuador.

Respecto a la variabilidad estacional, existen dos períodos fácilmente identificables. La época lluviosa que se extiende desde los días finales del mes de diciembre hasta el mes de mayo, con un máximo de lluvias que generalmente son registradas durante el mes de Marzo (aproximadamente 400 mm).

El período seco, va desde el mes de junio hasta finales de diciembre, siendo el mes de agosto el más seco con valores promedios multianuales de precipitaciones de aproximadamente 1 mm.

Durante la época lluviosa la temperatura se eleva, llegando a valores entre los 27 y 28°C, en la época seca las temperaturas son inferiores, oscilan entre los 24 y 26°C. Las temperaturas máximas absolutas superan los 37°C, mientras que las temperaturas mínimas absolutas llegan a 16°C.

Los vientos son muy variables durante la estación de lluvias, con direcciones predominantes tanto del noreste como del sudoeste, con velocidad media del viento de 3 m/s.

El INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, tiene a lo largo del país alrededor de 60 estaciones. Encargadas de recolectar datos referentes a las características meteorológicas del lugar en donde se encuentren ubicadas, estos datos son analizados posteriormente. Toda esta información está presente en los anuarios meteorológicos que el INAMHI posee.

En la provincia del Guayas existen por lo menos tres estaciones meteorológicas entre las que se encuentran Radio Sonda-Guayaquil (MA2V Código de la estación), Milagro (Ingenio Valdez, M037), Aeropuerto-Guayaquil (M056), que nos permiten conocer las características meteorológicas que esta presenta.

A continuación identificaremos los parámetros climáticos que nos serán de utilidad.

Heliofanía.- Medida de la radiación solar, desde el punto de vista de la duración en tiempo de la radiación solar, con la intensidad suficiente para producir formas definidas, se mide en horas de brillo solar¹.

Radiación Solar.- La Radiación Solar es sumamente importante para el desarrollo de la vida en nuestro planeta, los distintos flujos de la radiación son analizados en términos de balance de calor de la Tierra en su totalidad y en cualquier lugar en particular. El valor de la radiación se lo puede obtener a partir de datos referentes a la Heliofanía, mediante la regresión lineal de Armstrong – Modificada por Page.

¹ [5]

La distribución espectral de la intensidad de radiación extraterrestre solar cubre una banda de frecuencias que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo pasando por la luz visible. Con los siguientes valores: 100 - 400 nm Radiación Ultravioleta, 400 - 730 nm Radiación Visible, 730 nm - en adelante Radiación Infrarroja, se muestran a continuación.

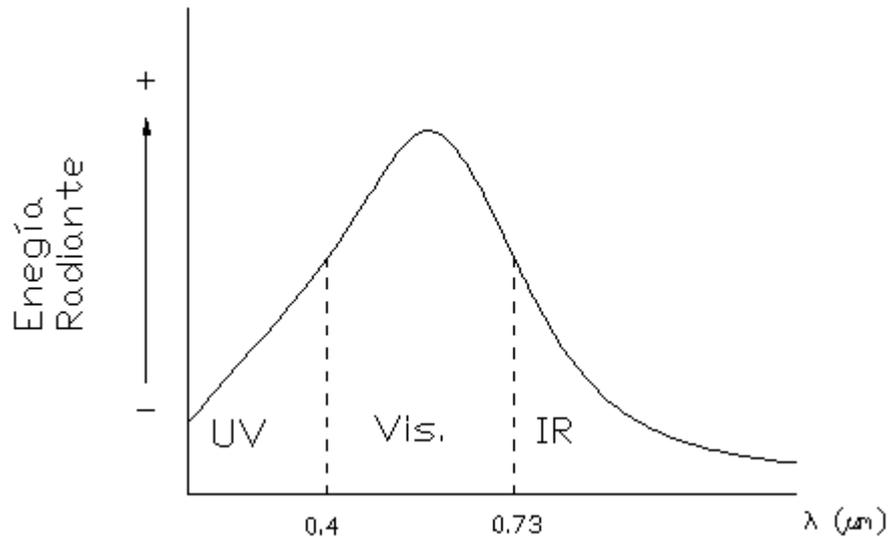


Figura 4.1: Curva Ideal del Nivel de radiación solar

Temperatura del aire a la sombra.- Promedio de lecturas de temperatura tomadas durante un período de tiempo determinado. Es el promedio entre las diferentes tomas realizadas durante un periodo de tiempo en el que los termómetros están colocados en un recinto que los cubre de la radiación solar.

Humedad Relativa.- Relación expresada en forma porcentual, entre la cantidad de vapor de agua que hay en un volumen determinado de aire y la cantidad que habría si el aire estuviese saturado a la misma temperatura.

Precipitación.- Es el producto líquido o sólido originado de la condensación del vapor de agua, cayendo de las nubes en forma lluvia, granizo, nieve, rocío, escarcha, niebla. La cantidad total de precipitación se expresa como el espesor de una capa líquida que cubriría una superficie horizontal.

Evaporación.- La evaporación es fenómeno físico en que el agua por acción de ganancia de calor, pasa de una fase líquida a gaseosa. Puede expresarse

como la masa o volumen de agua líquida evaporada a partir de una unidad de superficie durante una unidad de tiempo, habitualmente se representa como la altura equivalente de agua líquida por unidad de tiempo en toda la superficie considerada. La unidad de tiempo normalmente es un día y la altura puede expresarse en milímetros o centímetros.

Nubosidad.- La nubosidad es la extensión del cielo cubierta por nubes y se expresa en octavos de cielo cubierto u octas.

Velocidad del viento.- La velocidad del viento es una cantidad vectorial que tiene dirección y magnitud, esta es considerada en términos de tres componentes, ubicándose dos de ellas en un plano paralelo a la superficie de la Tierra, y la tercera perpendicular a ese plano. Con fines meteorológicos la componente vertical es despreciada, considerándose por lo tanto el viento en superficie como una cantidad vectorial en dos dimensiones.

Tensión de vapor.- Es la presión parcial que en un volumen de aire dado corresponde al agua contenida en él. Depende de la humedad relativa del aire y de la tensión máxima a la temperatura del aire:

4.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

4.1.1 HELIÓGRAFO

Es un instrumento que se utiliza para medir la duración diaria del brillo solar. Consta de una esfera maciza de cristal de roca (Esfera de Campbell - Stokes), de 10 cm de diámetro, la que actúa como lupa concentra los rayos solares sobre una faja de cartulina, graduada en tramos de media hora, ubicada en la superficie focal de la esfera en concordancia con la trayectoria del sol en los equinoccios y cada uno de los solsticios.

Se usan tres tipos de faja diariamente, las mismas que se colocan en tres posiciones diferentes. Una en verano (A), otra en invierno (B), y otra para las estaciones intermedias (C). Mediante un sistema de nivelación, formado de tornillos y platinos se nivela para ser ajustado al plano meridiano y ubicarlo según el ángulo de latitud. Durante el día y sin nubes entre el sol y el aparato,

la concentración de los rayos solares va dejando una marca quemada sobre la faja. Este se interrumpe al interponerse las nubes.



Figura 4.2 Heliógrafo - INAMHI

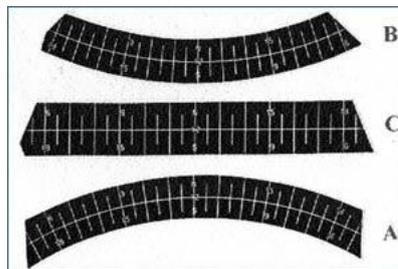


Figura 4.3 Cartulina graduada

La radiación solar se la puede medir en forma directa e indirecta. Los principales instrumentos utilizados para medir la radiación solar en forma directa son:

4.1.2 PIRHELIÓMETRO ÁNGSTROM

Este instrumento se utiliza para la medición de la radiación solar directa expresada en unidades de W/m^2 , siendo necesario que esté constantemente orientado hacia el sol. Para su funcionamiento debe estar conectado a la unidad de control auxiliar para poder determinar mediante cálculo la potencia que es recibida desde el sol.



Figura 4.4 Pirheliómetro - INAMHI

4.1.3 PIRANÓMETRO

Instrumento que mide la radiación solar (radiación global) recibida desde todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal terrestre.

El principio de funcionamiento de este instrumento es a través de termocuplas, las cuales al calentarse producto de la radiación del sol, emiten una pequeña f.e.m. (tensión o milivoltaje) pudiendo ser medidas por algún otro instrumento.

Para obtener la potencia en W/m^2 , se multiplica la tensión entregada por el piranómetro por una constante del instrumento.

El piranómetro mostrado a continuación se encuentra esta constituido por un piranómetro de radiación solar global (superior) y un piranómetro de radiación solar reflejada (inferior).



Figura 4.5 Piranómetro - INAMHI

Pudiendo también medirse la radiación solar en forma indirecta mediante la utilización de termómetros: de bulbo seco, bulbo húmedo. La temperatura es una magnitud física, que se la mide con termómetros, medida en grados ($^{\circ}$), existen cuatro escalas de temperatura, las usadas en meteorología son: Celsius, Fahrenheit y Kelvin o Absoluta. Entre los diferentes termómetros tenemos:



Figura 4.6 Termómetros - INAMHI

4.1.4 TERMÓMETRO DE BULBO SECO

Termómetro usado para medir la temperatura ambiental. La temperatura registrada es considerada idéntica a la temperatura del aire. Es uno de los dos termómetros que conforman el psicrómetro.

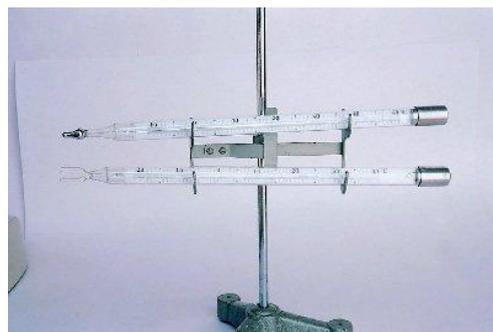


Figura 4.7 Termómetros de máxima y de mínima -INAMHI

Para determinar la humedad del aire, se utilizan diferentes métodos, los mismos que pueden clasificarse en cuatro grupos.

- Método Termodinámico (psicrómetros)

- Método basado en la variación de dimensiones en sustancias higroscópicas.
- Método del cambio de resistencia eléctrica debido a la absorción
- Método de condensación

4.1.5 PSICRÓMETROS

Miden el contenido de humedad del aire, constan de dos termómetros idénticos de mercurio. Uno es recubierto con gasa en la parte del bulbo, humedecida con agua destilada, este es el termómetro húmedo. Mientras que el otro mide la temperatura del aire, se llama termómetro seco.

El bulbo húmedo mide una temperatura igual o menor al bulbo seco, debido a que el agua que se evapora de la gasa, absorbe calor. La diferencia entre ambas medidas está relacionada, para cada temperatura y presión atmosférica, con el contenido de vapor de agua de la atmósfera.

Cuando la humedad relativa es de 100%, la lectura de ambos termómetros es igual. A diferencia cuando hay poca humedad en el aire, la gasa evapora más rápido y se nota más diferencia entre los dos termómetros.

4.1.6 PLUVIÓMETRO

Mide la cantidad de precipitación en forma directa. Uno de los diseños consta de un recipiente cilíndrico de mayor diámetro, ubicado sobre el nivel del suelo (1 m). La parte superior, tiene una boca de diámetro pequeño formada por un aro de bronce. A cierta distancia se encuentra un embudo soldado a las paredes interiores. La parte inferior, es un depósito cilíndrico que calza en la parte receptora. En su interior se coloca un recipiente más angosto, llamado colector que recibe y almacena el agua con una capacidad para 220mm (los más comunes). Entre el colector y el recipiente receptor queda una capa de aire que hace las veces de un aislante térmico. Para determinar la cantidad de lluvia se utiliza una probeta de plástico, graduada teniendo en cuenta la relación que existe entre el diámetro de la boca del pluviómetro y el diámetro de la probeta. En ella se vuelca el agua del receptor una vez al día.

La medición indica la lluvia recibida en la boca del pluviómetro. La medida de precipitación se expresa en milímetros que corresponden a la altura que tendría la capa de agua equivalente a la precipitación ocurrida. Cada milímetro significa un litro por metro cuadrado.



Figura 4.8 Pluviómetro - INAMHI

La evaporación se mide con los evaporímetros, entre los cuales podemos citar a los siguientes: Evaporímetro Piche, Evaporímetros de cubeta, tanques de Evaporación.

4.1.7 EVAPORÍMETRO PICHE

Aparato para medir la cantidad de agua que se evapora en la atmósfera durante un intervalo de tiempo dado a partir de un papel de filtro poroso en el extremo inferior, permanentemente humedecido de agua destilada. Las unidades son el mililitro (ml) o el milímetro (mm) de agua evaporada.

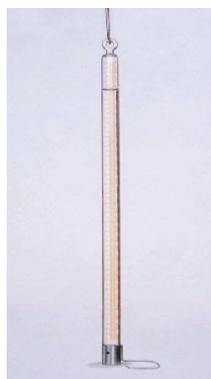


Figura 4.9 Evaporímetro piche – INAMHI

4.1.8 EVAPORÍMETROS DE CUBETA Y TANQUES DE EVAPORACIÓN

La evaporación se mide observando el cambio de nivel de la superficie libre del agua en una cubeta o tanque. Estos instrumentos constituyen el evaporímetro más utilizado.



Figura 4.10 Tanque de evaporación – INAMHI

En la práctica la nubosidad se aprecia sin ningún instrumento, simplemente se agrupan todas las nubes que se observan en un determinado momento y se divide imaginariamente el cielo en dos partes: la cubierta y la libre de nubes. Para la apreciación de la nubosidad hay que tener en cuenta que las nubes más alejadas del observador se ven juntas. Al observar la cantidad total de nubes se deben incluir todas, se han de contar también los velos transparentes.

4.1.9 VELETA

Las veletas son instrumentos que sirven para determinar la dirección del viento. Por normas de la OMM, Organización Meteorológica Mundial se la instala a diez metros sobre la superficie del suelo.

4.1.10 ANEMÓGRAFO

El Anemógrafo registra la velocidad y la dirección del viento. La parte sensible consta de una veleta que indica la dirección de donde proviene el viento y de un sistema de 3 cazoletas semiesféricas fijas a un eje que gira fácilmente. La velocidad de giro es proporcional a la velocidad del viento. A través de un sistema de cables llega información al aparato registrador. Este consta de unas

plumas que registran la velocidad y las diferentes direcciones en una banda que mueve un aparato de relojería, es decir un sistema de engranajes. Este instrumento se coloca a 10 m de altura, en una torre alejada de los obstáculos cercanas a unas diez veces la altura de los mismos.



Figura 4.11 Anemógrafo - INAMHI



Figura 4.12 Anemógrafo y veleta - INAMHI

4.2 HELIOFANÍA EN LA PROVINCIA DE GUAYAS

En la provincia de Guayas se encuentran las estaciones Radio Sonda-Guayaquil, Milagro (Ingenio Valdez), que pertenecen al INAMHI, y son las encargadas de medir la Heliofanía existente en la Provincia.

En la sección de anexos A 4.2.1 se pueden apreciar los datos facilitados por el INAMHI.

A continuación se muestran los valores promedio de Heliofanía para un periodo que va desde 1980 - 2005, estos datos fueron registrados por la estación GUAYAQUIL – RADIO SONDA.

El valor promedio de Heliofanía efectiva mensual (Horas), lo representaremos con la letra H, seguida del subíndice que indique de cual estación se tomo los datos.

$$H_{RS} = 107.7 \text{ Horas}$$

En la siguiente tabla se muestra valor promedio de la Heliofanía efectiva mensual, así como también los valores máximos, mínimos y la diferencia existente entre estos.

Tabla 4.2 Heliofanía efectiva mensual. E. GUAYAQUIL-RADIO SONDA

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
media	88.6	74.4	104.7	130.8	113.2	103.7	104.5	125.6	121.0	109.7	110.5	106.0	1293	107.7
mínima	69.6	46.6	80.1	96	88.8	71.1	85	80.1	83	70.2	78.9	52.5		46.6
máxima	105	102.5	150.8	195.4	140	130.8	136.1	160.9	191.9	141.5	151.3	143.3		195.4
amplit	35.4	55.9	70.7	99.4	51.2	59.7	51.1	80.8	108.9	71.3	72.4	90.8		148.8

Fuente: INAMHI

La estación MILAGRO (Ingenio Valdez), para un período comprendido desde 1950 hasta 2004 registró los siguientes resultados (ver anexo A 4.2.2).

$$H_M = 84.3 \text{ Horas}$$

Tabla 4.3 Heliofanía efectiva mensual. E. MILAGRO (Ingenio Valdez)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
media	85.8	85.8	114.7	126.9	103.1	66.6	64.8	76.0	73.1	60.1	69.9	85.5	1012.3	84.4
mínima	54.3	45.3	73.2	86.4	65.8	33.3	34.5	37.2	30.2	28.4	43.5	47.7		28.4
máxima	146.3	120.5	162.7	186.7	156.8	156	136	111	119.1	88.3	119.6	134		186.7
amplit	92	75.2	89.5	100.3	91	122.7	102	73.8	88.9	59.9	76.1	86.3		158.3

Fuente: INAMHI

4.3 RADIACIÓN SOLAR EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS

La dirección de la radiación solar directa sobre una superficie de orientación arbitraria se puede describir en términos de algunos ángulos, estos ángulos y las relaciones entre ellos se muestran a continuación, se mantendrá la notación introducida por Duffie y Beckman¹.

Φ Latitud, esta es, la posición angular hacia el norte o sur del Ecuador. Según la convención es positiva hacia el norte. $-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$

δ Declinación, es la posición angular del sol al mediodía con respecto al plano ecuatorial. Es positivo en el hemisferio Norte. $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$. La declinación puede ser encontrada mediante la ecuación de Cooper(1969):

$$\delta = \pm 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (4.1)$$

Donde n es el día del año que nos interesa, este puede obtenerse por medio de la tabla 4.4

β Inclinación de la superficie, es el ángulo entre la posición en cuestión y la horizontal. $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

y Angulo acimutal, este es la desviación de la proyección de la normal de la superficie del meridiano local. Siendo 0 para el Sur, negativo para superficies orientadas al este y positivo para las superficies orientadas al oeste. $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

¹ [6]

ω Es el ángulo horario, consiste en el desplazamiento angular del sol hacia el este o al oeste del meridiano local, debido al movimiento de rotación de la tierra alrededor de su eje de 15° por hora, considerado en la mañana negativo y en la tarde positivo.

Θ Angulo de incidencia, es el ángulo comprendido entre la radiación directa sobre la superficie y la normal a la superficie.

Existen otros ángulos adicionales que también se encuentran definidos. El ángulo de acimut solar γ_s , es la desviación de la proyección de la radiación directa del meridiano local. Tenemos el ángulo de altitud del sol (α), siendo aquel formado entre la dirección del sol y la horizontal, ($90-\theta_z$), en donde θ_z es el ángulo de incidencia de la radiación directa y la normal de la superficie conocido también como ángulo de zenith.

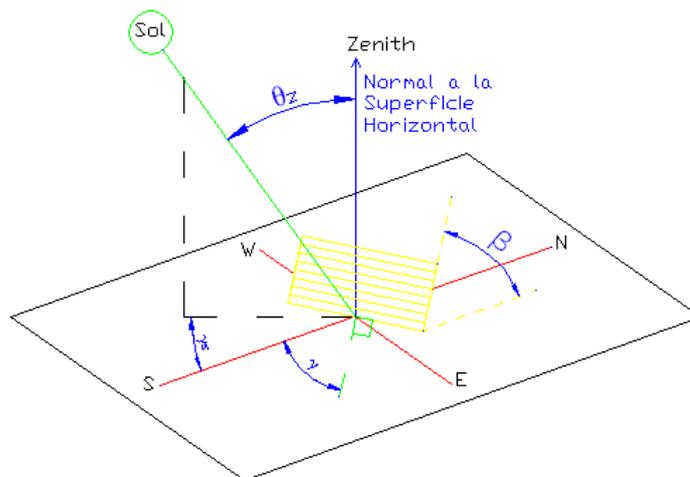


Figura 4.13 Dirección de la Radiación Solar

Para superficies horizontales, $\beta = 0^\circ$, y el ángulo de incidencia es el ángulo de zenith (θ_z), tenemos

$$\text{Cos}\theta_z = \text{Cos}\delta \cdot \text{Cos}\phi \cdot \text{Cos}\omega + \text{Sin}\delta \cdot \text{Sin}\phi \quad (4.2)$$

A continuación se muestra la tabla mediante la cual se puede determinar el día promedio recomendado para cada mes [por Klein (1976)]. En donde, i es el día del año a analizar, n es el valor que toma por cada mes

Tabla 4.4 Día^a promedio para cada mes y valor de n por meses

Mes	n para i Día del Mes ^b	Para el Día promedio del Mes		
		Fecha	n, Día del año ^b	δ, Declinación
Enero	i	17	17	-20.9
febrero	31+i	16	47	-13.0
Marzo	59+i	16	75	-2.4
Abril	90+i	15	105	9.4
Mayo	120+i	15	135	18.8
Junio	151+i	11	162	23.1
Julio	181+i	17	198	21.2
Agosto	212+i	16	228	13.5
Septiembre	243+i	15	258	2.2
Octubre	273+i	15	288	-9.6
Noviembre	304+i	14	318	-18.9
Diciembre	334+i	10	344	-23.0

^a El día promedio cuya radiación extraterrestre se acerca a la del promedio mensual.

^b Este no puede ser contabilizado para el año bisiesto; valores de n para marzo en el año Bisiesto puede ser corregido añadiendo 1. los valores de declinación también pueden ser movidos un grado.

En donde ω_s es el ángulo de ocaso y se lo determina mediante la ecuación mostrada a continuación.

$$\omega_s = \text{ArcCos}(-\text{tg} \delta \cdot \text{tg} \phi) \quad (4.3)$$

Para determinar el número de horas de brillo solar teóricas (N), se utiliza la siguiente ecuación.

$$N = \frac{2\omega_s}{15} \quad (4.4)$$

4.3.1 RADIACIÓN FUERA DE LA ATMÓSFERA SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL

Varios tipos de cálculos relacionados con la radiación son mas convenientes realizarlos usando niveles normalizados de radiación, necesitamos un método para calcular la radiación fuera de la atmósfera terrestre.

En cualquier punto y momento la radiación fuera de la atmósfera incidente sobre un plano horizontal es

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (4.5)$$

Donde G_{sc} es la constante solar, y n es el día del año. La ecuación (4.2) nos da $\cos \theta_z$, combinándola con la ecuación (4.5), G_o para una superficie horizontal en cualquier momento entre la radiación sobre el horizonte y el ángulo de ocaso viene dada por

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \phi \quad (4.6)$$

Esto es usualmente necesario para cálculos de radiación solar diaria, mediante la integración de la ecuación (4.6) se puede determinar la energía que el sol proyecta fuera de la superficie terrestre. Está representada por H_o , la misma que se determina de la siguiente forma:

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \cdot \sin \delta \right] \quad (4.7)$$

Si G_{sc} esta en watts por metro cuadrado, H_o en joules por metro cuadrado.

El índice de claridad K_T muestra la relación existente entre la radiación Solar sobre la superficie de la tierra la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre.

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (4.8)$$

La radiación solar se puede medir mediante la regresión de Ångstrom, cuya tipo original fue modificado por Page (1964), ya que originalmente mostraba algunas ambigüedades ya que se tomaba el valor promedio diario de radiación solar en un cielo descubierto, lo que daba lugar a diferentes interpretaciones.

Con la modificación de Page se relaciona a la radiación solar fuera de la atmósfera, sin hacer ningún tipo de interpretación.

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H_0}} = a + b \frac{\overline{n}}{\overline{N}} \quad (4.9)$$

en donde $\overline{H_0}$ es la radiación solar fuera de la atmósfera para determinado lugar, \overline{H} es el promedio mensual de la radiación solar diaria sobre una superficie horizontal; \overline{n} es el promedio mensual de la Heliofanía u horas de brillo solar diarias, y \overline{N} es el promedio mensual del máximo posible de horas de brillo solar (valor teórico, puede ser calculado para el día promedio recomendado para cada mes), a y b son coeficientes propios de cada clima y localización a continuación mostramos los valores de los coeficientes a y b para la provincia de Guayas, estos se nos fueron determinados por técnicos del INAMHI.

$$a = 0.23$$

$$b = 0.63$$

Mediante esta regresión determinaremos el valor promedio mensual de radiación solar diaria, cabe recalcar que los valores a continuación mostrados corresponden a la estación valor que es sumamente importante al momento de dimensionar nuestro sistema de colectores solares planos.

Las unidades en que se encuentra expresada el promedio mensual de radiación solar diaria son: $\frac{Wh}{m^2 día}$

4.3.2 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR

A continuación se muestran los diferentes cálculos realizados para determinar la radiación solar mensual promedio en la provincia de Guayas. Para esto, se recurrió a los datos de Heliofanía captados por la estación Milagro – Ingenio Valdéz.

Análisis de Energía Solar para el mes de Marzo.

i := 16

i, Es el día más representativo para el mes de Marzo (Klein(1976) - Tabla 4.4)

$$n := 59. + i$$

$$n = 75$$

Constante Solar fuera de la atmósfera terrestre

$$G_{sc} := 1353 \frac{W}{m^2}$$

Determinación de la Constante solar para este día.

FG, factor para la transformación de ° a radianes.

$$FG := \frac{\pi}{180}$$

$$G_{on} := G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \cdot FG \right) \right)$$

$$G_{on} = 1.365 \times 10^3 \frac{W}{m^2}$$

Latitud

$$\phi := 2 \cdot FG$$

Cálculo del ángulo de declinación (δ) □

$$\delta := -23.45 \cdot \sin \left[360 \cdot \frac{(284 + n)}{365} \cdot FG \right]$$

$$\delta = 2.418 \text{ } ^\circ$$

$$\delta := \delta \cdot FG$$

El ángulo entre la superficie a analizar y la horizontal es de 0 °:

$$\beta := 0 \cdot FG$$

Tomando las 10:00 am como una hora a la que se realiza el análisis tenemos que el ángulo horario es:

$$\omega := -30 \cdot FG$$

Suponiendo un ángulo azimuth de superficie de 45° este, tenemos.

$$\gamma_{\text{superficie}} := 45 \cdot FG$$

Determinación del ángulo de incidencia. (θ)

$$\begin{aligned} \text{Cos}_\theta &:= \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\beta) - \sin(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma_{\text{superficie}}) \\ &+ \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma_{\text{superficie}}) \cdot \sin(\omega) \end{aligned}$$

$$\text{Cos}_\theta = 0.866$$

$$\theta := \frac{\text{acos}(\text{Cos}_\theta)}{FG}$$

$$\theta = 29.98^\circ$$

Angulo de Zenit

$$\text{Cos}_{\theta z} := (\cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega)) + \sin(\delta) \cdot \sin(\phi)$$

$$\text{Cos}_{\theta z} = 0.866$$

$$\theta z := \frac{\text{acos}(\text{Cos}_{\theta z})}{FG}$$

$$\theta z = 29.98^\circ$$

$$\theta z := \theta z \cdot FG$$

Cálculo de la constante solar para un punto fuera de la atmósfera terrestre.

$$G_o := G_{on} \cdot \cos(\theta_z)$$

$$G_o = 1.183 \times 10^3 \frac{W}{m^2}$$

Determinación del ángulo de ocaso.

$$\cos_{\omega_s} := -\tan(\delta) \cdot \tan(\phi)$$

$$\cos_{\omega_s} = -0.001$$

$$\omega_s := \frac{\arccos(\cos_{\omega_s})}{FG}$$

$$\omega_s = 90.084^\circ$$

$$\omega_s := \omega_s \cdot FG$$

Cálculo del número de horas de brillo solar para el día en análisis.

$$N := \frac{2 \cdot \frac{\omega_s}{FG}}{15}$$

$$N = 12.011 \text{ horas}$$

Cálculo de la energía proyectada por el sol fuera de la superficie terrestre.

$$H_o := \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365} \cdot FG\right) \right) \left(\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_s}{360} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \right)$$

$$H_o = 3.749 \times 10^7 \frac{J}{m^2 \cdot \text{día}}$$

La Heliofanía para ese día y mes es 3.823 horas (INAMHI)

n_heliofania:= 3.823 horas

a := 0.23

b := 0.63

a y b son los coeficientes para la provincia de Guayas que se utilizarán en la regresión de Anstrong modificada por Page

Cálculo de la radiación solar sobre la superficie de la tierra, H.

$$H := H_0 \cdot \left(a + b \cdot \frac{n_{\text{heliofania}}}{N} \right)$$

$$H = 1.614 \times 10^7 \frac{J}{m^2 \cdot \text{dia}}$$

$$H := \frac{H}{3600}$$

$$H = 4.49 \times 10^3 \frac{Wh}{m^2 \cdot \text{dia}}$$

Se siguió el procedimiento anterior para todos los meses del año, basándonos en los datos proporcionados por el INAMHI.

De donde se obtuvieron los valores promedio de radiación solar para la provincia de Guayas (Tabla 4.5 y Tabla 4.6).

Tabla 4.5 Promedio mensual de radiación solar. E. Radio Sonda

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
H	3900	3747	4310	4605	4028	3715	3781	4365	4510	4364	4295	4148

Fuente: INAMHI

$$\text{Promedio} := 4147 \frac{Wh}{m^2 \text{ día}}$$

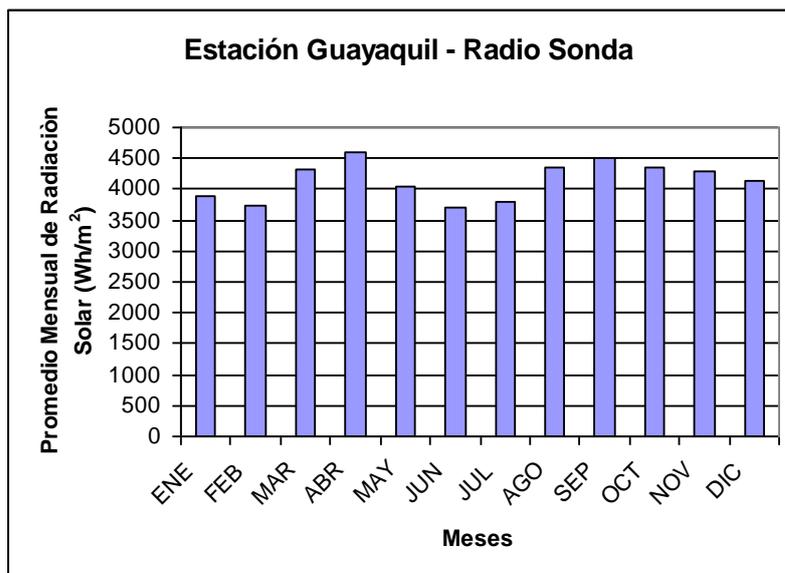


Figura 4.14 Promedio mensual de radiación E. Radio Sonda

Tabla 4.6 Promedio mensual de radiación solar. E. Milagro

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
H	3851	3955	4493	4536	3861	3125	3142	3520	3653	3469	3577	3792

Fuente: INAMHI

Promedio := 3748 $\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{ día}}$



Figura 4.15 Promedio mensual de radiación E. Milagro

4.4 PARÁMETROS METEOROLÓGICOS TABULADOS PARA LA PROVINCIA DE GUAYAS

Existen otros parámetros meteorológicos que son necesarios para la realización de este proyecto, por lo que a continuación se presentan sus valores obtenidos por parte del INAMHI en sus estaciones Guayaquil-Radio Sonda y Milagro (Ingenio Valdez).

Los valores de precipitación que se muestran en la Tabla 4.7 corresponden al periodo: 1990 – 2002

Tabla 4.7 Precipitación mensual (mm). E. Radio Sonda

VALORES MENSUALES - PRECIPITACIÓN (mm)														
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
media	160.1	358.6	385.6	309.2	97.6	16.5	11.1	1.1	1.9	10	58.2	124.9	1535.5	127.9
mínima	59.3	137.8	129.1	24.7	1.2	0	0	0	0	0	0	0.4		0
máxima	419.8	783.3	932.5	1137.7	228.8	88.9	80.6	10.5	14.6	89.6	520.7	772		1137.7
amplit	360.5	645.5	803.4	1113	227.6	88.9	80.6	10.5	14.6	89.6	520.7	771.6		1137.7

Fuente: INAMHI

Los valores de precipitación que se muestran en la tabla 4.8 corresponden al periodo: 1990 – 2003

Tabla 4.8 Precipitación mensual (mm). E. MILAGRO

VALORES MENSUALES - PRECIPITACIÓN (mm)														
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
media	219.7	448.7	440.7	261.8	115.3	29.8	16.9	2.7	11.3	4	51.8	102.5	1705.2	142.1
mínima	56.3	203.2	159.7	10.8	0.8	0	0	0	0	0	0.1	3.2		0
máxima	712.7	846	966.4	957.3	517.8	200.5	156.3	31.7	127.1	30.5	551.2	595.5		966.4
amplit	656.4	642.8	806.7	946.5	517	200.5	156.3	31.7	127.1	30.5	551.1	592.3		966.4

Fuente: INAMHI

La temperatura media mensual (°C), detectada por las estaciones del INAMHI para la provincia de Guayas, se muestra a continuación para el periodo 1990 – 2002.

Tabla 4.9 Temperatura media mensual (°C). E. Radio Sonda

VALORES MENSUALES - TEMPERATURA MEDIA (°C)														
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
media	27	26.6	27.1	27.3	26.9	25.8	25.2	24.9	25.3	25.7	25.9	26.9	315.1	26.2
mínima	26.6	26	26.8	26.8	25.6	24.1	23.9	23.9	24.5	24.7	25.4	26.4		23.9
máxima	27.7	27.7	27.9	28	27.9	27.6	27.9	27.5	27.6	27.8	27	27.4		28
amplit	1.1	1.7	1.1	1.2	2.3	3.5	4	3.6	3.1	3.1	1.6	1		4.1

Fuente: INAMHI

Para el período 1990 – 2003, la estación MILAGRO (Ingenio Valdez) registró los siguientes valores de Temperatura media mensual.

Tabla 4.10 Temperatura media mensual (°C). E. MILAGRO

VALORES MENSUALES - TEMPERATURA MEDIA (°C)														
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
media	26.2	26.1	26.7	26.7	26.3	25	24.1	23.9	24.3	24.8	25	26.1	305.2	25.4
mínima	25.6	25.4	26.1	26.3	25.1	23.5	22.8	22.9	23.6	24	24.5	25.3		22.8
máxima	27.3	27.4	27.4	27.7	27.5	27	27	26.6	26.5	26.9	26.6	27.1		27.7
amplit	1.7	2	1.3	1.4	2.4	3.5	4.2	3.7	2.9	2.9	2.1	1.8		4.9

Fuente: INAMHI

4.5 GRAFICAS

Precipitación mensual (mm).

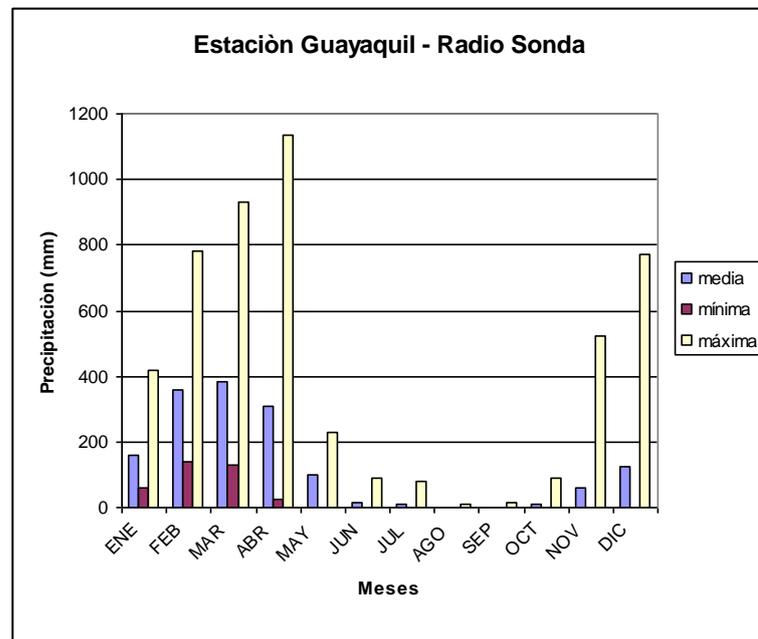


Figura 4.16 Precipitación mensual (mm). E. Radio Sonda

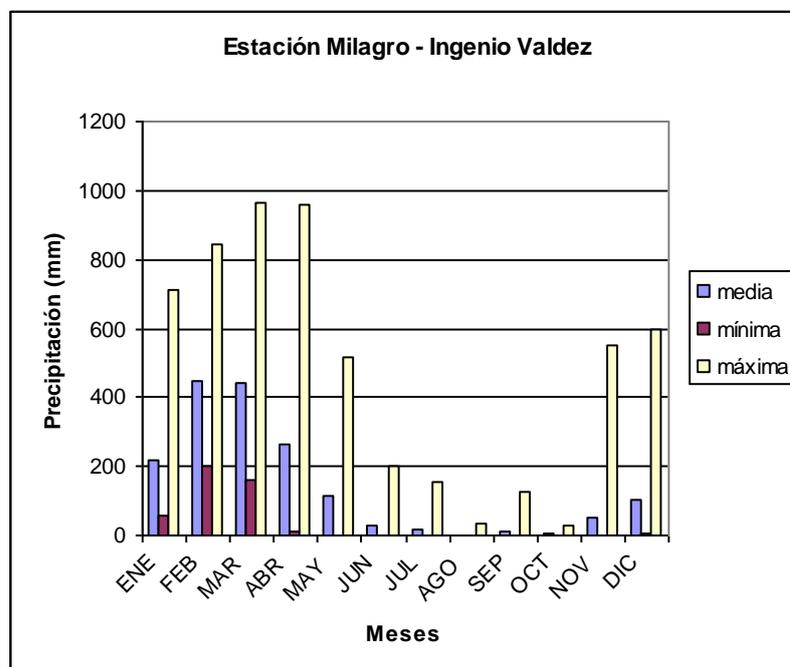


Figura 4.17 Precipitación mensual (mm). E. MILAGRO

Temperatura Media Mensual (°C).

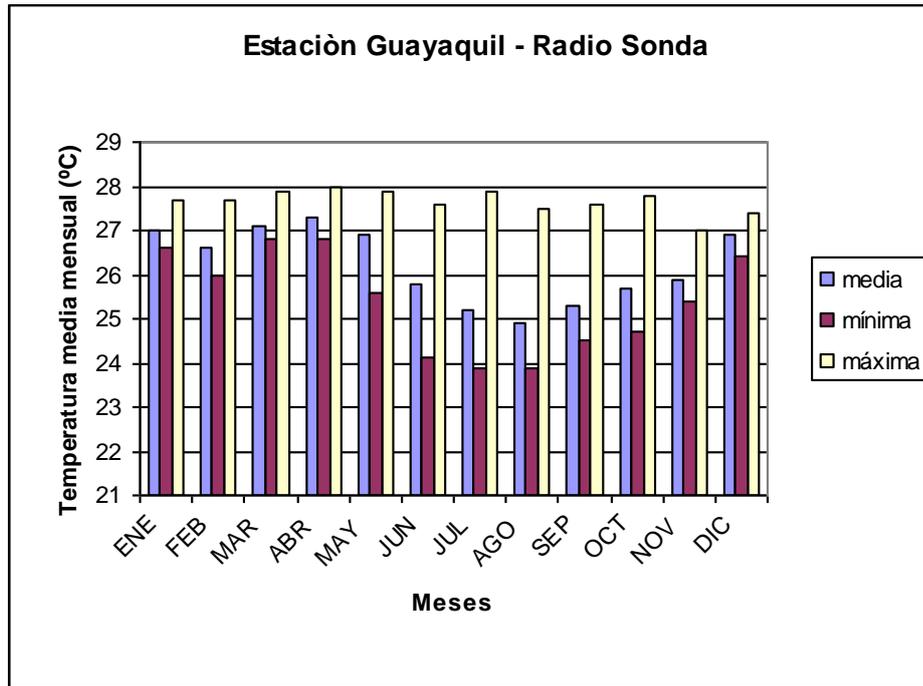


Figura 4.18 Temperatura media mensual (°C). E. Radio Sonda

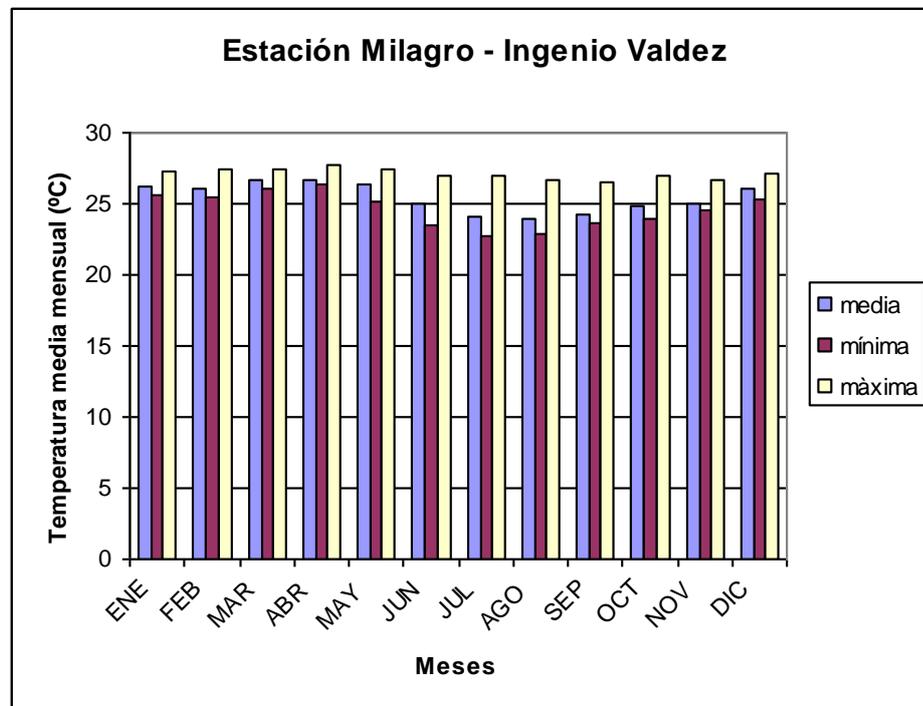


Figura 4.19 Temperatura media mensual (°C). E. MILAGRO

CAPITULO 5

DISEÑO DE LOS COLECTORES SOLARES

5.1 CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

Un colector solar es una forma de intercambiador de calor, este se encarga de transformar la energía radiante del sol en energía térmica o calorífica. La transferencia de energía se hace desde la fuente radiante (sol) hasta el fluido de trabajo (agua o aire generalmente).

Los captadores se clasifican de acuerdo a la aplicación requerida y la temperatura máxima que estos adquieran¹.

- 1) Captadores de muy baja temperatura (10° a 25 ° C)
- 2) Captadores de baja temperatura (25° a 50 ° C)
- 3) Captadores de temperatura media (60° a 130 ° C)
- 4) Captadores de alta temperatura (200° a 600 ° C)
- 5) Captadores de Temperaturas muy elevadas > 600° C

Estos captadores pueden ser planos o focales según la forma en que la radiación incida sobre la superficie absorbente situada en el mismo plano, o lo hagan concentrando las radiaciones sobre un absorbente situado en el punto teórico focal.

5.2 COLECTORES SOLARES PLANOS

Los colectores solares planos son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados para aplicaciones en las que se requiere que la energía sea liberada a bajas y medias temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores difícilmente supera los 100° C.

En comparación con los colectores focales destacamos que las ventajas que los colectores solares planos presentan es que utilizan la radiación solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento a la fuente de

¹[7]

radiación (sol), su construcción es más simple que los colectores focales y requieren de muy poco mantenimiento.

5.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Un colector solar convierte la radiación solar en calor, la radiación tiende a atravesar una o varias capas de vidrio a algún otro material transparente, el número de cubiertas transparentes depende del diferencial de temperatura que se espera alcanzar, luego de atravesar las cubiertas transparentes, la radiación llega a la parte principal del colector, la placa de absorción, la radiación es transformada en calor en esta placa, el mismo que se transmite al fluido de trabajo por conducción, convección, comúnmente se la pinta de color negro u otro oscuro.

La construcción de un colector solar de placa plana es sencilla, no requiere tecnología especial y su diseño depende de la aplicación específica a la cual vaya a destinarse.

Algunos de los parámetros más importantes son material, espesor y acabado de la placa de absorción, número y tipos de cubiertas transparentes, tipo de aislante y espesor, inclinación y orientación del colector, condiciones ambientales como velocidad del viento, temperatura del aire y radiación solar.

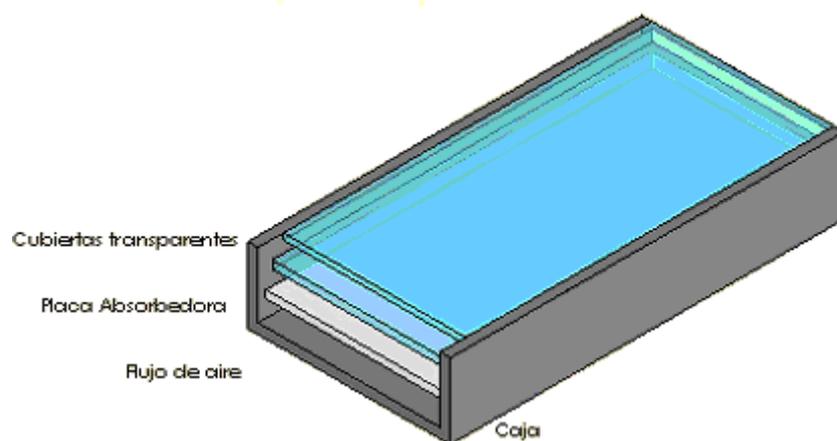


Figura 5.1 Esquema de un colector solar

5.2.2 COLECTORES SOLARES PLANOS PARA EL CALENTAMIENTO DE AIRE

Existen diferentes configuraciones de placas de absorción para el calentamiento de gases. Se espera que dentro del colector haya un área de contacto lo suficientemente grande entre la placa absorbidora y el aire que se halla circulando a través del colector, con el objetivo de asegurar una buena transferencia de calor.

Para este tipo de colectores, la placa de absorción se coloca sobre el aislante térmico, con una separación aceptable, de tal forma que el fluido de trabajo (aire) fluya entre estos dos componentes, otra forma en la que puede fluir el aire es por el espacio vacío existente entre la placa absorbidora y la cubierta de vidrio.

5.2.3 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

Generalmente un colector solar se halla constituido por una cubierta transparente, placa absorbidora, aislante y la caja en la que se ubica el colector solar.

5.2.3.1 cubierta transparente

Se denomina así ya que se halla constituida por una o varias láminas de vidrio o plástico transparentes, que se hallan ubicadas sobre la placa absorbidora. El objetivo principal de la cubierta transparente es reducir las pérdidas de calor por radiación y convección así como también aumentar la capacidad del colector solar para alcanzar un mayor diferencial de temperatura.

La energía absorbida por el colector más la energía reflejada y la energía transmitida representan la energía total presente en el sistema. La energía del sistema dependerá de¹:

- La longitud de onda
- El ángulo de incidencia

¹[8]

- El índice de refracción del material, medida relativa que indica que tanto se desvían los rayos de energía al atravesar el material.
- El índice de absorción, medida relativa que indica cuanta energía absorberá la superficie.

Para que una cubierta transparente sea considerada eficiente debe absorber la máxima cantidad de energía solar sin depender del ángulo de incidencia, también debe reflejar la máxima cantidad de energía calorífica que pudiese emitir la placa de absorción, debido a que la energía calorífica y la radiación solar tiene diferentes longitudes de onda esto se puede lograr con el mismo material.

El sol emite radiaciones cuya longitud de onda es corta, siendo estas entre 0.2 y 3.0 micras, por otro lado la energía calorífica que emite la superficie de absorción tiene longitudes de onda superiores a 3.0 micras.

A continuación se muestran las características que una cubierta transparente debe poseer.

- Capacidad elevada para transmitir ondas cortas (Alta refractancia)
- Baja capacidad para transmitir ondas largas (Alta reflectancia)
- Bajo absorción a cualquier longitud de onda
- Excelente resistencia a las condiciones atmosféricas y larga duración

La absorción depende del espesor del cristal, debido a esto el cristal debe ser tan delgado como sea posible tomando en cuenta que este espesor sea compatible con la resistencia mecánica del material. Comúnmente el espesor del vidrio utilizado para aplicaciones de energía solar es de 3mm.

Se puede reducir las pérdidas de calor usando más láminas de vidrio. La desventaja de este procedimiento es el aumento en los costos.

Duffie¹ recomienda que al utilizar varias cubiertas transparentes estas se deben colocar separadas entre si 25 mm para minimizar la circulación de aire entre ellas y de esta forma reducir las pérdidas por convección.

Tabla 5.1 Comparación de diversos tipos de cubiertas

Tipo de cubierta	Porcentaje de Transmitancia de Energía solar (onda corta)	Porcentaje de Transmitancia Infrarroja (onda larga)	Índice de Refracción	Durabilidad y Resistencia al clima
Vidrio blanco	91.5	2	1.5	Excelente
Vidrio templado con bajo contenido de hierro	87.5	2	1.51	Excelente
Láminas de vidrio con bajo contenido de hierro	87.5	2	1.51	Excelente
Vidrio flotado y templado	84.3	2	1.52	Excelente
Fibra de vidrio	77 a 87	0.1 a 0.3	1.54	Aceptable a bueno
Láminas acrílicas	80 a 90	2	1.49	Regular a bueno
Láminas de policarbonatos	73 a 84	2	1.59	Deficiente a bueno
Teflón FEP	90 a 92	25 a 26	1.34	Aceptable a bueno
Película de poliéster	80 a 87	20 a 21	1.64 a 1.67	Aceptable a bueno

Fuente: ENERGÍA SOLAR – Richard. Montgomery,

5.2.3.2 placa absorbedora

La placa de absorción es una parte imprescindible en un sistema de captación de energía solar por medio de colectores solares planos, es la encargada de recoger la energía transmitida a través de la cubierta transparente, debe tener la capacidad de a más de recoger esta energía retenerla y estar construida de tal manera que la transferencia de calor desde esta placa hacia el fluido calo portador (aire) sea eficiente.

La placa absorbedora desempeña diversas funciones dentro del colector:

- Capta y remite la radiación solar
- Transmite a un líquido o al aire el calor generado por la radiación solar
- Cuenta con pasajes o conductos a través de los cuales circula el fluido por el colector, para absorber el calor.

¹ [6]

La superficie de absorción puede ser cubierta con una capa para mejorar su capacidad de captación y retención de energía. Generalmente se utilizan dos tipos de recubrimientos: superficies selectivas y superficies no selectivas.

La superficie selectiva absorbe la mayor cantidad de radiación solar que incide sobre ella y la radiación térmica que emite es sumamente baja. A continuación se indica un tipo muy usado de superficie selectiva cuya duración es excelente en los sistemas de energía solar. La placa absorbadora se baña primero con un metal níquel por ejemplo, esto la protege contra la corrosión y disminuye la emisividad. El níquel se recubre luego por galvanoplastia con negro de cromo. Esto produce una capa de absorción de alto índice para las longitudes de onda corta (radiación solar), pero que es transparente al infrarrojo.

Este recubrimiento depositado con el espesor correcto, dará de 95% a 96% de absorción y de 9% a 12% de emisión, su temperatura de descomposición excede los 420° C y al parecer la humedad no le causa ningún efecto¹, el inconveniente es que su costo de fabricación es elevado.

La superficie no selectiva absorbe la mayor parte de la radiación solar, pero emite una gran cantidad de radiación térmica. Muchos colectores se diseñan con este tipo de superficie, usualmente se recubre a la placa de absorción con una capa de pintura negra (mate) siendo bastante eficientes. La superficie no selectiva cubierta con pintura negra tendrá una absorción del orden del 97% pero su emisividad también será elevada, existen pinturas que ofrecen 90% de absorción y 30% de emisividad.

Montgomery (1994) sugiere no que “no hay que preocuparse demasiado por los valores y relaciones de emisividad/absorción. Debido a que la curva de rendimiento térmico del colector indicará su eficiencia térmica general, incluyendo la capa de recubrimiento”.

La placa colectora requiere de alta conductividad térmica (K), por lo que generalmente es metálica, también se las puede construir de cualquier material plástico, capas de absorber la radiación solar. Se ha encontrado que las placas

¹ [8]

de metal son las más prácticas para su aplicación en calefacción de recintos y calentamiento de agua por medio de energía solar.

En los colectores de buena calidad se emplea Cobre, Aluminio, Acero al carbón, acero inoxidable o una combinación de ellos. Cada uno de estos metales tiene ventajas y desventajas por lo que no se encuentra que alguno sea mejor cuando se consideran todos los factores relativos a rendimiento, vida útil, costo y peso.

Duffie¹ realiza un estudio de los posibles usos de materiales en aplicaciones referentes a energía solar.

Existen varios metales que pulidos perfectamente proporcionan una buena reflectividad solar. El cobre y otros metales son buenos reflectores, pero se oxidan rápidamente y su superficie se oscurece. El Aluminio es quizás el mejor y más barato para la reflexión directa de la luz solar. Cuando se pule perfectamente proporciona una reflectividad muy alta porque la capa de óxido de Al_2O_3 que se forma instantáneamente no es muy profunda y la reflexión no se reduce mucho porque es suficientemente transparente.

5.2.3.3 aislamiento

Del aislamiento depende en gran parte la eficiencia del colector solar. Ya que las pérdidas que se producen por la parte posterior son función de la conductividad térmica y el espesor del aislamiento. Generalmente La temperatura del ambiente es inferior en este sitio debido a la no recepción directa de radiación solar.

En un colector el aislamiento lateral debe tener un valor (R) equivalente al respaldo para que las pérdidas sean pequeñas. Una forma aproximada de cálculo es mediante la suposición de que el calor escapa por el perímetro.

El aislamiento de un colector solar debe cumplir con los siguientes requisitos²:

¹[6]
²[8]

- No debe existir deterioro, gasificación ni vaporación a temperaturas de 200° C
- No debe haber deterioro debido a la repetición de los ciclos térmicos entre - 30° C y +120° C
- Conductancia térmica inferior a 0.04 W/m²K (R = 10 o menor)
- Debe ser hidrofóbico, de tal forma que no absorba ni retenga el agua

Existen cuatro tipos básicos de aislantes térmicos que son tratados por Montgomery (1994). Los aislantes de fibra mineral o de cerámica, con excepción de la lana mineral, están diseñados para soportar temperaturas superiores a las que se encuentran en los colectores solares, su costo imposibilita su utilización en estas condiciones. La lana mineral al estar bajo los efectos del ciclo de humedad pierde sus propiedades aislantes, por lo que no se la usa. Las planchas de fibra de vidrio para altas temperaturas están fabricadas con poco o ningún aglutinante y constituyen un aislante térmico muy satisfactorio.

Incropera¹ detalla las propiedades termofísicas de algunos materiales y sistemas de aislamiento, por lo que para escoger el aislante esta información será de gran importancia, cabe recalcar que debemos tomar en cuenta las posibilidades de obtener el aislante seleccionado en el mercado nacional, así como también los costos de este.

5.2.3.4 la caja del colector

La caja del colector es el recinto en donde irán empotradas la cubierta transparente, placa absorbedora, aislante del colector solar; debe ser un recipiente hermético, además debe fijarse con firmeza a la estructura del secador.

Para la elaboración de la caja del colector se pueden utilizar diferentes materiales tales como: metales, termoplásticos para alta temperatura, madera, entre otros.

¹ [9]

5.3 BALANCE ENERGÉTICO

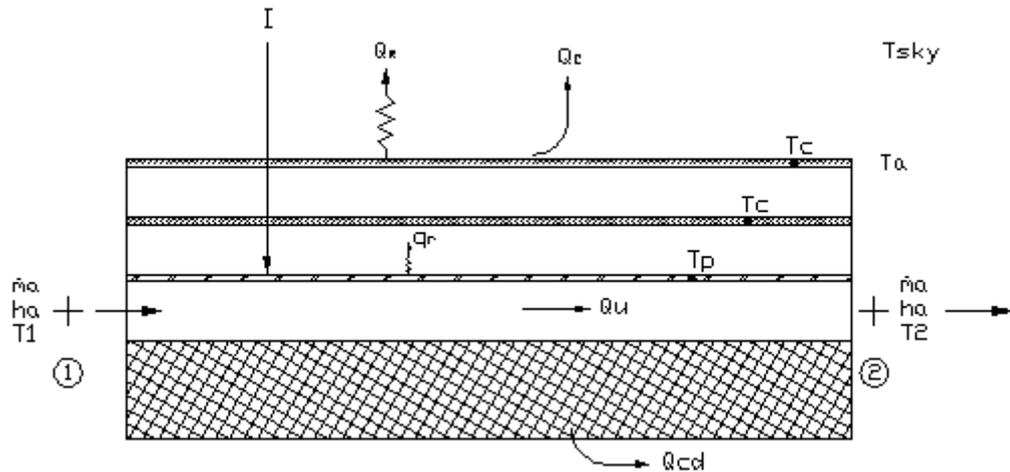


Figura 5.2 Volumen de control - Colector solar

En estado estable el desempeño de un colector solar plano se lo puede describir mediante un balance de energía. Este se lo puede representar en forma sencilla por medio de la ecuación:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_L + du/dt \quad (5.1)$$

En donde Q_{abs} es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo en el colector, Q_u el calor útil que finalmente se transfiere al fluido de trabajo, Q_L las pérdidas de calor hacia los alrededores por radiación, convección y conducción y du/dt la rapidez del cambio de energía interna almacenada en el colector. El valor del último término es muy pequeño y generalmente se desprecia.

Cada uno de los términos de la ecuación 5.1 puede ser representado por otra ecuación así.

$$Q_{abs} = H_T A_C (\tau \alpha) \quad (5.2)$$

$$Q_u = m \cdot Cp \cdot dT/dt \quad (5.3)$$

$$Q_L = U_L A_C (T_{pm} - T_a) \quad (5.4)$$

De donde para la ecuación 5.2 se tiene:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (5.5)$$

Como se puede apreciar en estas ecuaciones aparecen nuevos términos los mismos que representan: H_T es la energía solar incidente $\left(\frac{W}{m^2}\right)$, A_c es el área efectiva del colector (m^2), $(\tau\alpha)$ es el producto de la transmitancia del vidrio y la absorptancia de la placa colectora que representa la fracción de la radiación solar que es absorbida por el colector, mC_p la capacidad calorífica del fluido de trabajo ($J/^\circ C$), dT/dt la rapidez de cambio de temperatura con respecto al tiempo ($^\circ C/s$), U_L el coeficiente global de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$, T_{pm} la temperatura media de la placa de absorción ($^\circ C$), T_a la temperatura del aire ambiente ($^\circ C$) y ρ_d la reflectancia difusa. El valor de ρ_d toma diferentes valores según el número de cubiertas que se utilicen. Así, para 1, 2, 3 y 4 cubiertas, los valores de ρ_d son aproximadamente 0.16, 0.24, 0.29 y 0.32 respectivamente.

En estado estable la energía útil de un colector solar es entonces la diferencia entre la radiación solar absorbida y las pérdidas térmicas¹:

$$Q_u = A_c [S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (5.6)$$

Donde $S = H_T \cdot \tau\alpha$, es decir la energía absorbida por el colector por unidad de área.

El problema existente con la ecuación 5.6 es que el calor útil queda en función de la T_{pm} misma que es difícil de calcular o medir, ya que es función del diseño del colector y de variables que cambian continuamente con el tiempo tales como la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo que entra al colector. Por lo que Duffie (1991) se dedica a modificar la ecuación con

¹[6]

el objetivo de tenerla en términos de variables que si pueden ser calculadas o medidas con facilidad.

La medida del funcionamiento de un colector solar es la eficiencia de colección η_c , esta se define como la relación existente entre el calor útil y la energía solar incidente sobre el colector en un mismo período de tiempo. Analíticamente se representa,

$$\eta_c = \frac{Q_u}{H_T \cdot A_C} \quad (5.7)$$

De la ecuación anterior, es necesario conocer el calor útil para poder calcular la eficiencia del colector. Por lo que es necesario determinar las pérdidas de calor, estas son función del coeficiente total de pérdidas de calor (U_L).

Ya que conociendo uno de estos dos términos, Q_u o Q_L , se puede resolver la ecuación del balance de energía, debido que el calor absorbido lo podemos obtener por medición experimental y conociendo las características ópticas ($\tau\alpha$) de los materiales utilizados en la construcción del colector. A continuación se analiza cómo podemos evaluar alguna de las variables mencionadas para poder conocer el funcionamiento del colector.

Ya que es indispensable conocer el valor de U_L para poder evaluar el calor útil o las pérdidas de calor, a continuación se presenta el modelo matemático de cómo obtenerlo. El proceso para calcular U_L se basa en un circuito térmico de un colector solar como el que se presenta en la figura 5.3 y 5.4, que en este caso utiliza dos cubiertas de vidrio, $c1$ y $c2$. Este nos muestra que, de la energía absorbida en el colector (S) a través de la placa absorbidora (p), que se encuentra a la temperatura T_p ; parte se convierte en calor útil (Q_u) y parte tiende a disiparse hacia los alrededores que se encuentran a la temperatura ambiente T_a , a través de las cubiertas de vidrio que se encuentran a las temperaturas T_{c1} y T_{c2} respectivamente. Esto también ocurre a través del fondo y lados del colector que se encuentran a una temperatura T_b . La cantidad de energía disipada depende de las diversas resistencias que vienen

esquematisadas en el diagrama y que en este caso son 5¹, Duffie (1991) muestra el desarrollo de esta analogía eléctrica.

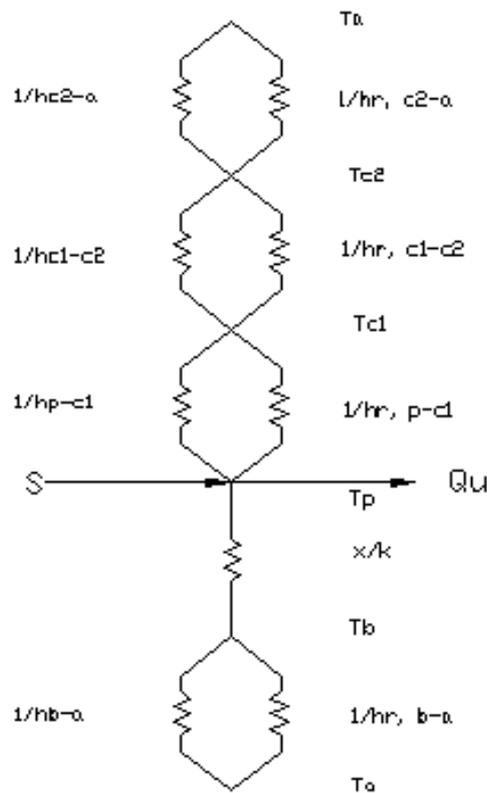


Figura 5.3 Analogía eléctrica del colector solar

De la figura 5.3, se puede observar que las resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_5 , son a la vez resistencias equivalentes que representan la oposición a las pérdidas de calor por convección $\left(\frac{1}{h}\right)$ y radiación $\left(\frac{1}{hr}\right)$ a través de la parte superior y posterior del colector. R_4 Constituye la resistencia a la conducción a través del aislante térmico por la parte posterior y lados del colector. La resistencia R_5 es usualmente muy pequeña y por lo tanto despreciable.

¹[6]

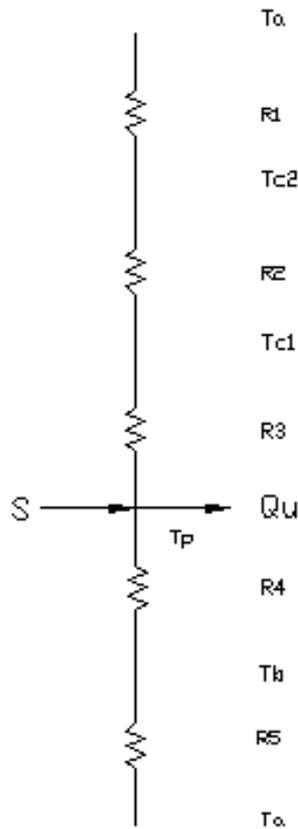


Figura 5.4 Analogía eléctrica desarrollada del colector solar

La idea es tratar de obtener una resistencia equivalente como la que representa la figura 5.5. Esta resistencia es igual al inverso del coeficiente total

de pérdidas de calor, $Req = \frac{1}{U_L}$

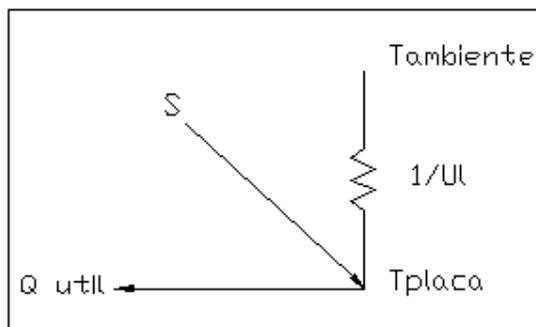


Figura 5.5 Resistencia equivalente

Por lo tanto tenemos que, U_L es la suma de varios coeficientes de pérdidas de calor, que se pueden expresar también como el inverso de sus resistencias, así:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (5.8)$$

Cabe indicar que la ecuación 5.8 es la forma general de calcular las pérdidas de calor en un colector solar. Mientras que para el colector solar utilizado la ecuación para el cálculo de las pérdidas totales de calor es:

$$U_L = U_t + U_b \quad (5.9)$$

Donde U_t es el coeficiente total de transferencia de calor para la parte superior del colector, y es igual al inverso de la suma de las primeras tres resistencias,

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.10)$$

U_b es el coeficiente de pérdida de calor por conducción por el fondo, este coeficiente tienen relación con las características termofísicas del aislante térmico y su espesor. Por lo tanto.

$$U_b = \frac{k_a}{l} \quad (5.11)$$

En estas ecuaciones, k_a es la conductividad térmica del aislante, l es el espesor del aislante por el fondo.

Existen graficas para determinar el valor de U_t , pero estas son convenientes para cálculos de tipo manual ya que presentan dificultades para ser utilizadas en programas de simulación computarizados.

Una ecuación empírica para el cálculo de U_t fue desarrollada por Klein (1979) siguiendo el básico procedimiento de Hotel y Woertz (1942) y Klein (1975).

Esta nueva relación cabe para las graficas de U_t para temperaturas de la placa comprendidas entre la ambiente y 200° C dentro de $\pm 0.3 \frac{W}{m^2 \circ C}$.

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{T_{pm} - T_a}{(N + f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma (T_{pm} + T_a) (T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591 \cdot N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N}$$

Donde N = número de cubiertas transparentes

$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ Constante de radiación de Stefan-Boltzmann

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w \cdot \varepsilon_p)(1 + 0.07866N) \quad (5.13)$$

$$C = 520(1 - 0.000051\beta^2) \quad (5.14)$$

Para $0^\circ < \beta < 70^\circ$. Para $70^\circ < \beta < 90^\circ$, use $\beta = 70^\circ$,

$$e = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (5.15)$$

β = Inclinación del colector ($^\circ$)

ε_g = Emitancia de la cubierta transparente

ε_p = Emitancia de la placa Absorbedora

T_a = Temperatura ambiente ($^\circ$ K)

T_{pm} = Temperatura media de la placa ($^\circ$ K)

h_w = Coeficiente de transferencia de calor del viento $\left(\frac{W}{m^2 \circ C} \right)$

Para determinar h_w es decir el coeficiente de transferencia de calor por convección debido al aire que se encuentra soplando sobre la cubierta transparente utilizamos la siguiente ecuación.

$$h_w = 5.7 + 3.8(V_v) \quad (5.16)$$

En donde V_v es la velocidad del viento.

La ecuación 5.12 sirve para cálculos manuales y mediante computadora. Para utilizarla es necesario conocer el valor medio de temperatura de la placa T_p ¹.

$$T_p := \frac{m \cdot C_p \cdot T_a + A_c \cdot I + A_c \cdot tT \cdot (h_f + h_w) \cdot T_a}{m \cdot C_p + A_c \cdot (h_w + h_f) \cdot tT} \quad (5.17)$$

En donde h_f es el coeficiente de transferencia de calor, tT es el número de horas de sol efectivas, m es la masa de la placa absorbadora y C_p el calor específico del material que está construida dicha placa.

El coeficiente de transferencia de calor h_f se lo determina con la siguiente ecuación

$$h_f := \frac{(K_a \cdot Nu)}{Dh} \quad (5.18)$$

En donde Nu es el número de Nusselt² y Dh es el diámetro hidráulico³.

$$Nu := 0.03 \cdot Re^{0.74} + 0.788 \cdot Re^{0.74} \cdot \frac{b}{Lc} \quad (5.19)$$

En esta expresión se tiene que Re es el número de Reynolds, b es el espacio por donde fluye el aire y Lc es la longitud del colector.

$$Dh := 4 \cdot \frac{Ax}{P} \quad (5.20)$$

¹ [10]

² [11]

³ [9]

Donde A_x y P son el flujo de área de la sección transversal y el perímetro en contacto con el fluido respectivamente.

$$\text{Re} := \frac{Ma \cdot Dh}{Ax \cdot \mu a} \quad (5.21)$$

Para calcular el número de Reynolds necesitamos conocer el flujo másico de aire, Ma , y μa es la viscosidad dinámica del aire.

A continuación se presenta la ecuación de Q_u modificada que nos permite calcular de forma más correcta. Esta ecuación queda en función de un factor de remoción de calor (F_R) y de la temperatura del fluido al entrar al colector (T_i). Por lo tanto la ecuación 5.6 se transforma en la ecuación de Duffie¹.

$$Q_u = A_C \cdot F_R \cdot (S - U_L \cdot (T_i - T_a)) \quad (5.22)$$

Siendo esta la ecuación mas importante del capítulo, puesto que el factor de remoción de calor (F_R) involucra específicamente la temperatura de todas las partes de la placa Absorbadora, así como también la temperatura del fluido y los flujos de masa pasando a través del colector.

Para evaluar (F_R), primero tenemos que evaluar otros dos factores de eficiencia como lo son: el factor de eficiencia del colector (F'), y el factor de flujo del colector (F'').

$$F_R = F'' \cdot F' \quad (5.23)$$

El factor de eficiencia del colector (F') se lo determina mediante la siguiente ecuación, la misma que es propia para trabajar con el aire como fluido de trabajo y con esa geometría de la placa.

¹[6]

$$F' := \left[1 + \frac{UI}{hf + \left[\left(\frac{1}{hf} \right) + \left(\frac{1}{hr} \right) \right]^{-1}} \right]^{-1} \quad (5.24)$$

Donde hr es el coeficiente de transferencia de calor por radiación. Para su cálculo se usa la siguiente expresión:

$$hr := \frac{4\sigma \cdot (T_{pm})^3}{\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_g} - 1} \quad (5.25)$$

El factor de flujo de colector (F'') se lo determina por medio de la siguiente ecuación:

$$F'' := \frac{Ma \cdot C_{pa}}{Ac \cdot UI \cdot F'} \cdot \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{Ac \cdot UI \cdot F'}{Ma \cdot C_{pa}} \right) \right] \right] \quad (5.26)$$

Ahora que se indicó la manera de determinar los factores de eficiencia requeridos, procedemos a la determinación del factor de remoción de calor (F_R) utilizando la ecuación 5.23

Siguiendo este proceso de cálculo se determina el calor útil que el colector solar puede brindar, este valor se encuentra sujeto a variaciones ya que depende de la radiación solar existente.

5.4 APLICACIÓN AL PROBLEMA PLANTEADO

5.4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL COLECTOR

Para dimensionar el colector solar nos basamos en la información brindada por el INAMHI de donde se tienen dos valores promedio de radiación solar para la provincia de Guayas. Estos valores fueron determinados mediante la regresión de Armstrong modificada por Page.

$$\text{Radiación} = 3748 \frac{Wh}{m^2 \text{ dia}} \quad (\text{estación Milagro – Ingenio Valdéz})$$

$$\text{Radiación} = 4147 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{ dia}} \quad (\text{estación Guayaquil – Radio Sonda})$$

El colector solar estará constituido por dos cubiertas transparentes debido a que el diferencial de temperatura entre el ambiente y el volumen de control es 50 ° C aproximadamente. Las dos estaciones antes mencionadas del INAMHI también se encargan de determinar la temperatura ambiente media en la provincia de Guayas por lo que a continuación se indica sus valores.

Tabla 5.2 Temperatura. Estación Milagro – Ingenio Valdez

media	25.4° C
mínima	22.8° C
máxima	27.7° C

Fuente: INAMHI

Tabla 5.3 Temperatura. Estación Guayaquil – Radio Sonda

media	26.2° C
mínima	23.9° C
máxima	28° C

Fuente: INAMHI

Para determinar el área de colectores solares aproximada que se necesitará para este tipo de aplicación, serán de gran utilidad las ecuaciones proporcionadas por la FAO¹.

La potencia que hay que transferir al aire por el sistema de calentamiento, N_a expresada en watts, se determina por el incremento de temperatura, ΔT en °C, del flujo de aire, Q , en m^3/s , de la masa específica del aire, δ_a , en kg/m^3 , y del calor específico del aire, C_{pa} , en $\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ por medio de la ecuación:

¹ [25]

$$N_a := Q \cdot \delta a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T \quad (5.27)$$

Para determinar la potencia del colector solar debemos dividir N_a para la eficiencia esperada del colector solar. No podemos olvidar que estos sistemas de energía solar tienen eficiencias térmicas del 30 al 60 %.

Ahora con este nuevo valor de N_a determinamos la cantidad de energía solar, E_c , que tendrá que llegar a la superficie del colector solar, para producir el calentamiento medio diario que se desea.

$$E_c := N_a \cdot 3600 \cdot 24 \quad (5.28)$$

Ya que conocemos el valor de la radiación media diaria, entonces podemos determinar el volar de radiación absorbida por el colector I . Por último tenemos que el área aproximada de colectores solares que se requiere será:

$$A := \frac{E_c}{I} \quad (5.29)$$

Las cubiertas transparentes utilizadas en la construcción del colector solar son de vidrio blanco.

La placa absorbedora estará construida completamente de aluminio, la placa de aluminio puede ser cubierta con pintura negro mate para que actúe como un cuerpo negro y absorba de mejor forma la radiación solar.

El aislamiento de la caja será poliuretano debido a su capacidad de trabajar a temperaturas superiores y su gran durabilidad.

La caja se construirá de acero al carbono con un recubrimiento exterior de pintura anticorrosiva con el objeto de aumentar su vida útil, disminuyendo los daños producidos por la humedad y lluvia propias del lugar donde se encuentra ubicada.

5.4.2 CÁLCULOS

El área aproximada de colectores solares planos se la determinó de la siguiente manera:

La potencia que hay que transferir al aire por el sistema de calentamiento N_a expresada en W se determina por medio de la siguiente ecuación. Se debe tener en cuenta que el diferencial de temperatura ΔT corresponde a la diferencia entre la temperatura de secado (50°C) y la temperatura media ambiental que para la provincia de Guayas es 25.4°C .

$$Q := 0.11 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{Caudal volumétrico de aire}$$

$$\delta_a := 1.092 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire a } 50^\circ \text{C}$$

$$C_{pa} := 1007.8 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad \text{Calor específico del aire}$$

$$\Delta T := 50 - 25.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$N_a := Q \cdot \delta_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T$$

$$N_a = 2.978 \times 10^3 \text{ W}$$

Ya que la eficiencia térmica del colector solar es del 40%, la potencia necesaria de dicho colector solar será:

$$N_a := \frac{N_a}{0.4}$$

$$N_a = 7.445 \times 10^3 \text{ W}$$

La cantidad de energía solar que tendrá que llegar a la superficie del colector solar, para producir el calentamiento medio diario que se desea es:

$$E_c := N_a \cdot 3600 \cdot 24$$

$$E_c = 6.432 \times 10^8 \text{ J}$$

Como la radiación solar media diaria $R = 11250665.85 \text{ J}$; la absorptancia de la placa absorbidora es 0.95 y la transmitancia del vidrio 0.9 entonces

$$I := 9619319.85 \text{ J} \quad \text{Radiación solar absorbida por el colector.}$$

El área de colector solar aproximada es:

$$A := \frac{E_c}{I}$$

$$A = 66.87 \text{ m}^2$$

Se han analizado dos opciones de colector solar el primero corresponde a un colector solar de placa corrugada V, y el segundo es un colector solar de placa plana.

Cálculo del flujo de aire de secado.

El flujo de aire que se recomienda para el proceso de secado a estas temperaturas es superior a $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ aire/s.kg}^1$ de granos.

$$f_a := 0.00022 \frac{\text{m}^3_{\text{aire}}}{\text{s}}$$

$$Q_v := f_a \cdot m_{\text{cacao}}$$

$$Q_v = 0.11 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

¹ [12]

Para calcular la potencia útil del ventilador se suele aumentar el flujo de aire en cerca de un 25%, por razones de seguridad. Por lo tanto el caudal volumétrico Q_v será:

$$Q_v := 0.2 \cdot Q_v + Q_v$$

$$Q_v = 0.132 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con este caudal volumétrico sabemos que se requiere un ventilador de 280 C.F.M. En la sección anexos A 5.4.2.1 se puede observar la selección del ventilador.

$$290 \text{ C.F.M} = 0.135 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_v := 0.135 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\delta_{\text{aire}} := 1.168 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire}^1$$

$$M_a := Q_v \cdot \delta_{\text{aire}}$$

$$M_a = 0.158 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Caudal másico de aire.}$$

¹ [9]

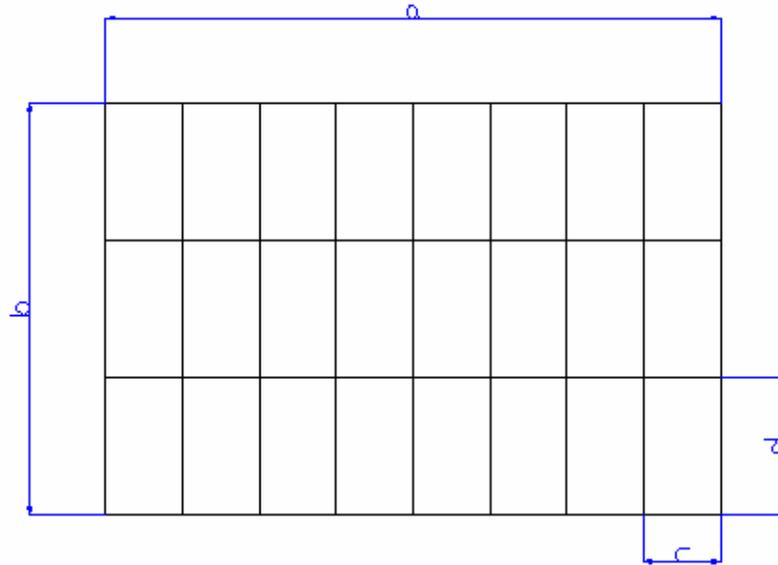


Figura 5.6 Banco de colectores solares

El área de cada colector es de 1.8 m^2 (Largo = 1.8 m , Ancho = 1 m) se estima que se podría utilizar 24 colectores de estas características para una área de colección de 43.2 m^2 ; los colectores estarán ubicados en 8 arreglos de 3 colectores cada uno, como se mostró en el esquema.

$A_c := 43.2 \text{ m}^2$ Área de colección.

$$m_a := \frac{M_a}{A_c}$$

$$m_a = 3.65 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \text{ Flujo másico por unidad de superficie de colección}$$

Opción 1.- Colectores con placa corrugada en V

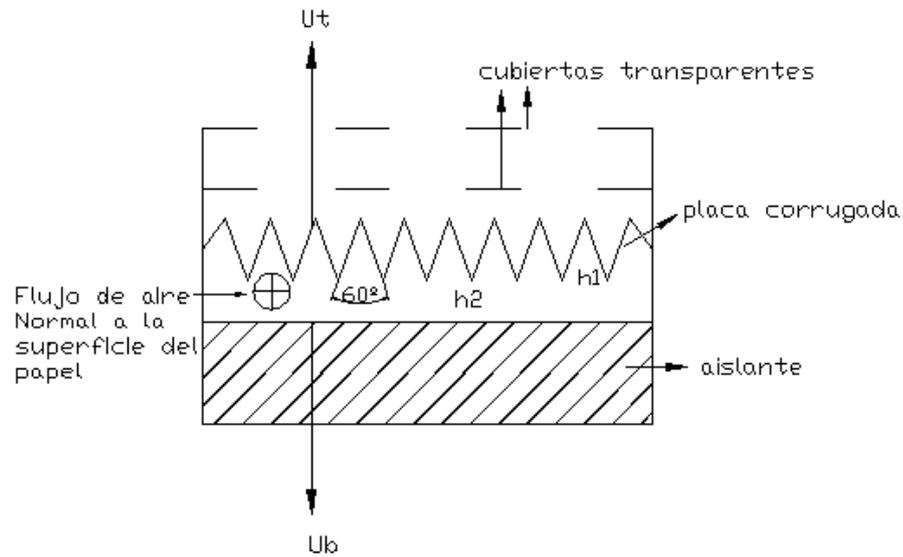


Figura 5.7 Colector con placa corrugada en V

El espacio disponible en el ducto es de 40 mm, por lo tanto la altura equivalente para este tipo de colector será $b = 20$ mm.

Para saber que tipo de flujo es, ya sea laminar o turbulento, debemos calcular el número de Reynolds.

$L_c := 1.8$ m Longitud del colector

$anc := 1$ m Ancho del colector

$b := 0.020$ m Espacio por donde fluye el aire

$A_x := anc \cdot b$

$A_x = 0.02$ m²

$P := 2(anc + b)$

$P = 2.04$ m

$$Dh := 4 \cdot \frac{Ax}{P}$$

$$Dh = 0.039 \text{ m}$$

$$L := 3 \cdot Lc \quad \text{Longitud del arreglo de colectores (3)}$$

$$L = 5.4 \text{ m}$$

$$\mu a := 1.839 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

$$Ka := 0.026 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica del fluido.}$$

$$Kais := 0.026 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \quad \text{Coeficiente de conductividad térmica del Poliuretano}$$

$$Pr := 0.7074 \quad \text{Número de Prandtl}$$

$$Re := \frac{Ma \cdot Dh}{Ax \cdot \mu a}$$

$$Re = 1.681 \times 10^4$$

Característica del flujo de acuerdo al número de Reynolds: Turbulento, completamente desarrollado, $0.5 < Pr < 2000$, $3000 < Re < 5 \times 10^6$, $L/D > 10$

Coeficiente de transferencia hf

$$f := (0.790 \cdot \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad \text{Ecuación de Petukhov}^1 \text{ para: } 3000 < Re < 5 \times 10^6$$

$$f = 0.027$$

¹ [9]

$$\text{Nu} := 0.03 \cdot \text{Re}^{0.74} + 0.788 \cdot \text{Re}^{0.74} \cdot \frac{b}{L_c}$$

$$\text{Nu} = 51.915$$

$$h_f := \frac{(K_a \cdot \text{Nu})}{D_h}$$

$$h_f = 34.42 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Cálculo de la caída de presión a través del arreglo de 3 colectores¹.

$$\mathbf{R} = \mathbf{GD}_h/\boldsymbol{\mu}$$

$$G := \frac{\text{Re} \cdot \mu a}{D_h}$$

$$G = 7.884 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$P_1 := 101325 \text{ Pa} \quad \text{Presión Atmosférica.}$$

$$P_2 := \left[1 - \left(\frac{G^2}{\delta_{\text{aire}} \cdot P_1} \right) \cdot \left(0 + \frac{f \cdot L}{D_h} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot P_1$$

$$P_2 = 1.01225 \times 10^5 \text{ Pa}$$

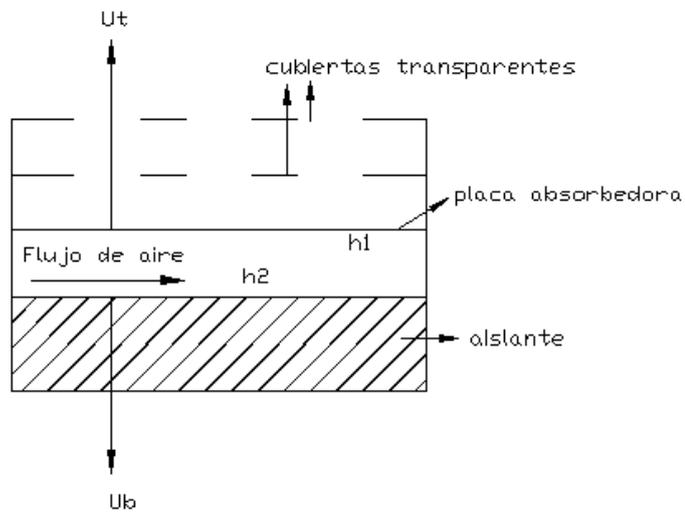
$$\Delta P := P_1 - P_2$$

$$\Delta P = 100.265 \text{ Pa}$$

Por lo tanto tenemos una caída de presión de 100.265 Pa en el arreglo de colectores con placa corrugada V.

¹[13]

Opción 2.- Colectores con placa plana



El espacio disponible en el ducto es de 40 mm, por lo tanto $b = 40 \text{ mm}$

$$b := 0.04 \text{ m}$$

$$A_x := a_{nc} \cdot b$$

$$A_x = 0.04 \text{ m}^2$$

$$P := 2(a_{nc} + b)$$

$$P = 2.08 \text{ m}$$

$$D_h := 4 \cdot \frac{A_x}{P}$$

$$D_h = 0.077 \text{ m}$$

$$L := 3 \cdot L_c$$

$$L = 5.4 \text{ m}$$

$$\mu_a := 1.839 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

$$Ka := 0.026 \frac{W}{m \cdot C}$$

$$Pr := 0.7074$$

$$Re := \frac{Ma \cdot Dh}{Ax \cdot \mu a}$$

$$Re = 1.649 \times 10^4$$

Coeficiente de transferencia de calor hf

$$f := (0.790 \cdot \ln(Re) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.027$$

$$Nu := 0.03 \cdot Re^{0.74} + 0.788 \cdot Re^{0.74} \cdot \frac{b}{Lc}$$

$$Nu = 62.736$$

$$hf := \frac{(Ka \cdot Nu)}{Dh}$$

$$hf = 21.205 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Cálculo de la caída de presión:

$$G := \frac{Re \cdot \mu a}{Dh}$$

$$G = 3.942 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

$$P1 := 101325 \text{ Pa}$$

$$P2 := \left[1 - \left(\frac{G^2}{\delta_{\text{aire}} \cdot P1} \right) \cdot \left(0 + \frac{f \cdot L}{Dh} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot P1$$

$$P2 = 1.01312 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Delta P := P1 - P2$$

$$\Delta P = 12.838 \text{ Pa}$$

Debido a que la caída de presión en un colector de placa plana es alrededor del 85% menor a la que se produce en un colector de placa corrugada tipo V, se utilizará colectores solares tipo placa plana.

Para diseñar los colectores solares planos, se realizará el cálculo de los diferentes parámetros inmersos en el funcionamiento de cada uno colectores que forman parte de cada arreglo.

Primer colector del arreglo de 3 colectores.

Propiedades del aire a la temperatura ambiente (22.8 ° C)

Ta := 22.8 °C Temperatura mínima registrada por el INAMHI

$$Ta := Ta + 273.15 \text{ K}$$

$$Ta = 295.95$$

$$\delta_a := 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ Densidad de aire}$$

$$\mu_a := 1.826 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \text{ Viscosidad dinámica}$$

$$Ka := 0.026 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \text{ Conductividad térmica}$$

$$C_{pa} := 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \text{ Calor específico a presión constante}$$

$$\text{Pr} := 0.7081 \text{ Número de Prandtl}$$

$$\text{Re} := \frac{\text{Ma} \cdot \text{Dh}}{\text{Ax} \cdot \mu_a}$$

$$\text{Re} = 1.661 \times 10^4$$

$$f := (0.790 \cdot \ln(\text{Re}) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.027$$

$$\text{Nu} := 0.03 \cdot \text{Re}^{0.74} + 0.788 \cdot \text{Re}^{0.74} \cdot \frac{b}{L_c}$$

$$\text{Nu} = 63.066$$

$$h_f := \frac{(\text{Ka} \cdot \text{Nu})}{\text{Dh}}$$

$$h_f = 21.316 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Propiedades y características de la placa absorbadora¹:

Material: Aluminio

$$\delta_{al} := 2770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ Densidad del aluminio}$$

$$L_p := 1.8 \text{ m} \quad \text{Longitud de la placa}$$

$$a_p := 1 \text{ m} \quad \text{Ancho de la placa}$$

¹ [9]

$esp := 0.001 \text{ m}$ Espesor de la placa (1 mm)

$Vp := Lp \cdot ap \cdot esp$

$Vp = 1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ Volumen de la placa absorbadora

$mp := \delta al \cdot Vp$

$mp = 4.986 \text{ kg}$

Masa de la placa absorbadora

$Cpp := 875 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ Calor específico del Aluminio

$\tau := 0.9$ Transmitancia del vidrio

$\alpha := 0.95$ Absortancia de la placa colectora

$\epsilon p := 0.92$ Emitancia de la placa absorbadora

$\epsilon g := 0.88$ Emitancia de la cubierta transparente

$R := 3.125 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2}$ Radiación mínima registrada por el INAMHI.

$I := R \cdot \tau \cdot \alpha$

$I = 2.672 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2}$ Radiación disponible en el colector

$Ac := 1.8 \text{ m}^2$ Área del colector

$tT := 2.00 \text{ h}$ Horas mínimas de sol efectivas registradas por el INAMHI.

$$W_v := 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ Velocidad del viento -INAMHI}$$

$$h_w := 5.7 + 3.8 \cdot W_v$$

$$h_w = 17.1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{ Coeficiente de transferencia de calor del viento}$$

Temperatura de la placa¹:

$$T_p := \frac{\frac{m_p \cdot C_{pp} \cdot T_a}{3600 \cdot 1000} + A_c \cdot I + \frac{A_c \cdot t_T \cdot (h_f + h_w) \cdot T_a}{1000}}{\frac{m_p \cdot C_{pp}}{3600 \cdot 1000} + \frac{A_c \cdot (h_w + h_f) \cdot t_T}{1000}}$$

$$T_p = 330.423 \text{ K}$$

Cálculo de las pérdidas superiores.

$N := 2$ Número de cubiertas transparentes

$$\sigma := 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \text{ Constante de radiación de Stefan Boltzmann}$$

$\beta := 0^\circ$ Inclinación de los colectores

$$f := (1 + 0.089 \cdot h_w - 0.1166 \cdot h_w \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0.07866 \cdot N)$$

$$f = 0.796$$

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

$$C = 520$$

$$e := 0.43 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_p}\right)$$

¹ [10]

$$e = 0.3$$

Ecuación desarrollada por Klein (1979).

$$U_t := \left[\frac{1}{hw} + \frac{N}{\frac{C}{T_p} \cdot \left[\frac{(T_p - T_a)}{N + f} \right]^e} \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_p + T_a) \cdot [(T_p)^2 + (T_a)^2]}{(\varepsilon_p + 0.00591 \cdot N \cdot hw)^{-1} + (2 \cdot N + f - 1 + 0.133 \cdot \varepsilon_p) \cdot \frac{1}{\varepsilon_g} - N}$$

$$U_t = 3.613 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Cálculo de las pérdidas posteriores

Laps := 0.06 m Longitud del aislamiento posterior

$$U_b := \frac{K_{ais}}{Laps}$$

$$U_b = 0.4333 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Cálculo de las pérdidas totales

$$U_I := U_t + U_b$$

$$U_I = 4.046 \frac{W}{m^2 \cdot K} \text{ Coeficiente de pérdidas totales}$$

Determinación del factor de eficiencia del colector F'

$$h_r := \frac{4\sigma \cdot (T_p)^3}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1}$$

$$h_r = 6.688 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$F' := \left[1 + \frac{UI}{hf + \left[\left(\frac{1}{hf} \right) + \left(\frac{1}{hr} \right) \right]^{-1}} \right]^{-1}$$

$F' = 0.8671$ Factor de eficiencia del colector

$$F'' := \frac{Ma \cdot Cpa}{Ac \cdot UI \cdot F'} \cdot \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{Ac \cdot UI \cdot F'}{Ma \cdot Cpa} \right) \right] \right]$$

$F'' = 0.9804$ Factor de flujo del colector

$$Fr := F'' \cdot F'$$

$Fr = 0.8501$ Factor de remoción de calor

T_i es equivalente $(T_a + T_p)/2$ siendo este un valor asumido ya que no podríamos suponer que $T_i = T_a$

$$T_i := \frac{T_a + T_p}{2}$$

$T_i = 313.187$ K

$$Q_u := Ac \cdot Fr \cdot \left[I - \frac{UI \cdot (T_i - T_a)}{1000} \right] \cdot t_T$$

$Q_u = 3.875$ kWh

$$\eta_c := \frac{Q_u}{R \cdot Ac}$$

$\eta_c = 0.69$

$$T_p := T_a + \left(\frac{Q_u \cdot 1000}{Ac \cdot UI \cdot Fr} \right) \cdot (1 - Fr)$$

$$T_p = 389.759 \text{ K}$$

Temperatura de salida del fluido, T_s , luego de haber atravesado el primer colector solar.

$$T_s := T_a + \left(\frac{\frac{Q_u \cdot 1000}{A_c}}{U_l \cdot F_r} \right) \cdot (1 - F'')$$

$$T_s = 308.233 \text{ K}$$

Para que los valores sean confiables se ha realizado varias iteraciones con el objetivo de que la temperatura del fluido se mantenga constante hasta la primera cifra decimal. En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 5.4 Temperatura de salida del aire

Temperatura de salida (K)	Temperatura de salida (° C)	Número de colector	Número de iteraciones
306.8	33.65	1	4
317	43.85	2	4
327.1	53.95	3	4

Fuente: J. P. Maureira

El banco de colectores formado está constituido por 8 arreglos los que a su vez se forman de 3 colectores solares. Al aumentar la temperatura del aire varía su densidad y por consiguiente la caída de presión a lo largo de cada arreglo, por lo tanto la volvemos a calcular:

Cálculo de la caída de presión:

$$G := \frac{Re \cdot \mu_a}{D_h}$$

$$G = 3.942 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$P1 := 101325 \text{ Pa}$$

$$L = 5.4 \text{ m}$$

$$P2 := \left[1 - \left(\frac{G^2}{\delta_{\text{aire}} \cdot P1} \right) \cdot \left(0 + \frac{f \cdot L}{Dh} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot P1$$

$$P2 = 1.01312 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Delta P := P1 - P2$$

$$\Delta P = 12.98 \text{ Pa}$$

A continuación se muestran los resultados alcanzados en cada arreglo.

Tabla 5.5 Resultados alcanzados en cada arreglo de colectores

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Calor útil	Qu	11.6	MJ
Eficiencia	η	48	%
Temperatura de secado	Ts	54.5	°C
Caudal volumétrico	Qv	290	CFM
Caída de presión	ΔP	13	Pa

Fuente: J. P. Maureira

En la siguiente tabla se observa los resultados alcanzados en el banco de colectores.

Tabla 5.6 Resultados alcanzados para el banco de colectores solares

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Calor útil	Qu	92.7	MJ
Eficiencia	η	48	%
Temperatura de secado	Ts	54.5	°C
Caudal volumétrico	Qv	290	CFM
Caída de presión	ΔP	104	Pa

Fuente: J. P. Maureira

Ya que la caída de presión que se produce a lo largo del banco de colectores solares es inferior a la presión de trabajo del ventilador seleccionado, este se mantiene.

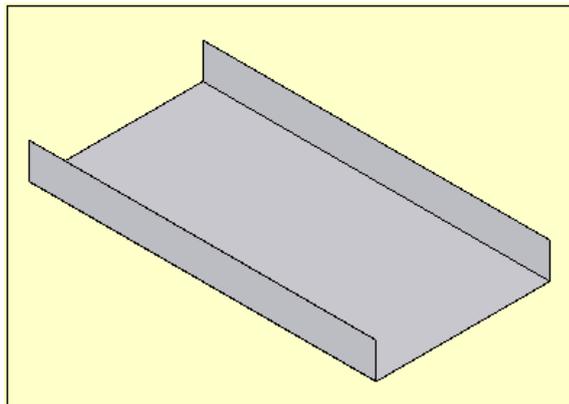
Para que la distribución del aire caliente sea la misma en la cámara de secado se utilizará dos ventiladores de iguales características.

5.4.3 PLANOS CONSTRUCTIVOS

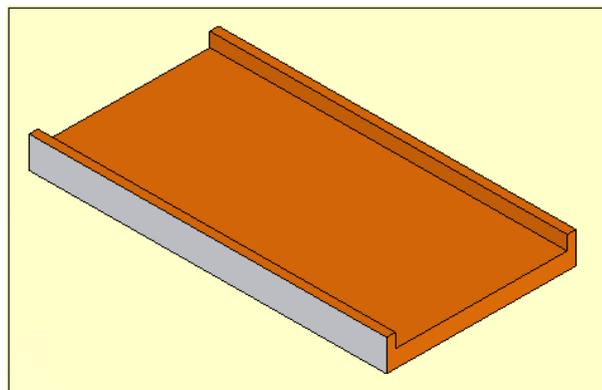
Los planos del colector solar y los elementos que lo constituyen se encuentran en la sección de Anexos A 5.4.3.1

5.4.4 MONTAJE

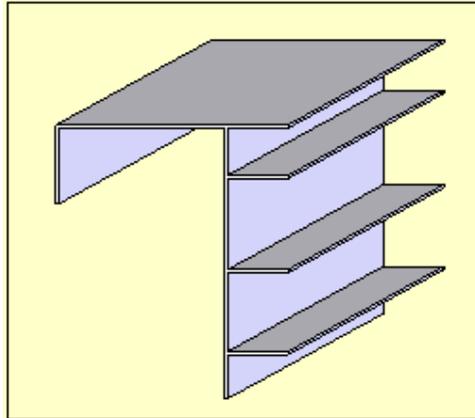
1. La caja del colector solar estará construida de Acero al Carbono A36 de 1mm de espesor.



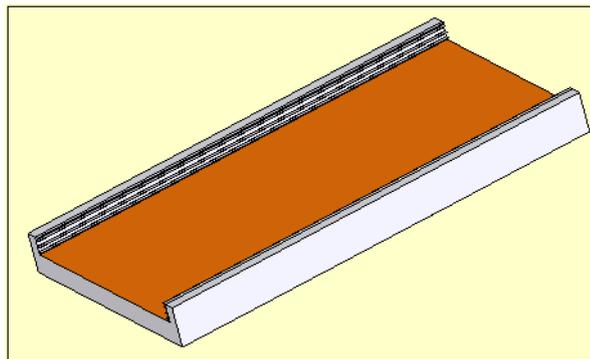
2. Se procede a colocar el aislante térmico en las paredes de la caja.



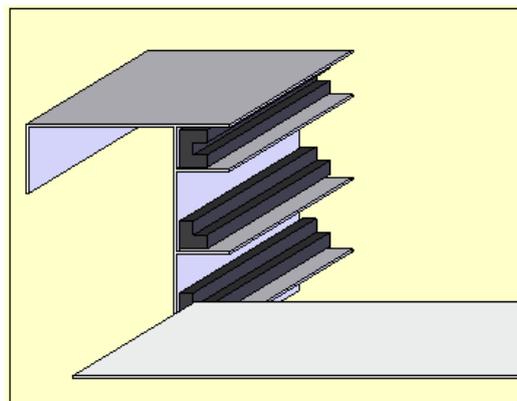
3. A continuación se cubre el aislante térmico de las paredes laterales con una placa de acero al carbono en la que se encuentran las guías para el montaje de las cubiertas transparentes, y placa absorbedora.

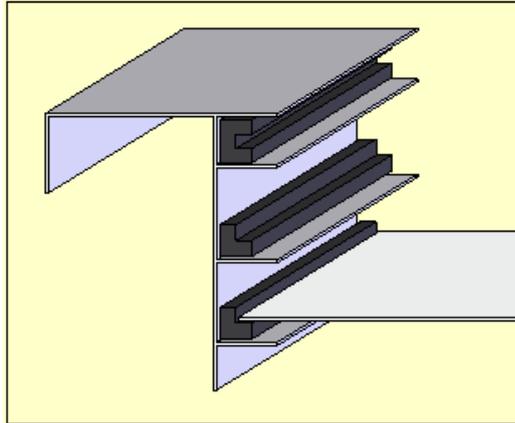


4. Mediante un proceso de remachado se ensamblan las guías a la caja.

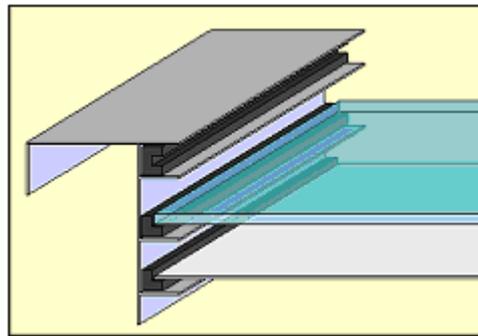


5. Se coloca la placa absorbedora sobre la guía inferior.

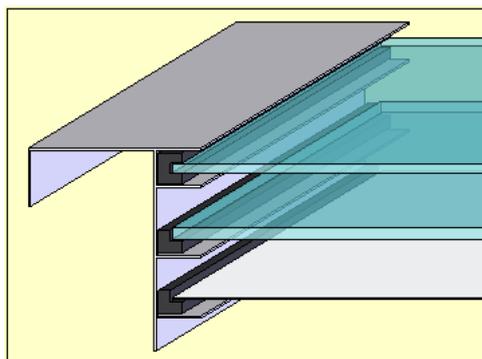




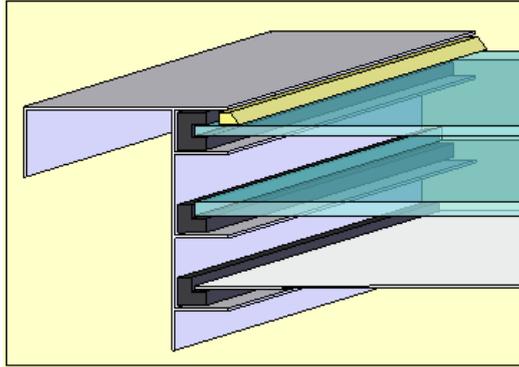
6. Se coloca la primera cubierta transparente sobre la guía de la parte intermedia.



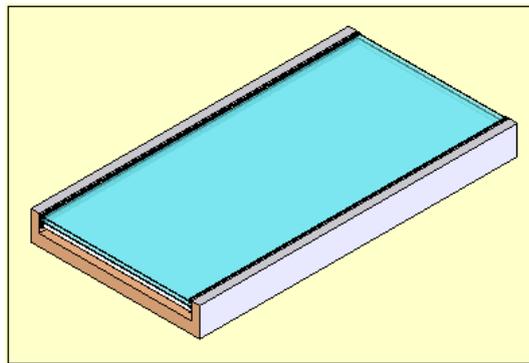
7. Se coloca la segunda cubierta transparente sobre la primera guía.



8. Entre la cubierta superior y la caja se debe aplicar un sellador primario. Para que la humedad del ambiente o posiblemente agua lluvia no penetren al colector.



9. Finalmente se tiene un colector solar 1.8 x 1 m.



10. Al realizar el montaje de cada arreglo de colectores se debe tener especial cuidado de sellar herméticamente las uniones entre ellos mediante silicón.

11. Los colectores solares deberán ir montados en la estructura diseñada para ello.

5.4.5 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

El Mantenimiento Preventivo, consiste en realizar operaciones de inspección visual, que aplicadas a la instalación deben mantener dentro de los límites aceptables las condiciones de funcionamiento, prestaciones, protección y durabilidad de la instalación.

Las operaciones de mantenimiento preventivo deben realizarse por personal que trabaje en la productora de cacao, claro está que antes de realizar este mantenimiento el personal encargado debe recibir las indicaciones y conocimientos necesarios para que identifique con facilidad los elementos constitutivos del colector solar. Estas operaciones se llevarán a cabo con

carácter periódico, prestando especial atención a los componentes que puedan sufrir degradación.

Además de la inspección visual el personal encargado de estas labores deberá realizar la limpieza de la cubierta transparente que se encuentra expuesta directamente al ambiente, es recomendable realizar esta operación al inicio de la jornada laboral (diariamente).

Dentro del Mantenimiento Correctivo se encuentran las operaciones de reparación, sustitución y otras que aplicadas a la instalación deben permitir su funcionamiento normal dentro de los límites preestablecidos.

Estas operaciones serán llevadas a cabo con carácter prioritario y en el menor tiempo posible tras el aviso del operador. El operador deberá tener muy en cuenta el funcionamiento del colector solar (sistema de control). En el momento que se produzca una variación considerable será el aviso para la realización del mantenimiento correctivo.

Se enumeran algunos de los fallos más comunes:

- Humedad o condensaciones dentro del colector
- Baja producción del sistema
- Aparición de oxidaciones en la caja
- Deterioro del aislante térmico

Debido que las temperaturas mínimas registradas en la provincia de Guayas se encuentran en 22.8 °C prácticamente no se requiere efectuar ninguna labor operativa sobre el banco de colectores solares. Para climas severos, con temperaturas menores al del punto de congelación se utilizan otros tipos de colectores.

El sistema de ventilación debe ser encendido al inicio de la jornada laboral y será apagado en las noches cuando la humedad del grano sea inferior al 16%.

5.4.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Se requieren 24 colectores solares de 1.8 x 1 m, los mismos que formaran 8 arreglos y cada arreglo estará constituido por 3 colectores solares conectados en serie.

El calor útil promedio que entregará cada arreglo de colectores será de 3.22 kWh, ya que el banco de colectores está formado por 8 arreglos, entonces todo el sistema entregará un promedio de 25.7 kWh

La caída de presión dentro del colector solar de placa plana aumenta a medida que el espacio por donde fluye el aire disminuye, como se puede observar en la siguiente figura, por lo tanto el espacio seleccionado para el flujo de aire es de 40 mm, al seleccionarse un espacio superior para el flujo de aire la inversión económica aumentará ya que se requeriría un ventilador de mayor potencia.

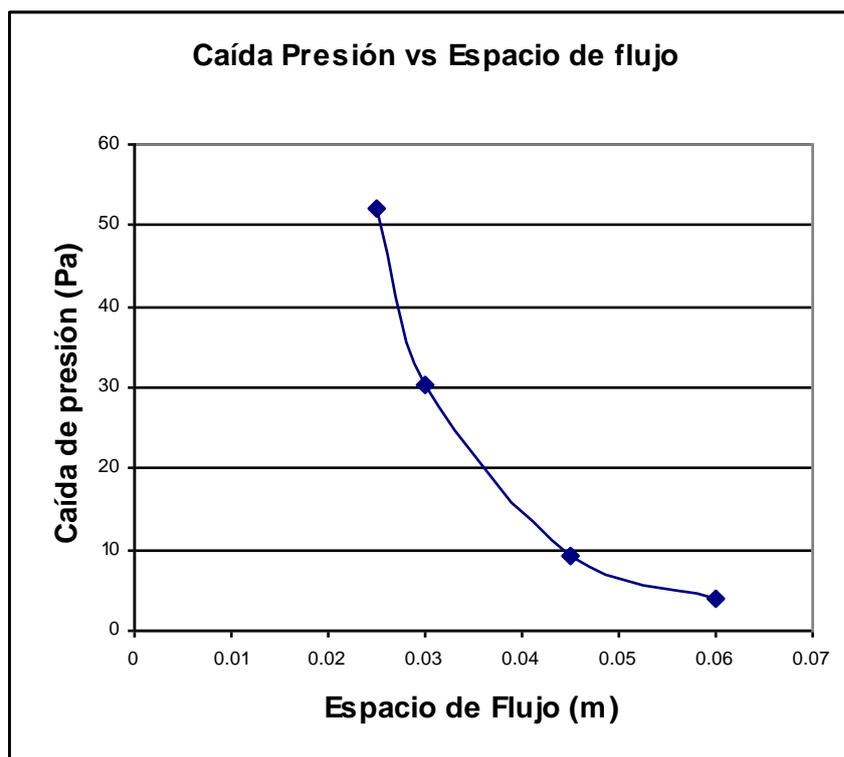


Figura 5.8 Caída de Presión vs Espacio de flujo

Al analizar la temperatura de salida del aire de acuerdo al espacio por donde este fluye y variando el número de cubiertas transparentes que el colector

posee se tiene: con tres cubiertas transparentes la temperatura de salida del aire es superior en 4° C al compararla con la temperatura alcanzada por un colector de 2 cubiertas transparentes. Desde el punto de vista económico la inversión a realizarse en la construcción de la tercera cubierta transparente no se justifica, además la temperatura que se requiere para el proceso de secado es de 50. La opción más acorde con las necesidades existentes es un colector solar de 2 cubiertas transparentes

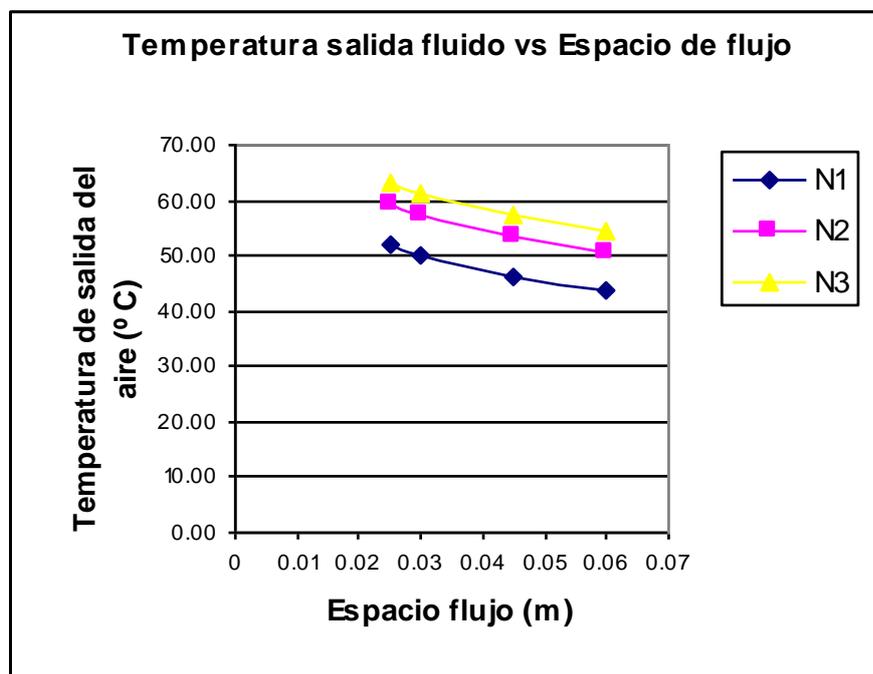


Figura 5.9 Temperatura de salida fluido vs Espacio de flujo

Las pérdidas totales disminuyen a medida que el número de cubiertas transparentes aumenta y el espacio por donde fluye el aire disminuye, por lo conocido se puede decir que la mejor opción es el colector solar de placa plana con 2 cubiertas transparentes y con un espacio de flujo de 40 mm.

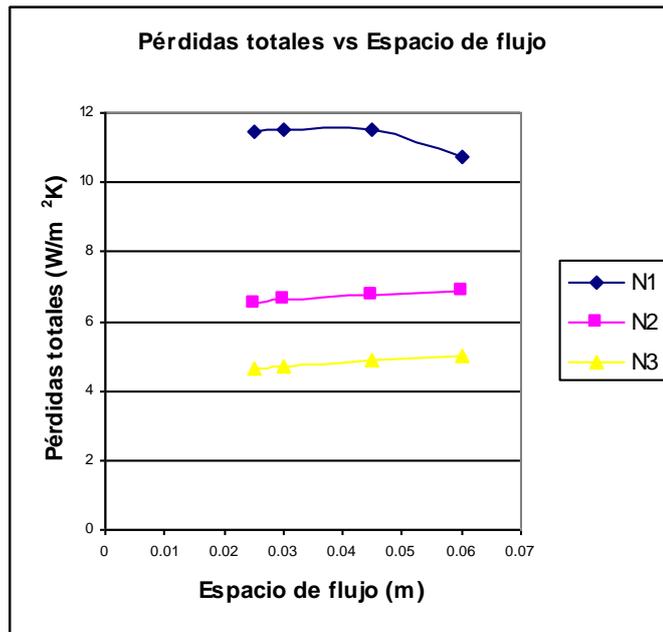


Figura 5.10 Perdidas totales vs Espacio de flujo

El espesor del aislante térmico influye la eficiencia del colector solar, mientras este aumenta el calor útil, y la temperatura también lo hacen, pero esto sucede de igual manera con su costo y el peso del material. Mientras que las pérdidas totales disminuyen. En las próximas figuras se puede observar la variación de algunos parámetros de acuerdo al espesor del aislante térmico.

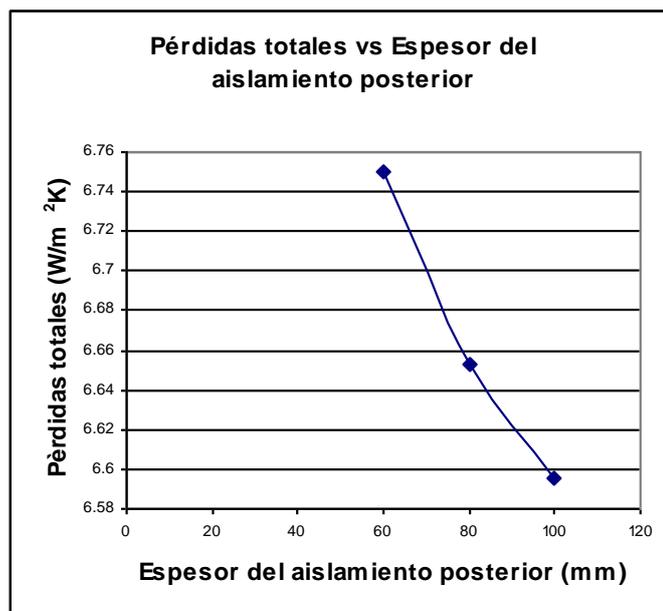


Figura 5.11 Perdidas totales vs Espesor del aislamiento posterior

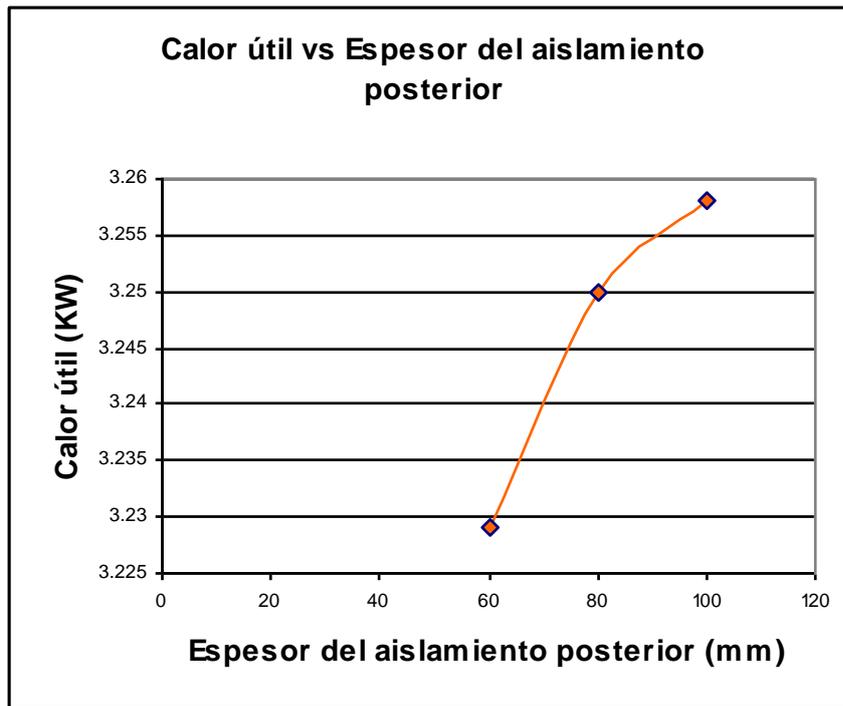


Figura 5.12 Calor útil vs Espesor del aislamiento posterior

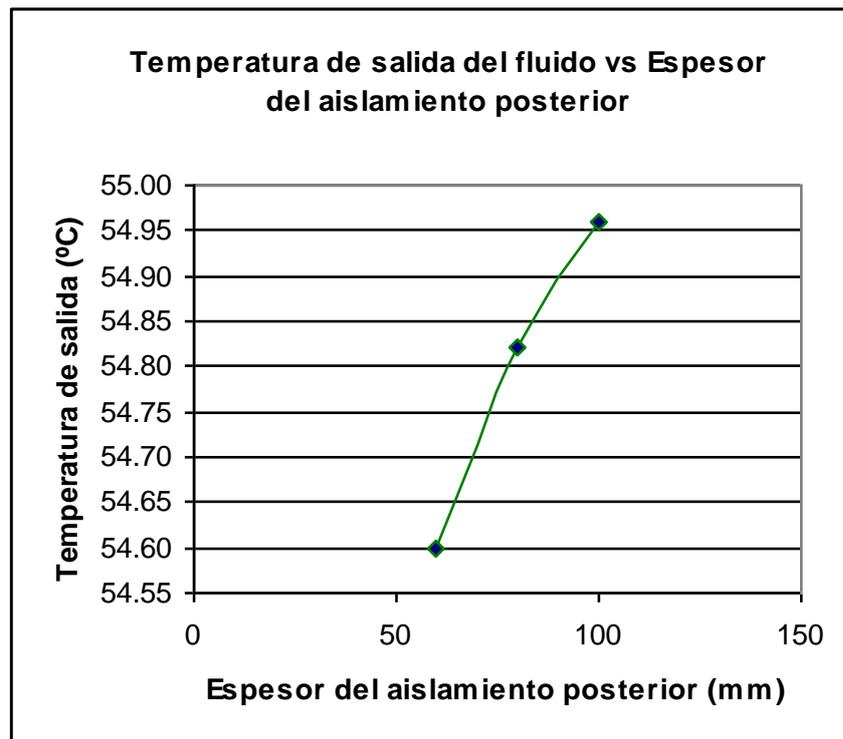


Figura 5.13 Temperatura de salida vs Espesor del aislamiento posterior

De lo mostrado en los gráficos y comparando el aislante térmico de 100 y 60 mm de espesor tenemos: las pérdidas totales aumentan 2.3%, el calor útil disminuye 0.8% y la temperatura del fluido disminuye menos de 0.7%. Por lo tanto el espesor posterior utilizado es de 60 mm.

Como la energía solar es variable por naturaleza debido a los movimientos de rotación y traslación de la tierra y también debido a las condiciones meteorológicas del lugar se sugiere la utilización de un sistema de acumulación de energía.

Para la construcción de los colectores solares se utilizarán materiales existentes en el mercado o que sean fáciles de adquirir. Estos materiales tales como: vidrio blanco, aluminio, poliuretano posiblemente no tendrán las características idénticas a los tomados en cuenta en este trabajo, debido que los aquí utilizados provienen de bibliografía especializada. Esta diferencia no representa un problema ni tampoco una variación significativa para el funcionamiento y eficiencia esperados del sistema.

Entre los materiales más utilizados para las juntas y selladores del colector solar tenemos: Caucho natural, Butilo, Nitrilo, Elastómeros de Neopreno, Silicón, Acrílicos, Polisulfuros.

El rendimiento térmico de un colector solar puede ser determinado de dos formas. Una consiste en probarlo bajo distintas condiciones lo cual es una tarea extensa y costosa, la otra y la más recomendable es elegir condiciones estándar y extrapolar matemáticamente los resultados. De esta manera se puede determinar la eficiencia del colector en diversas condiciones.

La American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) patrocinó el desarrollo de un método de prueba estandarizado para colectores solares, el mismo que es aceptado en la industria de la energía solar. Denominado ASHRAE STANDARD 93-77: Métodos de Prueba para Determinar el Rendimiento térmico de los Colectores Solares.

5.5 ALMACENAMIENTO

Los sistemas de captación solar son activos y pasivos. Se denominan sistemas activos ya que captan la radiación solar por medio de un "colector" y el fluido de trabajo se encuentra en movimiento forzadamente. Mientras que un diseño pasivo es un sistema que capta la energía solar, la almacena y la distribuye de forma natural, sin mediación de elementos mecánicos. Sus principios están basados en las características de los materiales empleados y en la utilización de fenómenos naturales de circulación del aire.

La masa térmica se encuentra constituida por los elementos estructurales del edificio o por algún material acumulador específico (agua, tierra, piedras), en este caso nos centraremos en el estudio de las rocas como acumulador específico; siendo la misión de estas almacenar la energía captada.

5.5.1 SISTEMAS ACTIVOS

La característica principal de los sistemas activos es que estos utilizan un fluido de trabajo en movimiento que puede ser agua, aire, aceites o algún otro fluido. Los principales componentes que intervienen en estos sistemas son: el colector solar, la unidad de almacenamiento, sistemas de conversión y control y el lugar donde se hace la descarga de energía.

Generalmente, el medio de almacenamiento es agua si por el colector se hace circular un líquido. Similarmente, si en el colector circula aire, el medio de almacenamiento serán rocas o piedras.

Las temperaturas alcanzadas en este tipo de sistemas fluctúan entre los 30 y 100 °C. En este caso el almacenamiento de energía se puede dar por medio de los siguientes mecanismos: calor sensible, cambio de fase, reacciones químicas y estanques solares. A continuación se describe los mecanismos de almacenamiento de calor:

- En forma de calor sensible, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso.
- En forma de calor latente, como el calor de fusión en sistemas químicos.

- En forma de calor sensible y latente, en el que el calor almacenado entraña una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido o líquido); la restitución del calor corresponde al cambio de estado inverso.
- En forma de energía química originada en algunas reacciones químicas.
- En forma de energía mecánica que se puede transformar en energía potencial mediante el almacenamiento de fluidos a ciertas alturas.
- En forma de sustancias obtenidas en procesos solares no energéticos, como el agua destilada en un alambique solar que se puede almacenar en depósitos para su utilización posterior.

Las características principales de un sistema de almacenamiento de energía térmica son:

- Su capacidad por unidad de peso o de volumen.
- El campo de temperaturas dentro del cual funciona, es decir, la temperatura a la que se aplica y se extrae calor del sistema.
- Los medios para aplicar y extraer calor y las diferencias de temperatura asociadas con ellos.
- Las necesidades energéticas para añadir o extraer calor.
- Los contenedores, depósitos y otros elementos estructurales asociados con el sistema de almacenamiento.
- Los medios para controlar las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento.
- Su coste.

La temperatura del colector, que es la que determina su ganancia útil, es más alta que la temperatura a la cual se utiliza el calor, debido a la suma de una serie de incrementos como consecuencia de las pérdidas, por lo que uno de los objetivos del diseño general del sistema y sobre todo de la unidad de almacenamiento, es el reducir al mínimo estas caídas de temperatura.

5.5.2 ALMACENAMIENTO DE CALOR EN LECHO DE ROCAS

Básicamente un lecho de piedra es un contenedor en donde se colocan piedras de pequeño tamaño y conductos de entrada y salida de aire. En los lechos

convencionales el flujo de aire se mantiene en un sentido durante la carga y en sentido opuesto durante la descarga, con el propósito de aprovechar la estratificación de temperatura dentro de los mismos.

Las rocas son un buen medio de almacenamiento. En sistemas activos, generalmente se usa lechos de piedra bajo tierra o lechos empaquetados. El aire es el fluido de trabajo que remueve o adiciona el calor de la unidad de almacenamiento. En este caso, el calor por lo general no puede ser adicionado y removido al mismo tiempo.

Aunque las rocas no tienen un calor específico alto, son buenos como medio de almacenamiento debido a que tienen una gran densidad, bajo costo, conductividad térmica baja y no tienen problemas de corrosión.

Para este caso mostramos algunos materiales usados en la construcción y sus características en la tabla 5.7

- Tambores de acero llenados agua y apilados.
- Ladrillo, piedra, o paredes de adobes.
- Losa de concreto encima de una cama de rocas.
- Compartimiento o pila floja de rocas.
- Pared y piso de losa.

Tabla 5.7 Densidad y calor específico

MATERIAL	DENSIDAD kg/m ³	CALOR ESPECÍFICO kJ/kg°C
Agua	1000	4.186
Acero	7853	0.500
Roca o piedra	2724	0.880
Concreto	2244	0.960
Ladrillo	2244	0.840
Arena	1522	0.800
Pino o abeto	433	2.800
Arcilla	1010	0.920

Fuente: ITESO – Energía Solar

Diversos tipos de materiales líquidos, sólidos y combinaciones de líquidos y sólidos, pueden almacenar energía por cambios de temperatura. Esta energía almacenada es igual al cambio de energía interna (ΔU) que sufre el material al cambiar su temperatura y viene a ser igual al calor sensible (Q_s) que se representa por la ecuación (5.30). Así:

$$\Delta U = Q_s = mC_p\Delta T \quad (5.30)$$

Según la ecuación anterior, la capacidad de almacenamiento depende específicamente de las capacidades caloríficas (mC_p) de los materiales utilizados y de los cambios de temperatura (ΔT) que en ellos se den. Esta ecuación también puede quedar en función de la capacidad volumétrica (C_v), de manera que:

$$Q_s = \Delta U = V \cdot C_v \cdot \Delta T \quad (5.31)$$

Donde

$$C_v = \delta \cdot C_p \quad (5.32)$$

Y (V) el Volumen del material utilizado se lo determina dividiendo la capacidad de almacenamiento térmica del material entre la capacidad volumétrica encontrada. O se lo puede seleccionar de acuerdo al espacio disponible para su ubicación.

$$V = \frac{CAT}{C_v} \quad (5.33)$$

De gran importancia es el diferencial de temperatura entre el lecho de rocas y el fluido, para determinar si este diferencial influirá en el funcionamiento del acumulador, se debe calcular el número de Biot, Duffie¹ (1991) en su obra Ingeniería solar de procesos térmicos (Solar Engineering of Thermal Processes) plantea la forma de realizar este cálculo.

¹ [6]

Primero se debe tener un diámetro promedio de las rocas , D , la fracción de agujeros de estas, ε , el factor de forma superficial de área, α , así cómo también la densidad , δ , calor específico, C_p , conductividad térmica, K , de las rocas y del aire y la velocidad del aire.

La fracción de agujeros existentes en las rocas (ε) se puede determinar experimentalmente pesando las rocas en un contenedor de Volumen (V) antes y después de llenarlo con agua, siendo esta fracción de agujeros igual a:

$$\varepsilon = \frac{m_w / \delta_w}{V} \quad (5.34)$$

Donde m_w es la masa de agua y δ_w su densidad. Con estos datos procedemos a calcular la velocidad másica superficial, G , que es igual a la velocidad por la densidad del aire.

$$G = V \cdot \delta \quad (5.35)$$

Mediante la expresión de Löff and Hawley (1948), determinamos el coeficiente de transferencia de calor volumétrico, h_v , en lechos de rocas.

$$h_v := 650 \cdot \left(\frac{G}{D} \right)^{0.7} \quad (5.36)$$

A continuación se calcula el coeficiente de transferencia de calor por unidad de área en lechos de rocas, h .

$$h := \frac{h_v}{6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\alpha}{D}} \quad (5.37)$$

Y por último se determina el número de Biot, que no es más que la medida de la caída de temperatura en el sólido en relación con la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido cuyo valor debe ser inferior a 0.1 para que la distribución de temperaturas sea uniforme.

$$Bi := \frac{h \cdot \frac{D}{2}}{K} \quad (5.38)$$

5.5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL LECHO DE ROCAS

El volumen del lecho en este caso se escoge de acuerdo al espacio disponible que existe en el secador. Y se encontrará formado por seis contenedores de 1.05 x 0.9 x 0.8 m.

Material: Rocas de río¹

$$V_{\text{lecho}} := 4.54 \text{ m}^3$$

$$\delta_{\text{roca}} := 2724 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad de la roca.}$$

$$C_{\text{proca}} := 0.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad \text{Calor específico de la roca}$$

$$T_{\text{il}} := 22.8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura inicial del lecho}$$

$$T_{\text{fl}} := 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura final del lecho}$$

$$\Delta T_{\text{lecho}} := T_{\text{fl}} - T_{\text{il}}$$

$$\Delta T_{\text{lecho}} = 27.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{\text{vroca}} := \delta_{\text{roca}} \cdot C_{\text{proca}}$$

$$C_{\text{vroca}} = 2.397 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \quad \text{Capacidad volumétrica}$$

$$Q_{\text{s_lecho}} := V_{\text{lecho}} \cdot C_{\text{vroca}} \cdot \Delta T_{\text{lecho}}$$

¹ [14]

$$Qs_lecho = 2.96 \times 10^5 \text{ kJ}$$

Esto quiere decir que mientras el sistema está en funcionamiento, durante las horas de brillo solar, el lecho de rocas almacenará 296 MJ de Energía, la misma que será entregada al cacao cuando el sistema de colectores solares no este generando energía térmica.

Para determinar si el diferencial de temperatura entre las rocas y el fluido es lo suficientemente grande para que afecte el funcionamiento del sistema se realizan los siguientes cálculos.

$$L := 3.3 \text{ m} \quad \text{Longitud del lecho en la dirección de fluido}$$

$$At := 2.52 \text{ m}^2 \quad \text{Área transversal } 1.05 \times 0.8 \text{ (3) m}$$

$$Af := 1.44 \text{ m}^2 \quad \text{Área frontal } 0.9 \times 0.8 \text{ (2) m}$$

$$Qv := 0.27 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{Caudal volumétrico de aire}$$

$$\delta_{ac} := 1.092 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire circulante}$$

$$C_{paire} := 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}}$$

$$\mu := 1.9428 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$V_{aire} := \frac{Qv}{2Af}$$

$$V_{aire} = 0.094 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad del aire}$$

$$D := 0.03 \text{ m} \quad \text{Diámetro promedio de las rocas.}$$

$\varepsilon := 0.47$ Fracción de agujeros de las rocas

$\alpha := 1.5$ Factor de forma superficial de área ($1.5 < D < 50$ mm)

$\delta_{roca} := 2724 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Densidad de la roca

$C_{proca} := 0.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ Calor específico de la roca

$K := 2 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$ Conductividad térmica de la roca (Incropera p - 838)

$G := V_{aire} \cdot \delta_{ac}$ Velocidad másica superficial

$G = 0.102 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

$h_v := 650 \cdot \left(\frac{G}{D}\right)^{0.7}$ Coeficiente de transferencia de calor volumétrico

$h_v = 1.535 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$

$h := \frac{h_v}{6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\alpha}{D}}$ Coeficiente de transferencia de calor por unidad de área

$h = 9.653 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

$Bi := \frac{h \cdot \frac{D}{2}}{K}$

$Bi = 0.072$

5.5.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El lecho de rocas utilizado en esta aplicación estará constituido por pilas de rocas en jaulas del alambre. Ya que se realizó una comparación con un lecho constituido por ladrillo y se observa que este tiene menor capacidad de almacenamiento de calor, además de aumentar considerablemente la caída de presión.

Las rocas deben estar ubicadas en donde recogerán la mayoría del calor. El lecho de rocas no debe tocar la pared, ya que se producen pérdidas por conducción.

El diámetro de las rocas utilizadas debe no debe ser superior a 30 mm debido a su pequeño tamaño se reducirán al mínimo los gradientes de temperatura entre ellas.

Los diámetros de las rocas deben ser bastante uniformes para de esta manera reducir la caída de presión.

Debido que el coeficiente volumétrico de transferencia de calor (h_v) es grande y el número de Biot (Bi) es todavía inferior a 0.1 la diferencia de temperaturas entre el lecho y el fluido se hacen muy pequeñas por lo tanto se considera que la temperatura es uniforme.

Las necesidades de aislamiento en la superficie exterior del lecho de rocas son mínimas, si el almacenamiento es para períodos de tiempo cortos, puesto que la conductividad térmica del lecho en las direcciones radiales es baja. En el secador propuesto el lecho de rocas debe funcionar continuamente por lo que es aislante utilizado será madera.

CAPITULO 6

DISEÑO ESTRUCTURAL

6.1 MATERIALES

En este tipo de sistemas se deben tomar en cuenta varios parámetros que influyen en la selección de materiales como por ejemplo:

Las condiciones climáticas, principalmente la humedad ambiental ya que se encuentra relacionada con fenómenos que sufren los materiales como: abrasión, corrosión, en el caso del acero y en el de la madera su enmohecimiento y finalmente su deterioro total.

La temperatura de trabajo y ambiental es otro de los parámetros que afecta a los elementos utilizados en el sistema es el caso específico de los aislantes térmicos. En este caso se utilizará poliuretano ya que la temperatura a la que se encuentra trabajando no afecta sus características.

La oferta de materiales y elementos existente en el mercado nacional, para poder disponer de los materiales requeridos sin que existan pérdidas de tiempo.

Y un punto que no podemos dejar a un lado es el económico, ya que el costo de los materiales obliga a buscar las alternativas más viables desde esta óptica.

6.1.1 ACERO

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono forjables, con porcentajes de carbono variables entre 0,03 y 2,00%. Se distinguen de las fundiciones, también aleaciones de hierro y carbono, en que la proporción de carbono es superior para estas: entre 1,5 y el 4%.

La diferencia fundamental entre ambos materiales es que los aceros son, por su ductilidad, fácilmente deformables en caliente utilizando forjado, laminación o extrusión, mientras que las fundiciones son frágiles y se fabrican generalmente por moldeo.

Además de los componentes principales indicados, los aceros incorporan otros elementos químicos. Algunos son perjudiciales (Impurezas) y provienen de la chatarra, el mineral o el combustible empleado en el proceso de fabricación; es el caso del azufre y el fósforo. Otros se añaden intencionalmente para la mejora de alguna de las características del acero (Aleantes); pueden utilizarse para incrementar la resistencia, la ductilidad, la dureza, entre otras o para facilitar algún proceso de fabricación como puede ser el mecanizado. Elementos habituales para estos fines son el níquel, el cromo, el molibdeno y otros.



Figura 6.1 Estructura de Acero

El acero es actualmente la aleación más importante, empleándose de forma intensiva en numerosas aplicaciones, aunque su utilización se ve condicionada en determinadas circunstancias por las ventajas técnicas o económicas específicas que ofrecen otros materiales. Aún así siguen empleándose extensamente ya que:

- Existen abundantes yacimientos de minerales de hierros suficientemente ricos, puros y fáciles de explotar.
- Existe la posibilidad de reciclar la chatarra.
- Los procedimientos de fabricación son relativamente simples y económicos.
- Presentan una interesante combinación de propiedades mecánicas, las que pueden modificarse dentro de un amplio rango variando los componentes de la aleación o aplicando tratamientos.
- Su plasticidad permite obtener piezas de formas geométricas complejas.

- La experiencia acumulada en su utilización permite realizar predicciones de su comportamiento.

6.1.2 MADERA

La madera es un material que constituye el principal contenido del tronco de una planta, especialmente en árboles. Los árboles se caracterizan por tener troncos que crecen cada año y que están compuestos por fibras de celulosa unidos con lignina.

Una vez cortada y seca, la madera se utiliza para diferentes aplicaciones. Una de ellas es la fabricación de pulpa o pasta, materia prima para hacer papel. Artistas y carpinteros tallan y unen trozos de madera con herramientas especiales, para fines prácticos o artísticos. La madera es un material de construcción muy importante y entre sus usos también se la encuentra como aislante térmico.

La madera seca es mala conductora del calor y la electricidad, pero húmeda se hace conductora, por esta característica debe ser recubierta con pintura que impida el paso de la humedad y al mismo tiempo prolongue su vida útil.

La madera es un buen aislante térmico gracias a la propiedad y discontinuidad de su materia. Las maderas porosas y blandas, son las más aislantes del calor.¹



Figura 6.2 Madera utilizada para la construcción

¹ [15]

6.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Para la construcción del sistema propuesto se utilizarán los materiales indicados en la sección anterior. De estos materiales se han construido y seleccionado los diferentes elementos que forman parte de la estructura y del secador. Para el diseño estructural nos basamos en el Método de diseño por el factor de carga y resistencia LRFD por sus siglas en ingles (Load Resistance Factor Design).

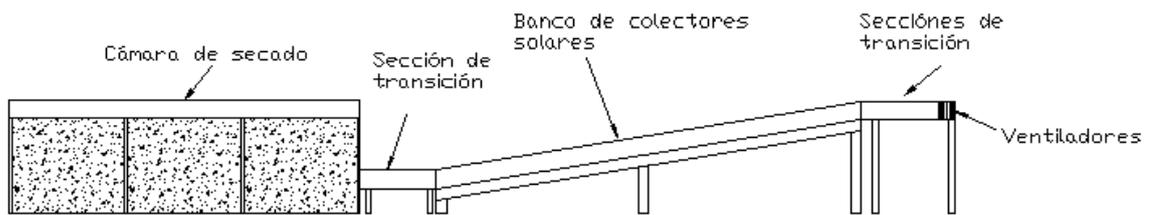


Figura 6.3 Esquema del Secador

Cada una de las partes que conforman el sistema de secado se han diseñado mediante procedimientos técnicos y cálculos matemáticos..

6.2.1 DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR

El área de la cámara de secado, A_s , se la puede determinar conociendo algunos parámetros tales como: masa del producto a secar (m_{cacao}), la densidad del producto (δ_{cacao}) y el espesor de la capa de producto (h_{cacao}) mediante una expresión matemática planteada por la FAO¹

$$A_s := \frac{m_{cacao}}{\delta_{cacao} \cdot h_{cacao}} \quad (6.1)$$

Mediante la aplicación de esta expresión se obtiene:

$$\delta_{cacao} := 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del cacao (aproximada)}$$

$$h_{cacao} := 0.15 \text{ m} \quad \text{Altura de la capa de cacao a ser secada.}$$

¹ [12]

$m_{\text{cacao}} := 500 \text{ kg}$ Cantidad de cacao a secar

$$A_s := \frac{m_{\text{cacao}}}{\delta_{\text{cacao}} \cdot h_{\text{cacao}}}$$

$A_s := 6.6 \text{ m}^2$ Área de la cámara de secado

Al conocer el área de la cámara de secado debemos distribuirla de tal forma que cumpla con las recomendaciones de la FAO para el diseño de una cámara de secado de un secador de lecho fijo (rectangular). La recomendación dice “El lado mayor debe ser 1.5 veces el lado menor”. De donde se tiene que la cámara de secado tendrá un lado menor de 2 m y el mayor de 3.3 m, como se puede observar no se cumple al 100 % la recomendación pero esto se debe a la altura que tendrá la cama de producto dentro de la cámara de secado es de 15 cm, cuyo valor no puede ser excedido ya que por la humedad del producto y la altura de la cama de cacao el aire no podría pasar a través de él corriendo el riesgo de formar una masa húmeda en la parte en contacto con las bandejas.

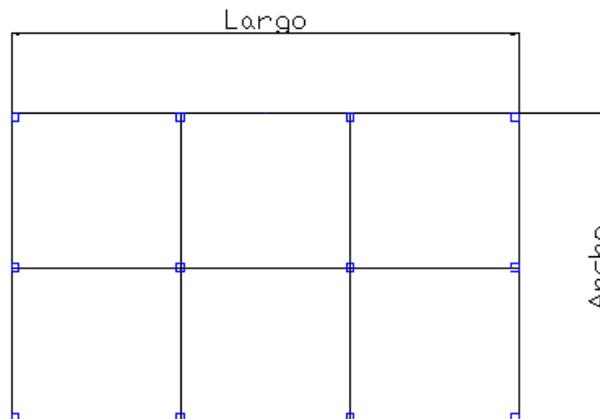


Figura 6.4 Esquema de la cámara de secado

6.2.2 NÚMERO DE BANDEJAS

Ya que tenemos el área y geometría de la cámara de secado se necesita determinar el número de bandejas, nb , para lo cual utilizaremos la siguiente expresión. En donde A_b es el área de cada bandeja.

$$nb := \frac{As}{Ab} \quad (6.2)$$

Se seleccionan bandejas de 1.1 m de longitud y 1 m de ancho y se procede con la aplicación de la ecuación 6.2.

$lb := 1.1 \text{ m}$ Longitud de la bandeja

$ab := 1 \text{ m}$ Ancho de la bandeja

$Ab := lb \cdot ab$

$Ab = 1.1 \text{ m}^2$ Área de la bandeja

$$nb := \frac{As}{Ab}$$

$nb = 5.455$ Número de bandejas

Por lo tanto se requieren 6 bandejas de 1.1 x 1.0 m

Las bandejas o planchas de secado serán de Acero al carbono de 1.5 mm de espesor y perforadas, de tal forma que la superficie tenga por lo menos el 10% de perforaciones, para evitar que existan valores elevados de pérdida de carga. El área de perforaciones, A_p , se la determina fácilmente

$$A_p := 0.1 \cdot As \quad (6.3)$$

Aplicado la ecuación a nuestro secador se requiere un área de perforaciones mínima de 0.6 m^2 .

$A_p := 0.1 \cdot As$

$A_p = 0.6 \text{ m}^2$ Área perforada

6.2.3 DISEÑO DE BANDEJAS

Las bandejas estarán montadas sobre un marco construido con platina PL 38 x 12 mm cuyas dimensiones son las mismas que las de la bandeja.

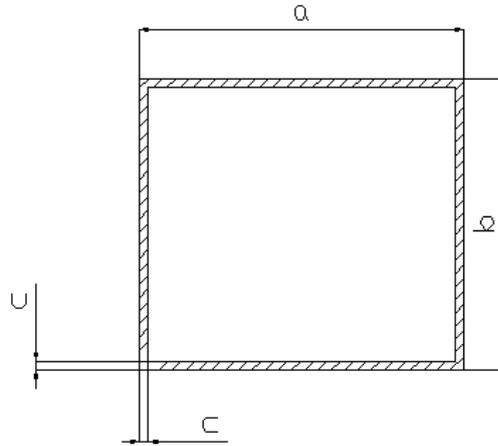


Figura 6.5 Esquema del marco de la bandeja

Las cargas que aplicarán sobre la bandeja, q , son conocidas, por lo tanto se calculará el borde mas largo de la bandeja como una viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida. Hay que tener en cuenta que las unidades de los pesos son kgf.

Material: Acero al carbono ASTM A - 36

$$\sigma_{adm} := 2400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \text{ Esfuerzo admisible}$$

$$P_m := 3.58 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \text{ Peso de la platina por metro}$$

$$P_e := 2 \cdot l_b + 2 \cdot a_b$$

$$P_e = 4.2 \text{ m} \text{ Perímetro de la bandeja}$$

$$P_{marco} := P_e \cdot P_m$$

$$P_{marco} = 15.036 \text{ kgf} \text{ Peso del marco de bandeja}$$

Como la bandeja perforada está construida por una plancha de Acero al carbono (tol) de 1.5 mm de espesor y de 1.1 x 1.0 m, requerimos conocer la densidad del acero.

$$\delta := 7304 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$l_b := 1.1 \text{ m} \quad \text{Longitud de la bandeja}$$

$$a_b := 1.0 \text{ m} \quad \text{Ancho de la bandeja}$$

$$t_b := 0.0015 \text{ m} \quad \text{Espesor de la bandeja}$$

$$P_b := l_b \cdot a_b \cdot t_b \cdot \delta$$

$$P_b = 12.052 \text{ kgf} \quad \text{Peso de la bandeja}$$

Ya que el producto a secar es el cacao necesitamos saber cual es el peso que esté tiene en cada bandeja.

$$C_{\text{cacao}} := \delta_{\text{cacao}} \cdot h_{\text{cacao}}$$

$$C_{\text{cacao}} = 75 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad \text{Peso del cacao por unidad de área}$$

$$P_{\text{cacao}} := C_{\text{cacao}} \cdot A_b \quad \text{Peso de cacao por bandeja.}$$

$$P_{\text{cacao}} = 82.5 \text{ kgf}$$

Con estas cargas se procede a calcular el valor de la carga distribuida q .

$$q := \frac{P_{\text{marco}} + P_b + P_{\text{cacao}}}{l_b}$$

$$q = 99.625 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

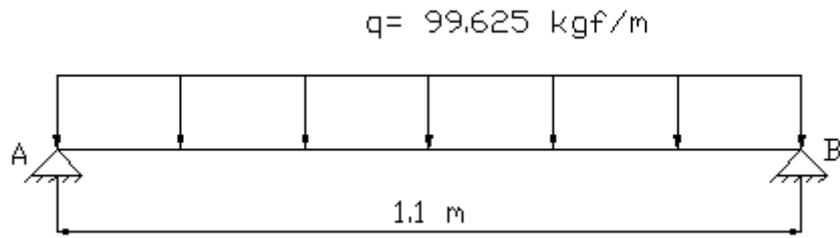


Figura 6.6 Carga distribuida en la bandeja

$$\sum F_y \uparrow + = 0$$

$$A + B = R_e$$

$$\sum M_A = 0$$

$$R_e \times 0.55 - B \times 1.1 = 0$$

$$R_e := q \cdot l_b$$

$$R_e = 109.588 \text{ kgf}$$

$$B := \frac{R_e}{2}$$

$$B = 54.794 \text{ kgf}$$

$$A := R_e - B$$

$$A = 54.794 \text{ kgf}$$

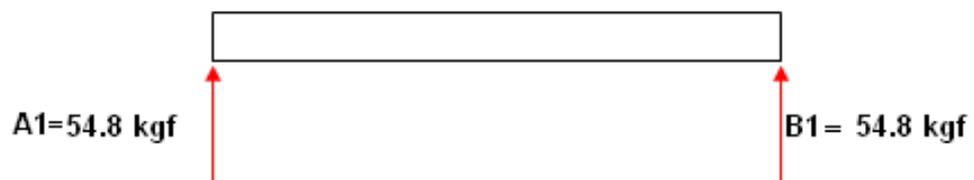


Figura 6.7 Reacciones en la viga - bandeja

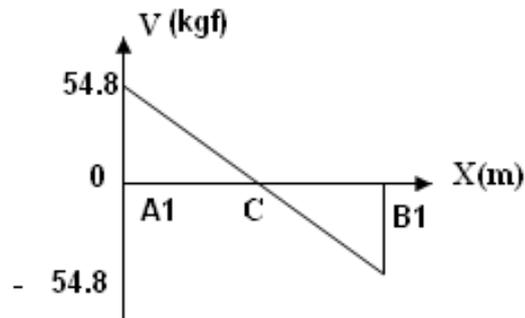


Figura 6.8 Diagrama de Fuerza cortante - bandeja

El cálculo del momento flector máximo, M_{max} , se lo realiza de la siguiente manera:

$$M_C = M_A + aV$$

$$M_C = M_{MAX}$$

$$M_C := A \cdot \frac{\frac{lb}{2}}{2}$$

$$M_C = 15.068 \text{ Kgf} \cdot \text{m}$$

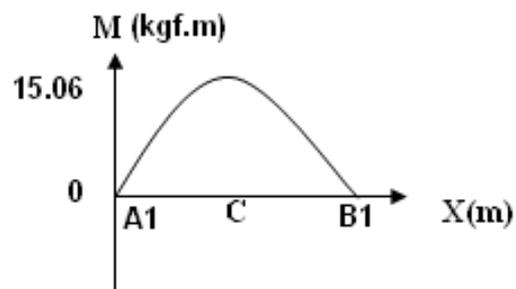


Figura 6.9 Diagrama Momento flector - bandeja

Por lo tanto el mínimo módulo elástico de la sección, S_{min} , que se requiere es:

$$M_{max} = 1.507 \times 10^3 \text{ Kgf} \cdot \text{cm}$$

$$S_{min} := \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}}$$

$$S_{\min} = 0.628 \text{ cm}^3$$

La platina seleccionada tiene las siguientes dimensiones¹:

$$a := 3.8 \text{ cm}$$

$$e := 1.2 \text{ cm}$$

Para determinar el modulo elástico de la sección debemos calcular la inercia respecto a x, I_x , y además de la distancia C_x .

Respecto al eje x:

$$I_x := \frac{a \cdot e^3}{12}$$

$$I_x = 0.547 \text{ cm}^4$$

$$C_x := \frac{e}{2}$$

$$C_x = 0.6 \text{ cm}$$

$$S_x := \frac{I_x}{C_x}$$

$$S_x = 0.912 \text{ cm}^3$$

Debido a que $S_x > S_{\min}$; el perfil cumple con lo requerido y el factor de seguridad FS existente es

$$FS := \frac{S_x}{S_{\min}}$$

$$FS = 1.5$$

¹ Catálogo Novacero Aceropaxi, Anexo A 6.3.2

6.2.4 DISEÑO DE LA COLUMNA DE LA CÁMARA DE SECADO

Para determinar el tipo de columna que se utilizará para soportar al cacao, las bandejas y los marcos, se utilizará el método de “Diseño por factor de carga y resistencia”, LRFD, por sus siglas en ingles.

Primero se debe determinar el área colaborante, Aco, que es el área que se encuentra sustentada por una columna, siempre se debe tomar la mayor.

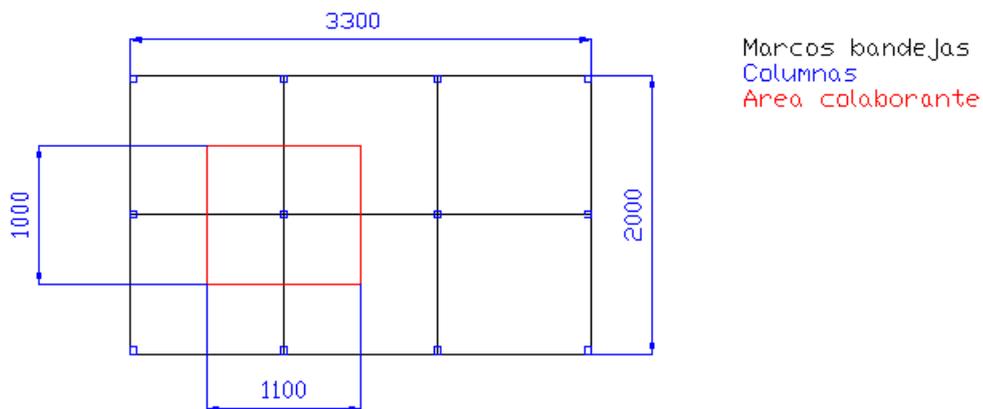


Figura 6.10 Área colaborante – cámara de secado

$A_{co} := 1.1 \text{ m}^2$ Es igual $1.1 \times 1 \text{ m}$

Este método de diseño toma en cuenta cargas de diferentes características a las que denomina por ejemplo: Carga muerta, D, es la carga que permanece constante durante todo el tiempo; Carga viva, L, es la carga que varía o está fluctuando en el tiempo, también aparecen cargas como W que es la del viento, R la de la lluvia, C la de la ceniza, S que representa a la carga de la nieve.

Para nuestro caso en particular la carga viva corresponde a la carga del cacao aplicada en el área colaborante, de donde:

$$C_{cacao} = 75 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \text{ Carga cacao}$$

$$L := C_{cacao} \cdot A_{co}$$

$L = 82.5 \text{ kgf}$ Carga viva

Mientras que la carga muerta estará constituida por el peso del marco y las bandejas en el área colaborante.

$P_b = 12.052 \text{ kgf}$ Peso de las bandejas sobre el área colaborante

$P_{\text{marco}} = 15.036 \text{ kgf}$

$D := P_b + P_{\text{marco}}$

$D = 27.088 \text{ kgf}$ Carga muerta

Debido a las características propias de la cámara de secado, para la determinación de la resistencia requerida, R_u , aplicamos la principal ecuación del método de diseño utilizado, tomando en cuenta que esta se encuentra restringida a los valores de cargas vivas y muertas.

$$R_u := 1.2 \cdot D + 1.6 \cdot L \quad (6.4)$$

Este método tiene como objetivo principal el cumplimiento de la siguiente relación:

$$R_u \leq \phi \cdot R_n \quad (6.5)$$

En donde ϕ es el factor de resistencia, normalmente 0.85. Este valor ha sido determinado por medio de ensayos de laboratorio. R_n es la resistencia nominal, esta depende de las características geométricas y propiedades del material de la columna.

De la aplicación de la ecuación 6.4 se tiene que la resistencia requerida R_u es:

$R_u = 164.505 \text{ kgf}$

$R_u = 1.645 \times 10^3 \text{ N}$

El parámetro de esbeltez, λ_c , es de gran importancia en el diseño de estructuras ya que son más propensas a fallar por estabilidad (esbeltez) antes que por resistencia. La esbeltez se la determina mediante la siguiente expresión:

$$\lambda_c := \frac{K \cdot L_c}{r \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (6.6)$$

En donde K^1 es la constante de sujeción de la columna es el radio de giro, L_c la longitud de la columna, F_y es resistencia a la cedencia, E es el módulo de elasticidad.

Para continuar con los cálculos se selecciona el tipo de columna y material que se utilizará.

Material: Acero al carbono ASTM A - 36

$$F_y := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$E := 207000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Columna tipo cuadrado 40 x 40 mm y 1.5 mm de espesor.

$L_c := 900 \text{ mm}$ Longitud de la columna

$es := 1.5 \text{ mm}$

$a_1 := 40 \text{ mm}$

El radio de giro, r , es calculado por medio de la expresión que se muestra a continuación:

¹ [16]

$$r := \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (6.7)$$

En donde I es la inercia, y A es el área de la sección.

$$I := \frac{1}{12} \cdot [a1^4 - (a1 - 2 \cdot es)^4]$$

$$I = 5.715 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$A := a1^2 - (a1 - 2es)^2$$

$$A = 231 \text{ mm}^2$$

$$r := \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r = 15.729 \text{ mm}$$

$$K := 2 \quad \text{Constante de sujeción}$$

$$\lambda_c := \frac{K \cdot L_c}{r \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

$$\lambda_c = 1.24$$

Ya que $\lambda_c < 1.5$ se encuentra en la zona inelástica, por lo que el límite crítico F_{cr} se lo determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_{cr} := 0.658^{\lambda_c^2} \cdot F_y \quad (6.8)$$

Aplicando esta expresión al problema existente se tiene que F_{cr} es:

$$F_{cr} = 126.06 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Para determinar la resistencia nominal R_n , multiplicamos el área de la sección por el límite crítico.

$$R_n := A \cdot F_{cr} \quad (6.9)$$

De donde tenemos que R_n es igual a:

$$R_n = 2.912 \times 10^4 \text{ N}$$

Verificamos se cumple la relación 6.5, por motivos de cálculo representaremos al factor de resistencia por la resistencia nominal con R_{nf} , que significa resistencia nominal final.

$$R_{nf} := \phi \cdot R_n$$

$$R_{nf} = 2.475 \times 10^4 \text{ N}$$

Debido a que $R_u = 1645 \text{ N}$, este tipo de columna es la adecuada.

6.2.5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO DE COLECTORES SOLARES

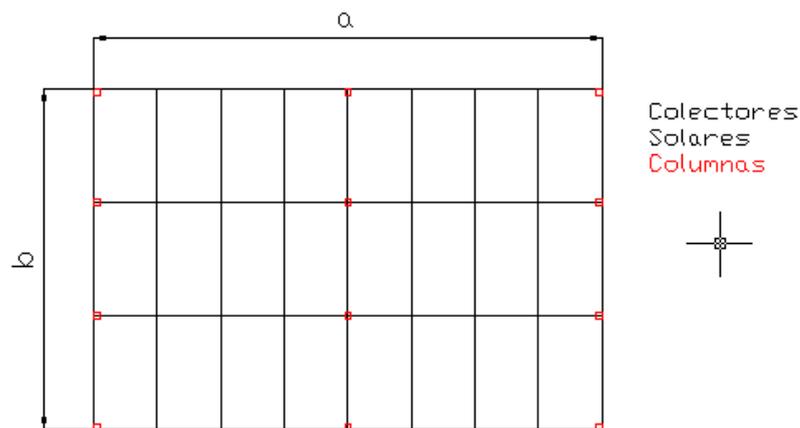


Figura 6.11 Estructura banco de colectores solares

La estructura debe soportar el peso de los colectores solares y de las vigas, a continuación se determinará el peso de los elementos que constituyen el banco de colectores solares

Placa Absorbedora

$$\delta_{al} := 2770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aluminio}$$

$$L_p := 1.8 \text{ m} \quad \text{Longitud de la placa}$$

$$a_p := 0.938 \text{ m} \quad \text{Ancho de la placa}$$

$$e_{sp} := 0.001 \text{ m} \quad \text{Espesor de la placa (1 mm)}$$

$$V_p := L_p \cdot a_p \cdot e_{sp}$$

$$V_p = 1.688 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad \text{Volumen de la placa absorbadora}$$

$$m_p := \delta_{al} \cdot V_p$$

$$m_p = 4.677 \text{ kg} \quad \text{Masa de la placa absorbadora}$$

$$N_p := 24 \quad \text{Número de placas absorbadoras}$$

$$C_{al} := m_p \cdot N_p$$

$$C_{al} = 112.245 \text{ Kgf} \quad \text{Peso total de la placa absorbadora}$$

Cubierta transparente de Vidrio

$$\delta_g := 145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del vidrio}$$

$$L_g := 1.8 \text{ m} \quad \text{Longitud de la cubierta transparente}$$

$$a_g := 0.938 \text{ m} \quad \text{Ancho de la cubierta transparente}$$

$$e_{sg} := 0.005 \text{ m} \quad \text{Espesor de la cubierta transparente (5 mm)}$$

$$V_g := L_g \cdot a_g \cdot e_{sg}$$

$V_g = 8.442 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ Volumen de la cubierta transparente

$m_g := \delta_g \cdot V_g$

$m_g = 1.224 \text{ kg}$ Masa de la cubierta transparente

$N_g := 48$ Número de cubiertas transparentes

$C_g := m_g \cdot N_g$

$C_g = 58.756 \text{ Kgf}$ Peso total de la cubierta transparente

Caja del colector de Acero al carbono

$\delta_{Ao} := 7304 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Densidad del Acero al carbono

$L_{Ao} := 1.8 \text{ m}$ Longitud de la plancha de Acero al carbono

$a_{Ao} := 1.414 \text{ m}$ Ancho de la plancha de Acero al carbono

$es_{Ao} := 0.001 \text{ m}$ Espesor de la plancha de Acero al carbono (1 mm)

$V_{Ao} := L_{Ao} \cdot a_{Ao} \cdot es_{Ao}$ Volumen de la plancha de Acero al carbono

$V_{Ao} = 2.545 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

$m_{Ao} := \delta_{Ao} \cdot V_{Ao}$ Masa de la plancha de Acero al carbono

$m_{Ao} = 18.59 \text{ kg}$

$N_{Ao} := 24$ Número de cajas de Acero al carbono

$C_{guías} := 6.92 \cdot N_{Ao}$

$C_{guías} = 166.08 \text{ Kgf}$ Peso de las guías internas del colector solar

$$CAo := mAo \cdot NAo + Cguias$$

$$CAo = 612.243 \text{ Kgf} \quad \text{Peso total de cajas de Acero al carbono}$$

Aislante térmico - Poliuretano

$$\delta_{ais} := 55 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aislamiento}$$

$$Lais1 := 3.6 \text{ m} \quad \text{Longitud del aislamiento lateral}$$

$$aais1 := 0.107 \text{ m} \quad \text{Ancho del aislamiento lateral}$$

$$esais1 := 0.025 \text{ m} \quad \text{Espesor del aislamiento lateral (2.5 cm)}$$

$$Vais1 := Lais1 \cdot aais1 \cdot esais1 \quad \text{Volumen del aislamiento lateral}$$

$$Vais1 = 9.63 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$Lais2 := 1.8 \text{ m} \quad \text{Longitud del aislamiento posterior}$$

$$aais2 := 1 \text{ m} \quad \text{Ancho del aislamiento posterior}$$

$$esais2 := 0.06 \text{ m} \quad \text{Espesor del aislamiento posterior (6 cm)}$$

$$Vais2 := Lais2 \cdot aais2 \cdot esais2 \quad \text{Volumen del aislamiento posterior}$$

$$Vais2 = 0.108 \text{ m}^3$$

$$Vais := Vais1 + Vais2 \quad \text{Volumen del aislamiento de un colector}$$

$$Vais = 0.118 \text{ m}^3$$

$$mais := \delta_{ais} \cdot Vais \quad \text{Masa del aislamiento de un colector}$$

$$mais = 6.47 \text{ kg}$$

Nais := 24

Número de sistemas de aislamiento

Cais := mais · Nais

Peso total del aislamiento

Cais = 155.272 Kgf

Para que el montaje y funcionamiento de los colectores solares sea correcto sobre las vigas principales se colocarán platinas, las mismas que servirán como guías de los colectores. El método de diseño utilizado es similar al que se utilizó en el diseño de las bandejas.

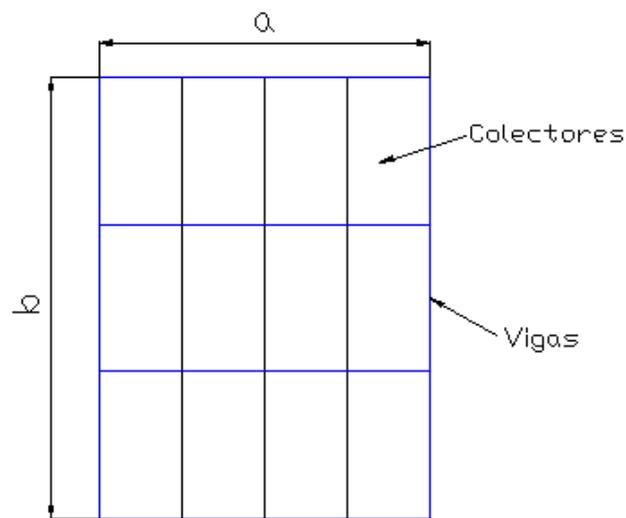


Figura 6.12 Vigas del banco de colectores solares

Las vigas serán IPE 100¹

$P_m := 8.10 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$ Peso por metro

Material: Acero al carbono

$\sigma_{adm} := 2400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ Esfuerzo admisible

$l_v := 5.4 \text{ m}$ Longitud de la viga

¹ Catálogo IPAC, Anexo A 6.3.2

$av := 4 \text{ m}$ Ancho de las vigas

$Pe := 2 \cdot lv + 2 \cdot av$ Perímetro

$Pe = 18.8 \text{ m}$

$vex := 2 \cdot av$

$vex = 8 \text{ m}$ Vigas extra

$A := lv \cdot av$

$A = 21.6 \text{ m}^2$

$P_{\text{perfil}} := (Pe + vex) \cdot P_m$

$P_{\text{perfil}} = 217.08 \text{ kgf}$

Sobre este armazón se ubicarán 12 colectores

$Abc := 43.2 \text{ m}^2$ Área del banco de colectores solares

$$q := \frac{\frac{C_{al} + C_g + C_{Ao} + C_{ais}}{Abc} \cdot A + P_{\text{perfil}}}{lv}$$

$q = 127.1 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$ Carga aplicada a la viga

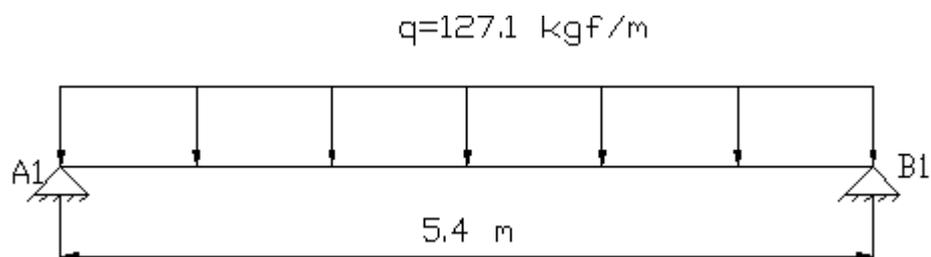


Figura 6.13 Carga aplicada a la viga

$$R_e := q \cdot l_v$$

$$R_e = 686.338 \text{ kgf}$$

$$B_1 := \frac{R_e}{2}$$

$$B_1 = 343.169 \text{ kgf}$$

$$A_1 := R_e - B_1$$

$$A_1 = 343.169 \text{ kgf}$$

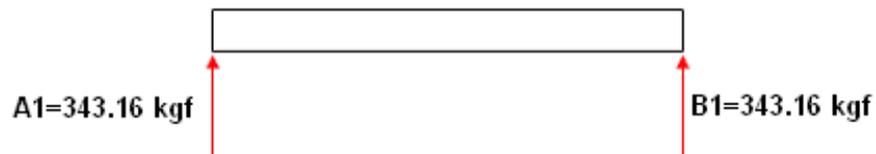


Figura 6.14 Reacciones en la viga

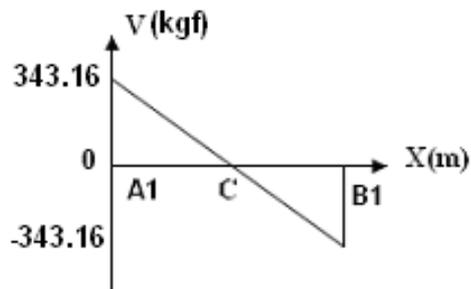


Figura 6.15 Diagrama Fuerza cortante - viga

$$M_C = M_A + aV$$

$$M_C = M_{MAX}$$

$$M_c := A_1 \cdot \frac{l_v}{2}$$

$$M_c = 463.278 \text{ Kgf} \cdot \text{m}$$

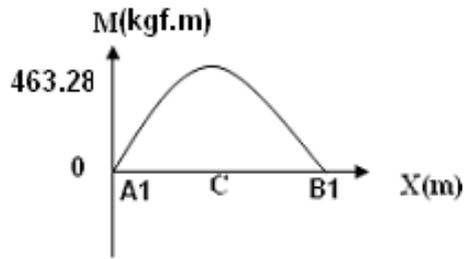


Figura 6.16 Diagrama Momento flector - viga

$$M_{\max} := 100 \cdot M_c$$

Por lo tanto el mínimo módulo elástico de la sección (S_{\min}) que se requiere es:

$$M_{\max} = 4.633 \times 10^4 \text{ Kgf} \cdot \text{cm}$$

$$S_{\min} := \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}}$$

$$S_{\min} = 19.303 \text{ cm}^3$$

Determinación del modulo elástico de la sección S

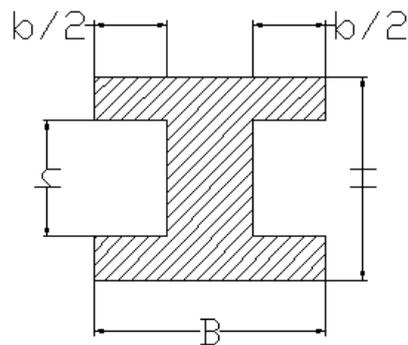


Figura 6.17 Sección transversal de la viga

$$e_{\text{alma}} := 0.41 \text{ cm}$$

$$e_{\text{ala}} := 0.57 \text{ cm}$$

$$B := 5.5 \text{ cm}$$

$$H := 10 \text{ cm}$$

$$b := B - ealma$$

$$b = 5.09 \text{ cm}$$

$$h := H - 2 \cdot eala$$

$$h = 8.86 \text{ cm}$$

$$I := \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{12}$$

$$I = 163.323 \text{ cm}^4$$

$$C := \frac{H}{2} \text{ cm}$$

$$S := \frac{I}{C}$$

$$S = 32.665 \text{ cm}^3$$

Debido a que $S > S_{min}$; el perfil cumple con lo requerido y se tiene un factor de seguridad FS de:

$$FS := \frac{S}{S_{min}}$$

$$FS = 1.7$$

Para determinar el tipo de columna que se utilizará para soportar al banco de colectores solares las y vigas, se utilizará el método de "Diseño por factor de carga y resistencia", LRFD, por sus siglas en ingles, tal como se hizo para el cálculo de la columna de la cámara de secado.

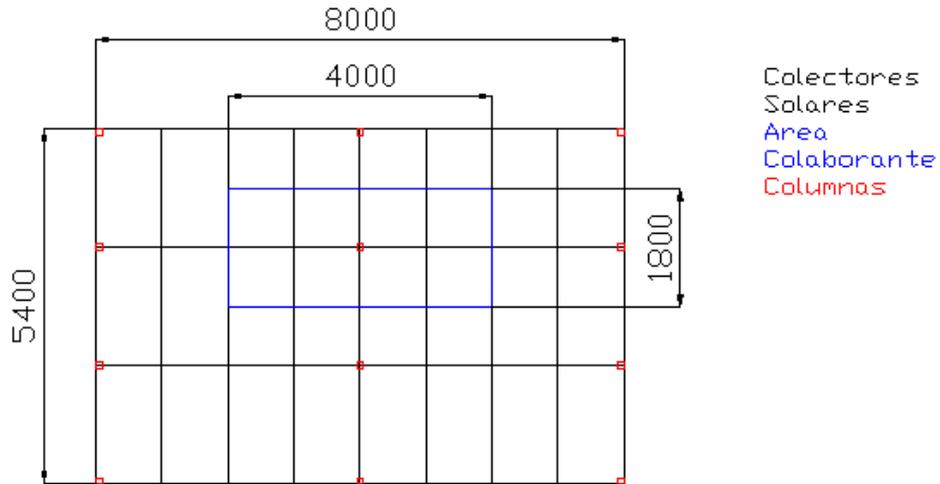


Figura 6.18 Área colaborante – estructura colectores solares

$$A_{co} := 7.2 \text{ m}^2 \quad \text{Área colaborante (4 x 1.8 m)}$$

Determinación de las cargas aplicadas a la columna.

$$L_v := 48.2 \text{ m} \quad \text{Longitud total de las vigas IPE 100}$$

$$P_v := P_m \cdot L_v$$

$$P_v = 390.42 \text{ Kgf} \quad \text{Peso total de las vigas}$$

$$D := \frac{C_{al} + C_g + C_{Ao} + C_{ais} + P_v}{A_{bc}} \cdot A_{co}$$

$$D = 221.489 \text{ kgf} \quad \text{Carga muerta}$$

De acuerdo a los datos proporcionados por el INAMHI se tiene que el valor máximo de precipitación en la provincia de Guayas es 1137.7 mm. La cantidad total de precipitación se expresa como el espesor de una capa líquida que cubriría una superficie horizontal (1 m²).

$$V_{agua} := 1.1377 \text{ m}^3$$

$$\delta_{\text{agua}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\text{agua}} := V_{\text{agua}} \cdot \delta_{\text{agua}}$$

$$m_{\text{agua}} = 1.138 \times 10^3 \text{ kg}$$

Ya que el banco de colectores solares tendrá una inclinación de 10° , el efecto causado por la lluvia es mínimo por lo que se tomará el 10 % de la masa de agua para realizar el cálculo de las columnas.

$$P_{\text{agua}} := 0.1 \cdot m_{\text{agua}}$$

$$P_{\text{agua}} = 113.77 \text{ kgf} \quad \text{Peso de agua por cada m}^2$$

$$R := P_{\text{agua}} \cdot A_{\text{co}}$$

$$R = 819.144 \text{ kgf} \quad \text{Carga de la lluvia}$$

Determinación de la resistencia requerida. Método LRFD

$$R_u := 1.2 \cdot D + 1.6 \cdot R$$

$$R_u = 1.576 \times 10^3 \text{ kgf}$$

$$R_u = 1.576 \times 10^4 \text{ N}$$

Determinación del parámetro de esbeltez

Material: Acero al carbono ASTM A500-93

Columna tipo Cuadrado 50 x 50 mm y 1.5 mm de espesor¹

$$F_y := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

¹ Catálogo Novacero-Aceropaxi, Anexo A 6.3.2

$$E := 207000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$L_c := 1237 \text{ mm} \quad \text{Longitud de la columna más larga}$$

$$e_s := 1.5 \text{ mm}$$

$$a_1 := 50 \text{ mm}$$

$$I := \frac{1}{12} \cdot [a_1^4 - (a_1 - 2 \cdot e_s)^4]$$

$$I = 1.142 \times 10^5 \text{ in}^4$$

$$A := a_1^2 - (a_1 - 2e_s)^2$$

$$A = 291 \text{ mm}^2$$

$$r := \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r = 19.81 \text{ mm}$$

$$K := 2$$

$$\lambda_c := \frac{K \cdot L_c}{r \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

$$\lambda_c = 1.354$$

Ya que $\lambda_c < 1.5$ se encuentra en la zona inelástica, en donde:

$$F_{cr} := 0.658^{\lambda_c^2} \cdot F_y$$

$$F_{cr} = 111.468 \frac{N}{mm^2}$$

$$R_n := A \cdot F_{cr}$$

$$R_n = 3.244 \times 10^4 \text{ N}$$

Verificación si se cumple la relación 6.5.

$$R_{nf} := \phi \cdot R_n$$

$$R_{nf} = 2.757 \times 10^4 \text{ N}$$

Ya que $R_u = 15760 \text{ N}$; ésta es la columna adecuada.

6.2.6 DISEÑO DE LA PLACA BASE

Las columnas de la cámara de secado así como las que soportan al banco de colectores solares serán desmontables e irán fijadas a las placas por medio de soldadura por arco eléctrico. Las placas se empotrarán a la cimentación por medio de pernos de anclaje.

El diseño de las placas se realizará de acuerdo a la metodología propuesta por el Instituto Americano para construcciones de Acero¹, AISC, por sus siglas en Ingles.

¹ [16]

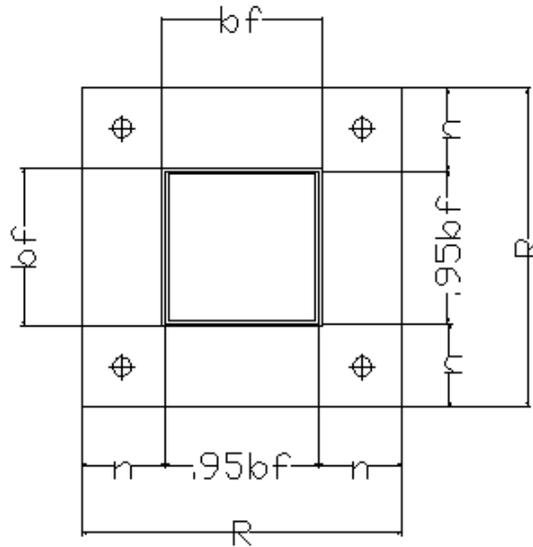


Figura 6.19 Placa base de la columna

Al conocer la carga R_u aplicada a la columna, la resistencia a la compresión del concreto, f'_c , y la resistencia a la cedencia del acero, F_y , se procede a calcular el esfuerzo admisible de flexión de la placa base, F_b , esfuerzo que se lo determina aplicando la siguiente expresión.

$$F_b = 0.75 F_y \quad (6.10)$$

El esfuerzo admisible de aplastamiento del concreto, F_c , depende de f'_c y del porcentaje de área de soporte ocupada por la placa base. Cuando el área entera está cubierta como es en este caso F_c es igual a:

$$F_c = 0.35 f'_c \quad (6.11)$$

Para determinar el área real de la placa base, A_1 , debemos fijarnos en la geometría de la columna. Para que el diseño sea óptimo la placa base debe ser simétrica, por lo tanto A_1 será:

$$A_1 = R \times R \quad (6.12)$$

En donde R representa los lados de la placa base. Para tener la mejor geometría de la placa se determina el valor de n .

$$n = \frac{R - 0.95bf}{2} \quad (6.13)$$

En donde bf es la longitud del lado de la base de la columna. El área de la sección transversal de concreto que soporta a la placa base, A_2 , se la determina de acuerdo a las condiciones de cimentación que se tenga en el lugar de montaje. El esfuerzo actual de aplastamiento aplicado a la placa, f_p , se lo determina así:

$$f_p = \frac{Ru}{R \times R} \quad (6.14)$$

El espesor de la placa base, e_p , se lo determina mediante la siguientes expresiones. Se tomará el mayor valor arrojado por ellas.

$$e_p = 2n \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \quad (6.15)$$

Las placas base se empotraran sobre el área de cimentación mediante pernos de anclaje. Para determinar la ubicación de estos en la placa base, se seguirá la especificación para uniones estructurales usando tornillos ASTM A-490¹, propuesta por el Instituto Americano para construcciones de Acero (AISC) por sus siglas en Ingles.

Esta metodología es perfectamente aplicable a este caso ya que se utilizarán pernos ISO Clase 4.6 cuyas propiedades mecánicas son muy similares a los de la especificación utilizada.

Seleccionamos el número de pernos, N_p , que se utilizará para la sujeción de la placa base, con el objetivo de distribuir la fuerza R_u aplicada, F_{cp} representa la fuerza aplicada en cada perno:

$$F_{cp} = \frac{Ru}{N_p} \quad (6.16)$$

¹ [16]

La distancia, L_{\min} , entre el centro del tornillo más cercano y el final del miembro conectado hacia el cual la presión desde el tornillo es directa no será menor que $\frac{2Df_p}{F_u}$, por lo tanto:

$$L_{\min} = \frac{2Df_p}{F_u} \quad (6.17)$$

En donde D es el diámetro del tornillo, f_p es el esfuerzo de aplastamiento calculado en el perno debido a la fuerza de diseño y F_u es la resistencia de tensión mínima del perno.

$$f_p = \frac{F_{cp}}{e_p \cdot D} \quad (6.18)$$

Otra distancia que se debe tomar en cuenta es la medida paralela a la línea de aplicación de la fuerza desde un tornillo hacia el filo libre del miembro hacia el cual la fuerza está dirigida, y esta no debe ser menor que el diámetro del tornillo multiplicado por el radio del esfuerzo de aplastamiento de la fuerza de tensión de la parte conectada. Proporcionando un factor de seguridad de 2.0, el criterio de diseño del esfuerzo de trabajo es el $\frac{L}{D} \geq 2 \left(\frac{F_p}{F_u} \right)$ por lo tanto:

$$L_{\min} = \frac{2 \cdot D \cdot F_p}{F_u} \quad (6.19)$$

Para determinar la longitud que tendrá el perno y el torque de apriete se sigue el procedimiento expuesto por Shigley (2003)¹

¹ [17]

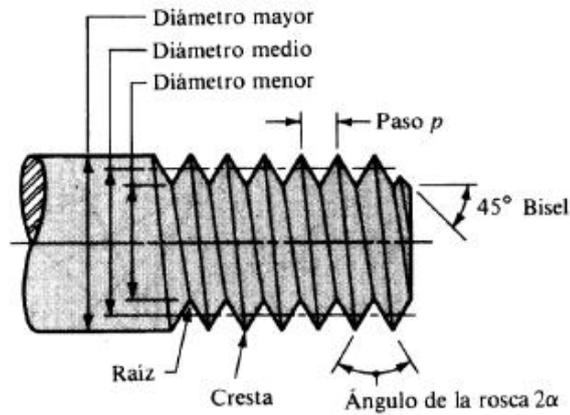


Figura 6.20 Nomenclatura para roscas de tornillos

El perno está formado por una parte roscada y otra cilíndrica. La longitud de la parte roscada está normalizada a dos veces el diámetro del perno, D , más 6 mm, para pernos de hasta 150 mm de longitud¹

$$L_r = 2 \cdot D + 6 \quad (6.20)$$

Se considera que un perno de longitud ideal tiene 3 hilos fuera de la tuerca posterior al apriete, por lo tanto tomamos esta consideración y representamos a esta longitud extra como L_{re} , en donde p es el paso del perno:

$$L_{re} = 3 \cdot p \quad (6.21)$$

El agarre en una conexión es la suma de los espesores de todos los elementos sujetos. La denominamos longitud de agarre, L_a .

Dentro del análisis de tensión en juntas empernadas el perno tiene una precarga inicial F_i , pero también sobre este influye una carga P , dicha carga se reparte entre el perno y las piezas unidas

¹ [18]

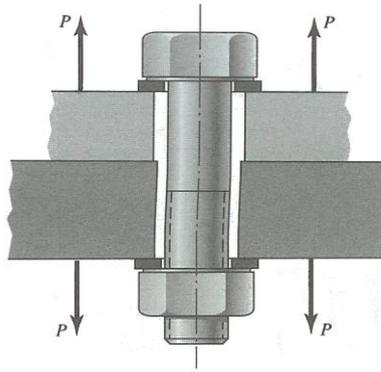


Figura 6.21 Junta empernada - Shigley

Cuando se está apretando la tuerca el perno se estira, así se produce una fuerza de sujeción denominada de precarga F_i . Esta fuerza existe en el perno después que la tuerca se apretó adecuadamente, por lo que no importa si se somete a una fuerza de tensión P .

Si entre los elementos a unir existe un empaque suave, el cual posee una rigidez muy pequeña en comparación con las de los otros elementos se vuelve despreciable. En el caso de existir un empaque cuya rigidez se asemeje a la de los otros elementos unidos se deberá calcular la fuerza del empaque F_{emp} y está deberá ser menor a F_i .

$$F_i = 0.9 \cdot A_t \cdot S_b \quad (6.22)$$

El factor de 0.9 se lo usa para juntas permanentes ya que para juntas desmontables se utiliza 0.75; A_t es el área de esfuerzo de tensión del perno, y S_b es la resistencia mínima de prueba.

La fuerza de precarga en el perno produce compresión en los elementos unidos por el. La rigidez de un perno dentro de la zona de sujeción consiste de dos partes en general, una de la parte roscada y otra de la parte sin roscar. Por lo tanto la rigidez del perno, k_b , es equivalente a la rigidez de dos resortes en serie.

$$k_b = \frac{A_c \cdot A_t \cdot E}{A_c \cdot L_{or} + A_t \cdot L_{oc}} \quad (6.23)$$

En donde A_c es el área de la parte sin rosca, A_t es el área de la parte roscada la misma que se encuentra tabulada, E es el módulo de elasticidad del material, L_r es la longitud sin roscar que se encuentra en la zona de sujeción y L_r es la longitud roscada en la zona de sujeción.

Para el caso de los elementos que se encuentran unidos por medio del conector la rigidez se la determina así:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_i} \quad (6.24)$$

La rigidez de cada uno de estos materiales $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$ se la determina mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{0.577 \cdot \pi \cdot E}{\ln \frac{(1.15t + D - d) \cdot (D + d)}{(1.15t + D + d) \cdot (D - d)}} \quad (6.25)$$

Si los elementos de la unión son del mismo material con trancos espalda con espalda simétricas, entonces actúan como dos resortes idénticos en serie. Si la longitud de agarre $L_a = 2e$ donde e es el espesor de cada placa y el diámetro de la cara de la arandela es $1.5D$, se determina que la relación esta dada por

$$k_m = \frac{0.577 \cdot \pi \cdot E}{2 \ln \left(5 \frac{0.577L_a + 0.5D}{0.577L_a + 2.5D} \right)} \quad (6.26)$$

Al tener las rigideces de los elementos incluidos en la unión empernada, debemos calcular la constante de rigidez de la unión, C , que representa la fracción de la carga externa R_u soportada por el perno.

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (6.27)$$

A continuación se realizará el cálculo de las fuerzas totales que se encuentran aplicadas a los elementos de la junta.

Precarga en las Placas

$$F_{ip} = F_i \cdot N_p \quad (6.28)$$

En los elementos conectados:

Fuerza Total en las placas.

$$F_t = (1 - C) \cdot R_u - F_i \cdot N_p \quad (6.29)$$

La relación que se debe cumplir es: $|F_{ip}| > |F_t|$

En cada perno

$$F_{pp} = C \cdot \frac{R_u}{N_p} + F_i \quad (6.30)$$

El esfuerzo de tracción, es parte de los esfuerzos directos ya que aparece por la aplicación directa de una carga.

$$\sigma = \frac{F_{pp}}{A_t} \quad (6.31)$$

Esfuerzo de precarga

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_t} \cdot K_t' \quad (6.32)$$

En la determinación del esfuerzo de precarga el factor de K_t' toma un valor de 1 ya que se trata de un material dúctil como lo es el acero.

Para la determinación del factor de seguridad, FS, aplicando un criterio conservador se utiliza la siguiente expresión

$$FS = \frac{S_y}{\sigma} \quad (6.33)$$

Para prevenir un exceso en el par de torsión de apriete de precarga del perno, se calculará el torque necesario, T_{ra} . Para lo cual se necesita conocer un factor de par de torsión, K , el cual depende de la condición inicial del perno. En este caso se tomará como galvanizado por lo que K tiene un valor de 0.20.

$$T_{ra} = k \cdot F_i \cdot D \quad (6.34)$$

6.2.6.1 placas bases del banco de colectores solares

Del diseño de la columna que soporta al banco de colectores solares tomamos el valor de la carga aplicada, en este caso únicamente tomaremos el valor correspondiente a la carga muerta maximizada por 1.2, ya que la inclinación que posee la estructura del banco de colectores solares reduce casi en su totalidad la fuerza que puede ejercer la lluvia sobre la estructura.

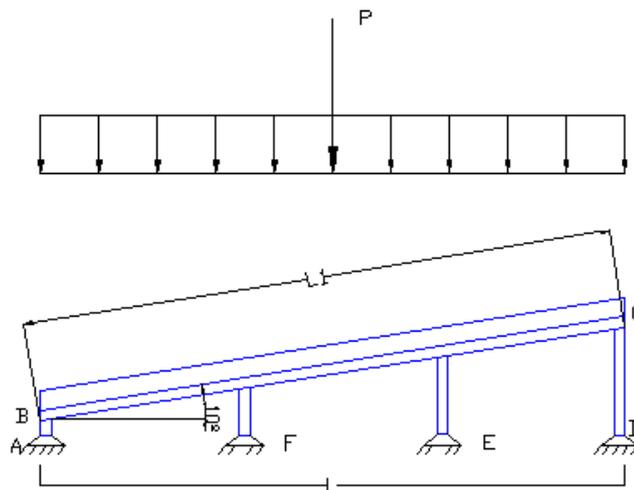


Figura 6.22 Carga aplicada sobre las columnas - banco colectores

$$R_u := 2658 \text{ N}$$

Carga muerta aplicada a la columna, D , y maximizada (1.2), ya que la inclinación del banco de colectores solares no permite que la lluvia ejerza una carga significativa sobre la columna.

$$f'_c := 21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Resistencia a la compresión del concreto}$$

$$F_y := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Resistencia a la cedencia del acero A-36}$$

$$F_b := 0.75 \cdot F_y \quad \text{Esfuerzo admisible de flexión en la placa base}$$

$$F_b = 180 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$F_c := 0.35f'_c \quad \text{Esfuerzo admisible de aplastamiento del concreto}$$

$$F_c = 7.35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R := 110 \text{ mm} \quad \text{Lado de la placa base}$$

$$A_1 := R \cdot R \quad \text{Área de la placa base}$$

$$A_1 = 1.21 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$f_p := \frac{R_u}{R \cdot R} \quad \text{Esfuerzo actual de aplastamiento en la placa base}$$

$$f_p = 0.22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$a_{cn} := 100 \text{ mm} \quad \text{Profundidad de la capa de concreto bajo la placa}$$

$$L_{cn} := 110 \text{ mm} \quad \text{Longitud de la capa de concreto bajo la placa}$$

$$A_2 := L_{cn} \cdot a_{cn} \quad \text{Área transversal de concreto que soporta a la placa}$$

$$A_2 = 1.1 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$b_f := 50 \text{ mm} \quad \text{Lado de la base de la columna}$$

$$n := \frac{R - 0.95 \cdot bf}{2} \quad \text{Distancia desde la columna al extremo de la placa}$$

$$n = 31.25 \text{ mm}$$

$$ep := 2 \cdot n \cdot \sqrt{\frac{fp}{Fy}} \quad \text{Espesor de la placa base}$$

$$ep = 1.891 \text{ mm}$$

Por lo tanto la placa base que se requiere es: 110 x 110 x 5 mm de espesor

Se han seleccionado 4 pernos M10 x 1.5 clase 4.6

$$D := 10 \text{ mm} \quad \text{Diámetro del perno}$$

$$p := 1.5 \text{ mm} \quad \text{Paso}$$

$$Hper := 6.85 \text{ mm} \quad \text{Altura de la cabeza}$$

$$Wper := 16 \text{ mm} \quad \text{Ancho entre caras planas}$$

$$Np := 4 \quad \text{Número de pernos}$$

$$Fcp := \frac{Ru}{Np} \quad \text{Fuerza aplicada en cada perno}$$

$$Fcp = 664.5 \text{ N}$$

$$fp := \frac{Fcp}{ep \cdot D} \quad \text{Esfuerzo de aplastamiento en el perno}$$

$$fp = 13.29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$Fu := 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Resistencia de tensión mínima del perno}$$

$$L_{\min} := \frac{2 \cdot D \cdot f_p}{F_u}$$

$$L_{\min} = 0.664 \text{ mm}$$

$$F_p := 0.75 \cdot F_y$$

$$F_p = 180 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$L_{\min} := \frac{2 \cdot D \cdot F_p}{F_u}$$

$$L_{\min} = 9 \text{ mm}$$

Determinación de la longitud del perno

$$e_{\text{concreto}} := 50 \text{ mm} \quad \text{Espesor de sujeción de la cimentación}$$

$$e_{\text{Ao}} := 5 \text{ mm} \quad \text{Espesor de la placa de anclaje}$$

$$E_{\text{concreto}} := 25000 \text{ MPa} \quad \text{Modulo de elasticidad del concreto}$$

$$E_{\text{Ao}} := 207000 \text{ MPa} \quad \text{Modulo de elasticidad del acero}$$

Arandela: 10R

Material: Acero al carbono

$$D_{\min} := 10.85 \text{ mm} \quad \text{Diámetro interno mínimo}$$

$$D_{\max} := 28.00 \text{ mm} \quad \text{Diámetro externo máximo}$$

$$e_{\max} := 2.80 \text{ mm} \quad \text{Espesor máximo}$$

Longitud del Perno

El perno está formado por una parte roscada y otra cilíndrica.

Longitud de la parte roscada

$$L_r := 2 \cdot D + 6$$

$$L_r = 26 \text{ mm}$$

Longitud ideal del perno 3 hilos fuera de la rosca

$$L_{re} := 3 \cdot p$$

$$L_{re} = 4.5 \text{ mm}$$

Longitud de agarre

$$L_a := e_{Ao} + e_{concreto} + 2 \cdot e_{max}$$

$$L_a = 60.6 \text{ mm}$$

Tuerca: Hexagonal regular M10

Material: Acero al carbono

$$W := 16 \text{ mm Ancho}$$

$$H := 8.4 \text{ mm Altura}$$

Zona de sujeción:

$$L_{or} := L_r - L_{re} - H$$

$$L_{or} = 13.1 \text{ mm}$$

$$L_{oc} := L_a - L_{or}$$

$$L_{oc} = 47.5 \text{ mm}$$

Longitud del perno

$$L_p := L_{oc} + L_r$$

$$L_p = 73.5 \text{ mm}$$

Propiedades mecánicas del perno clase 4.6

$$S_b := 225. \text{ MPa} \quad \text{Resistencia mínima de prueba}$$

$$S_u := 400 \text{ MPa} \quad \text{Resistencia de tensión mínima}$$

$$S_y := 240 \text{ MPa} \quad \text{Resistencia mínima de fluencia}$$

Material del perno: Acero al bajo o medio carbono

$$E_{\text{perno}} := 207000 \text{ MPa}$$

$$A_t := 58.0 \text{ mm}^2 \quad \text{Área de esfuerzo de tensión}$$

Precarga Inicial.

$$F_i := 0.9 \cdot A_t \cdot S_b$$

$$F_i = 1.175 \times 10^4 \text{ N}$$

Constantes de rigidez:

Para el perno

$$K_{bc} := \frac{E_{\text{perno}} \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot L_{oc}}$$

$$K_{bc} = 3.42 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$K_{br} := \frac{E_{\text{perno}} \cdot A_t}{L_r}$$

$$K_{br} = 9.165 \times 10^5 \frac{N}{mm}$$

$$K_b := \frac{K_{bc} \cdot K_{br}}{K_{bc} + K_{br}}$$

$$K_b = 2.492 \times 10^5 \frac{N}{mm}$$

Para las Placas

$$d := \frac{Dimin}{1.5}$$

$$d = 7.233 \text{ mm}$$

$$K_1 := \frac{0.577 \cdot \pi \cdot E_{concreto}}{\ln \left[\frac{(1.15 \cdot e_{concreto} + D - d) \cdot (D + d)}{(1.15 \cdot e_{concreto} + D + d) \cdot (D - d)} \right]}$$

$$K_1 = 2.808 \times 10^4 \frac{N}{mm}$$

$$K_2 := \frac{0.577 \cdot \pi \cdot E_{Ao}}{\ln \left[\frac{(1.15 \cdot e_{Ao} + D - d) \cdot (D + d)}{(1.15 \cdot e_{Ao} + D + d) \cdot (D - d)} \right]}$$

$$K_2 = 4.486 \times 10^5 \frac{N}{mm}$$

$$K_m := \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2}$$

$$K_m = 2.642 \times 10^4 \frac{N}{mm}$$

Constante de rigidez o elástica de las juntas: C

$$C := \frac{K_b}{K_b + K_m}$$

$$C = 0.9$$

Cálculo de fuerzas totales:

Precarga en las Placas

$$F_{ip} := F_i \cdot N_p$$

$$F_{ip} = 4.7 \times 10^4 \text{ N}$$

En los elementos conectados:

Fuerza Total en las placas

$$F_t := (1 - C) \cdot R_u - F_i \cdot N_p$$

$$F_t = -4.67 \times 10^4 \text{ N}$$

$$|F_{ip}| > |F_t|$$

En un cada perno

$$F_{pp} := C \cdot \frac{R_u}{N_p} + F_i$$

$$F_{pp} = 1.23 \times 10^4 \text{ N}$$

Cálculo de los Esfuerzos:

Esfuerzo de tracción

$$\sigma_t := \frac{F_{pp}}{A_t}$$

$$\sigma_t = 212.86 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de precarga

$$K_t' := 1$$

$$\sigma_i := \frac{F_i}{A_t} \cdot K_t'$$

$$\sigma_i = 202.5 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad, FS:

$$FS := \frac{S_y}{\sigma_t}$$

$$FS = 1.128$$

Torque de apriete:

$$k := 0.20$$

$$T_{ra} := \frac{k \cdot F_i \cdot D}{1000}$$

$$T_{ra} = 23.49 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Entonces se requiere para el anclaje de la placa base 4 pernos M10 tipo hexagonal clase 4.6 de 76 mm de longitud, 4 tuercas M10 hexagonal regular y 8 arandelas 10R. El torque de apriete aplicado será de 23.49 Nm.

6.2.6.2 placas bases de la cámara de secado

El procedimiento para el diseño de la placa base para la cámara de secado es similar al realizado para la estructura del banco de colectores solares.

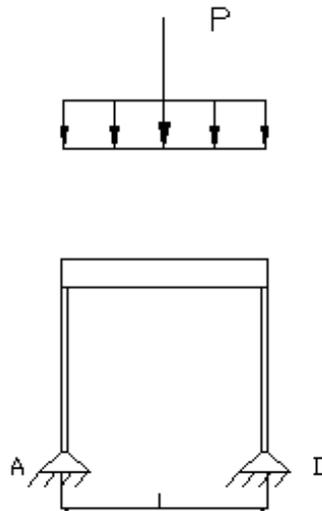


Figura 6.23 Carga aplicada a la columna cámara de secado

La placa de anclaje será de 100 x 100 x 5, la cual irá empotrada a la cimentación por medio de 4 pernos M10 tipo hexagonal clase 4.6 de 73 mm de longitud, 4 tuercas M10 hexagonal regular y 8 arandelas 10R. Además el torque de apriete para el montaje será de 23.49 Nm.

6.2.7 DISEÑO DE LAS SECCIONES DE TRANSICIÓN

Las secciones de transición son las encargadas de guiar y uniformar el flujo de aire en el secador. El ángulo de apertura de la sección de transición en relación con el eje de simetría del secador debe ser superior a 15° para que la pérdida de carga o caída de presión sea despreciable y las secciones que unen a los ventiladores con el banco de colectores solares y la que lo une con la cámara de secado deben tener tales dimensiones para que la velocidad del aire sea inferior a 5 m/s^1 .

¹ [12]

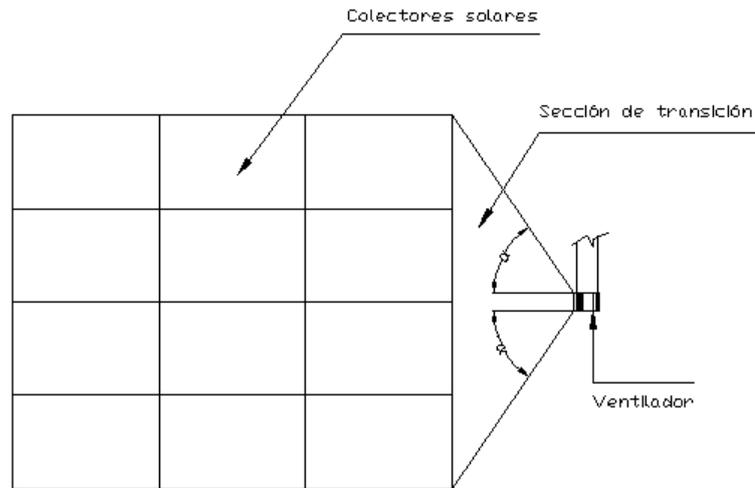


Figura 6.24 Sección de transición - FAO

Las secciones de transición se han diseñado siguiendo las recomendaciones hechas por la FAO.

Puesto que las secciones de transición están construidas con chapa de acero al carbono se prevé que existan pérdidas de calor, las mismas que se eliminarán ya que las secciones de transición estarán recubiertas con Belzona 3211¹.

6.2.7.1 diseño de las secciones de transición del banco de colectores

Para guiar el aire desde los ventiladores hasta el banco de colectores solares utilizaremos dos secciones de transición. Cada una de estas se conectarán al banco de colectores solares mediante remaches ya que al determinar el diámetro mínimo del elemento conector utilizando la siguiente expresión²

$$D_{\min} = \sqrt{5 \cdot e_{\min}} - 2 \quad (6.35)$$

En donde e_{\min} constituye la sumatoria de las placas a unir, que en este caso es 3 mm. De donde se obtiene que el diámetro del elemento conector es 2 mm por lo tanto las dimensiones de los diámetros de los remaches cumplen con este requerimiento.

¹ Las aplicaciones, características técnicas e instrucciones de aplicación de Belzona 3211 se encuentran en la sección Anexos A 6.4.2

² [19]

Se realizó un análisis de los posibles efectos que tendrá la presión de los ventiladores sobre la junta y se llegó a la conclusión que no afectan a la junta ya que el material del que normalmente se construyen los elementos conectores muestra propiedades mecánicas que sobrepasan de gran manera a los esfuerzos que se generan a partir de las presiones tratadas.

6.2.7.2 diseño de la sección de transición de la cámara de secado

Para transportar el aire caliente desde los colectores solares hasta la cámara de secado se utilizará una sección de transición de mayor tamaño que las dos anteriores.

Ya que los elementos a unir son de diferente naturaleza y dimensiones puesto que hablamos de madera y acero con espesores de 40 mm y 1.5 mm respectivamente el procedimiento de diseño es aquel seguido para una junta empernada, en la que las fuerzas máximas y mínimas que se presentarán provienen de la presión de trabajo de los ventiladores.

Para acoplar la sección de transición a la cámara de secado tomando en cuenta las consideraciones indicadas en el párrafo anterior, se utilizara 24 pernos M10 x 1.25 clase 4,6 de 55 mm de longitud, 24 tuercas M10 y 48 arandelas 10N. El torque de apriete aplicado será de 24.79 Nm.

6.2.8 DISEÑO DE LA SOLDADURA

La sociedad americana de soldadura (AWS) por sus siglas en ingles define a la soldadura como¹ “Una coalescencia localizada de metales ó no metales producida por calentamiento de los materiales a temperaturas adecuadas, con ó sin la aplicación de presión ó por la aplicación de presión solamente y con ó sin el uso de Material de aporte”.

Se utilizará soldadura por arco (AW), mediante un proceso de soldadura manual con electrodos revestidos (SMAW). En este proceso de soldadura, la

¹ Definiciones incluidas en la norma A.W.S. A 3.0 “Términos y Definiciones de Soldadura” (A.W.S. A 3.0 Welding Terms and Definitions).

unión del metal se produce por el calor generado por un arco eléctrico, establecido entre el extremo del electrodo y la pieza.

El electrodo revestido es el metal de aporte de la soldadura y se encuentra formado por una parte central metálica conductora de la corriente eléctrica, denominada “alma”, y recubierta por una capa no conductora, llamada “revestimiento”.

Las especificaciones ANSI AWS A5.1 prescribe los requerimientos para la clasificación de electrodos revestidos para soldadura de aceros al carbono por proceso de soldadura con electrodo revestido, entre estos electrodos tenemos: E6010, E6013, E7015, E7018.

El tipo de electrodo a utilizar es el E7018 de 2 mm de diámetro. De acuerdo a su revestimiento este electrodo es de tipo básico ya que en el recubrimiento de estos electrodos predomina la calcita (CO_3Ca) y la fluorita (F_2Ca). Se los conoce también como electrodos de bajo hidrógeno, dado que estando bien secos, los niveles de H_2 en la atmósfera del arco es sustancialmente baja.

El revestimiento básico absorbe humedad del medio ambiente con mucha facilidad, por lo tanto, es muy importante que estos electrodos estén conservados en cajas herméticamente cerradas, depositadas en recintos climatizados, o en su defecto, colocados en hornos o termos portaelectrodos con temperatura y humedad controlada.

El tipo de soldadura será de filete ya que es la soldadura de aplicación normal más frecuente, se la puede definir como una soldadura de fusión de corte transversal aproximadamente triangular.

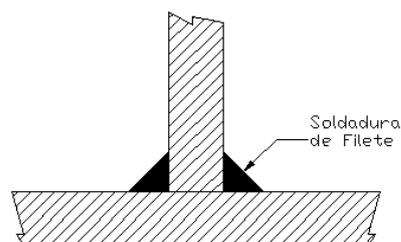


Figura 6.25 Soldadura de Filete

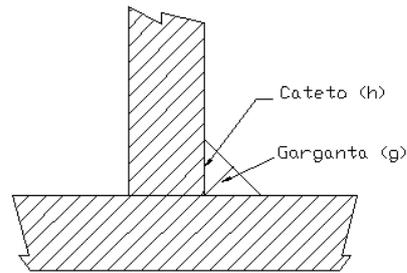


Figura 6.26 Cateto y garganta de la soldadura de filete

Para el cálculo del filete supongamos que en la unión de filete representada en la figura se aplica una carga de tracción (R_u) en la dirección longitudinal del filete de largo L_s y garganta g , luego:

$$\frac{R_u}{L_s \cdot g} = \sigma_F \quad (6.36)$$

En donde se tiene que la carga por unidad de soldadura en filete, C_s , está dada por la expresión

$$\frac{R_u}{L_s} = C_s \quad (6.37)$$

La tensión admisible σ_F , corresponde a la tensión admisible de corte (τ_v) y $L_s \cdot g$ es el área o sección resistente del filete. La tensión admisible es fijada, por ejemplo, para el Código Estructural AWS D1.1 o el AISC, aplicando el criterio de diseño por tensión admisible (DTA) o en la sigla del inglés ASD, como 0,30 de la resistencia a la tracción nominal del metal de aporte a utilizar en la soldadura, F_y .

$$\sigma_F = 0.3S_u \quad (6.38)$$

Como se puede apreciar en la figura el cateto c se lo puede determinar teóricamente mediante la siguiente expresión

$$h = \frac{g}{0.707} \quad (6.39)$$

También puede tomarse como un criterio de diseño fijando el cateto mínimo requerido por código y luego calculando el largo de soldadura de filete necesario. La Tabla 6.1 muestra el tamaño mínimo de cateto requerido para filetes estructurales según AWS D1.1.

Tabla 6.1 Cateto requerido para filetes

Espesor material base (mm)	Tamaño mínimo cateto (mm)
$t \leq 6$	3
$6 \leq t \leq 12$	5
$12 \leq t \leq 20$	6
$20 < t$	8

Fuente: AWS D1.1

6.2.8.1 soldaduras para las columnas del banco de colectores solares

Puesto que la placa base de la columna tiene un espesor de 5 mm y la columna tiene un espesor interior (1,5 mm) se diseñará tomando el cateto mínimo requerido por código para filetes estructurales de este tipo.

$R_u := 2658 \text{ N}$ Carga Total que soporta la columna

$S_u := 482 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ Resistencia a la tracción nominal del electrodo E7018

$\sigma_F := 0.3 \cdot S_u$

$\sigma_F = 144.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ Tensión admisible

Para espesores de menos de 6 mm el código dice que se requiere un cateto de mínimo 3 mm entonces:

$h := 3 \text{ mm}$ Cateto

$g := 0.707 \cdot h$ Garganta

$$g = 2.121 \text{ mm}$$

$$C_s := g \cdot \sigma_F \quad \text{Carga por longitud de soldadura en filete}$$

$$C_s = 306.697 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$L_s := \frac{R_u}{C_s} \quad \text{Longitud del filete de soldadura}$$

$$L_s = 8.667 \text{ mm}$$

6.2.8.2 soldaduras para las columnas de la cámara de secado

El procedimiento de diseño que se sigue el mismo. Debido a que la carga aplicada a las columnas de la cámara de secado es 1645 N la longitud del filete de soldadura se reduce a 5.3 mm.

6.2.9 DISEÑO DE UNIONES A CORTANTE

Las bandejas, marcos y las paredes de madera de la cámara de secado se unirán por medio de tornillos los mismos que están sometidos a cortante. Para determinar si los elementos conectores son los adecuados, se analizarán de acuerdo a la Teoría del esfuerzo cortante máximo, TECM.

$$P_{\text{cacao}} := 82.5 \text{ kgf} \quad \text{Peso de cacao por bandeja}$$

$$P_b := 12.052 \text{ kgf} \quad \text{Peso de la bandeja}$$

$$R_u := (2P_{\text{cacao}} + 2P_b) \cdot 10$$

$$R_u = 1.891 \times 10^3 \text{ N}$$

$$L := 2000 \text{ mm} \quad \text{Longitud de dos bandejas juntas}$$

$$W := \frac{R_u}{L}$$

$$W = 0.946 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{Carga distribuida en las bandejas}$$

Se le analiza como una viga empotrada en sus extremos y con una carga uniformemente distribuida

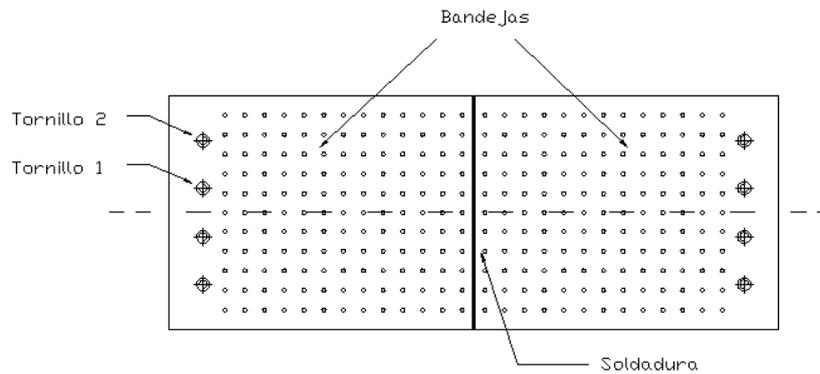


Figura 6.27 Esquema de la unión a cortante

$$V := \frac{W \cdot L}{2}$$

$$V = 945.52 \text{ N} \quad \text{Fuerza cortante}$$

$$M_{\max} := \frac{W \cdot L^2}{12}$$

$$M_{\max} = 3.152 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

El tornillo seleccionado es M10 x 1.25

$$r_1 := 110 \text{ mm} \quad \text{Distancia desde el tornillo 1 hasta el centroide}$$

$$r_2 := 330 \text{ mm} \quad \text{Distancia desde el tornillo 2 hasta el centroide}$$

La carga cortante primaria por tornillo corresponde a:

$$N_p := 4 \quad \text{Número de tornillos}$$

$$F' := \frac{V}{N_p}$$

$$F' = 236.38 \text{ N}$$

Las fuerzas cortantes secundarias son:

$$F''_1 := \frac{M_{\max} \cdot r_1}{(r_1^2 + r_2^2) \cdot 2}$$

$$F''_1 = 143.261 \text{ N}$$

$$F''_2 := \frac{M_{\max} \cdot r_2}{(r_1^2 + r_2^2) \cdot 2}$$

$$F''_2 = 429.782 \text{ N}$$

$$\beta_1 := 83.6^\circ \quad \text{Arctag}(981/110)$$

$$\beta_2 := 71.4^\circ \quad \text{Arctag}(981/330)$$

$$F_{11} := \left(F''_1^2 + F'^2 + 2 \cdot F''_1 \cdot F' \cdot \cos(\beta_1) \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$F_{11} = 289.739 \text{ N}$$

$$F_{22} := \left(F''_2^2 + F'^2 + 2 \cdot F''_2 \cdot F' \cdot \cos(\beta_2) \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$F_{22} = 552.626 \text{ N}$$

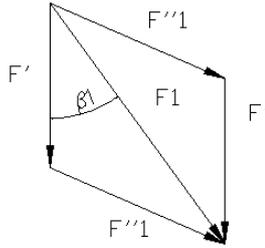


Figura 6.29 Componentes de la cortante principal

Se necesita un tornillo de 44.2 mm de longitud

El esfuerzo cortante está dado por:

$A_t := 61.2 \text{ mm}^2$ Área de esfuerzo de tensión (parte roscada)

$$\tau_2 := \frac{F''_2}{A_t} \text{ MPa}$$

$\tau_2 = 7.023 \text{ MPa}$ Esfuerzo cortante mayor producido en el tornillo dos

$$\sigma_t := \frac{F_{22}}{A_t}$$

$\sigma_t = 9.03 \text{ MPa}$

La bandeja está construida de chapa metálica de 1.5 mm de espesor, entonces el esfuerzo de aplastamiento mayor se debe a la presión del tornillo contra el alma de la chapa. El área de soporte corresponde al espesor de la chapa multiplicada por el diámetro del tornillo.

$A_{ap} := e_{ba} \cdot D$ Área da aplastamiento

$A_{ap} = 15 \text{ mm}^2$

$$\sigma_{ap} := \frac{F_{11}}{A_{ap}}$$

$$\sigma_{ap} = -19.316 \text{ Mpa}$$

El esfuerzo flexionante crítico en la bandeja se produce en la sección paralela al eje y a través de los pernos

$$aba := 1100 \text{ mm} \quad \text{Ancho de la bandeja}$$

$$I_{ba} := \frac{e_{ba} \cdot aba^3}{12}$$

$$I_{ba} = 1.664 \times 10^8 \text{ mm}^4 \quad \text{Inercia de la bandeja}$$

$$I_{agujero} := \frac{e_{ba} \cdot D^3}{12}$$

$$I_{agujero} = 125 \text{ mm}^4 \quad \text{Inercia del agujero}$$

$$I := I_{ba} - 2 \cdot (I_{agujero} + r1^2 \cdot e_{ba} \cdot D) - 2 \cdot (I_{agujero} + r2^2 \cdot e_{ba} \cdot D)$$

$$I = 1.627 \times 10^8 \text{ mm}^4 \quad \text{Inercia Total}$$

$$c := \frac{aba}{2}$$

$$c = 550 \text{ mm}$$

$$\sigma_f := \frac{M_{max} \cdot c}{I}$$

$$\sigma_f = 1.065 \text{ MPa}$$

Aplicando la teoría del esfuerzo cortante máximo

$$\sigma_{eq} := \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau^2}$$

$$\sigma_{eq} = 16.697 \text{ MPa}$$

Como el esfuerzo equivalente es menor a la Resistencia mínima de prueba (Clase 4.6), el tornillo es el indicado.

Precarga Inicial.

$$F_i := 0.9 \cdot A_t \cdot S_b$$

$$F_i = 1.239 \times 10^4 \text{ N}$$

Determinación del torque de apriete

$$k := 0.20$$

$$T_{ra} := \frac{k \cdot F_i \cdot D}{1000}$$

$$T_{ra} = 24.79 \text{ N} \cdot \text{m}$$

6.2.10 DISEÑO DEL SOPORTE DE LOS COLECTORES SOLARES

Cada arreglo está constituido por tres colectores solares, la estructura del banco de colectores presenta en su parte superior una inclinación de 10° por lo que se necesitará un soporte que impida el deslizamiento de los colectores fuera de la estructura. El soporte irá soldado a la viga de la estructura justamente a la mitad de la longitud del colector solar, como se puede apreciar en la siguiente figura.

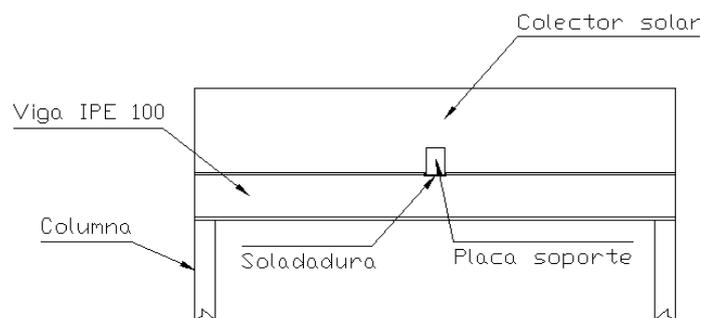


Figura 6.30 Esquema de la ubicación del soporte

Para comenzar con el diseño del soporte se debe determinar la fuerza aplicada sobre este. La carga total, C_t , aplicada sobre el soporte está formada por los pesos de tres colectores solares.

$$C_t = 117.57 \text{ Kgf}$$

Asumiendo que el peso del pegamento y los remaches representan el 1% del peso total entonces tenemos una carga total de:

$$C_t = 118.746 \text{ Kgf}$$

De donde la fuerza, F , aplicada al soporte será:

$$F = 1.187 \times 10^3 \text{ N}$$

El soporte estará construido con platina PL 38 x 12. Posterior al análisis del modulo de elasticidad de la sección se determino que se requieren dos platinas unidas entre si espalda con espalda, con el objetivo de aumentar su inercia para que el modulo de elasticidad sea superior al mínimo requerido por causa de la fuerza aplicada.

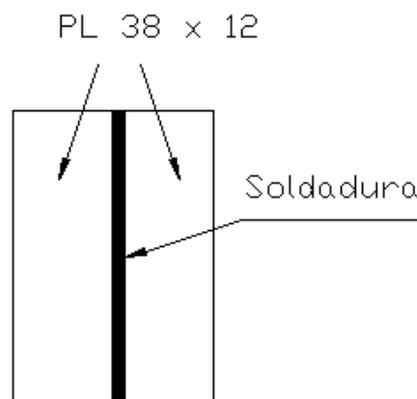


Figura 6.31 Esquema de la formación del soporte

La longitud del soporte es 35.7 mm ya que se quiere que este en contacto con el colector solar 30 mm y el espesor del ala de la viga es 5.7 mm.

$$L := 35.7 \text{ mm} \quad \text{Longitud del soporte}$$

$$M := F \cdot L$$

$$M = 4.239 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

De acuerdo a lo expresado por la AWS D1.1 seleccionamos el cateto, h , de nuestro filete de soldadura.

$$h := 5 \text{ mm}$$

$$g := 0.707 \cdot h \quad \text{garganta}$$

$$g = 3.535 \text{ mm}$$

El electrodo utilizado es de tipo básico E7018, cuya resistencia a la tensión, S_u es:

$$S_u := 482 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

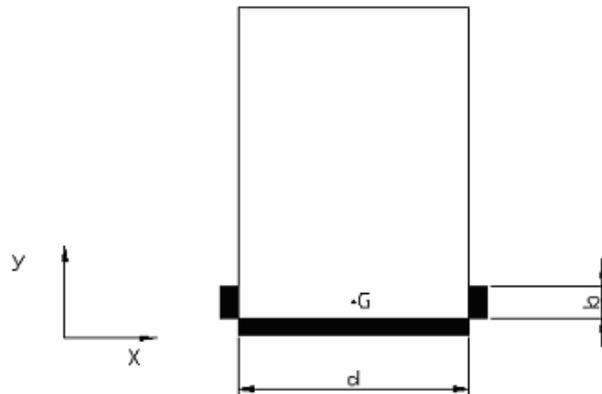


Figura 6.32 Soldadura del soporte a la viga

$$b := 5.7 \text{ mm}$$

$$d := 38 \text{ mm}$$

$$A := 0.707 \cdot h \cdot (2 \cdot b + d) \quad \text{Área de la garganta}$$

$$A = 174.629 \text{ mm}^2$$

A continuación se determina la ubicación del centro de gravedad de la soldadura, G, a donde se transporta la fuerza aplicada.

$$x_G := \frac{d}{2}$$

$$x_G = 19 \text{ mm}$$

$$y_G := \frac{\left(2 \cdot b \cdot g \cdot \frac{b}{2}\right) + d \cdot g \cdot \left(b + \frac{g}{2}\right)}{(2 \cdot b + d) \cdot g}$$

$$y_G = 6.402 \text{ mm}$$

Con un cordón de soldadura de tipo filete bajo cualquier carga la falla se produce por cortante, entonces determinamos el esfuerzo cortante debido a la fuerza aplicada τ_v y el debido al momento τ_m .

$$\tau_v := \frac{F}{A}$$

$$\tau_v = 6.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Cálculo de la inercia del soporte:

$$I_{x1} := \left(\frac{1}{12} \cdot g \cdot b^3\right) + g \cdot b \cdot \left(\frac{b}{2} - y_G\right)^2$$

$$I_{x1} = 308.764 \text{ mm}^4$$

$$I_{x2} := \left(\frac{1}{12} \cdot d \cdot g^3\right) + d \cdot g \cdot \left(b + \frac{g}{2} - y_G\right)^2$$

$$I_{x2} = 292.41 \text{ mm}^4$$

$$I_x := 2 \cdot I_{x1} + I_{x2}$$

$$I_x = 909.938 \text{ mm}^4$$

$$\tau_m := \frac{M \cdot y_G}{I_x}$$

$$\tau_m = 298.253 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puesto que tenemos dos componentes del esfuerzo cortante, se calculará un esfuerzo cortante equivalente, τ_{eq} .

$$\tau_{eq} := \sqrt{\tau_v^2 + \tau_m^2}$$

$$\tau_{eq} = 298.331 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Y por último el factor de seguridad de la soldadura

$$FS := \frac{\frac{2}{3} \cdot S_u}{\tau_{eq}}$$

$$FS = 1.077$$

6.2.11 DISEÑO DEL TECHO DE LA CÁMARA DE SECADO

El método de Diseño por factor de carga y resistencia nos ha permitido el diseño de las columnas, las vigas se han diseñado suponiéndolas como simplemente apoyadas, la placa base se ha diseñado siguiendo la metodología indicada para ello, y la soldadura se ha calculado de acuerdo a lo estipulado por AWS D1.1

6.3 PLANOS CONSTRUCTIVOS

Los planos que se deben seguir para la construcción y ubicación de los elementos que forman el secador de granos de cacao se encuentran en la sección anexos A.6.3.1.

Los Catálogos de los perfiles estructurales empleados se encuentran en la sección anexos A.6.3.2; las características del electrodo E7018 se encuentran en la sección anexos A.6.3.3

6.4 MONTAJE

Para el montaje en primer lugar se necesita un área de terreno horizontal con la debida cimentación (mínimo 10 cm). Sobre este se encontrará la cámara de secado, las secciones de transición, los ventiladores y la estructura que soporta al banco de colectores solares.

El encargado de la construcción deberá marcar en el terreno cimentado los puntos donde se ubicarán las columnas que soportaran a la cámara de secado, a las secciones de transición y al banco de colectores solares.

Se señalará el área que va a ser ocupada por cada uno de los contenedores de roca. Este señalamiento es de gran importancia ya que las jaulas serán llenadas con roca en ese lugar, de no hacerlo así representaría un problema su transporte.

Las columnas de la cámara de secado se empotraran a la cimentación por medio de los pernos de anclaje, los marcos de las bandejas se unirán a las columnas por medio de soldadura por arco eléctrico, las bandejas se unirán a los marcos y estos a su vez a las paredes de madera por medio de tornillos.

Las secciones de transición pequeñas se unirán al banco de colectores solares mediante remaches y a los ventiladores usando pernos. La sección de transición grande se unirá al banco de colectores solares por medio de remaches y a la cámara de secado mediante pernos.

La estructura del secador será ensamblada en el sitio de trabajo. Las columnas se empotrarán en el suelo utilizando pernos de anclaje, luego, sobre estas se colocarán las vigas y se unirán a las columnas por medio de soldadura por arco eléctrico.

En las vigas y mediante un proceso de soldadura se colocarán los soportes de los arreglos de colectores solares, posteriormente se realizará el montaje de cada uno de los colectores solares los mismos que se unirán entre si mediante la aplicación de Belzona 3111¹ que es un polímero de última generación que garantizará una soldadura molecular efectiva entre los elementos a unir. Se debe tener en cuenta las juntas en que se necesite impedir el ingreso de agua o humedad se aplicará este producto.

6.5 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

6.5.1 MANTENIMIENTO

El mantenimiento preventivo es de gran importancia en este tipo de sistemas y consiste en aplicar pinturas o recubrimientos a los diferentes elementos dependiendo del material.

Estos recubrimientos tienen por objetivo salvaguardar las propiedades y características de los materiales que pudiesen ser afectadas por las condiciones ambientales. Consisten en recubrimientos anticorrosivos para el caso de elementos metálicos e impermeables para la madera.

Realizando estas actividades se prolonga la durabilidad de los elementos, eventualmente el operador deberá observar el estado externo de ellos y en el caso de encontrar algún rastro de corrosión se procederá a limpiar la parte afectada y colocar una nueva capa de protección, en el caso de los materiales metálicos.

En el caso de la madera se analizará el grado de afectación que esta ha sufrido, en caso de ser menor se procederá a limpiar la zona afectada y aplicar

¹ Las aplicaciones, características técnicas e instrucciones de uso de Belzona 3111 se encuentran en la sección de Anexos A 6.4.1

el recubrimiento adecuado y en el caso de que el daño sea severo se procederá a realizar un mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo se lo aplica a todos y cada uno de los elementos que constituyen el sistema ya que de una u otra forma estos van a deteriorarse. Consiste en retirar el elemento deteriorado y cambiarlo por otro en buen estado.

6.5.2 OPERACIÓN

El encargado de la operación del sistema debe prestar mucha atención a los instrumentos de control ya que estos nos indican el funcionamiento del secador.

Para la puesta en marcha del sistema el operador debe ubicar al rededor de la cámara de secado los sacos de cacao cuyo peso total sea equivalente a 500 kg. Luego debe verter el producto sobre las bandejas tomando en cuenta no exceder la altura de la cama de producto (15 cm).

Ahora debe anotar los valores de masa entregados por el sensor utilizado para medir esta magnitud.

Posterior a esta toma de datos se enciende el ventilador (no se lo apaga hasta que la masa de cacao que exista sobre las bandejas refleje que la humedad es inferior al 16%), Hay que realizar estas actividades lo más temprano posible con el afán de aprovechar la mayor cantidad de radiación solar.

CAPITULO 7

DISEÑO DEL SECADOR

7.1 EL VOLUMEN DE CONTROL

El volumen de control es el lugar en donde se realizará el proceso de secado. Se halla constituido por una estructura metálica, cuyas paredes son de madera, las bandejas se localizan en la parte superior de la estructura y son el lugar en donde va ubicado el producto a secar en este caso el cacao.

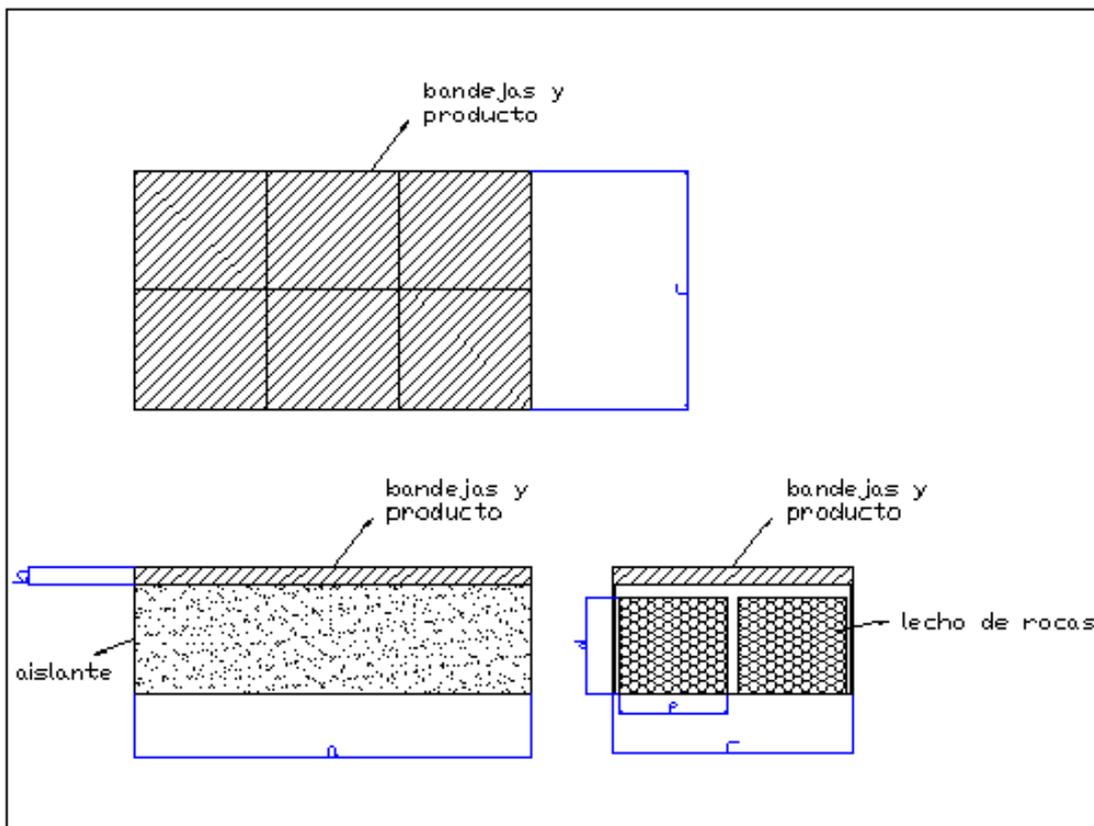


Figura 7.1 Esquema del volumen de control

El secador se encuentra ubicado en la Provincia de Guayas, Pascuales, a 0 metros sobre el nivel del mar, debido a esto la presión de la zona es de 1 atmósfera. El fluido de trabajo encargado de secar el cacao es el aire. En la tabla 7.2 se muestra las características del volumen de control. Pero antes debemos definir y determinar propiedades que son muy importantes para la ejecución del proyecto.

El cacao es un producto que antes de ser secado viene de un proceso de fermentación en el que alcanza un valor promedio de humedad en base húmeda (Hbh) del 60%; como se puede observar el agua forma parte del cacao y es la encargada del transporte de las sustancias nutritivas. El contenido de humedad en base húmeda Hbh se define con la ecuación (7.1), mw es la masa del agua, ms es la masa seca de producto y mt es la masa total.

$$Hbh = \frac{mw}{mw + ms} = \frac{mw}{mt} \quad (7.1)$$

Este valor de humedad puede ser expresado tanto en decimal como en porcentaje, también se puede expresar en base seca pero en el comercio y la industria no es muy difundida su utilización.

El grano pierde humedad según las condiciones psicrométricas del aire (temperatura y humedad relativa). Y esto se da por medio del fenómeno de sorción, este fenómeno indica la interacción existente entre agua y sustancia absorbente. Los términos adsorción y desorción se usan para indicar el proceso de ganar o perder agua por medio de sorción.

Los granos de cacao están compuestos por varias sustancias que poseen una estructura organizada, existen muchos tipos de agua que va desde el agua libre al agua ligada químicamente¹.

El equilibrio higroscópico se da cuando la actividad del agua de los granos es idéntica a la de la humedad relativa del aire, en este punto el contenido de humedad del grano es igual al contenido de humedad de equilibrio, He, para las condiciones psicrométricas del lugar.

Entre los modelos de equilibrio higroscópico existen teóricos, semiteóricos y empíricos para expresar el contenido de humedad de los granos. La ecuación de Henderson expresa en gamas más amplias de temperatura y humedad relativa el contenido de humedad de equilibrio de granos. Esta ecuación recibió modificaciones empíricas que ampliaron sus aplicaciones, a continuación se muestra la ecuación de Henderson modificada.

¹ [20]

$$He := \frac{1}{100} \cdot \left[\frac{\ln(1 - \phi)}{-c1 \cdot (Ts + c2)} \right]^{\frac{1}{c3}} \quad (7.2)$$

En donde Φ es la humedad relativa, T es la temperatura expresada en ° C, c1, c2, y c3 son parámetros de la ecuación de Henderson modificada cuyos valores se muestran a continuación.

Tabla 7.1 Parámetros de la ecuación de Henderson modificada para el cacao

Producto	c1	c2	c3
Cacao	4.1942×10^{-9}	0.0	2.7296

Fuente: ASAE (1981); BACH (1979); SILVA (1979); FIOREZE (1982)

Las propiedades termodinámicas, se relacionan con el equilibrio de un sistema, de aquí la necesidad de determinar el calor específico del cacao Cp. Para esto utilizamos la ecuación (7.3), la misma que es aplicable para productos cuya humedad se encuentre entre 26 y 100 %. Se encuentra expresado en kJ/kg °C

$$Cp := 1.675 + 0.025 \cdot \frac{Hbh}{100} \quad (7.3)$$

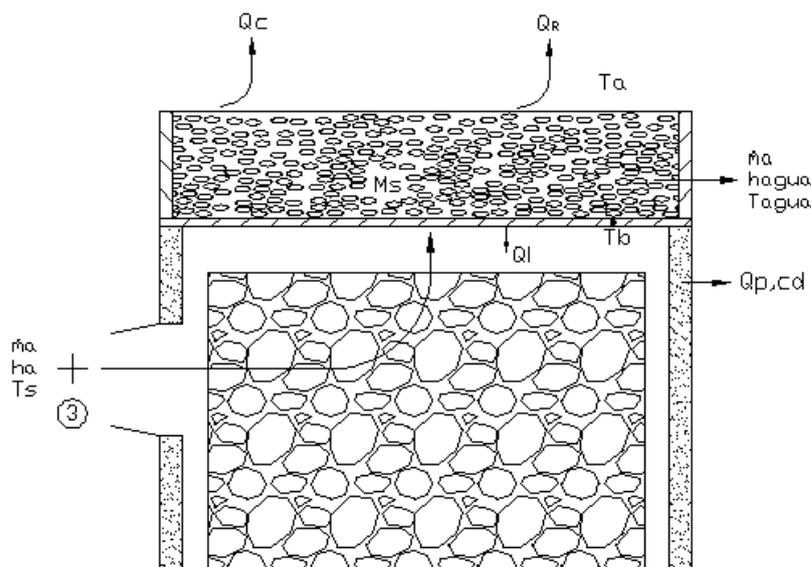


Figura 7.2 Volumen de control – Cámara de secado

Tabla 7.2 Características del Volumen de control

Parámetro	Magnitud	Valor	Unidades
Cacao	Masa	500	kg
	Densidad	500	kg/m ³
	Calor específico	1.69	kJ/kg °C
	humedad de equilibrio	10	%
	Area ocupada	6.6	m ²
	Altura de cama	0.15	m
Aire	Temperatura media ambiental	25.4	°C
	Temperatura de secado	50	°C
	Densidad	1.08	kg/m ³
	Calor específico	1.007	kJ/kg °C
	Conductividad térmica	0.0279	W/m °C
	Caudal másico	0.15	kg/s
	Caudal volumetrico	0.135	m ³ /s
	Humedad relativa	70	%
Acero	Densidad	7304	kg/m ³
	Espesor de la placa	0.0015	m
	Calor específico	0.434	kJ/kg °C
	Conductividad térmica	60.5	W/m °C
	Area ocupada	6.6	m ²
Madera	Densidad	640	kg/m ³
	Espesor de la pared	0.04	m
	Calor específico	1.17	kJ/kg °C
	Conductividad térmica	0.094	W/m °C
Rocas	Densidad	2724	kg/m ³
	Calor específico	0.88	kJ/kg °C
	Conductividad térmica	2.75	W/m °C
	Volumen del lecho	4.54	m ³

Fuente: Incropera, Iteso.

Las características térmicas y físicas de los elementos que constituyen el volumen de control se encuentra en la bibliografía utilizada la misma que se detalla posteriormente.

7.2 DISEÑO TÉRMICO

Las horas de brillo solar varían todos los días por lo tanto la cantidad de radiación solar absorbida y transformada en energía térmica por el sistema de colectores solares también lo hará. Al encontrar la dificultad de predecir este tipo de variaciones es sumamente recomendado para realizar el análisis térmico de los que sucede dentro de la cámara de secado suponer que la cantidad de energía térmica y mecánica que entra y sale a través del volumen

de control es igual, entonces la condición que prevalecerá es de un estado estable.

Aunque la generación térmica ocurriera en el medio, el proceso no afectará al balance de energía en el volumen de control. Además este requerimiento de conservación es válido para las condiciones de estado estable y transitorio¹.

El sistema está caracterizado por condiciones de estado estable en el que la temperatura en cada punto es independiente del tiempo, las dimensiones del volumen e control son pequeñas, por lo tanto el análisis de transferencia de calor se lo realizará en condiciones unidimensionales de estado estable.

Siempre que existe una diferencia de temperatura entre un cuerpo o entre cuerpos ocurre transferencia de calor. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

7.2.1 CONDUCCIÓN

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. Este intercambio de calor se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor.

Es posible cuantificar la conducción mediante ecuaciones o modelos. El calor por conducción Q_{cd} se lo determina mediante la ley de Fourier, que para nuestro caso se presenta así:

$$Q_{cd} = -K \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (7.4)$$

¹ [9]

En donde K es la conductividad térmica, A el área de contacto, ΔT es la variación de temperatura y Δx es la variación de longitud.

7.2.2 CONVECCIÓN

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección.

El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la hidrodinámica. El calor por convección Q_c se lo determina aplicando la ley Newton para el calentamiento o enfriamiento así:

$$Q_c = h \cdot A \cdot (T_s - T\phi) \quad (7.5)$$

Los parámetros asociados a esta ecuación son el coeficiente de convección h , T_s la temperatura de secado y $T\phi$ la temperatura ambiental.

7.2.3 RADIACIÓN

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío, o bien que no exista materia entre ellas. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética

es la teoría cuántica. El calor por radiación Q_R se lo determina en forma realista aplicando la siguiente ecuación:

$$Q_R = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon \cdot (T_A^4 - T_B^4) \quad (7.6)$$

En donde $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ Constante de radiación de Stefan-Boltzmann, ε es la emitancia del cuerpo radiante, T_A y T_B son las temperaturas de los cuerpos en análisis.

7.2.4 DISEÑO TÉRMICO DEL SECADOR

En el caso del secador propuesto la transferencia de calor se producirá principalmente por conducción y convección ya que la radiación es muy reducida; y las condiciones serán unidimensionales de estado estable.

El calor total Q requerido para el secado de los 500 kg de cacao mediante la utilización del secador lo representamos como la sumatoria de todos los calores que se hallan inmersos en el problema, de donde tenemos:

$$Q = Q_s + Q_L + Q_i + Q_p \quad (7.7)$$

En donde Q_s es el calor sensible, es decir, el calor empleado en la variación de temperatura, de una sustancia cuando se le comunica o sustrae calor. El calor latente Q_L , es el calor que, sin afectar a la temperatura, es necesario adicionar o sustraer a una sustancia para el cambio de su estado físico. El calor requerido para el inicio del funcionamiento del proceso de secado está representado por Q_i , se lo determina con la ecuación del calor sensible, teniendo en cuenta que debemos analizar el material del que se encuentra construido el secador. Y por último el calor perdido Q_p , el mismo que se lo determina utilizando las ecuaciones que rigen la transferencia de calor por conducción y convección. La suma del calor sensible y el calor latente es el calor producido.

$$Q_s = m \cdot C_p \cdot (T_s - T_\phi) \quad (7.8)$$

$$Q_L = m_w \cdot H_{fg} \quad (7.9)$$

En donde m es la masa del producto húmedo, C_p es el calor específico del producto. Mientras que para el calor latente tenemos: m_w que es la cantidad de agua que vamos a retirar del producto y H_{fg} es la entalpía de vaporización del agua.

Para determinar la eficiencia de la cámara de secado, η_{cs} , bajo las condiciones establecidas se utilizará la siguiente expresión:

$$\eta_{cs} = 1 - \frac{Q_p + Q_i}{E_o} \quad (7.10)$$

En donde E_o es la energía ofertada por el banco de colectores solares.

La cantidad de agua m_w a retirar del producto será determinada utilizando la siguiente ecuación propuestas por la FAO¹.

$$m_w := m_s \cdot \left(\frac{H_{bh}}{100 - H_{bh}} - \frac{H_f}{100 - H_f} \right) \quad (7.11)$$

En donde la cantidad de humedad inicial en el producto es igual a H_{bh} , H_f es la cantidad de humedad final del producto, m_s es la masa seca del producto, la misma que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$m_s := m \cdot \frac{\Delta H_s}{100} \quad (7.12)$$

En la que ΔH_s es la diferencia entre una humedad del 100 % y la humedad inicial del producto H_{bh} .

El sistema está caracterizado por condiciones de estado estable en el que la temperatura en cada punto es independiente del tiempo, las dimensiones del

¹ [12]

volumen de control son pequeñas, por lo tanto el análisis de transferencia de calor se lo realizará en condiciones unidimensionales de estado estable.

A continuación se muestra el proceso de cálculo que se siguió para determinar los requerimientos energéticos para el secado del cacao.

Hbh := 60 % Contenido de Humedad inicial del cacao

$$C_p := 1.675 + 0.025 \cdot \frac{Hbh}{100}$$

$$C_p = 1.69 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad \text{Calor específico del cacao}$$

m := 500 kg Masa de cacao

ϕ := 0.7 Humedad relativa del ambiente 70%

Los parámetros de la ecuación de Henderson modificada son: c1, c2, c3

$$c1 := 4.1942 \cdot 10^{-5}$$

$$c2 := 0.0$$

$$c3 := 2.7296$$

Ts := 50 °C Temperatura de secado

T Φ := 25.4 °C Temperatura media ambiental

$$He := \frac{1}{100} \cdot \left[\frac{\ln(1 - \phi)}{-c1 \cdot (Ts + c2)} \right]^{\frac{1}{c3}}$$

$$He = 0.103$$

Entonces la humedad de equilibrio del cacao es 10.3%

Ya que para que el cacao sea utilizado en los procesos de producción en chocolateras o para la exportación se requiere que tenga una humedad final del 7 %, se procede a calcular la cantidad de agua a retirar.

$H_f := 7 \%$ Contenido de humedad final

$$\Delta H_s := 100 - H_{bh}$$

$$\Delta H_s = 40 \%$$

$$m_s := m \cdot \frac{\Delta H_s}{100}$$

$m_s = 200 \text{ kg}$ Masa seca de cacao

$$m_{\omega} := m_s \cdot \left(\frac{H_{bh}}{100 - H_{bh}} - \frac{H_f}{100 - H_f} \right)$$

$m_{\omega} = 284.946 \text{ Kg_agua}$ Masa de agua a retirar del producto

La masa de agua que se desea retirar es equivalente a 284.946 litros de agua.

Al conocer la cantidad de agua que se debe retirar del producto determinaremos la cantidad de energía que se necesita para eliminar toda esa agua, para lo cual se calculan los diferentes calores inmersos en el proceso. Se requieren cuatro dimensiones básicas para el desarrollo de la transferencia de calor: longitud, masa, tiempo, y temperatura. La unidad que representa la energía (térmica, mecánica o eléctrica) en el SI es el joule (J).

Calor Sensible:

$$Q_s := m \cdot C_p \cdot (T_s - T_{\Phi})$$

$$Q_s = 2.079 \times 10^4 \text{ kJ}$$

Calor Latente

$$H_{fg} := 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Entalpía de vaporización del agua}$$

$$Q_l := m_w \cdot H_{fg}$$

$$Q_l = 6.44 \times 10^5 \text{ kJ}$$

Calor producido

$$Q_{\text{prod}} := Q_s + Q_l$$

$$Q_{\text{prod}} = 6.648 \times 10^5 \text{ kJ}$$

Calor perdido

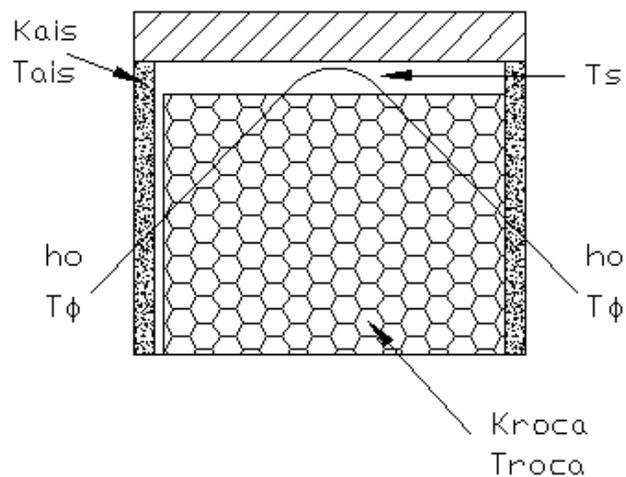


Figura 7.3 Transferencia de calor dentro de la cámara de secado

$$W := 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad del viento}$$

La velocidad del viento a esta altura se la podría excluir, ya que de acuerdo con los procedimientos de la Organización Meteorológica Mundial, OMM, los datos

referentes a la velocidad del viento son tomados a una altura de 10 m. Con la finalidad de prever posibles pérdidas debidas al viento se la tomará en cuenta.

$$h_o := 5.7 + 3.8V_w$$

$$h_o = 6.46 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad \text{Coeficiente de convección en el exterior}$$

Dimensiones de la cámara de secado:

$$L := 3.3 \text{ m} \quad \text{Longitud}$$

$$a_n := 2 \text{ m} \quad \text{Ancho}$$

$$a_l := 0.80 \text{ m} \quad \text{Altura del lecho de rocas}$$

$$A := L \cdot a_l$$

$$A = 2.64 \text{ m}^2 \quad \text{Área analizada}$$

Aislamiento

Material: madera prensada¹

$$K_{ais} := 0.094 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad \text{Conductividad térmica de la madera}$$

$$L_{ais} := 0.04 \text{ m} \quad \text{Longitud del aislante (40 mm)}$$

Lecho de rocas

$$L_{lecho} = 2 \text{ m} \quad \text{Longitud del lecho de rocas}$$

$$K_{roca} := 2.75 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad \text{Conductividad térmica de la roca}$$

¹ [9]

Para determinar la resistencia térmica a la convección y a la conducción debemos calcular una resistencia equivalente para lo cual utilizaremos un circuito térmico también conocido como analogía eléctrica.

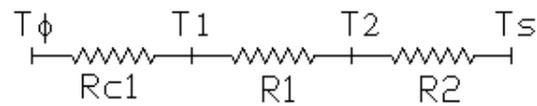


Figura 7.4 Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en serie

Resistencia a la convección en la pared más externa

$$R_{c1} := \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_{c1} = 0.059 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Resistencia a la conducción del aislante

$$R_1 := \frac{L_{\text{ais}}}{K_{\text{ais}} \cdot A}$$

$$R_1 = 0.161 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Resistencia a la conducción del lecho

$$R_2 := \frac{L_{\text{lecho}}}{K_{\text{roca}} \cdot A}$$

$$R_2 = 0.275 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Resistencia total a las pérdidas de calor

$$R_t := R_{c1} + R_1 + R_2$$

$$R_t = 0.495 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$Q_p := \frac{T_s - T_{\Phi}}{R_t}$$

$$Q_p = 49.666 \text{ W}$$

$$Q_p := \frac{Q_p \cdot 3600}{1000}$$

$$Q_p = 178.799 \text{ kJ}$$

Calor requerido para calentar la placa de acero

$$\delta := 7304 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del acero}$$

$$C_p := 0.434 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$m := 72.31 \text{ kg} \quad \text{Masa de la placa de acero sin perforaciones}$$

Puesto que la placa de acero está perforada del valor total de su masa se reducirá el 10 % que representa el área perforada.

$$m = 65.079 \text{ kg} \quad \text{Masa de la placa de acero perforada}$$

$$Q_i := m \cdot C_p \cdot (T_s - T_{\Phi})$$

$$Q_i = 694.809 \text{ kJ}$$

Cálculo de calor total requerido en el proceso

$$Q := Q_{\text{prod}} + Q_p + Q_i$$

$$Q = 6.656 \times 10^5 \text{ kJ}$$

Se requiere 0.66 MJ de energía para secar 500 kg de cacao bajo las condiciones establecidas para el análisis, en donde la eficiencia de la cámara de secado será:

$$\eta_{cs} := 1 - \frac{(Q_p + Q_i)}{E_o}$$

$$\eta_{cs} = 0.99$$

Tabla 7.3 Parámetros inmersos en el secado

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Humedad en base Humeda	Hbh	60	%
Humedad final	Hf	7	%
Masa Seca	ms	200	kg
Masa de agua	mw	285	kg
Calor Sensible	Q _s	20790	kJ
Calor Latente	Q _L	644000	kJ
Calor Inicial	Q _i	695	kJ
Calor Perdido	Q _p	179	kJ
Calor Total	Q	665664	kJ
Eficiencia	η _s	99	%

7.3 PROCESO DE SECADO

Una primera aproximación para determinar el tiempo de secado será analizar directamente los valores energéticos ofertados, E_o y la energía requerida o demandada, E_d, para secar 500 kg de cacao. De donde el tiempo de secado será:

$$t_s = \frac{E_d}{E_o} \quad (7.13)$$

Aplicando la expresión 7.13 al problema existente tenemos:

$$E_d = 6.656 \times 10^5 \text{ kJ Energía demandada}$$

$$E_o = 9.252 \times 10^4 \text{ kJ Energía ofertada}$$

$$t_s := \frac{E_d}{E_o} \quad \text{Tiempo de secado estimado}$$

$$t_s = 7.195 \quad \text{horas}$$

En la provincia de Guayas se tiene un promedio de 2.81 horas de heliofanía efectiva, the, el tiempo de secado, t_s , será:

$$t_{he} := 2.81 \quad \text{horas}$$

$$t_s := \frac{t_s}{t_{he}}$$

$$t_s = 2.56 \quad \text{días}$$

La metodología más recomendada para la predicción del proceso de secado mediante la utilización de sistemas de colectores solares es indicada por el Instituto Nacional de Energía¹. La carta psicrométrica utilizada en el proceso de secado se la puede observar en la sección anexos A 7.3.1

El aire se lo toma a temperatura promedio de 25.4° C y a una humedad relativa de 70%. Este punto está representado en la carta psicrométrica como el punto 1. En dicho punto la relación de humedad θ_1 será:

$$\theta_1 := 0.0142 \frac{\text{kg_agua}}{\text{kg_aire}}$$

Luego de pasar el aire a través de los colectores solares, alcanza una temperatura promedio de 50° C. Este punto se encuentra representado en la carta psicrométrica como el punto 2.

Al atravesar la cama del producto, el aire absorbe agua y aumenta su contenido de humedad, el punto de equilibrio se produce a una humedad

¹ [10]

relativa del 60%*. Y con ello se localiza el punto 3. La relación de humedad en dicho punto será:

$$\theta_3 := 0.021 \frac{\text{kg_agua}}{\text{kg_aire}}$$

Es decir que la capacidad de secado del aire circulante es:

$$\theta := \theta_3 - \theta_1$$

$$\theta = 6.8 \times 10^{-3} \frac{\text{kg_agua}}{\text{kg_aire}}$$

Debido a que se utiliza 2 ventiladores de 290 CFM para impulsar el aire caliente (a 50° C la densidad del aire es 1.08 kg/m³) dentro de la cámara de secado, el flujo másico de aire será:

$$Ma := 0.3 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

El régimen¹ de secado es:

$$\text{Regimen} := \theta \cdot Ma \quad (7.14)$$

$$\text{Regimen} := 2.1 \frac{\text{g_agua}}{\text{s}}$$

Como para el Ecuador tenemos un valor teórico de 12 horas de brillo solar, tomamos un valor conservador de 10 horas de trabajo diario del secador, la cantidad de agua extraída por día será:

$$M_{\text{agua}} := \frac{\text{Regimen} \cdot 10 \cdot 3600}{1000}$$

* Valor asumido referente al café, ya que no existen a disposición las curvas higrotérmicas del cacao

¹ [10]

$$M_{\text{agua}} = 75.6 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{día}}$$

El tiempo de secado del cacao se calcula dividiendo la cantidad total de agua que debe extraerse, para la masa de agua que puede extraerse diariamente.

$$\text{Tiempo}_{\text{secado}} := \frac{m_{\omega}}{M_{\text{agua}}} \quad (7.15)$$

$$\text{Tiempo}_{\text{secado}} = 3.8 \text{ días}$$

El proceso de secado finalizará cuando el producto alcance la humedad establecida según las exigencias comerciales o de uso, y tomando en cuenta las dos aproximaciones del tiempo de secado se espera que esto suceda en 3 días aproximadamente.

7.4 GRAFICAS

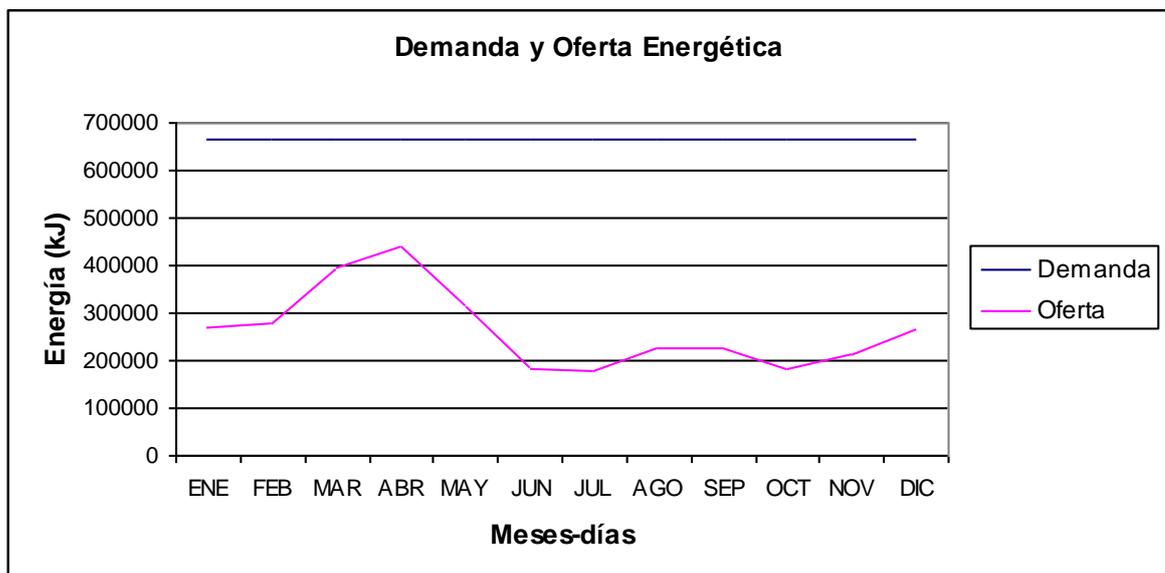


Figura 7.5 Demanda y Oferta energética

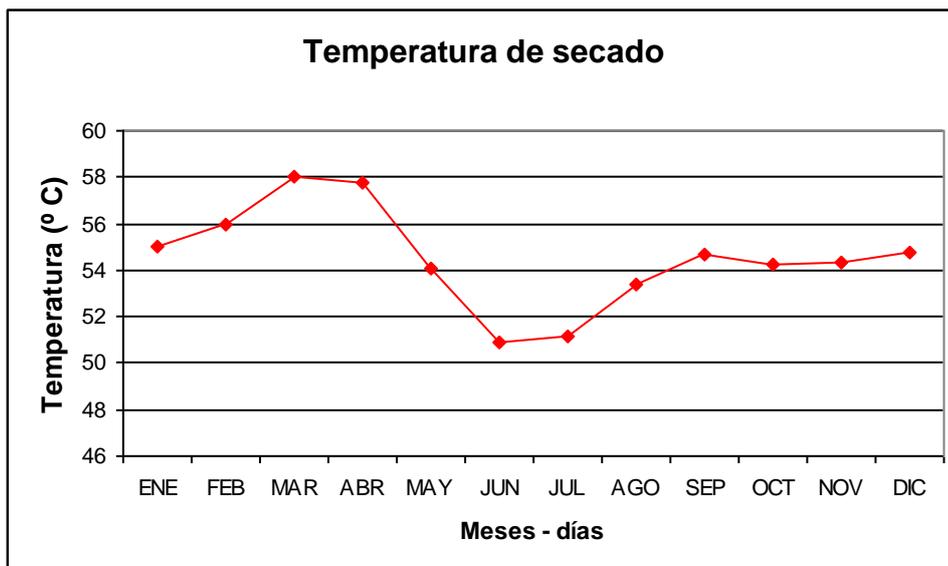


Figura 7.6 Temperatura de secado

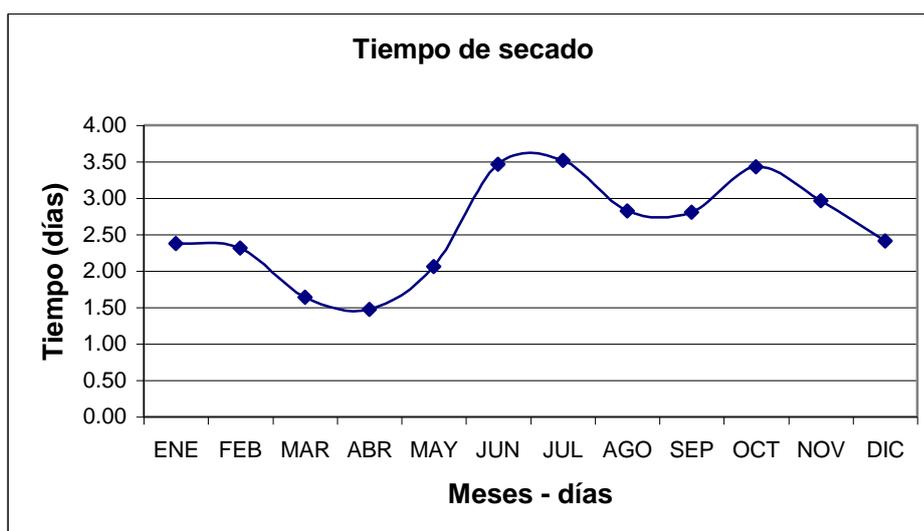


Figura 7.7 Tiempo de Secado

7.5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los datos proporcionados por el INAMHI referentes a las condiciones meteorológicas de la provincia de Guayas nos han permitido realizar las predicciones y graficas del funcionamiento del sistema.

La demanda energética es constante durante todo el año, y es de 665 MJ, mientras que la oferta energética no lo es, debido a la variación de la Heliofanía efectiva mensual y tiene un valor aproximado de 92.5 MJ.

La Temperatura de secado es uno de los factores de mayor relevancia en el diseño del secador. Mediante la implementación del banco de colectores solares y los valores promedio de radiación solar mensual, se alcanza una temperatura de secado de 50° C.

El tiempo de secado a más de depender de los factores meteorológicos propios de la zona, también depende de las características del producto. Entre las principales se halla la humedad inicial del producto, sus dimensiones, espesor de la cama de producto.

Se tiene un tiempo promedio de secado de 2.6 días. Durante los meses de Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo el tiempo de secado se reduce, teniendo un mínimo de 1.5 días durante el mes de Abril, mientras que en los meses restantes el tiempo de secado es superior al promedio, teniendo un máximo de 3.5 días durante el mes de Julio.

La temperatura de operación producirá variaciones mínimas en las dimensiones de los elementos que constituyen el secador puesto que sus coeficientes de dilatación lineal son bajos. En la siguiente tabla se muestran dichos valores.

Tabla 7.4 Coeficientes de dilatación lineal

Material	Coeficiente de dilatación lineal
	(mm/° C)
Aluminio	23×10^{-6}
Acero	11×10^{-6}
Madera	$5-8 \times 10^{-6}$
Vidrio	9×10^{-6}

CAPITULO 8

SIMULACIÓN Y CONTROL

8.1 SOLIDWORKS – COSMOS

SolidWorks® es una aplicación de automatización de diseño mecánico que utiliza la interfaz de usuario gráfica de Microsoft® Windows®. Esta aplicación hace posible que los diseñadores coquicen con rapidez sus ideas, experimenten con las operaciones y cotas, y produzcan modelos y dibujos detallados¹.



Figura 8.1 SolidWorks

El paquete informático SolidWorks incluye el programa Cosmos, el programa informático Cosmos fue desarrollado por Structural Research & Analysis Corporation (USA) y permite la generación y análisis de modelos basados en el método de los elementos finitos. Dispone de módulos generales para el cálculo estático y dinámico junto con los módulos para el cálculo estático, dinámico de frecuencias y térmicos lo que permite la resolución de grandes modelos.

¹ [26]

8.2 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Módulo de pre-proceso: Utilización de diferentes técnicas de mallado automático y paramétrico. Generación automática de uniones entre elementos no compatibles y de líneas y superficies de contacto.

Módulo de análisis: Realización de análisis estáticos y dinámicos, lineales y no lineales, térmicos, fatiga, optimización y sensibilidad.

Módulo de post-proceso: Generación de gráficas de isocontornos, secciones del modelo, animaciones temporales, gráficos XY.

8.2.1 APLICACIONES

- Generación y optimización directa de mallas tridimensionales de forma paramétrica, junto con la colocación de condiciones de contorno y cargas
- Cálculo avanzado de estructuras: edificaciones, puentes, presas, etc

8.3 MÉTODO Y FORMA DE TRABAJO DEL SOFTWARE

El método de elementos finitos es el utilizado por el software para realizar los diferentes tipos de análisis. Básicamente el método consiste en dividir el continuo en un número finito de elementos, es decir, discretizar el continuo y resolver sobre cada uno de los elementos las ecuaciones del sistema para después ensamblar la solución total¹

El método fue propuesto en 1943 pero en 1956 se presentaron los primeros resultados obtenidos con el, fue hasta 1960 cuando se le denominó como ahora se lo conoce².

El modelo numérico se lo construye a partir de un número finito de puntos, los mismos que podrán estar unidos con líneas cuyo objetivo es formar superficies y sólidos, y de esta manera representar la geometría a estudiar. A estos

¹ [21]

² [22]

puntos se los denomina nodos y son los responsables de mantener la continuidad entre elementos.

La solución de estos elementos unidos por los nodos arroja ecuaciones aritméticas (ecuaciones de discretización) que reemplazan a las ecuaciones diferenciales que gobiernan al sistema que se encuentra en estudio. Para llegar a estas ecuaciones se utilizan diferentes técnicas matemáticas y dentro de estas anotaremos las más comunes: método variacional, series de Taylor, método de residuos ponderados y balance de energía.

Para obtener la solución de un problema mediante el método de elementos finitos se sigue un procedimiento genérico que consta de las siguientes partes:

- Preprocesamiento – Discretización – Generación del modelo.
- Procesamiento – Cálculo del sistema de ecuaciones.
- Post procesamiento – Simulación – Animación.

El mallado es decir la discretización es una fase crucial en el análisis por Elementos Finitos. La calidad de la malla es fundamental para determinar la bondad de los resultados. Con la capacidad de transición automática de malla implementada en esta versión del Cosmos, se puede utilizar elementos muy pequeños en zonas importantes o de pequeño espesor, a la vez que usar elementos de mayor tamaño en zonas menos críticas.

8.4 SIMULACIÓN

8.4.1 SIMULACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA CÁMARA DE SECADO

Primero simularemos lo que sucede con las columnas, placas base y cimentación que soportan a la cámara de secado¹.

En la siguiente figura se observa la columna y placa base utilizadas en la cámara de secado.

¹ En el Anexo 8.4.1 Se ha preparado un manual del usuario para simular utilizando SolidWorks y Cosmos Works.

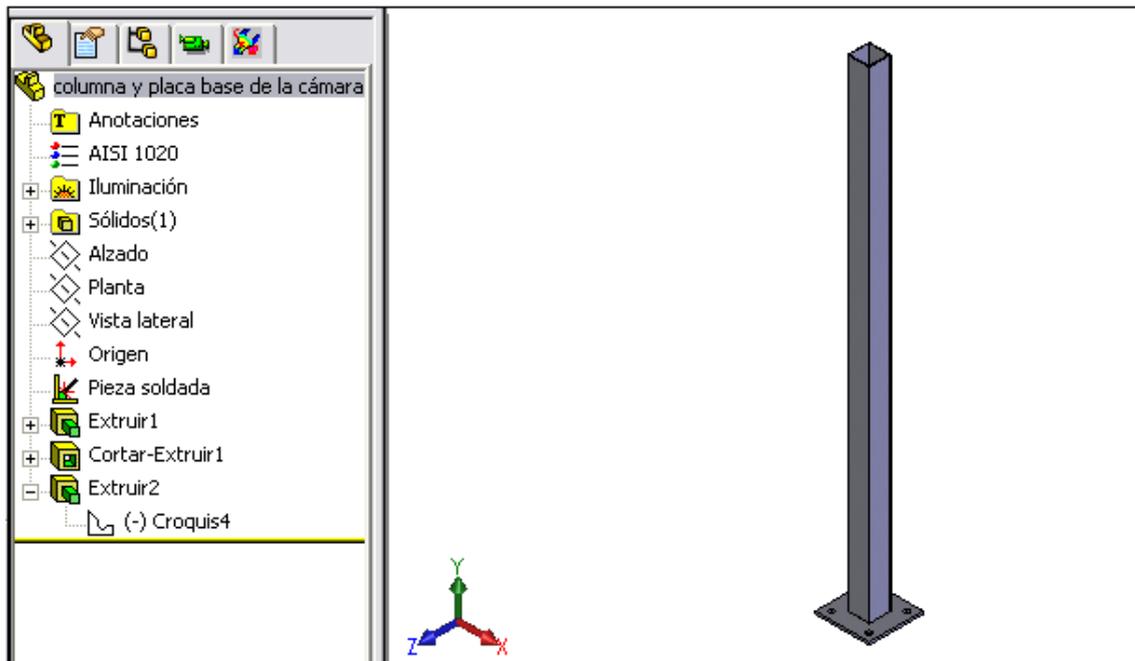


Figura 8.2 Columna y placa base de la cámara de secado

La placa base irá empotrada en la cimentación por lo tanto este elemento también será construido y simulado.

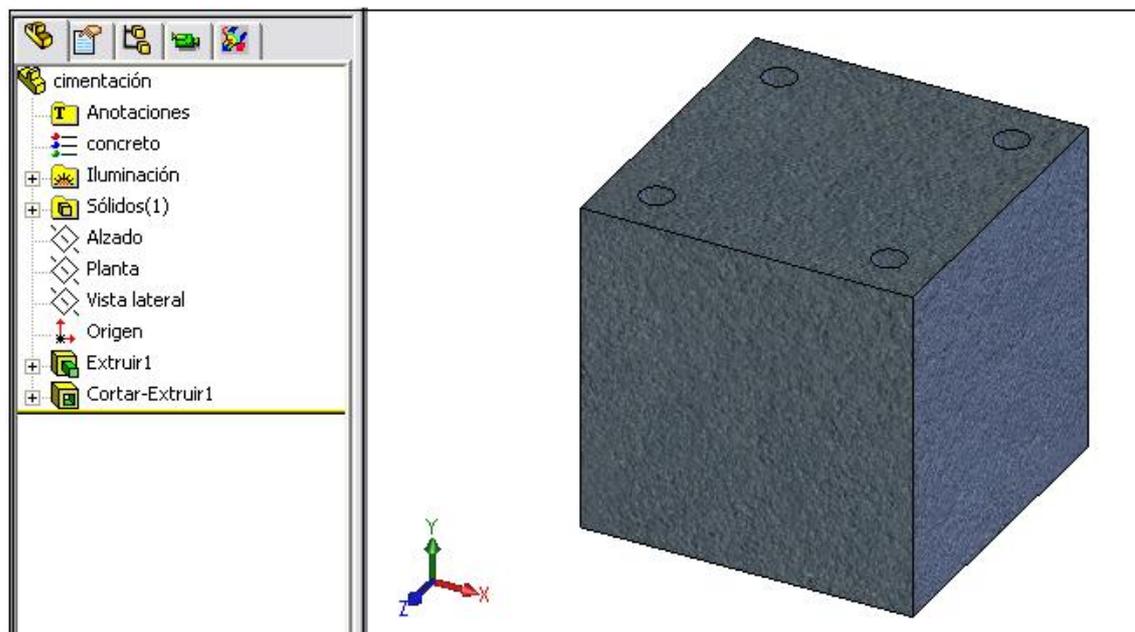


Figura 8.3 Cimentación

Utilizando un ensamble se procede a colocar todos los elementos de acuerdo al diseño inicial, una característica importante del software utilizado es que

posee elementos tales como pernos, arandelas que se encuentran normalizados.

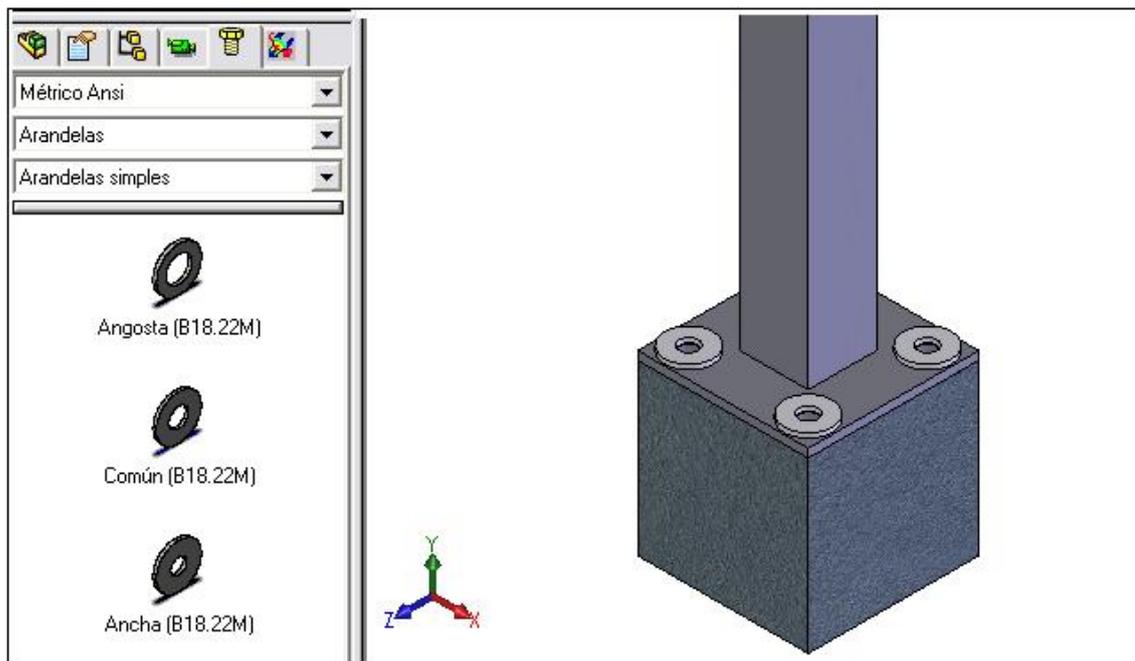


Figura 8.4 Placa base y arandelas de la cámara de secado

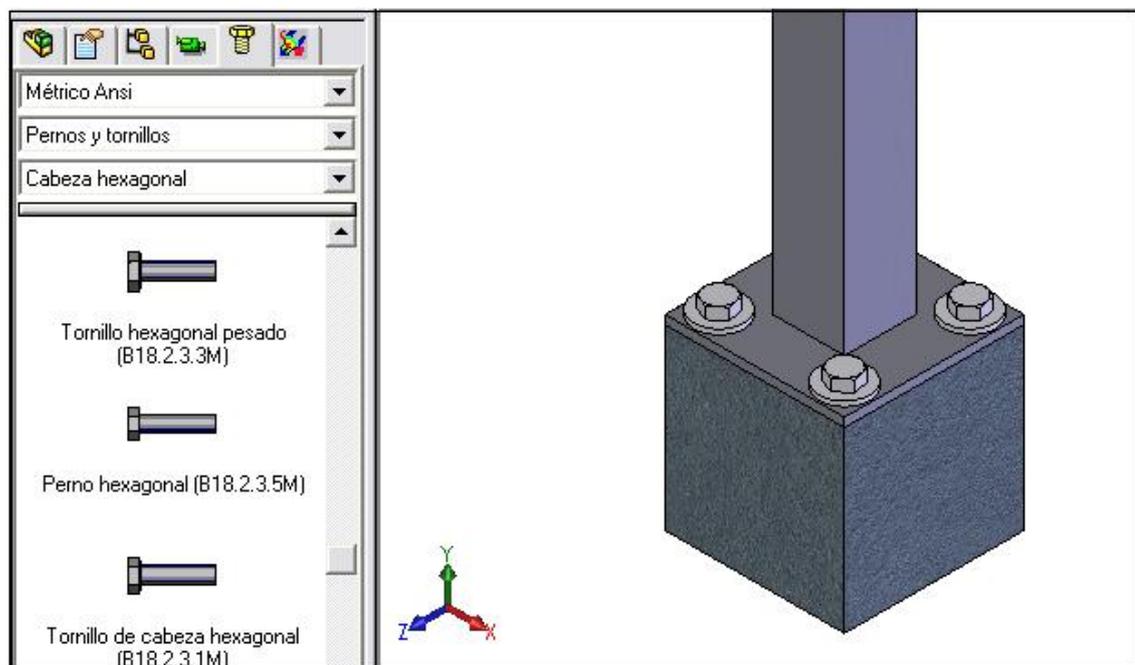


Figura 8.5 Elementos estructurales de la cámara de secado

Utilizando Cosmos Works se realizará el análisis de esfuerzos y pandeo del ensamble de los elementos estructurales de la cámara de secado.

En la figura mostrada a continuación se representa mediante flechas de color verde la restricción que tiene la cimentación (inmóvil) y las flechas de color azul representan la fuerza aplicada a la columna (Ru-método LRFD).

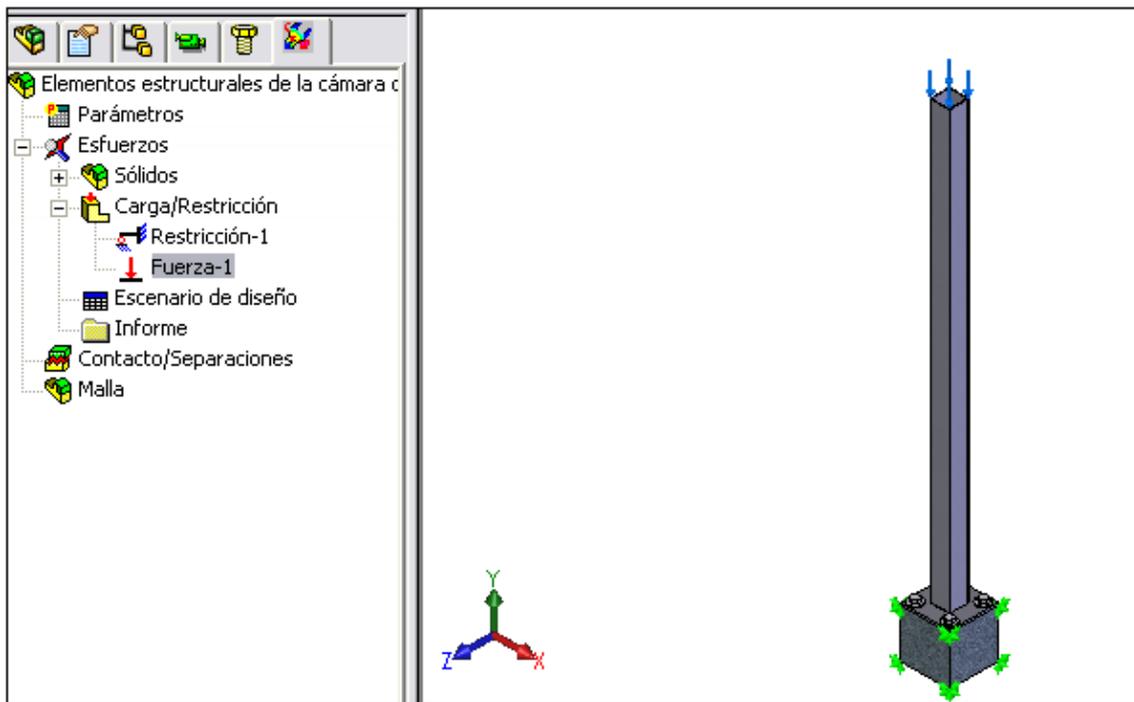


Figura 8.6 Restricciones y fuerza existentes

Mediante el método de elementos finitos el software calculará los esfuerzos que se producen en los elementos analizados, utilizando la teoría de la energía de deformación. En la siguiente figura se puede observar el mallado aplicado al ensamble.

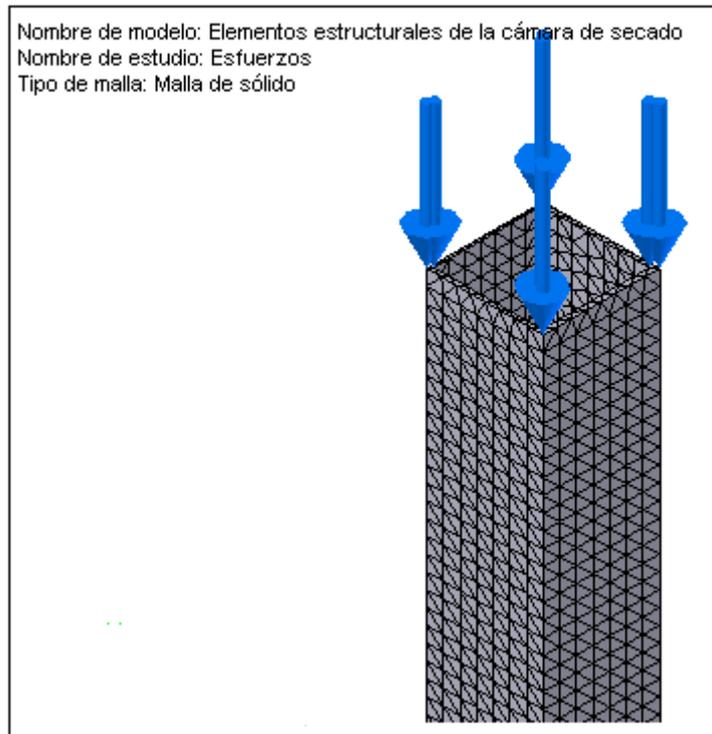


Figura 8.7 Mallado utilizado para el cálculo por elementos finitos

8.4.1.1 RESULTADOS DE ESFUERZOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

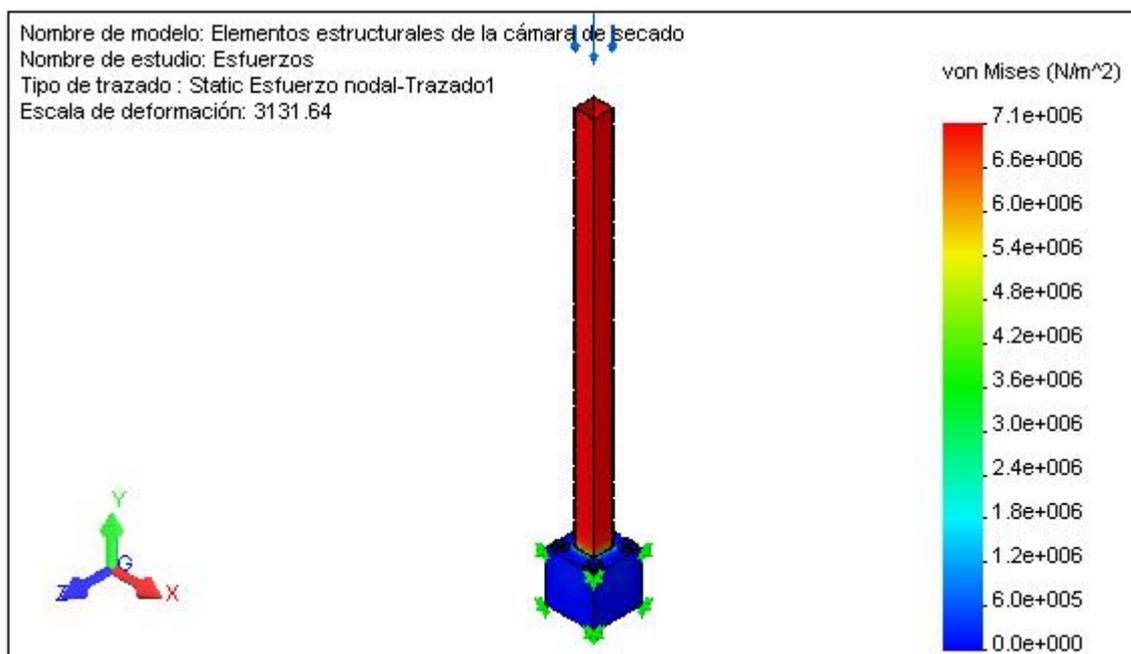


Figura 8.8 Resultado de esfuerzos

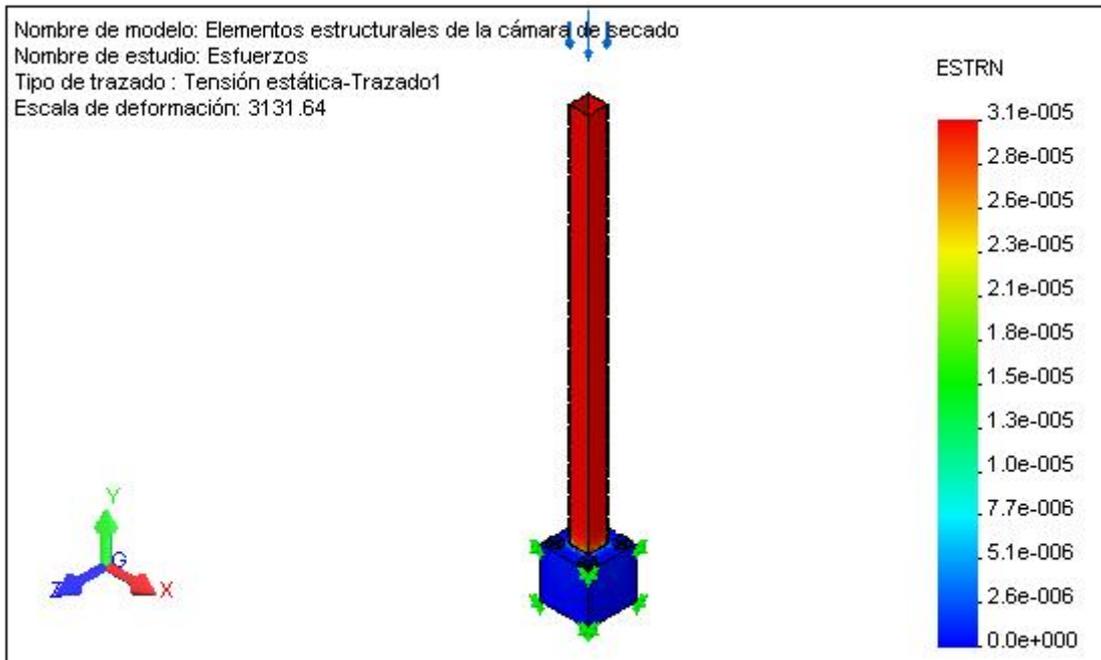


Figura 8.9 Resultado de tensiones

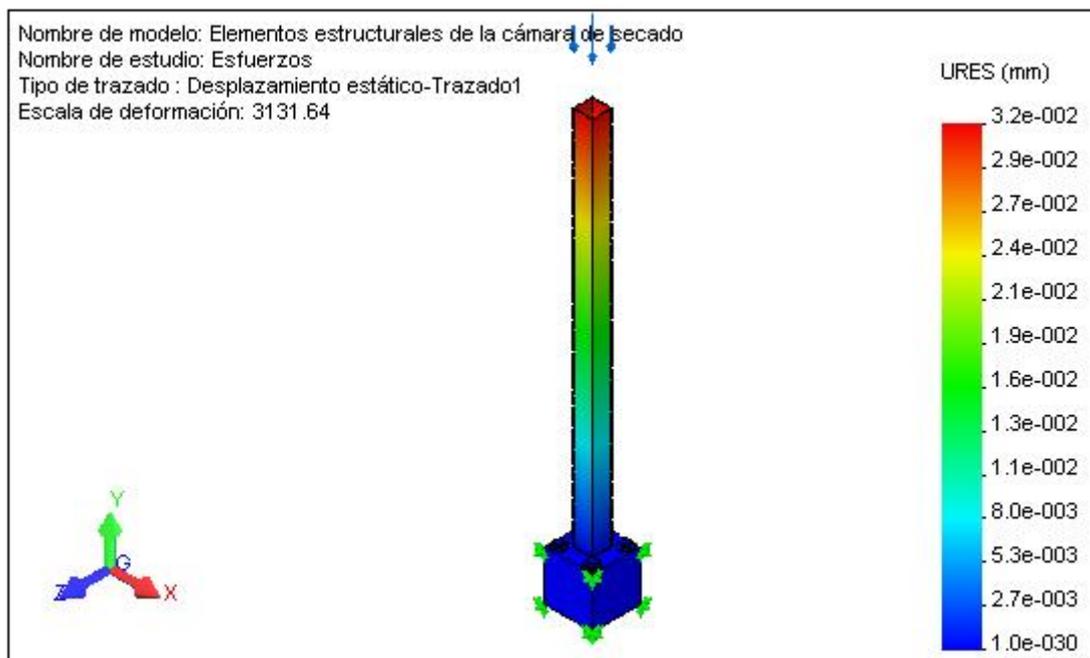


Figura 8.10 Resultado de desplazamientos

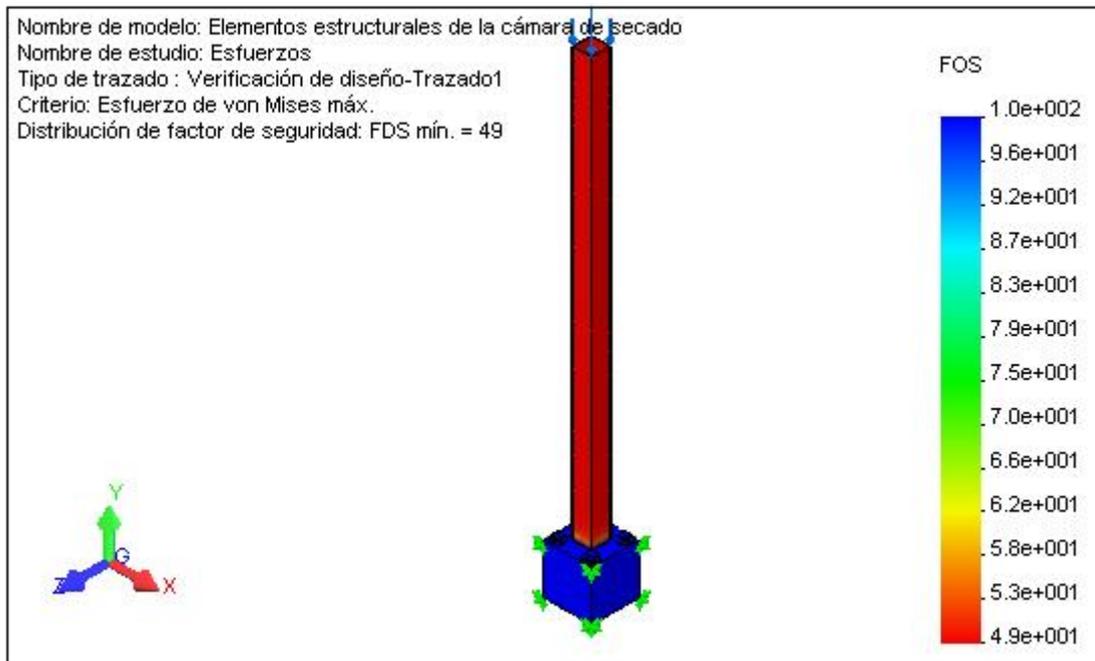


Figura 8.11 Resultado de verificación de diseño

8.4.1.2 RESULTADOS DE PANDEO OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

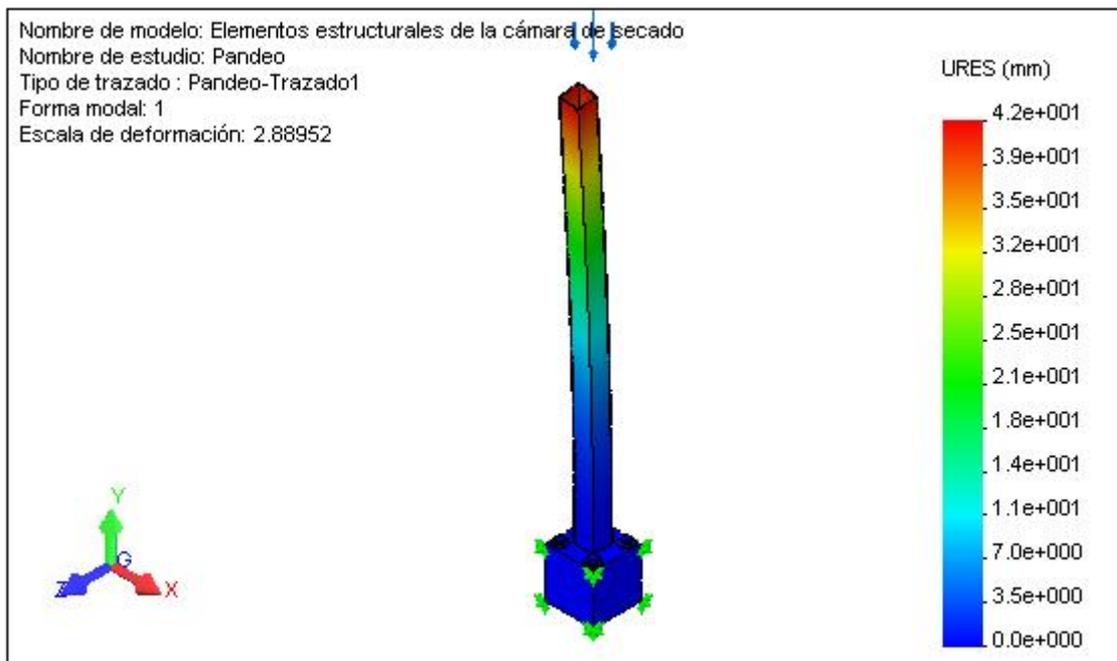


Figura 8.12 Resultado de desplazamientos

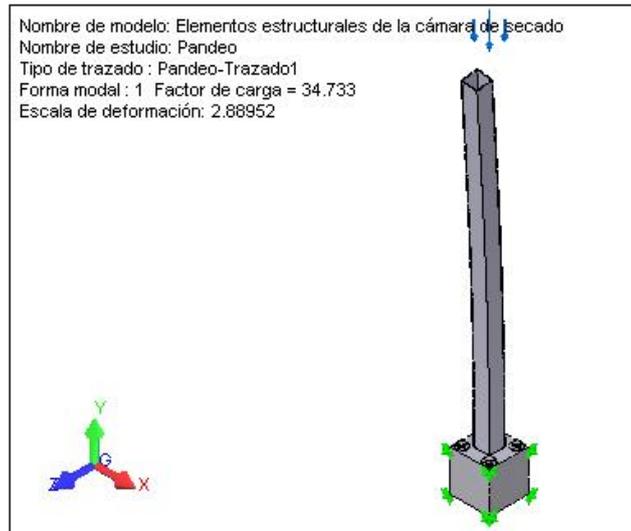


Figura 8.13 Resultado de deformación

8.4.2 SIMULACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEL BANCO DE COLECTORES SOLARES.

Se tomará para la simulación la columna de mayor longitud, placa base y cimentación del banco de colectores solares. El procedimiento a seguir es el mismo aplicado para los elementos estructurales de la cámara de secado. De igual manera se realizarán los análisis de esfuerzos y de pandeo.

8.4.2.1 RESULTADOS DE ESFUERZOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

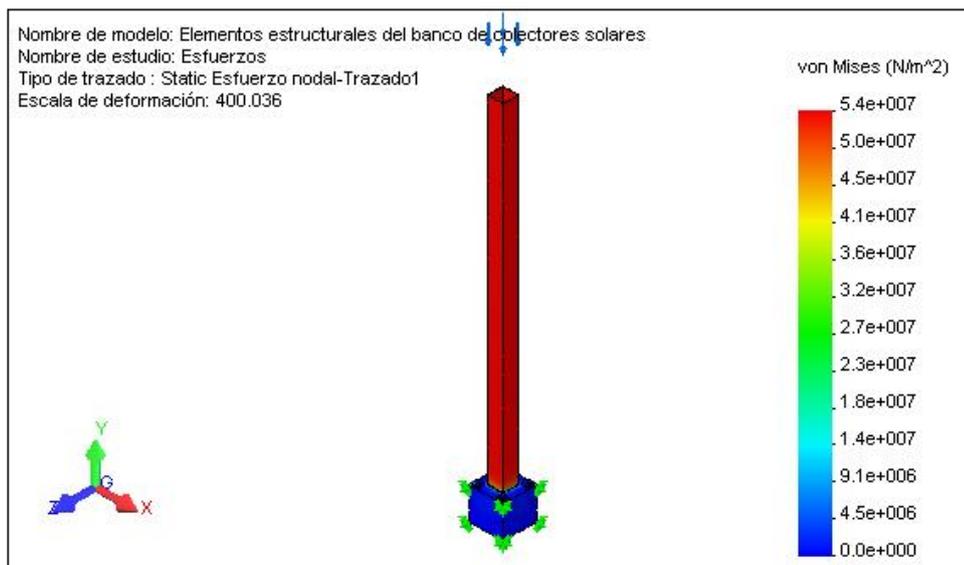


Figura 8.14 Resultado de esfuerzos

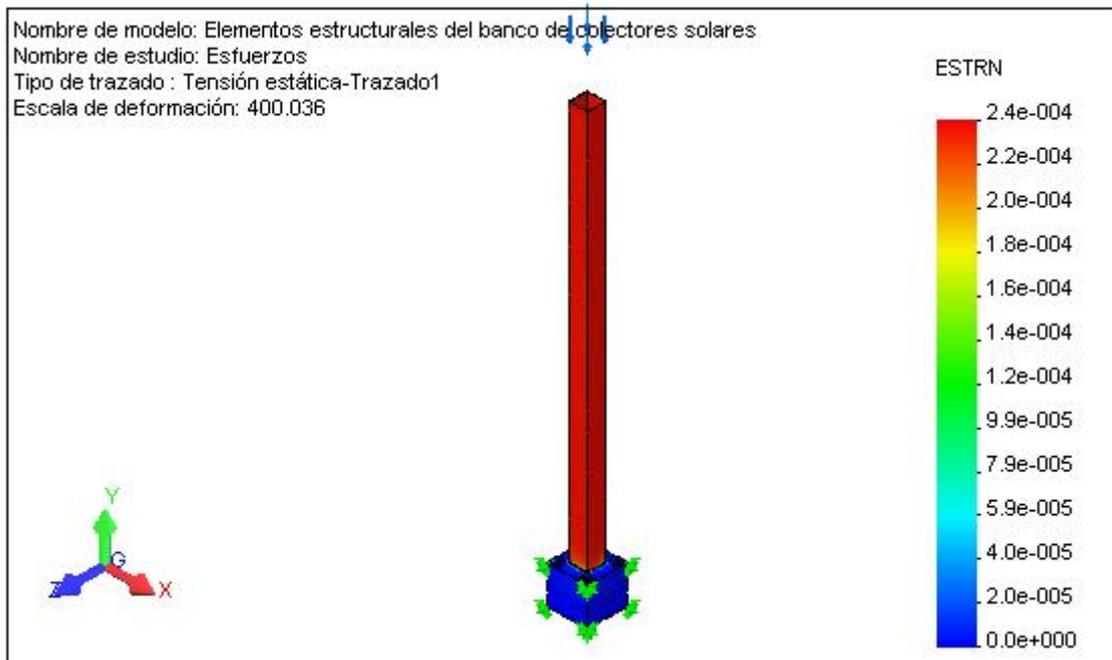


Figura 8.15 Resultado de tensiones

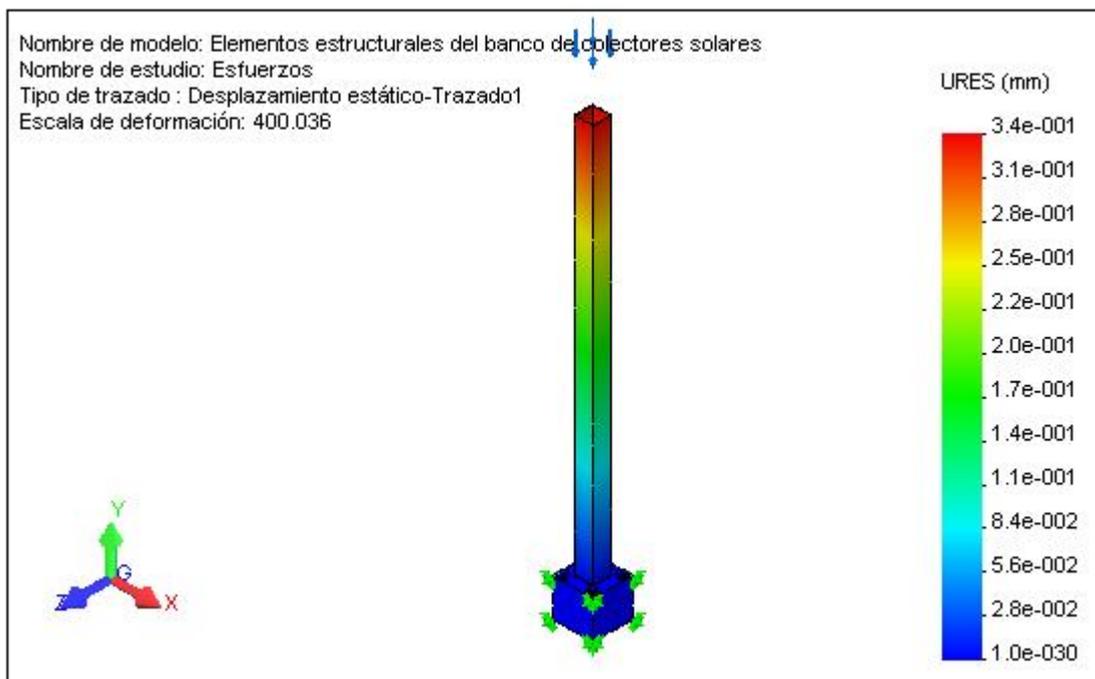


Figura 8.16 Resultado de desplazamientos

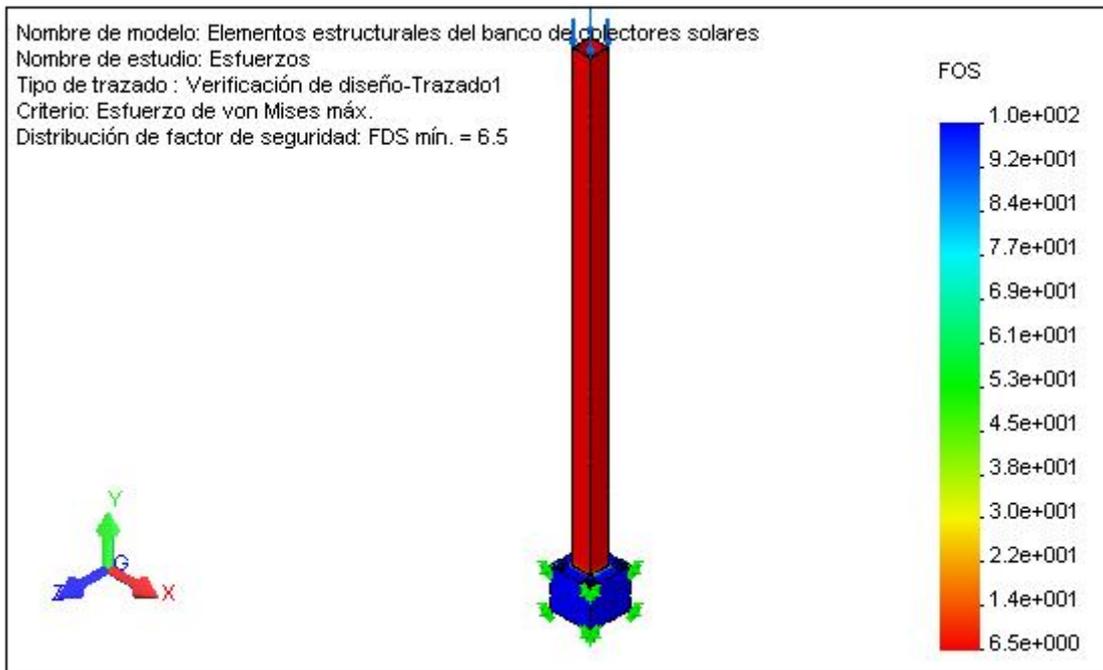


Figura 8.17 Resultado de verificación de diseño

8.4.2.2 RESULTADOS DE PANDEO OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

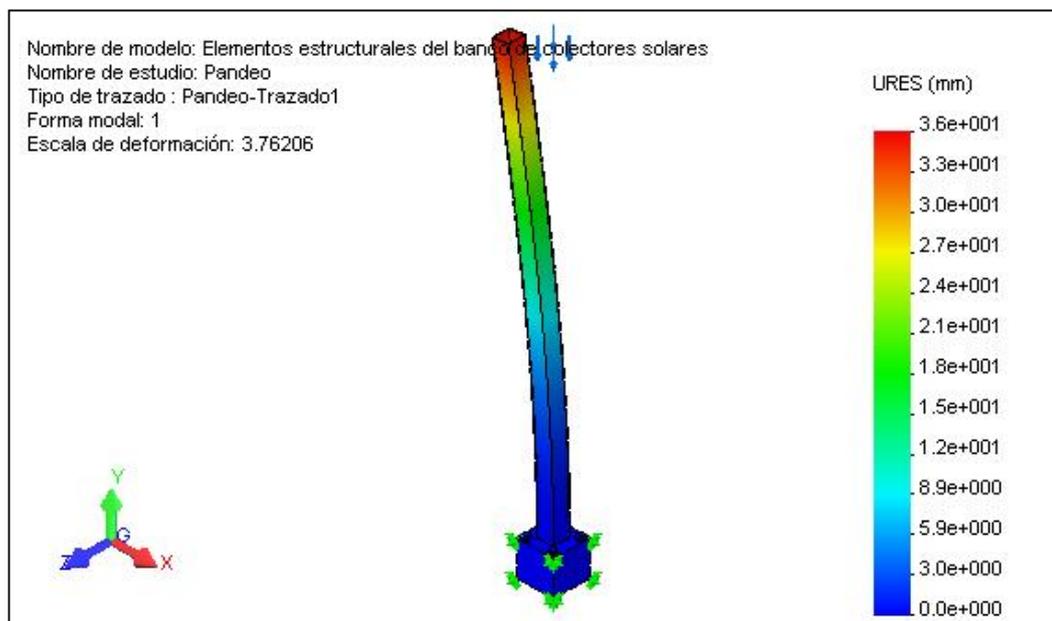


Figura 8.18 Resultado de desplazamientos

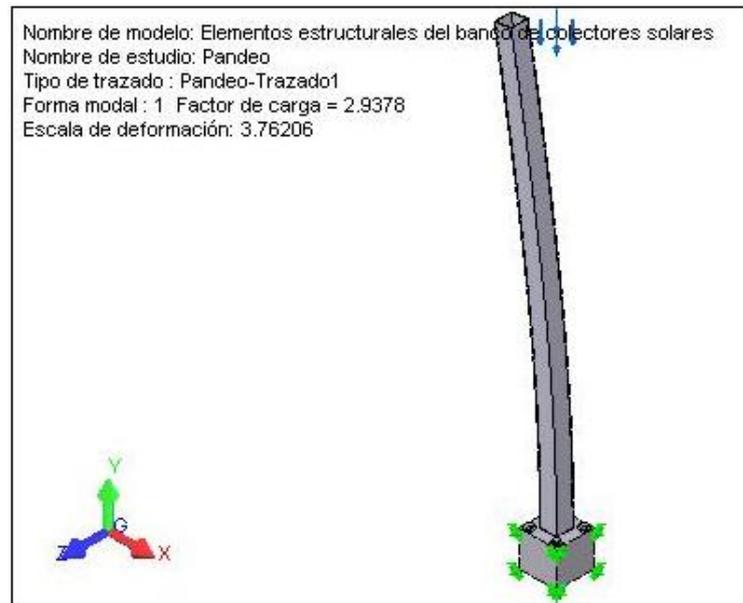


Figura 8.19 Resultado de deformación

8.5 EL SISTEMA DE CONTROL

Para llevar el control de la cámara de secado, se cuenta con sensores de temperatura digitales ubicados a la entrada de la cámara de secado, y de presión ubicado en la parte externa de la cámara de secado, los mismos que permiten llevar un registro de las condiciones que se tienen en la cámara de secado. Esta información es útil para tomar decisiones sobre el manejo del secador y para mejorar el proceso de secado, debido a que en el secado solar la temperatura y la humedad están determinadas por la condiciones del medio ambiente en que se encuentra el secador.

La presente es una propuesta de guía básica de secado; vale la pena mencionar que para cada carga pueden existir variaciones en los horarios propuestos, puesto que se registrarán por las condiciones de temperatura y humedad que se tengan en el interior y exterior de la secadora, así como por el contenido de humedad que presente el cacao que se esté secando (Durand, 1984). Con la finalidad de poder llevar una mejor secuencia en el proceso de secado, el operario deberá siempre tomar en cuenta las mediciones de temperatura y presión, para decidir los pasos a seguir durante el proceso y evitar al máximo un posible deterioro del cacao. Hay que considerar este punto como uno de mayor importancia, pues si el encargado del proceso de secado

no tiene estos conocimientos básicos, la calidad del cacao puede disminuir notablemente.

8.5.1 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA CÁMARA DE SECADO

Se utilizarán dos termómetros digitales FULLGAUGE, uno se ubicara en la sección de transición que une al banco de colectores solares con la cámara de secado muy cerca de la entrada de aire caliente, mientras que el otro se encontrará sobre el lecho de rocas dentro de la cámara de secado.

Estos termómetros digitales tienen un rango de operación de -50 hasta 105° C, poseen excelente precisión, capacidad de repetición, fuerte construcción e inmunidad a vibraciones, humedad e interferencias*.



Figura 8.20 Termómetro digital

El sensor es una termocupla. Consiste en dos alambres de distinto material unidos en un extremo. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivolts el cual aumenta proporcionalmente con la temperatura.

8.5.2 MEDICIÓN APROXIMADA DE LA HUMEDAD DEL CACAO

Se utilizará un sistema de medición indirecta, puesto que la humedad del producto para ser cuantificada de forma más certera toma por lo menos 24 horas.

* En la sección Anexos A 8.5.1 se encuentra las especificaciones técnicas, manual de operación y demás características de estos termómetros

Con la implementación de este sistema de medición el productor tendrá una idea bastante cercana a la realidad de la humedad que tiene el cacao en cualquier momento.

Tenemos que tomar en cuenta que el cacao al haber tenido un buen proceso de fermentación, durante el proceso de secado no disminuye sus dimensiones externas (forma), únicamente pierde la masa de agua excedente.

El sistema de mediación aproximada de humedad del cacao está formado por una celda de suspensión TT 100 TRU-TEST*, a este tipo de sensor también se lo denomina celda de carga. La celda de carga es un elemento elástico que se deforma al aplicarle una fuerza en una dirección determinada.



Figura 8.21 Celdas de suspensión TRU-TEST

Se ubicara sobre la cámara de secado sujeta a la viga que forma parte del techo, y en el otro extremo tendrá un recipiente de 2 kg de capacidad en el que se colocará el cacao extraído de la cámara de secado.

Al no variar las dimensiones externas del cacao (ocupa el mismo volumen), en cada muestra analizada únicamente variará el peso, el mismo que al compararlo con la siguiente tabla nos dirá el grado de humedad que tiene el producto aproximadamente.

* En la sección Anexos A 8.5.2.1 se encuentra las especificaciones técnicas, manual de operación y demás características de la celda de suspensión

Tabla 8.1 Humedad aproximada del cacao

Humedad Aproximada	Valor registrado
(%)	(kg)
60	2.00
55	1.78
50	1.60
45	1.46
40	1.33
35	1.17
30	1.14
25	1.07
20	1.00
15	0.94
10	0.89
7	0.86

Fuente: J. P. Maureira

El peso del cacao (valor registrado) será mostrado en el indicador Eziweigh Tru-Test* registrara mediante

8.5.3 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL CACAO

En los procesos de producción tanto como para exportar el cacao se requiere que cumpla con normas, entre estas normativas se encuentra que la humedad del cacao debe ser del 7%, con el método aproximado de medición no podemos asegurar que se a cumplido con la norma. Por ello se aconseja medir la humedad en una forma más acertada.

Una lectura correcta de humedad se obtiene colocando la muestra en un frasco hermético de vidrio, y midiéndola 24 horas más tarde. Si se comparan estas lecturas con las efectuadas por el proceso aproximado, se podrá obtener un factor de corrección.

La FAO recomienda que cuando el producto tiene un contenido de humedad superior al 16 % se debe mantener el ventilador conectado constantemente. Si el ventilador es desconectado, la liberación de energía debido a la respiración

* En la sección Anexos A 8.5.2.2 se encuentra el manual de funcionamiento Eziweigh.

de los granos y la actividad de los hongos, provocará el calentamiento de la masa de granos y acelerará el proceso de deterioro¹.

8.5.4 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CACAO

Para medir la temperatura del cacao, hay que contar con un recipiente térmico, para evitar que se enfriara durante la medición. Se coloca primero una muestra en el recipiente de la medición para calentarlo durante un minuto; luego se la saca y se coloca otra muestra junto a un termómetro y se hace la lectura a los 2-3 minutos.

Es importante que las muestras que se obtengan de la secadora sean representativas; por lo menos debieran sacarse tres muestras suficientemente espaciadas durante la descarga.

8.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Debido a que la determinación de la humedad en los granos de cacao presenta cierta dificultad para los pequeños productores se presenta una forma indirecta de determinarla y cuantificarla.

Cuando el sistema se implemente se deben tomar datos de temperatura y carga cada hora de la jornada laboral durante el tiempo que sea necesario hasta que se complete el proceso de secado.

Con los datos tomados se construirá una gráfica en la que el eje de las y corresponde a los valores de temperatura registrados a la entrada de la cámara de secado y en el eje de las x estarán los datos correspondientes a la humedad aproximada.

Debido a que una jornada laboral normalmente es de 8 horas y el tiempo promedio de secado es 3 días se registrarán 24 datos. Este proceso se realizará con tres cargas diferentes para cada mes y así se obtendrá una curva de secado en función de la temperatura y carga.

¹ [12]

Este procedimiento se lo realizará durante el primer año de funcionamiento del secado con el objetivo de tener curvas de secado para cada mes, ya que estas varían de acuerdo a las condiciones climáticas del lugar.

Al implementar el sistema de secado, el productor debe experimentar con el funcionamiento continuo y no del ventilador, ya que al no producirse deterioro en el producto se debe apagar el ventilador al terminar la jornada laboral, con lo que se conseguirá reducción en el consumo energético y por lo tanto disminución en los costos de producción.

CAPITULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

1. La información referente a las condiciones meteorológicas predominantes en la provincia de Guayas permitió diseñar un secador solar para granos de cacao que funciona con energía solar. El sistema estará conformado por 24 colectores solares planos con doble cubierta transparente, el mismo que permite transformar la energía solar en energía térmica. La eficiencia de los colectores solares es del 48%, siendo un valor razonable para este tipo de sistema y energía utilizada.
2. La temperatura de secado promedio a la que se llevará acabo el proceso será de 50° C. A esta temperatura se asegura que el cacao no va a sufrir variaciones en su composición química.
3. El banco de colectores solares se encuentra montado sobre una estructura metálica que tiene una inclinación de 10°, esta inclinación permite aprovechar de mejor forma la radiación solar disponible, disminuye totalmente la carga que la lluvia pudiese ejercer sobre las columnas de la estructura, y facilita las labores de mantenimiento.
4. La cámara de secado está construida con madera, este aislante térmico permite que las pérdidas de calor sea mínimas; bajo las condiciones de análisis la cámara de secado tendrá una eficiencia del 99 %.
5. El software de simulación permitió observar el funcionamiento de las estructuras metálicas que soportarán al banco de colectores solares y a la cámara de secado, así como también la transferencia térmica ocurrida en las bandejas. Demostrando que los elementos y materiales que las constituyen son los apropiados.
6. El tiempo de secado requerido para tener cacao con una humedad del 7% es de 2.6 días aproximadamente. Durante los meses de Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo el tiempo de secado se reduce, teniendo un mínimo de 1.5 días durante el mes de Abril, mientras que en los meses

restantes el tiempo de secado es superior al promedio, teniendo un máximo de 3.5 días durante el mes de Julio.

7. En comparación con el tiempo de secado requerido para el proceso utilizando tendales, que es alrededor de 7 días, se tiene una disminución de cerca del 50 %, lo que permitirá que los pequeños productores tengan el cacao listo para ser vendido a las productoras de chocolate o a las exportadoras en menos tiempo, permitiéndoles contar con recursos económicos mas rápido.
8. Al área utilizada por el secador propuesto es de 60 m², en comparación con los 121 m² requerido por los tendales para secar 500 Kg de cacao, se tiene una disminución del 50 % del área antes utilizada.
9. Se requiere de aproximadamente \$ 7000 para la construcción del secador.

9.2 RECOMENDACIONES

1. Antes de comenzar con el diseño de sistemas que utilicen energía solar es imprescindible conocer las características meteorológicas del lugar. Para esto existen entidades como el INAMHI en el Ecuador que posee los anuarios meteorológicos para todas las provincias del Ecuador.
2. La temperatura de secado no debe exceder los 60° C ya que al hacerlo se corre el riesgo que el cacao aumente su acidez, lo cual deriva en la pérdida de calidad y el no cumplimiento de las normas que la regulan.
3. El ángulo de inclinación que las instalaciones de energía solar deben tener corresponde a la latitud del lugar en donde el sistema está ubicado. Para el Ecuador que se encuentra en la latitud 0° es recordable utilizar una inclinación de 10°, de esta manera se captará de mejor forma la radiación solar.
4. La estructura que soporta al banco de colectores solares debe tener una cierta inclinación, ya que de no hacerlo las columnas diseñadas serán de mayor dimensión puesto que la lluvia ejercerá una carga muy importante.
5. Hay que tener mucho cuidado con las pérdidas de calor que se pueden producir en los acoples y juntas en la cámara de secado, para lo cual se recomienda recubrir todas estas zonas con polímeros aislantes (Belzona).
6. Cuando el sistema se implemente se debe seguir el procedimiento recomendado en el capítulo 8 para la generación de curvas de secado, es

sumamente importante contar con estas para poder determinar los tiempos y las características reales del proceso.

7. El 50 % de área ahorrada puede ser utilizada efectivamente ya sea para sembrar más cacao, o para construir una bodega de almacenamiento de producto.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ecuador, Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Manual del cultivo de cacao. 2da. ed. Estación experimental tropical Pichilingue del INIAP. s.e. 1993. p.4, p.6, pp.14-15, p.21, p.128
- [2] G. A. R. Wood. Cacao. 2da. ed. Mexico. s.e. 1982. p.34, p.47, p.51
- [3] Venezuela, Fondo Nacional del Cacao. Manual del productor de cacao. 4ta. ed. Mérida. Karol. 2000. 87 p.
- [4] Hill Percy H. The Science of Engineering Design. 3ra. ed. U.S.A. Holt Rinehart and Winston. 1998. p.44
- [5] Ecuador, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Datos meteorológicos. 1950-2004
- [6] Duffie John A. and Beckman William A. Solar Engineering of Thermal Processes. 2a. ed. Wisconsin. John Wiley, 1991. pp.10-16, p.188, p.198, p. 202, p.210, 224, 238, 243, 140, 341
- [7] GARCIA BADELL, José Javier, Cálculo de la Energía Solar, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Madrid. 1983. p.63
- [8] Richard Montgomery. ENERGÍA SOLAR. 3ra. ed. Mexico. LIMUSA. 1994 p.10:10-14
- [9] Incropera, Frank P. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta. ed. Mexico. PRENTICE HALL. 1999. p.20, pp. 73-134, pp. 283-332, p.424, p. 449, pp. 833-834, p.828, p.839
- [10] Ecuador, Instituto Nacional de Energía, Diseño de un secador solar de café de tipo indirecto, con circulación forzada de aire. Quito. s.e. 1988. 32 p.
- [11] Ecuador, Instituto Nacional de Energía, Alternativas para colectores solares calentamiento de aire. Quito. s.e. 1987. 27p.
- [12] Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Secado de granos a altas temperaturas. Santiago. s.e. 1991. 75p.

- [13] Eugene A. Avallone and Theodore Baumeister III. MARKS' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 10th. ed. New York. McGraw-Hill. 1996. p.3-48
- [14] Mexico, Jalisco. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. s.e. 1995. 158p.
- [15] E. P. S. Tecnología de la madera. 3ra. ed. Barcelona. Don Bosco. s.f. pp.11-12
- [16] American Institute of Steel Construction. Manual of Steel Construction. 8th. ed. Chicago. 1987. p.5-124
- [17] Joseph E. Shigley y Charles R. Mischke. Diseño en ingeniería mecánica. Javier León Cárdenas. 6ta. ed. Mexico D.F. McGraw-Hill. 2002. pp.450-474
- [18] Norton, Robert L. Diseño de máquinas. Ing. Gabriel Sánchez García. Primera ed. Mexico. Prentice Hall. 1999. p.917
- [19] N, Larburu. Máquinas prontuario.13^a ed. Madrid. Thomson. 2004. P.208
- [20] Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Principio de secado de granos psicrometría higroscopía. Santiago. s.e. 1991. 69p.
- [21] S. V. Pantakar. Numerical Heat Transfer and fluid Flow. s.ed. S.L. Hemispher. 1980. p.26
- [22] S. Kobayashi, S-I Oh, T. Altan, Metal Forming and the Finite Element Method. S.ed. S.L. Oxford U. 1989

DIRECCIONES INTERNET

- [23] www.anecacao.com, Asociación Nacional de Exportadores de Cacao, Español, Febrero 21 de 2006.
- [24] www.sica.gov.ec , Cacao y Elaborados, Español, Mayo 18 de 2006.
- [25] www.fao.org, Calentamiento del aire, Español, 2006.
- [26] www.solidworks.com , products, Ingles, 2006

ANEXOS

CACAO EN GRANO. REQUISITOS.....	223
NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 177:95. CACAO EN GRANO. MUESTREO.....	228
MANTENIBILIDAD	232
ESTACIÓN GUAYAQUIL-RADIO SONDA	234
ESTACIÓN MILAGRO (INGENIO VALDEZ).....	236
VENTILADOR AXIAL MRS18-BUL	238
COLECTOR SOLAR	246
SECADOR DE GRANOS DE CACAO	252
PERFILES ESTRUCTURALES.....	276
ELECTRODO E7018.....	283
BELZONA 3111.....	285
BELZONA 3211.....	292
CARTA PSICROMETRICA UTILIZADA	299
MANUAL DEL USUARIO DE SOLIDWORKS Y COSMOSWORKS	301
TERMÓMETROS DIGITALES	315
CELDA DE SUSPENSIÓN TT 100	317
INDICADOR EZIWEIGH	322

A 2.8.1

**NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 176.
CACAO EN GRANO. REQUISITOS**

1 OBJETO.

- 1.1 Esta norma establece la clasificación y los requisitos de calidad que debe cumplir el cacao en grano beneficiado y los criterios que deben aplicarse para su clasificación.

2 ALCANCE.

- 2.1 Esta norma se aplica al cacao beneficiado, destinado para fines de comercialización.

3 DEFINICIONES.

- 3.1 Cacao en grano. Es la semilla proveniente del fruto del árbol *Theobroma cacao* L.
- 3.2 Cacao beneficiado. Grano entero, fermentado, seco y limpio.
- 3.3 Grano defectuoso. Se considera como grano defectuoso a los que a continuación se describen:
- 3.3.1 Grano mohoso. Grano que ha sufrido deterioro parcial o total en su estructura interna debido a la acción de hongos, determinado mediante prueba de corte.
- 3.3.2 Grano dañado por insectos. Grano que ha sufrido deterioro en su estructura (perforaciones, picados, etc.) debido a la acción de insectos.
- 3.3.3 Grano vulnerado. Grano que ha sufrido deterioro evidente en su estructura por el proceso de germinación, o por la acción mecánica durante el beneficiado.
- 3.3.4 Grano múltiple o pelota. Es la unión de dos o más granos por restos de mucílago.
- 3.3.5 Grano negro. Es el grano que se produce por mal manejo poscosecha o en asocio con enfermedades.
- 3.3.6 Grano ahumado. Grano con olor o sabor a humo o que muestra signos de contaminación por humo.
- 3.3.7 Grano plano vano o granza. Es un grano cuyos cotiledones se han atrofiado hasta tal punto que cortando la semilla no es posible obtener una superficie de cotiledón.
- 3.3.8 Grano partido (quebrado). Fragmento de grano entero que tiene menos del 50% del grano entero.
- 3.4 Grano pizarroso (pastoso). Es un grano sin fermentar, que al ser cortado longitudinalmente, presenta en su interior un color gris negruzco o verdoso y de aspecto compacto.
- 3.5 Grano violeta. Grano cuyos cotiledones presentan un color violeta intenso, debido al mal manejo durante la fase de beneficio del grano.
- 3.6 Grano ligeramente fermentado. Grano cuyos cotiledones ligeramente estriados presentan un color ligeramente violeta, debido al mal manejo durante la fase de beneficio del grano.
- 3.7 Grano de buena fermentación. Grano fermentado cuyos cotiledones presentan en su totalidad una coloración marrón o marrón rojiza y estrías de fermentación profunda. Para el tipo CCN51 la coloración variará de marrón a marrón violeta.
- 3.8 Grano infestado. Grano que contiene insectos vivos en cualquiera de sus estados biológicos.
- 3.9 Grano seco. Grano cuyo contenido de humedad no es mayor de 7,5% (cero relativo).
- 3.10 Impureza. Es cualquier material distinto a la almendra de cacao.
- 3.11 Cacao en baba. Almendras de la mazorca del cacao recubiertas por una capa de pulpa mucilaginosa.
- 3.12 Fermentación del cacao. Proceso a que se somete el cacao en baba, que consiste en causar la muerte del embrión, eliminar la pulpa que rodea a los granos y lograr el proceso bioquímico que le confiere el aroma, sabor y color característicos.



4 CLASIFICACIÓN.

Los cacaos del Ecuador por la calidad se clasifican de acuerdo a lo establecido en la tabla 1.

5 REQUISITOS.

- 5.1 Requisitos específicos.
- 5.1.1 El cacao beneficiado debe cumplir con los requisitos que a continuación se describen y los que se establecen en la tabla 1.
- 5.1.2 El porcentaje máximo de humedad del cacao beneficiado será de 7,5% (cero relativo), el que será determinado o ensayado de acuerdo a lo establecido en la NTE INEN 173.
- 5.1.3 El cacao beneficiado no deberá estar infestado.
- 5.1.4 Dentro del porcentaje de defectuosos el cacao beneficiado no deberá exceder del 1% de granos partidos.
- 5.1.5 El cacao beneficiado deberá estar libre de: olores a moho, ácido butírico (podrido), agroquímicos, o cualquier otro que pueda considerarse objetable.
- 5.1.6 El cacao beneficiado, deberá sujetarse a las normas establecidas por la FAO/OMS, en cuanto tiene que ver con los límites de recomendación de aflatoxinas, plaguicidas y metales pesados hasta tanto se elaboren las regulaciones ecuatorianas correspondientes.
- 5.1.7 El cacao beneficiado deberá estar libre de impurezas.

TABLA 1. Requisitos de las calidades del cacao beneficiado.

Requisitos	Unidad	Cacao Arriba					CCN-51
		ASSPS	ASSS	ASS	ASN	ASE	
Cien granos pesan	g	135-140	130-135	120-125	110-115	105-110	135-140
Buena fermentación (mínimo)	%	75	65	60	44	26	65***
Ligera fermentación* (mínimo)	%	10	10	5	10	27	11
Total fermentado (mínimo)	%	85	75	65	54	53	76
Violeta (máximo)	%	10	15	21	25	25	18
Pizarroso/pastoso (máximo)	%	4	9	12	18	18	5
Moho (máximo)	%	1	1	2	3	4	1
Totales (análisis sobre 100 pepas)	%	100	100	100	100	100	100
Defectuoso (máximo) (análisis sobre 500 gramos)	%	0	0	1	3	4**	1

TABLA 1. Requisitos de las calidades del cacao beneficiado (continuación).

ASSPS	Arriba Superior Summer Plantación Selecta
ASSS	Arriba Superior Summer Selecto
ASS	Arriba Superior Selecto
ASN	Arriba Superior Navidad
ASE	Arriba Superior Época

* Colocación marrón violeta

** Se permite la presencia de granza solamente para el tipo ASE.

*** La coloración varía de marrón violeta

5.2	Requisitos complementarios.
5.2.1	La bodega de almacenamiento deberá presentarse limpia desinfectada, tanto interna como externamente, protegida contra el ataque de roedores.
5.2.2	Cuando se aplique plaguicidas, se deberán utilizar los permitidos por la Ley para formulación, importación, comercialización y empleo de plaguicidas y productos afines de uso agrícola (Ley No 73).
5.2.3	No se deberá almacenar junto al cacao beneficiado otros productos que puedan transmitirle olores o sabores extraños.
5.2.4	Los envases conteniendo el cacao beneficiado deberán estar almacenados sobre palets (estibas).

6 INSPECCIÓN.

6.1	Muestreo.
6.1.1	El muestreo se efectuará de acuerdo a lo establecido en la NTE INEN 177.
6.1.2	Aceptación o rechazo. Si la muestra ensayada no cumple con los requisitos establecidos en esta norma, se considera no clasificada. En caso de discrepancia se repetirán los ensayos sobre la muestra reservada para tales efectos.

Cualquier resultado no satisfactorio en este segundo caso será motivo para reclasificar el lote.

7 ENVASADO.

7.1	El cacao beneficiado deberá ser comercializado en envases que aseguren la protección del producto contra la acción de agentes externos que puedan alterar sus características químicas o físicas; resistir las condiciones de manejo, transporte y almacenamiento.
-----	--

8 ETIQUETADO.

8.1	Los envases destinados a contener cacao beneficiado, serán etiquetados de acuerdo a las siguientes indicaciones:
	<ul style="list-style-type: none">• Nombre del producto y tipo.• Identificación del lote.• Razón social de la empresa y logotipo.• Contenido neto y contenido bruto en unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI).• País de origen.• Puerto de destino.

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR.

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 173:1987 Cacao en grano. Determinación de la humedad.

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 177:1987 Cacao en grano. Muestreo.

Z.2 BASES DE ESTUDIO.

Norma Española UNE 34 002:1994. Cacaos. Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. Madrid, 1994.

Norma Técnica Colombiana NTC 1 252. Cacao. Instituto Colombiano de Normas Técnicas Industrias alimentarias. Bogotá, 1988.

Norma Cubana NC 87 08:1984. Cacao. Términos y definiciones. Comité Estatal de Normalización. La Habana, 1984.

Norma Cubana NC 87 05:1982. Cacao beneficiado. Especificaciones de calidad. Comité Estatal de Normalización. La Habana, 1982.

International Standard ISO 2451. Cocoa beans. Specifications. International Organization for Standardization. Geneva 1973.

Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Manual del cultivo del cacao. Quito, 1993.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento: NTE INEN 176 (3R)

TÍTULO: CACAO EN GRANO. REQUISITOS.

Código: AL.02.06-401

ORIGINAL: Fecha de iniciación del estudio: 19

REVISIÓN:

Fecha de aprobación anterior por Consejo Directivo 1995-07-04

Oficialización con el Carácter de Obligatoria

por Acuerdo No. 248 de 1995-09-05

publicado en el Registro Oficial No. 790 de 1995-09-27

Fecha de iniciación del estudio: 2000-10-05

Subcomité Técnico: "CACAO Y PRODUCTOS DE CACAO"

Fecha de iniciación: 2000-10-16 * **Fecha de aprobación:** 2000-11-13

Integrantes del Subcomité Técnico:

NOMBRES	INSTITUCIÓN REPRESENTADA
Ing. Julio César Zambrano (Presidente)	COFINA
Ing. Sergio Cedeño Amador	APROCAFA
Sr. José Sierra Fiallos	REPEC S.A.
Sr. Gonzalo Romero	REPEC S.A.
Sr. Gustavo Rodríguez	INTERCA
Sr. Alejandro Orellana Jara	EXITORE CIA. TLDA.
Eco. José Ampuero Balda	ATLANTIC COCOA
Ing. Ashley Delgado	ASDE
Ing. Alfredo Villavicencio	UNOCACE
Sr. René Rodríguez	ANECACAO
Ing. Carlos Elizalde	ANECACAO
Ing. Rosa Pérez	UNOCACE
Ing. Jacinto Velásquez	UNOCACE
Sr. Jaime Zea	INMOBILIARIA GUANGALA
Ing. Freddy Amores	INIAP (PICHILINGUE)
Ing. Eduardo Crespo del Campo	APROCAFA
Sr. Javier Elizalde Romero	CORPEI-GUAYAQUIL
Ing. Lorena Vasquez Gonzales	NESTLE - ECUADOR
Ing. Bolívar Cano (Secretario Técnico)	INEN

A 2.8.2

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 177:95.

CACAO EN GRANO. MUESTREO

1. Objeto.

- 1.1. Esta norma establece el procedimiento para la toma de muestra del cacao en grano.

2. Definiciones.

- 2.1. Lote. Es la cantidad específica de cacao en grano con características similares, que se somete a inspección como un conjunto unitario.
- 2.2. Muestra. Es un grupo de granos extraído de un lote, que sirve para obtener la información necesaria que permite apreciar una o más características de ese lote, lo cual servirá de base para tomar una decisión sobre dicho lote.
- 2.3. Muestra elemental. Es la cantidad de granos tomada de una sola vez y de un solo punto del lote determinado.
- 2.4. Muestra global o total. Es el conjunto de muestras elementales.
- 2.5. Muestra reducida (porción). Es la cantidad de cacao en grano que se obtiene al reducir de tamaño la muestra global.
- 2.6. Muestra de laboratorio. Es la cantidad de cacao en grano obtenida de la muestra reducida, que está en condiciones de ser enviada al laboratorio, para en ella efectuar los ensayos correspondientes.
- 2.7. Muestra de ensayo. Es la parte de la muestra de laboratorio destinada a un análisis o ensayo.
- 2.8. Nivel de calidad aceptable (AQL). Es el máximo porcentaje defectuoso, o el mayor número de defectos en 100 unidades, que debe tener el producto para que el plan de muestreo de por resultado la aceptación de la mayoría de los lotes sometidos a inspección.
- 2.9. Nivel de inspección. Es el número que identifica la relación entre el tamaño del lote y el tamaño de la muestra.
- 2.10. Envase (saco). Es el recipiente que contiene cacao en grano y que está destinado a protegerlo del deterioro, contaminación y a facilitar su manipulación.
- 2.11. Sacamuestras. Instrumento que se utiliza para extraer el producto de un embalaje.
- 2.12. Producto granel. El que no está envasado.

3. Disposiciones generales.

- 3.1. Se deberá tomar todo tipo de precauciones para evitar la contaminación del cacao en grano durante el muestreo.
- 3.2. Las muestras serán identificadas consecutivamente según hayan sido tomadas.
- 3.3. Las muestras se protegerán contra los cambios en su composición, pérdidas y contaminación por impurezas, etc.

4. Muestreo.

- 4.1. Toma de muestras.
 - 4.1.1. Si el cacao en grano que se va a muestrear se presenta en envases de distintos tamaños se deberá agrupar en lotes de acuerdo con la capacidad de los envases, es decir, en cada lote deberá haber envases de una misma capacidad.
 - 4.1.2. El número de muestras elementales extraídas completamente al azar, estarán en función de lo indicado en la tabla 1, y serán tomadas en gramos.
 - 4.1.3. Las muestras elementales que en conjunto forman la muestra global, podrán ser de aproximadamente de 100 a 1.000 gramos, las mismas que serán divididas de acuerdo a lo indicado en el numeral 4.4.1., hasta obtener una muestra reducida de 1.500 gramos.
 - 4.1.4. Las muestras en los lotes para producto envasado o empacado se obtendrán realizando un muestreo al azar, para lo cual se enumerarán las unidades del lote, se utilizarán los números aleatorios, y el número de muestras según lo establecido en la tabla 1. En los envases la muestra se obtendrá introduciendo el calador (ejemplo Fig. 1) en un solo punto, este deberá penetrar por lo menos hasta la mitad diagonal el saco, y por lo menos en tres puntos seleccionados al azar, cuando se utilice uno de los caladores que se indican como ejemplo en las figuras 2, 3 y 4.

Cuando por condiciones del sitio de almacenamiento no sea posible movilizar el producto, se podrá muestrear las caras visibles del lote.

Cuando las partes interesadas consideren conveniente se hará un corte longitudinal el mismo que deberá llegar hasta el fondo del lote, con lo cual se tendrá dos caras adicionales para muestrear.

Siempre se utilizará un sistema de muestreo aleatorio, para lo cual el número de muestras elementales establecidos en la tabla 1, serán divididas para el número de caras visibles del lote.

- 4.1.5. Para muestreo de productos a granel y para obtener una muestra verdaderamente representativa, este deberá efectuarse en el lugar y momento adecuado, que será de preferencia en el momento de la carga, descarga o empaque del producto; cuando no se puedan aplicar los criterios anteriormente indicados, las muestras elementales serán tomadas en forma aleatoria o completamente al azar y a diferentes profundidades, y con uno de los caladores que se indican como ejemplo en las figuras 1 y 5.

El lote de productos a granel se reducirá matemáticamente a sacos de (n) kilogramos y se aplicará la

- 4.1.6. Cuando el producto esté en movimiento, durante las operaciones de carga y descarga, la toma de unidades de muestreo se hará a base del tiempo que va a durar el producto en movimiento, y se dividirá dicho tiempo para el número de muestras elementales que se deben tomar de acuerdo a lo establecido en la tabla 1. El resultado indica la frecuencia de la extracción. En la figura 6 se indica un ejemplo de muestreador para productos en movimiento.

El lote de productos a granel se reducirán matemáticamente a sacos de (n) kilogramos y se aplicará la tabla 1.

Tabla 1. Número de muestras elementales de cacao.

Tamaño del lote (número de sacos)	Número mínimo de muestras elementales
2 – 8	2
9 – 15	3
16 – 25	5
26 – 50	8
51 – 90	13
91 – 150	20
151 – 280	32
281 – 500	50
501 – 1.200	80
1.201 – 3.200	125
3.201 – 10.000	200
10.001 – 35.000	315
35.001 – 150.000	500
150.001 – 500.000	800
Mayor a 500.001	1250

*el tamaño de la muestra puede cambiar, dependiendo del nivel de inspección acordado entre el comprador y vendedor. Muestreo por atributos.

- 4.2. Sacamuestras.

Dependiendo de la forma de presentación se podrá utilizar:

Calador sacamuestras de compartimiento de doble tubo. Compuesto de dos tubos metálicos concéntricos, ambos con aberturas que coincidan entre sí. El diámetro del tubo interior es ligeramente menor al del tubo exterior, lo cual hace posible la rotación mediante el uso de la manivela. La forma y dimensiones del calador sacamuestras de compartimiento se indican en el ejemplo de la figura 1.

Sacamuestras de los ejemplos de las figuras 2 a 5, y para productos en movimiento ejemplo figura 6.

- 4.3. Divisores.

Divisor tipo Boerner. Aparato constituido por un alimentador (a) una serie de tubos distribuidores (b) y un recipiente (c). Sirve para distribuir el producto, dividiendo las muestras en dos porciones representativas, y también para homogenizar la muestra haciéndola pasar varias veces por el aparato cuarteador que consta en el ejemplo de la figura 8.

- 4.4. Reducción por cuarteo.

- 4.4.1. Tanto para el cuarteo que se efectúe en forma manual o mecánicamente, la cantidad del producto de la recolección de las muestras elementales se mezclará muy bien para tomar la muestra global, para luego dividirla en 4 partes iguales; se eliminarán dos porciones diagonalmente opuestas, las otras dos se mezclarán de nuevo y se repetirá sucesivamente la operación hasta obtener el tamaño requerido de muestra reducida (1.500 gramos) según lo establecido en el numeral 4.1.3.

- 4.5. Condiciones posteriores al muestreo.
- 4.5.1. La muestra reducida (1.500 gramos) se dividirá en tres muestras iguales, destinadas: una al vendedor, otra al comprador para destinarla al laboratorio de análisis y la tercera a la entidad que debe actuar en casos de discrepancia.
- 4.5.2. La muestra reducida y dividida según se indica en el numeral anterior (4.5.1.) Se distribuirá en recipientes adecuados (envases plásticos, etc.), limpios y secos, que se cerrarán herméticamente, se les pondrá los sellos o firmas de las partes interesadas.
- 4.5.3. Se deberá suscribir un acta de muestreo que incluya la siguiente información.
- a) Número de la norma INEN de referencia: NTE INEN 177.
 - b) Dirección donde se realizó el muestreo.
 - c) Lugar y fecha donde se realizó el muestreo (establecimiento, bodega, etc.).
 - d) Nombre de la compañía comercializadora del cacao en grano y nombre del comprador.
 - e) Nombre comercial del cacao en grano (clasificación-tipo, nombre científico).
 - f) Número de lote.
 - g) Capacidad de los envases del lote, o cantidad a granel.
 - h) Número de envases y/o empaques muestreados.
 - i) Tamaño de la muestra en gramos del cacao en grano muestreado.
 - j) Observaciones sobre condiciones en que se encuentra el cacao en grano.
 - k) Nombre y firma de la persona que realizó el muestreo.
 - l) Nombre y dirección de las partes interesadas.
- 4.5.4. La muestra (500 gramos) destinada al análisis deberá enviarse al laboratorio tan pronto como se haya tomado, si no es posible hacer esto, se deberá guardar de tal modo que no se altere la calidad del cacao en grano, el tiempo que dure guardado no deberá ser mayor de 15 días. Las dos muestras restantes se almacenarán por el término de 30 días para efectos de discrepancia entre los interesados, y en condiciones que no afecte la calidad del cacao en grano.

Apéndice Z.

Z.1. Documentos normativos a consultar.

No requiere de otros documentos normativos para su aplicación.

Z.2. Bases de estudio.

Norma Colombiana ICONTEC 1252. Industrias alimentarias. Cacao. Bogotá. 1988.

Norma Cubana NC 87-05.1987. Cacao beneficiado. Especificaciones de calidad. La Habana, 1982.

Norma Ecuatoriana INEN 255: 1976. Control de calidad. Procedimientos de muestreo y tablas para la inspección por atributos. Quito, 1976.

International Standard ISO 950. Cocoa beans sampling. Geneva, 1973.

Datos proporcionados por varias empresas en la fase de estudio al nivel de campo.

A 3.5.6
MANTENIBILIDAD

MANTENIBILIDAD				
Mala	Regular	Buena	Muy Buena	Excelente
No mantenimiento	Mantenimiento ocasional	Plan mantenimiento	Planes de mantenimiento	Planes de mantenimiento
Rudimentario	Artesanal	Técnicamente	Sistema de control	Sistema de control-Predicción de fallas
1	2	3	4	5

A 4.2.1
HELIOFANÍA EFECTIVA MENSUAL
ESTACIÓN GUAYAQUIL-RADIO SONDA

A 4.2.2
HELIOFANÍA EFECTIVA MENSUAL
ESTACIÓN MILAGRO (INGENIO VALDEZ)

A 5.4.2.1
VENTILADOR AXIAL MRS18-BUL

A 5.4.3.1
COLECTOR SOLAR

A 6.3.1
SECADOR DE GRANOS DE CACAO

A 6.3.2
PERFILES ESTRUCTURALES

A 6.3.2
ELECTRODO E7018

A 6.4.1
BELZONA 3111

A 6.4.2
BELZONA 3211

A 7.3.1
CARTA PSICROMETRICA UTILIZADA

A 8.4.1

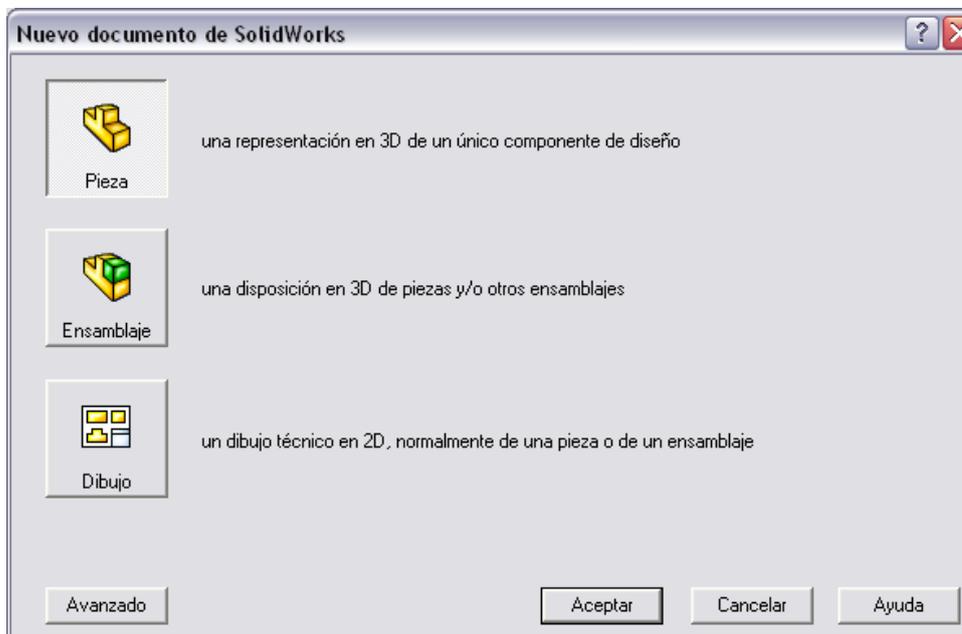
MANUAL DEL USUARIO DE SolidWorks y CosmosWorks

MANUAL DEL USUARIO DE SolidWorks y CosmosWorks

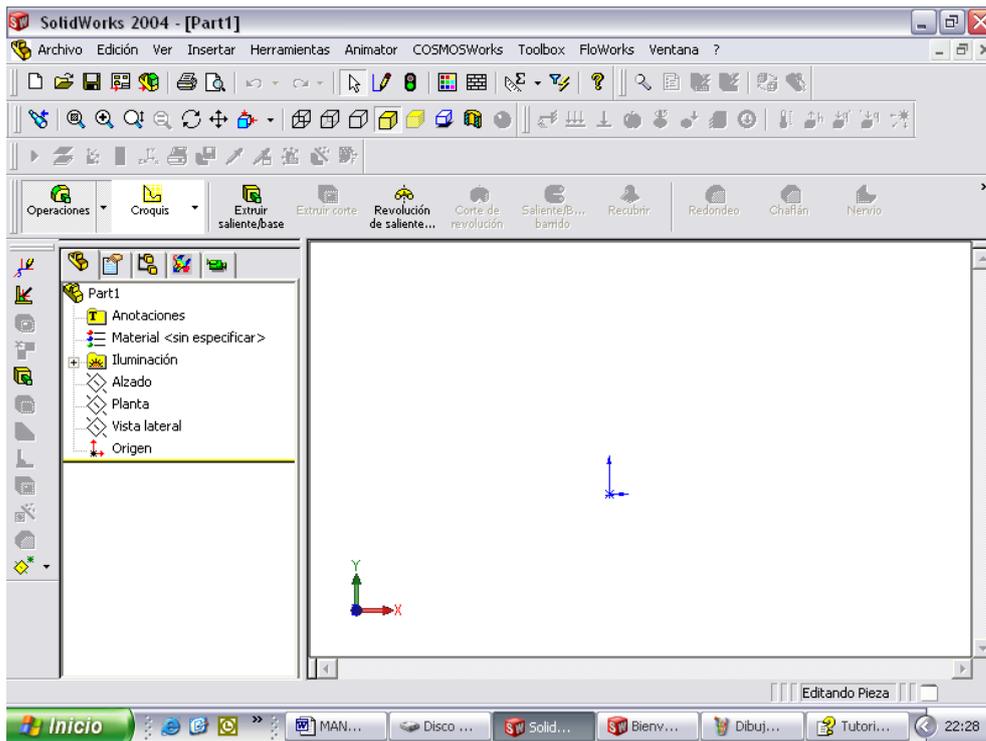
1. Al ejecutar el programa, usted verá el siguiente cuadro de dialogo.



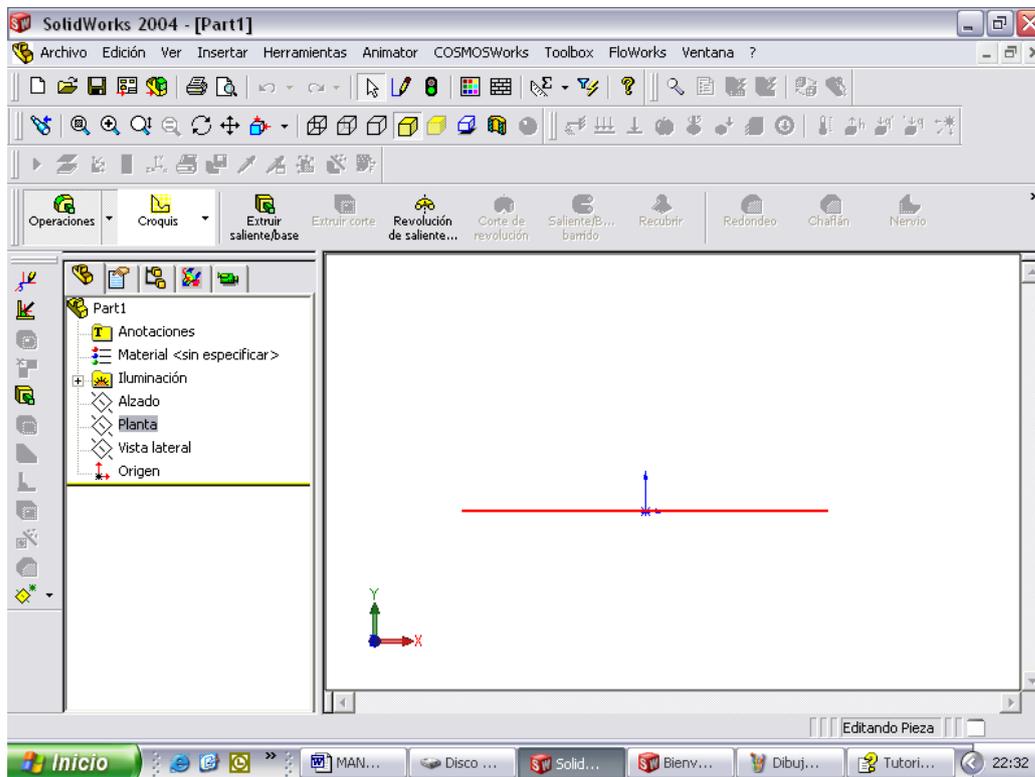
2. Haga clic en Nuevo documento y aparecerá el siguiente cuadro.



3. Seleccione la opción pieza y presione Aceptar.

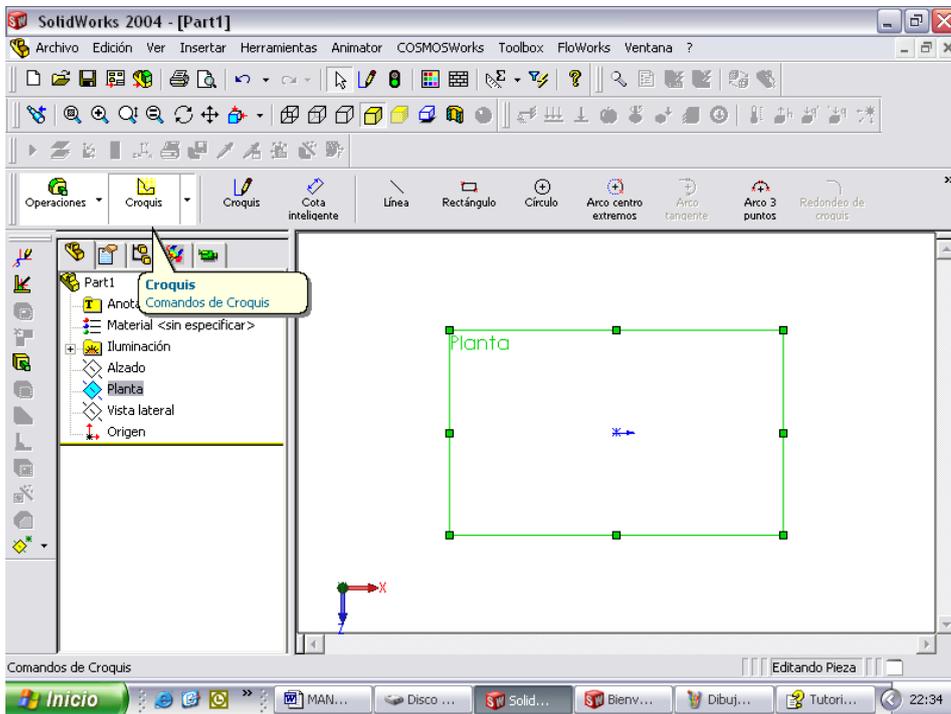


4. Seleccione el plano en el que desea trabajar en este caso será planta.

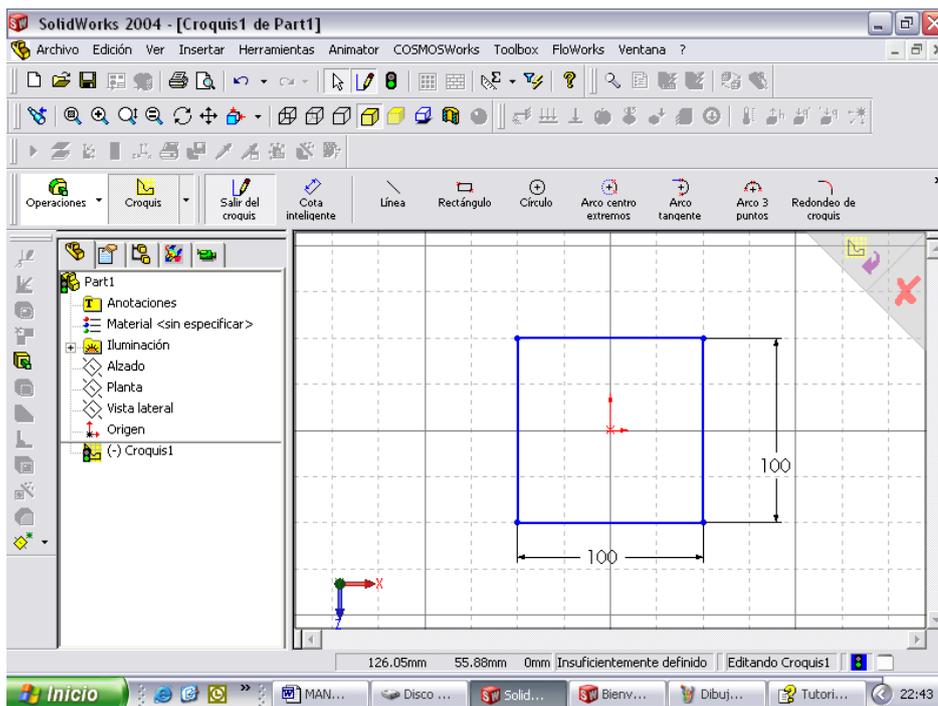


5. Seleccione croquis y en esta opción usted puede realizar el diseño deseado utilizando: línea, círculo, rectángulo, y para dar las dimensiones

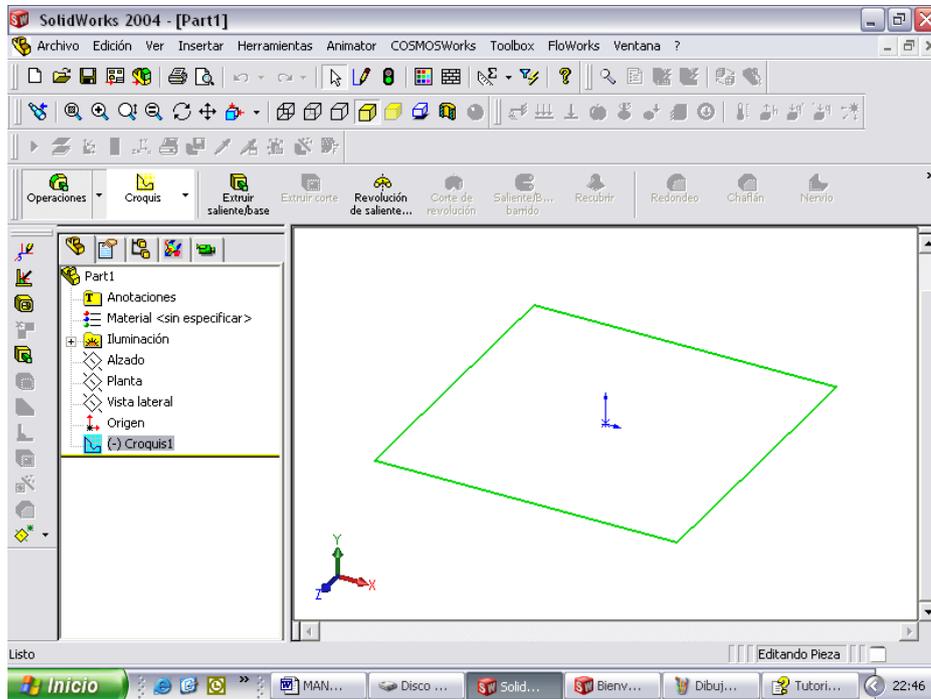
deseadas posterior al haber realizado el dibujo marque en cota inteligente y de el valor deseado.



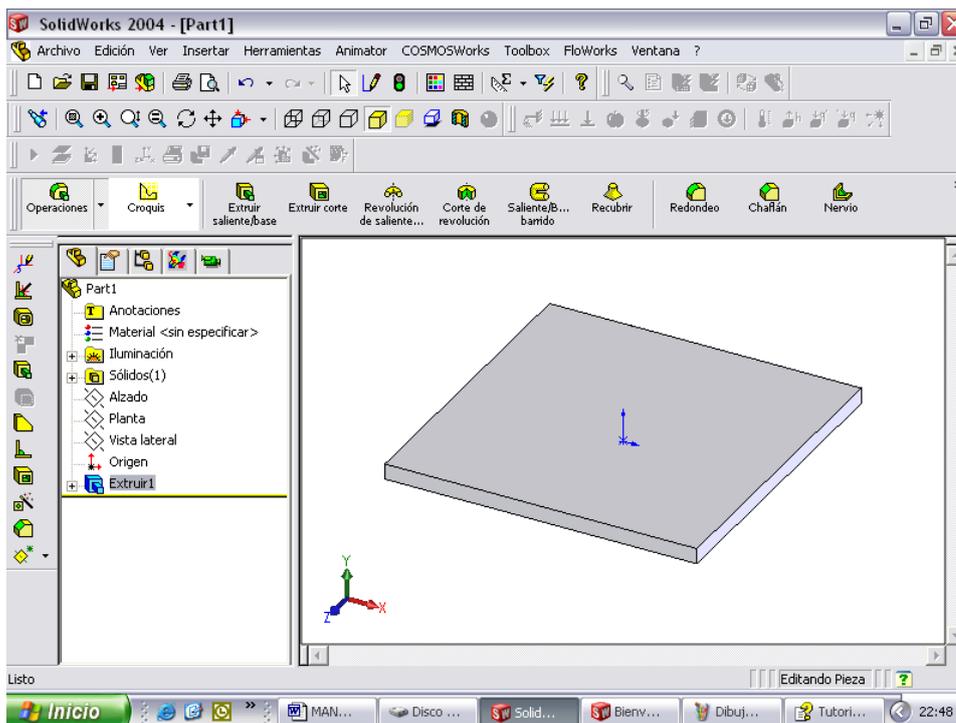
6. Se diseñara la columna que soporta al banco de colectores solares.
7. Haga clic en la parte superior derecha de la página de diseño (flecha morada) para guardar lo realizado hasta el momento.



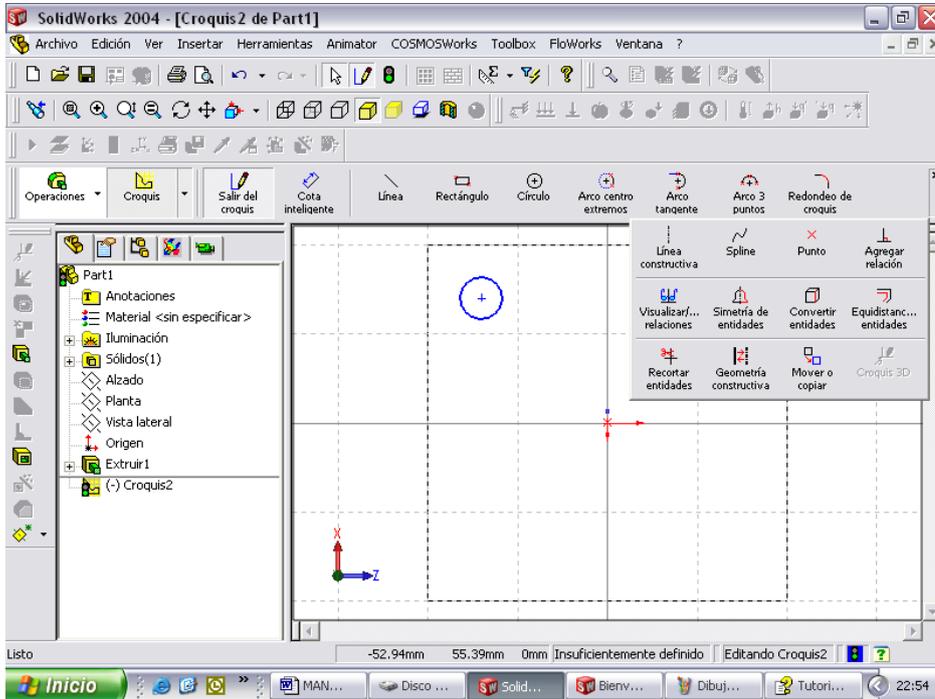
8. Ahora utilizaremos la función Operaciones, en donde extruiremos al cuadrado base. Antes de Extruir saliente/base usted debe marcar el croquis realizado.



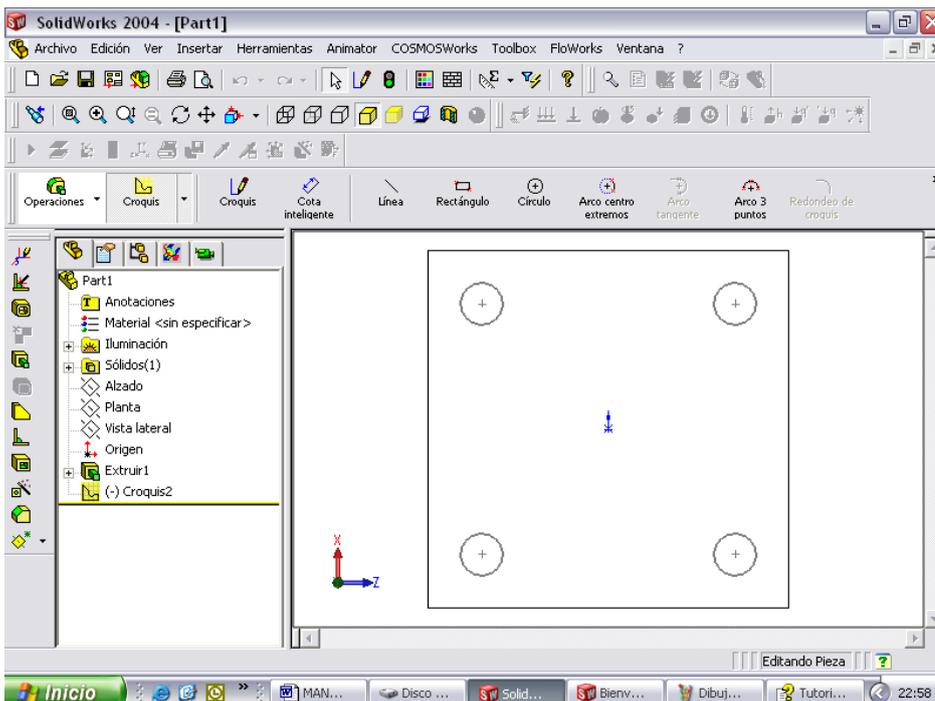
9. Ingrese el espesor de la placa base, en este caso será 5 mm. Y como puede observar en la siguiente figura. Tendrá la placa base en 3D.



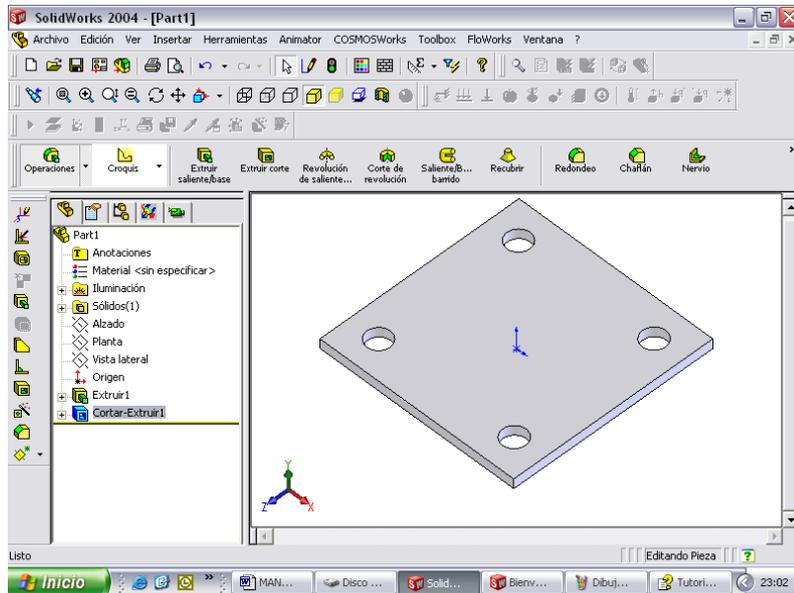
10. Para realizar los agujeros en donde estarán los pernos de anclaje, marque la cara superior del sólido creado y utilice un nuevo croquis en el que usará la opción círculo.



11. Utilice una línea constructiva, marque el círculo y la Línea constructiva y presione el botón Simetría de entidades, borre las líneas constructivas utilizadas y guarde lo realizado.

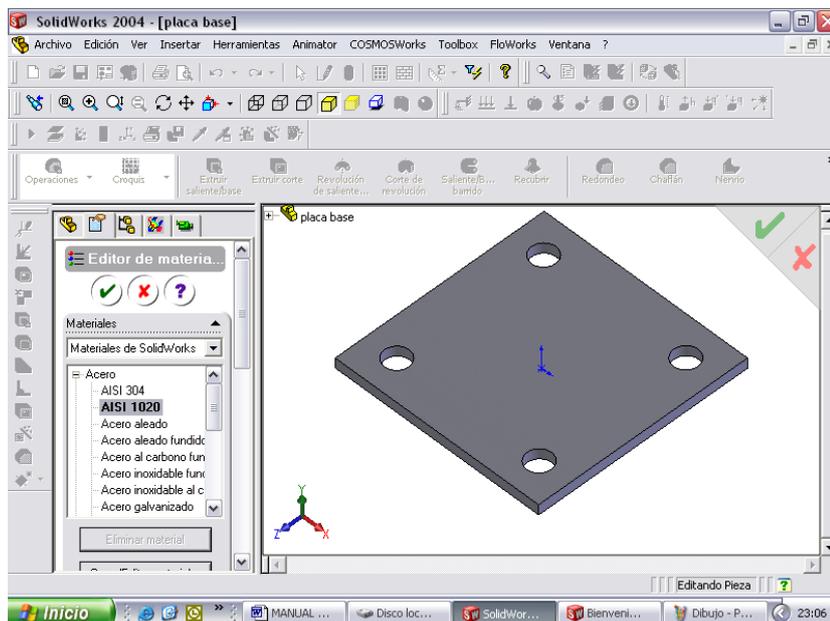


12. Ahora presione el botón de Operaciones y marque el croquis que acabó de realizar. Seleccione la opción Extruir corte e indique la profundidad deseada. En este caso será 5mm. Guarde lo realizado y tendrá la placa base con los agujeros para los pernos de anclaje así:

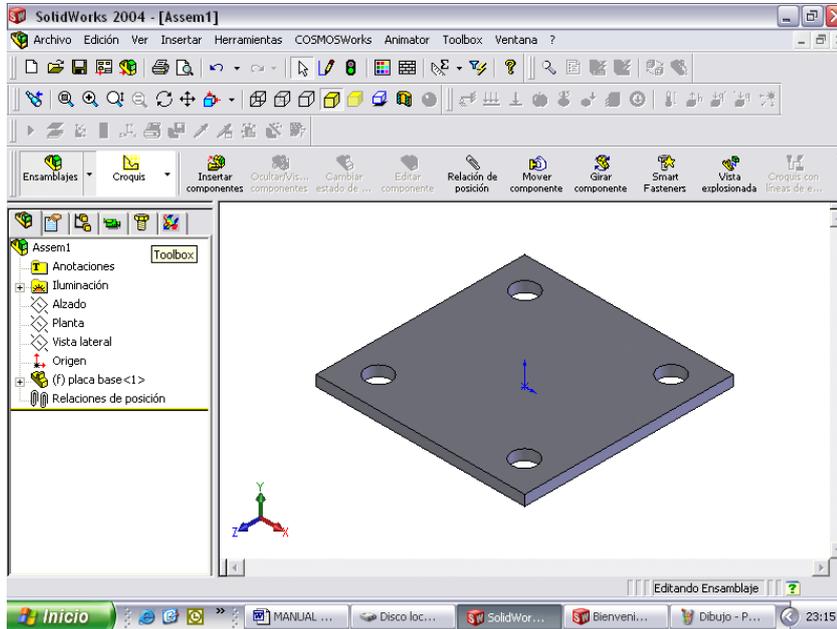


13. En el menú principal seleccione la opción Archivo y guarde la pieza realizada con el nombre placa base.

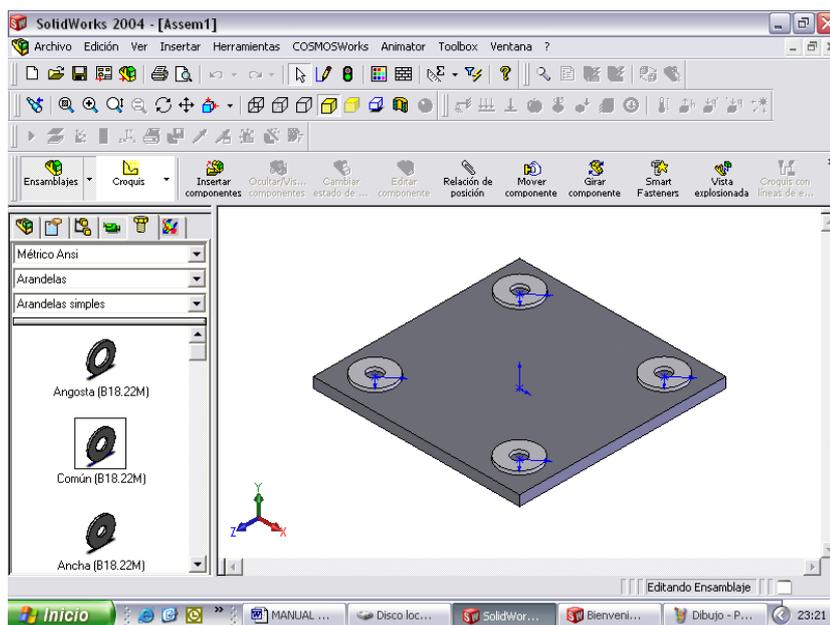
14. De un clic derecho sobre Material y seleccione Editar, utilice si desea los materiales que posee el programa o sino cree uno a su conveniencia. Guarde lo realizado dando un clic en el visto de color verde.



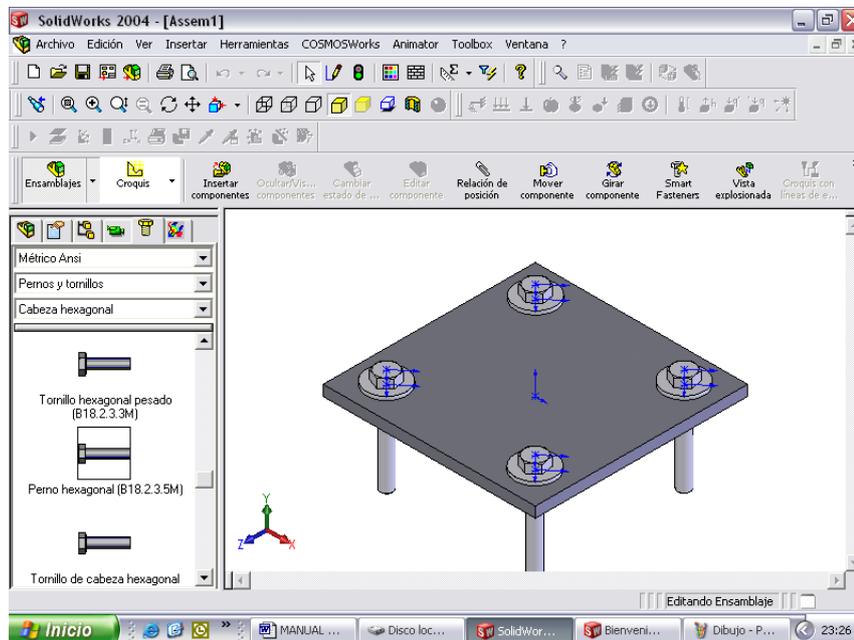
15. Abra un nuevo documento y seleccione la opción Ensamble. Ubique mediante el Mouse la placa base realizada dentro de la nueva página de diseño (ensamble).



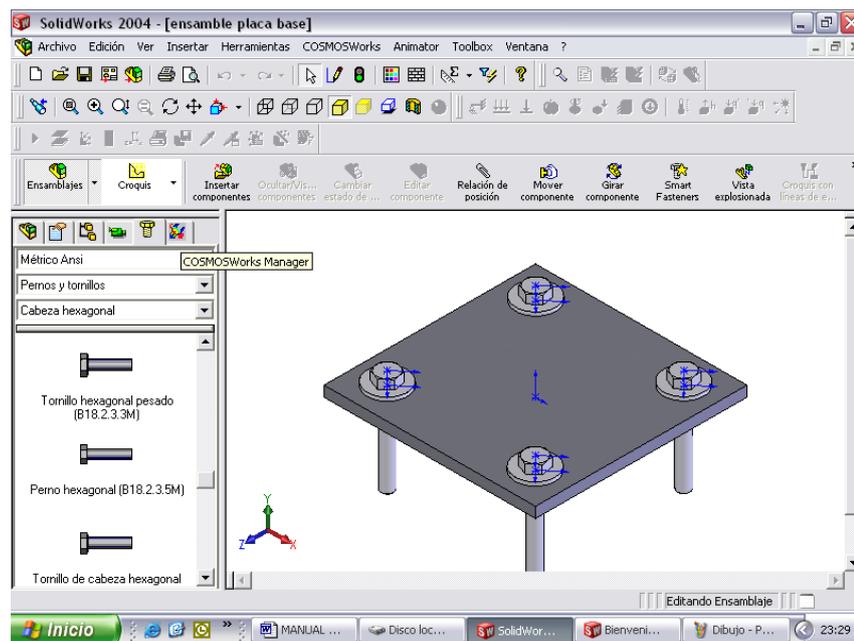
16. En el cuadro inferior izquierdo marque el icono Toolbox representado por un perno. Y seleccione el primer elemento a utilizar en este caso serán las Arandelas (Aparecerá un cuadro en el que usted debe definir el diámetro interno de la arandela). Con el Mouse arrastre las arandelas hasta los agujeros de la placa base.



17. Regrese al cuadro y seleccione los Pernos que desea utilizar (aparecerá un cuadro en el que usted debe definir el diámetro y longitud del perno que utilizará). Arrastre con el Mouse los pernos hacia los agujeros de las arandelas.



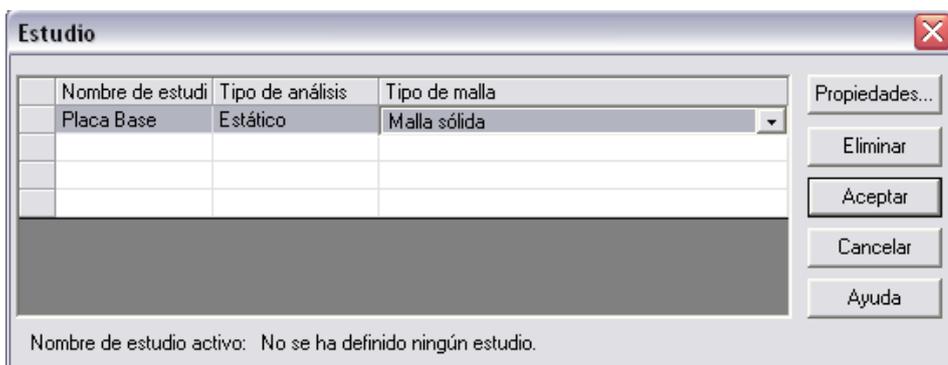
18. En el menú principal seleccione Archivo y guarde lo realizado como ensamble placa base.
19. En el cuadro inferior izquierdo seleccione COSMOSWorks Manager.



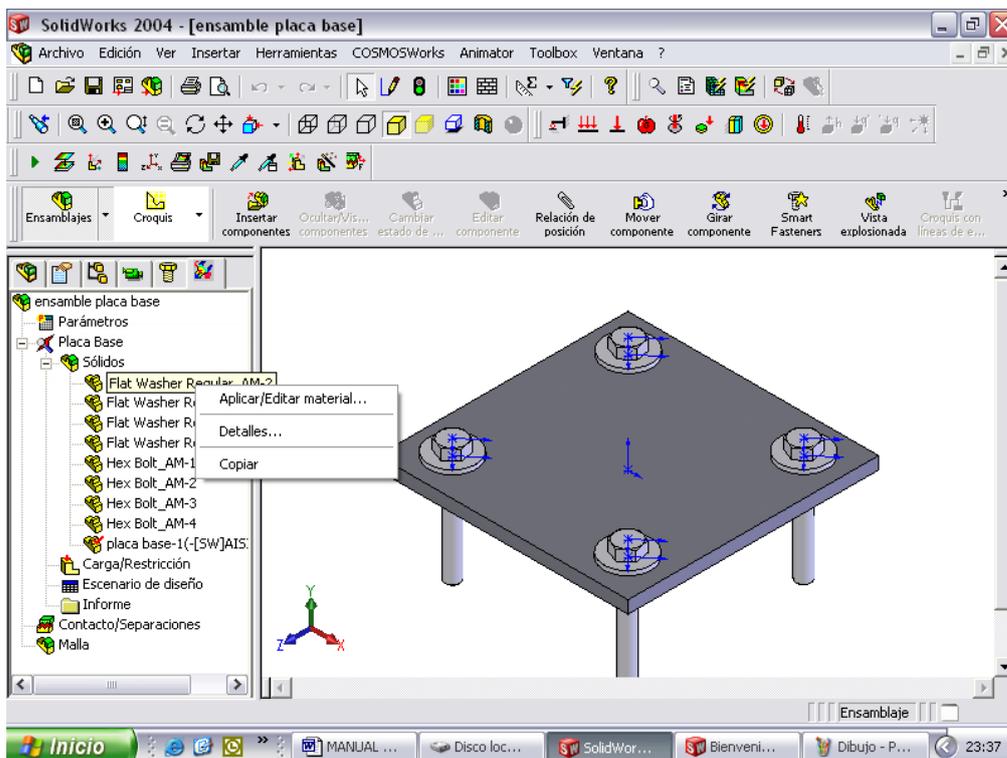
20. En la opción ensamble seleccione estudio.



21. De un nombre al estudio, seleccione el tipo de análisis a realizar y el tipo de malla que se utilizará para el cálculo mediante elementos finitos.



22. Con un clic derecho sobre las arandelas y pernos que aparecen en el cuadro del lado izquierdo aplique el material del que serán construidos.

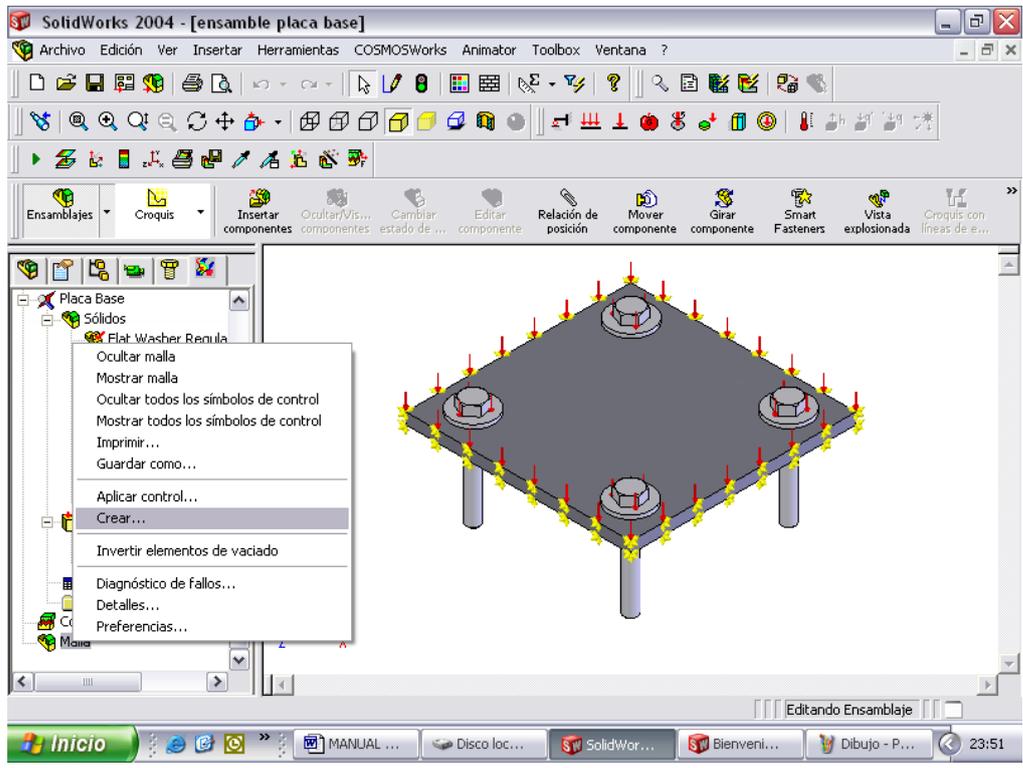


23. De clic derecho sobre Carga /restricción. Aquí usted dará las condiciones en las que se realizará el análisis.

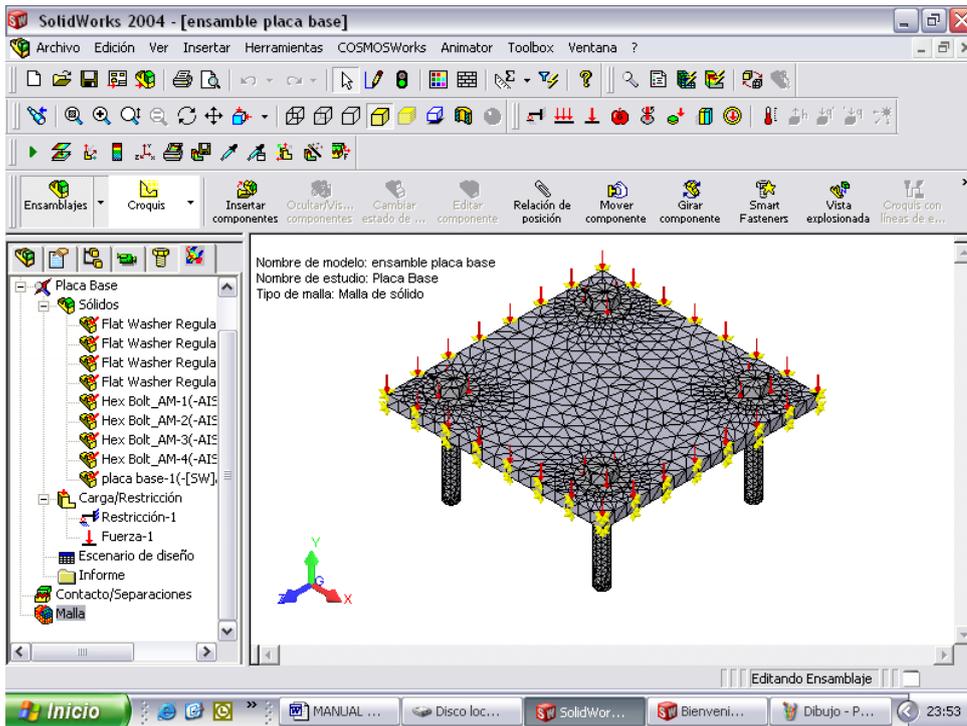


24. En este caso se usará la Restricción Inamovible sin traslación (flechas de color amarillo), y además se aplicará una Fuerza normal de 1650 N (flechas de color rojo).

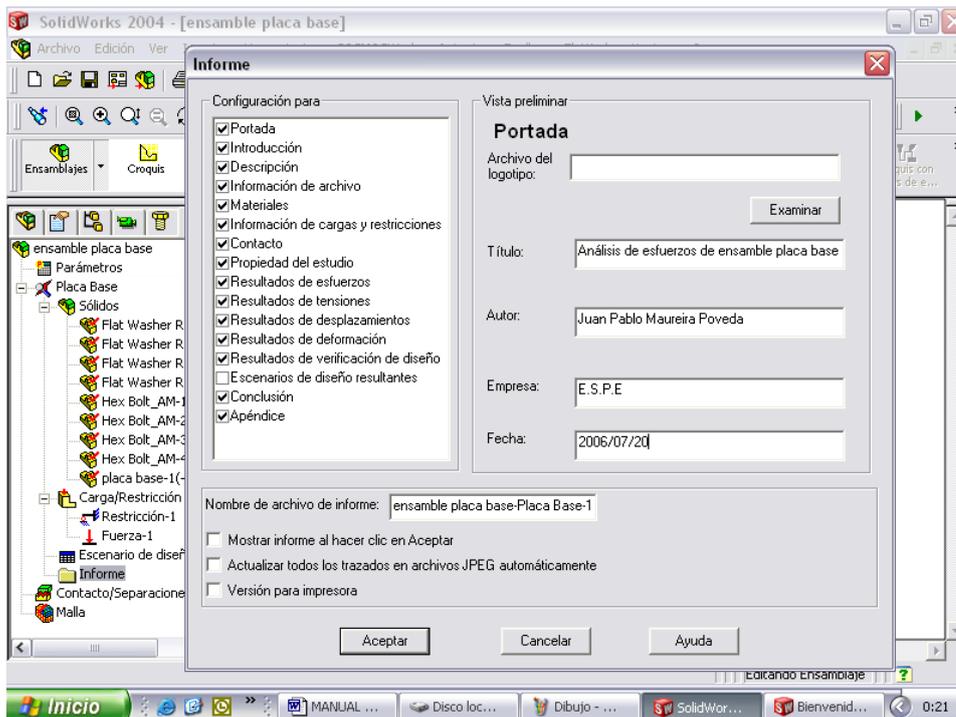
25. En el cuadro derecho de un clic derecho sobre malla y seleccione crear.



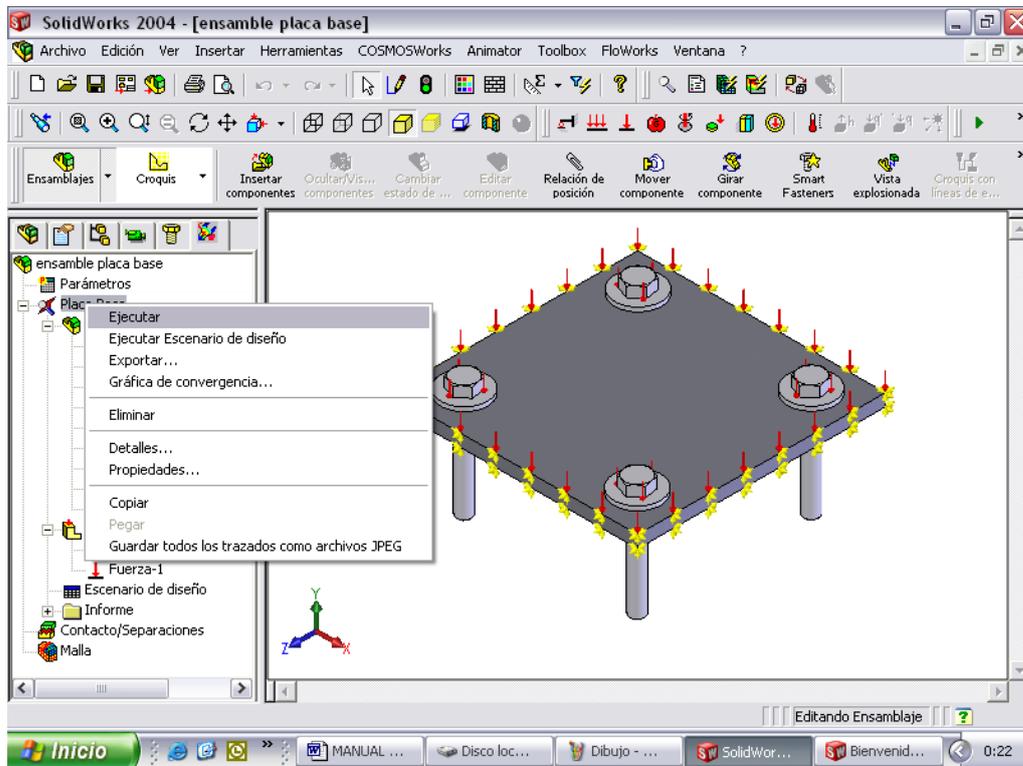
26. Defina las características del mallado y presione Aceptar.



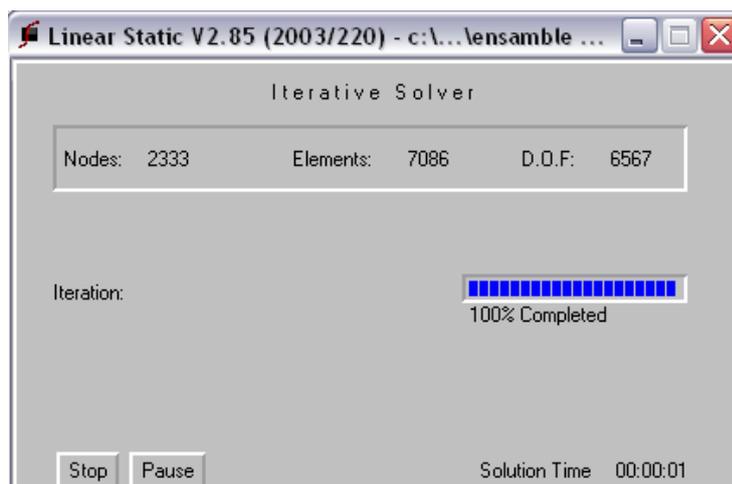
27. Ubíquese sobre el icono que dice informe de un clic derecho, defina y seleccione la información que usted quiere que se muestre luego de realizar el análisis. Esta información se presentará a modo de página web.



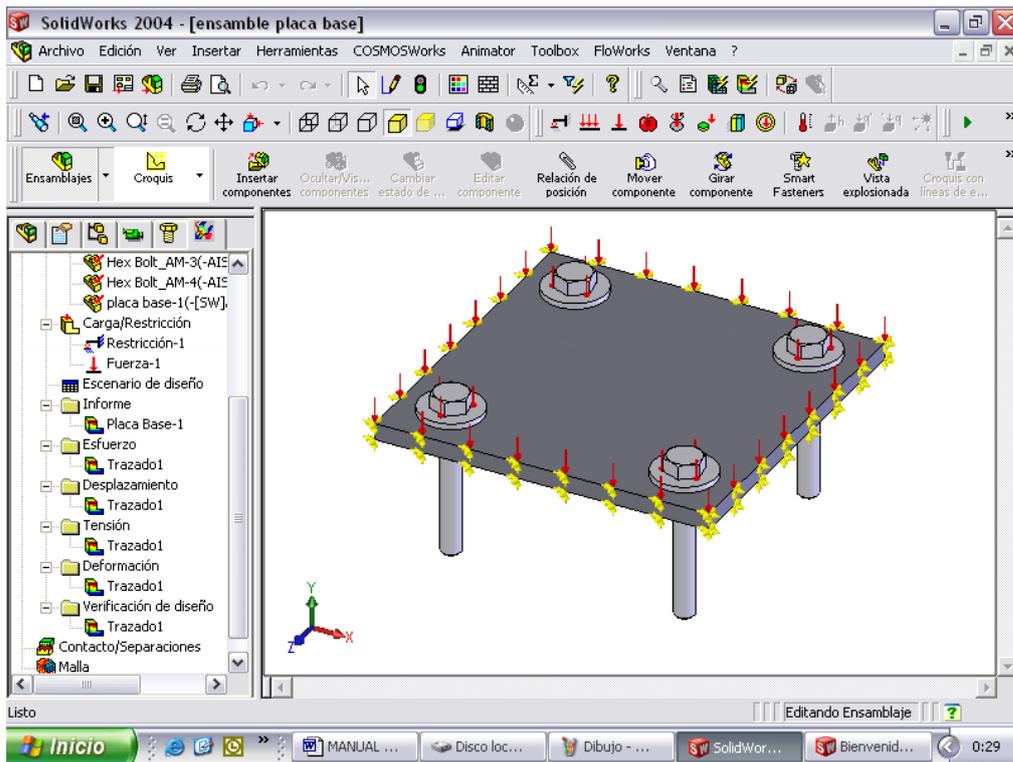
28. En el cuadro del lado izquierdo de clic derecho sobre el nombre del análisis (placa base) y posteriormente ejecutar.



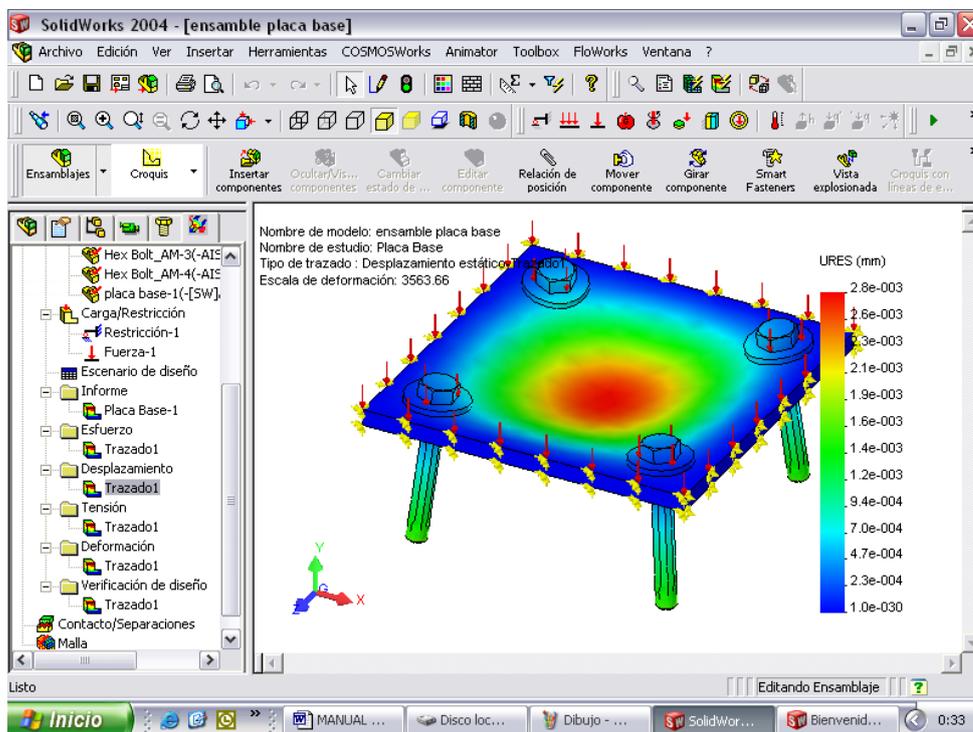
29. El programa empezará a realizar el análisis de esfuerzos utilizando elementos finitos. En la siguiente pantalla se puede observar el número de nodos y elementos tomados para el análisis.



30. Como se puede observar en el cuadro del lado izquierdo bajo el icono informe aparecerán los resultados del análisis. Cuyas pantallas son las mismas mostradas en el capítulo 8 como resultados de la simulación.



31. Por ejemplo se observarán los resultados de desplazamiento así:



32. Se ha concluido el diseño y análisis de esfuerzos a manera de ejemplo para una placa base. La misma que no es la utilizada en el presente proyecto.

A 8.5.1

TERMÓMETROS DIGITALES

A 8.5.2.1
CELDA DE SUSPENSIÓN TT 100

A 8.5.2.2
INDICADOR EZIWEIGH

