

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE FLUJO FORZADO PARA SECADO DE GRANOS DE
CAFÉ CON USO DE COLECTORES SOLARES ELABORADOS CON LATAS DE
ALUMINIO.**

PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

JULIÁN MOLINA GUTIÉRREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
SAN JOSÉ, COSTA RICA

2015

Evaluación de un sistema de flujo forzado para secado de granos de café con uso de colectores solares elaborados con latas de aluminio.

Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Sustentante:

Julián Molina Gutiérrez

COMITÉ ASESOR

Aprobado Por:



Ing. Adolfo Ulate

Presidente del Tribunal

Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.



Ing. Esteban Durán, Ph.D

Director del Proyecto

Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.



Ing. Cindy Torres M.Sc.

Miembro Lector

Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.



Ing. Allan Mora

Miembro Lector

Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

Ing. Karolina González M.Sc.

Miembro Lector

Escuela de Ingeniería Química, U.C.R.

RESUMEN

El objetivo general de este proyecto fue evaluar un sistema de flujo forzado para secado de granos de café con uso de colectores solares elaborados con latas de aluminio. Se tiene como punto de partida 2 secadores solares de convección natural. Al inicio del documento se plantea un marco teórico que se utiliza como referencia sobre los distintos tipos de secadores y se definen características específicas de estos, haciendo énfasis en los utilizados para secar café. Se cuenta con la ventaja de experiencia previa de un secador de convección natural, se utiliza como punto de partida del desarrollo del proyecto.

Respecto al marco teórico se plantearon una serie de modificaciones al sistema de secado, para modificar el secador de convección natural y transformarlo en uno de flujo forzado, con una mejor distribución de aire y un sistema de control automático que permita facilitar la operación del mismo. Se dimensionó el flujo de aire para un secado adecuado y se seleccionó equipo para lograr un bajo consumo energético.

Se cotizaron los materiales, equipos y recursos para la modificación y una vez adquiridos se comenzó con la ejecución de las modificaciones respectivas. Se construyó una cámara de presión para distribuir el aire uniformemente en la cama de granos y se instaló un sistema de control automático, cuya variable controlada es la temperatura del aire, por medio de 2 ventiladores de 182 m³/h.

Completada esta etapa, se procedió a realizar un plan experimental donde se plantean una serie de experimentos para estudiar y cuantificar el desempeño del secador. Por medio los gráficos y ecuaciones se representan eficiencias de secado de hasta 77% con una remoción de humedad de $4,89 \times 10^{-4}$ kg/s y una radiación promedio de 702 W/m². Se trataron de realizar las pruebas lo más similar posible a las realizadas con el secador de convección natural, para su posterior comparación. Por lo que en cada prueba se cargó el secador con 45 kg de café pergamino recién chancado. Se alcanzaron valores de velocidad de aire de hasta 1,12 m/s, la temperatura del aire llegó hasta 65,5 °C.

Se logró realizar 3 pruebas de aproximadamente 4 días cada una donde se alcanzaron valores satisfactorios de humedad en el café para su almacenamiento y buena calidad en el café obtenido. Se recomienda implementar un sistema nuevo con movimiento de secado de granos, y mayor capacidad de secado.

INDICE GENERAL

COMITÉ ASESOR.....	i
RESUMEN.....	ii
INDICE GENERAL.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE CUADROS.....	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	2
2.1 Principios de Secado.....	2
2.2 Secado de Granos de café.....	2
2.2.1 Tiempos de Secado.....	4
2.2.2 Fases del grano durante el secado.....	5
2.3 Psicometría.....	5
2.3.1 Conceptos Psicométricos de interés.....	6
2.3.2 Uso de la psicometría.....	6
2.4 Parámetros más influyentes.....	7
2.4.1 Caudal de aire.....	8
2.4.2 Temperatura del aire de secado.....	8
2.4.3 Contenido de humedad inicial y final del grano.....	9
2.4.4 Espesor de la capa de grano.....	9
2.5 Contenido de Humedad del grano.....	10
2.6 Secador Solar.....	11
2.7 Tipos de Circulación en secadores solares.....	11
2.7.1 Circulación por convección natural:.....	11
2.7.2 Circulación forzada:.....	13
2.8 Tipos de secadores solares.....	14
2.8.1 Secadores con circulación natural.....	14
2.8.2 Secadores solares de circulación forzada.....	18
2.8.3 Secadores de efecto invernadero.....	20
2.8.4 Secadores tipo túnel.....	23
2.8.5 Secadores tipo casa.....	23
2.8.6 Secadores combinados solares y biomasa.....	24
2.9 Lechos empacados para el almacenamiento de energía.....	24
2.10 Ventilación.....	27

2.11	Recepción de la radiación en Secadores Solares.....	27
2.11.1	Indirecta.....	28
2.11.2	Directa.....	28
2.12	La eficiencia de secado.....	29
2.13	Colectores Solares.....	29
2.13.1	Experiencias previas con colectores solares construidos con latas de aluminio.....	30
2.13.2	Otros tipos de colectores solares.....	31
2.13.3	Eficiencia Térmica del Colector Solar.....	32
2.14	Uso de la energía solar en agricultura.....	32
CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NUEVO DISEÑO.....		34
3.1	Punto de partida.....	34
3.2	Cambios y modificaciones.....	36
3.2.1	Ventilación.....	36
3.2.2	Distribución del aire.....	37
3.2.3	Sistema de control automático.....	38
3.3	Dimensionamiento.....	40
3.3.1	Dimensionamiento de los ventiladores.....	40
3.3.2	Dimensionamiento de la cámara de secado.....	40
CAPÍTULO 4. EJECUCION DE LAS MODIFICACIONES AL SECADOR SOLAR.....		41
CAPÍTULO 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES.....		45
5.1	Metodología experimental.....	45
5.2	Equipo para la toma de datos y variables.....	47
CAPITULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....		51
6.1	Radiación y temperatura.....	51
6.2	Velocidad del aire.....	52
6.3	Pérdida de Humedad.....	56
6.3.1	Humedad del aire.....	56
6.3.2	Perdida de humedad por bandeja.....	58
6.3.3	Relación entre café pergamino y café oro.....	63
6.4	Eficiencia de secado.....	64
6.5	Eficiencia de térmica del colector solar.....	65
CAPÍTULO 7. MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO.....		67
7.1	Pasos para el inicio del secado.....	67
7.1.1	Ubicación del Sistema.....	67

7.1.2	Distribución de masa a secar.....	67
7.1.3	Encendido e inicio del secado.....	67
7.1.4	Operación durante el secado.....	67
7.2	Mantenimiento del sistema.....	68
7.2.1	Mantenimiento diario.....	68
7.2.2	Mantenimiento semanal.....	68
7.2.3	Mantenimiento Mensual.....	68
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		69
8.1	Conclusiones.....	69
8.2	Recomendaciones.....	70
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA.....		71
CAPÍTULO 10. NOMENCLATURA.....		73
APENDICES.....		74
A.	Datos experimentales.....	74
B.	Resultados Intermedios.....	88
C.	Memorias de Cálculos.....	100
ANEXOS.....		105
Anexo 1. Plano de secador Modificado.....		105
Anexo 2. Plano de secador de convección natural utilizado como punto de partida.....		106
Anexo 3. Plano de colectores solares utilizados.....		107
Anexo 4. Diagrama de Control automático del secador solar modificado.....		108
Anexo 5. Presupuesto del secador solar modificado.....		109
Anexo 6. Cotización de MAZCR para 1 secador.....		110

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Secadores solares por convección natural.....	12
Figura 2.2 Secadores solares de convección forzada.....	13
Figura 2.3. Ejemplo de secadores solares tipo carpa.....	15
Figura 2.4. Ejemplo de secadores solares tipo caja.....	16
Figura 2.5. Ejemplo de secadores solares tipo balancín.....	16
Figura 2.6. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete.....	17
Figura 2.7. Ejemplo de secador de convección natural con calentador de respaldo, utilizando biomasa como combustible.....	18
Figura 2.8. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete con ventilación activa.....	19
Figura 2.9. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete con ventilación activa utilizando un panel fotovoltaico.....	19
Figura 2.10. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete con ventilación activa utilizando calefacción de apoyo.....	20
Figura 2.11. Secador solar de efecto invernadero de circulación natural.....	21
Figura 2.12. Ejemplo de Secadores solares de efecto invernadero por circulación forzada.....	22
Figura 2.13. Ejemplo de Secadores solares de efecto invernadero por circulación forzada.....	22
Figura 2.14. Ejemplo de Secador solar de tipo túnel.....	23
Figura 2.15. Ejemplo de Secador solar de tipo casa.....	23
Figura 2.16. Ejemplo de Secador combinado solar y biomasa.....	24
Figura 2.17. Ejemplo de Secador con lecho de almacenamiento de energía.....	25
Figura 2.18. Materiales para el almacenamiento de calor con cambio de fase.....	25
Figura 2.19. Ejemplo de Secadores con almacenamiento de energía.....	26
Figura 2.20. Soplador y ventilador axial respectivamente.....	27
Figura 2.21. Secador solar indirecto de circulación forzada.....	28

Figura 2.22. Secador solar directo.....	29
Figura 2.23. Colector solar comercial (RA 240 Solar Max) hecho con latas de aluminio para calentar aire.....	30
Figura 2.24. Colector solar construido, con salidas de aire a los lados.....	31
Figura 2.25. Colector quíntuple utilizado por la empresa CONA Solar.....	31Y
Figura 3.1. Secador solar de partida (Mora, 2013).....	35
Figura 3.2 Lazo de control a utilizarse en el sistema de secador de granos.....	38
YFigura 4.1. Cámara de secado en su etapa de construcción. Fuente: Julián Molina.....	
Figura 4.2. Cámara de secado en su etapa de construcción. Fuente: Julián Molina.....	42
Figura 4.3. Cámara de secado en su etapa de construcción. Fuente: Julián Molina.....	43
Figura 4.4. Compuertas para la toma de muestras, abiertas y cerradas. Fuente: Julián Molina.	44
Figura 5.1. Café a la salida de las máquinas de chancado. Fuente: Julián Molina.....	45
Figura 5.2. Medidores de humedad utilizados en las pruebas de determinación de Humedad base húmeda café pergamino y oro.....	46
Figura 5.3. Piranómetro TES 1333 Solar Power meter.....	47
Figura 5.4. Termoanemómetro Extech SDL350 de hilo caliente con datalogger.....	48
Figura 5.5. Medidor de temperatura y humedad relativa. Lascar EL-USB-2-LCD.....	48
Figura 5.6. Romana utilizada para pesar la masa de café utilizada en cada una de las bandejas durante las pruebas de secado. Fuente Julián Molina.....	49Y
Figura 6.1. Temperatura de entrada en secadores y radicación solar por hora del día.19/01/2014.....	52
Figura 6.2. Velocidad del aire de salida de ambos secadores y diferencia de velocidades. Para el 19 de enero del 2014.....	53
Figura 6.3. Fotografías de termoanemómetros de hilo caliente durante la realización de una prueba de secado de café, para el secador tico y canadiense respectivamente.....	54
Figura 6.4. Fotografías durante la Medición de velocidad del aire y temperatura a la salida de la cámara de secado.....	54
Figura 6.5. Gráfica de Flujo de aire a la salida de los secadores solares en m ³ /s durante la corrida el 07 de febrero del 2014.....	56

Figura 6.6. Gráfica de humedades relativas de entrada y salida del secador tico y canadiense durante el 5 de febrero del 2014.....	57
Figura 6.7. Temperaturas de entrada y salida del secador tico y Canadiense durante la prueba realizada el 05 de febrero del 2014.....	58
Figura 6.8. Humedad en granos % B.H. en el secador, para la bandeja 1, prueba piloto.....	59
Figura 6.9. Humedad en granos % B.H. en el secador, para la bandeja 2, prueba piloto.....	60
Figura 6.10. Humedad en granos % B.H. en el secador, para la bandeja 3, prueba piloto.....	61
Figura 6.11. Grafica de Humedad en granos en % B.H. en el secador, para la corrida 1.....	62
Figura 6.12. Gráfica de Humedad en granos en % B.H. en el secador, para la corrida 2.....	62
Figura 6.13. Gráfica de Humedad pergamino vs. Humedad oro.....	63
Figura 6.14. Eficiencia de secado para 2 corridas durante la prueba.....	65
Figura 6.15. Eficiencia térmica de colectores tico y canadiense para el 05/02/14.....	66

INDICE DE CUADROS

YCuadro 3.1. Dimensiones del colector solar RA 240 Solar Max.....	
Cuadro 3.2. Lista de componentes y características por tipo de secador.	36
Y	
Cuadro A.1. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto, día 18 de enero del 2014.....	74
Cuadro A.2. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 19 de enero del 2014.....	74
Cuadro A.3. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 20 de enero del 2014.....	75
Cuadro A.4. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 21 de enero del 2014.....	76
Cuadro A.5. Datos de radiación, temperatura de aire de salida con termoanemómetro, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 22 de enero del 2014.....	76
Cuadro A.6. Temperaturas entrada y salida, humedad entrada y salida de cámara de secado para corrida piloto en el secador tico, día 18 de enero del 2014.....	76
Cuadro A.7. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador canadiense, día 18 de enero del 2014.....	77
Cuadro A.8. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador tico, día 19 de enero del 2014.....	78
Cuadro A.9. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador canadiense, día 19 de enero del 2014.....	78
Cuadro A.10. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador tico, día 20 de enero del 2014.....	79
Cuadro A.11. Temperaturas entrada y salida, humedad entrada y salida de cámara de secado para corrida piloto en secador canadiense, día 20 de enero del 2014.....	79
Cuadro A.12. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador tico, día 21 de enero del 2014.....	80
Cuadro A.13. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador canadiense, día 21 de enero del 2014.....	81
Cuadro A.14. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1, día 5 de febrero del 2014.....	81

Cuadro A.15. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1 día 6 de febrero del 2014.....	82
Cuadro A.16. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1 día 7 de febrero del 2014.....	82
Cuadro A.17. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1 día 8 de febrero del 2014.....	83
Cuadro A.18. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 5 de febrero del 2014.....	83
Cuadro A.19. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 5 de febrero del 2014.....	84
Cuadro A.20. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 6 de febrero del 2014.....	84
Cuadro A.21. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 6 de febrero del 2014.....	85
Cuadro A.22. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 7 de febrero del 2014.....	85
Cuadro A.23. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 7 de febrero del 2014.....	86
Cuadro A.24. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 8 de febrero del 2014.....	86
Cuadro A.25. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 8 de febrero del 2014.....	87
Cuadro A.26. Áreas del sistema de secado, para ambos secadores.....	87
Cuadro A.27. Masa de café recién chancado por bandeja en secador al inicio de pruebas de secado.....	8
Cuadro B.1. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en bandeja 1, para corrida piloto.....	88
Cuadro B.2. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 2, para la corrida piloto.....	88
Cuadro B.3. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 3, para la corrida piloto.....	88
Cuadro B.4. Masa de Humedad en secador al inicio de la prueba, para la corrida piloto.....	88

Cuadro B.5. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 1, para la corrida 1.....	89
Cuadro B.6. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 2, para la corrida 1.....	89
Cuadro B.7. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 3, para la corrida 1.....	89
Cuadro B.8. Peso de Humedad en secador desde el inicio de la prueba en kg de agua, para la corrida 1.	89
Cuadro B.9. Porcentaje de humedad promedio, masa removida en kilogramos, peso de granos de café por día de secado para la corrida piloto.....	90
Cuadro B.10. Masa removida y eficiencia de secado por día de secado para la corrida piloto.....	90
Cuadro B.11. Porcentaje de humedad promedio, masa removida en kilogramos, peso de granos de café por día de secado para la corrida 1.....	90
Cuadro B.12. Masa removida y eficiencia de secado por día de secado para la corrida 1.....	90
Cuadro B.13. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 18 de enero del 2014.....	91
Cuadro B.14. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 18 de enero del 2014.....	91
Cuadro B.15. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 19 de enero del 2014.....	92
Cuadro B.16. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 19 de enero del 2014.....	92
Cuadro B.17. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 20 de enero del 2014.....	93
Cuadro B.18. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 20 de enero del 2014.....	93

Cuadro B.19. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 21 de enero del 2014.....	94
Cuadro B.20. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 21 de enero del 2014.....	94
Cuadro B.21. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 05 de febrero del 2014.....	95
Cuadro B.22. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 05 de febrero del 2014.....	95
Cuadro B.23. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 06 de febrero del 2014.....	96
Cuadro B.24. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 06 de febrero del 2014.....	96
Cuadro B.25. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 07 de febrero del 2014.....	97
Cuadro B.26. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 07 de febrero del 2014.....	97
Cuadro B.27. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 08 de febrero del 2014.....	98
Cuadro B.28. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 08 de febrero del 2014.....	98
Cuadro B.29. Radiación promedio por día de secado para la prueba piloto.....	99
Cuadro B.30. Radiación promedio por día de secado para la corrida 1.....	99

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Existe la necesidad de un equipo que pueda secar café a bajo costo, en el menor tiempo posible y a la vez que no emita gases de efecto invernadero. El secado de café es un proceso que consume mucha energía y además debe hacerse a una temperatura adecuada, para que el grano no pierda propiedades organolépticas. La utilización de energía solar para el secado es una de las defensas más importantes del proyecto así como el interés de muchos micro-beneficios de café en el desarrollo de tecnologías poco costosas para implementarlas y mejorar su productividad, así darle un valor agregado al producto.

Se pretende evaluar un secador solar de flujo forzado de utilidad a micro beneficios, que utilice poca energía eléctrica, utilice el sol como fuente de calor, sea funcional, fácil de construir y económicamente viable.

El secado tradicional o secado en patios lleva mucho tiempo, los granos se exponen a los elementos y clima cambiante, lo cual no es favorable para optimizar el uso del área y la eficiencia en la producción. El secado tradicional o secado en patios lleva mucho tiempo, los granos se exponen a los elementos y clima cambiante, lo cual no es favorable para optimizar el uso del área y la eficiencia en la producción. El secado en Guardiola y verticales, es un proceso que consume mucha energía, y es factible solo cuando las cantidades son muy grandes, con el secado solar se ahorra energía no renovable. Un secador solar tiene costo energético y de mantenimiento mínimo, además permite un producto de alta calidad, que mantiene las características típicas de los granos, es así que el uso de la energía solar ha tomado mucha fuerza para el desarrollo de secadores que la utilicen minimizando los costos de operación y del producto final.

En el desarrollo del proyecto se pretende modificar un secador de flujo natural, previamente construido y evaluado. Convirtiéndolo en un secador de flujo forzado, por medio de abanicos que utilizan energía eléctrica, así aumentar la eficiencia de secado y eficiencia térmica, de esta manera, poder secar una mayor cantidad de café de una forma más rápida y también poder transferir de forma más eficiente el calor. Este utiliza como fuente de calor un colector solar construido con latas de aluminio recicladas. Se tienen 2 colectores uno comprado y construido por la empresa CanSolar y el otro de fabricación local que conserva las mismas dimensiones del primero.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Principios de Secado.

El secado es básicamente un fenómeno donde se da la eliminación de un líquido ligado a un sólido, por evaporación. La mayor parte del consumo de energía durante el secado es para la evaporación de agua. De forma líquida a vapor (2,258 kJ/kg a 101,3 kPa). El agua está contenida en el sólido en diversas formas, como humedad libre o ligada que afecta directamente a la velocidad de secado.[CITATION GLV12 \l 5130].

El secado es la operación unitaria en la cual se da la remoción de pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido, con el fin de reducir el contenido del líquido excedente hasta un valor aceptable para el producto que se requiere. Se utiliza en la industria de los alimentos como una técnica de preservación, ya que muchos microorganismos y enzimas no pueden funcionar sin una cantidad importante de agua. En general, el proceso de secado es la etapa final de una serie de operaciones unitarias, y es frecuente que luego de este proceso el producto final esté listo para su almacenamiento y empaquetado (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

2.2 Secado de Granos de café.

El nivel seguro de humedad para el almacenamiento de granos se encuentra entre el 10 y el 13%, base húmeda, para las principales especies, dadas las condiciones medias de temperatura y humedad relativa en América Latina.[CITATION Jos91 \l 5130]. En el caso particular del secado de café la energía necesaria para el proceso de secado según Nandwani (2010) representa cerca del 95% del total de energía utilizada en el procesamiento del café, por lo que el utilizar la energía solar para el secado sería una gran posibilidad de economizar gran parte de la energía de procesamiento.

Este grano posee ciertas características propias que lo diferencian de otros tipos de granos; cualidades que hacen que este producto sea complicado de secar, razones citadas por Cléves, 1986.

- i. Posee un alto contenido de humedad a la salida del despulpado. Algunos autores sugieren un rango del 50 al 55% de contenido de humedad, que difieren considerablemente de otros granos como el maíz que rara vez excede un 20%.

- ii. Por la diferente naturaleza química del pergamino o endocarpio y del grano o endospermo. El pergamino se endurece durante el proceso de secado, debido a su composición celulósica. Este presenta una ligera contracción del volumen en un 10% aproximadamente. En cambio el grano, reduce su tamaño considerablemente durante el proceso. Entonces se produce una cámara de aire entre ambos componentes, que obstaculiza tanto la transferencia de calor hacia el interior del grano como la salida de vapor de agua hacia el exterior.
- iii. Por la volatilización de componentes aromáticos que ocurre, si se emplean altas temperaturas de secado. Esto fundamentalmente va en detrimento de la calidad del grano, que se manifiesta en la calidad de la taza con la pérdida de cuerpo, aroma y acidez. Además debido al calentamiento excesivo también se produce el desprendimiento del embrión, posiblemente porque se contrae más rápido que los tejidos de mayor dureza que lo rodean. Por último se presenta un daño en la apariencia externa del grano.
- iv. Conforme avanza el proceso es más difícil extraer el agua del grano, el proceso se torna menos eficiente y más consumidor de energía.

Estos factores muestran que el café es un grano complicado de secar, y si no se tienen los cuidados apropiados se puede ir en detrimento de su calidad, lo que es un factor predominante para su comercialización.

Existen diferentes maneras de secar el café por métodos naturales y métodos artificiales. En particular en Costa Rica el secado de volúmenes comerciales de granos se lleva a cabo por combustión de diesel o de desechos bio-másicos (leña). Al usar combustibles de origen fósil puede que el costo del proceso sea mayor al del valor comercial del producto seco, lo cual es una preocupación cada vez mayor entre los productores de café pues las alzas tan frecuentes de los precios del crudo, y el uso de la biomasa mantiene el problema del abastecimiento debido a la escasez y contaminación, por lo que muchos productores, en conjunto con universidades, están investigando el uso de energías renovables para mejorar el proceso de secado[CITATION Nan10 \l 5130].

El grado de humedad con que se inicia el proceso de secado, por parte del grano, es de cerca de 50% al 55% aproximadamente, el cual se debe reducir a un valor final entre 11% al 12% de humedad, lo que le brinda las condiciones óptimas para su almacenamiento seguro[CITATION Ram03 \l 5130].

2.2.1 Tiempos de Secado.

El tiempo total de secado se divide en tres períodos:

- Período de adaptación:

Es el período de calentamiento inicial del producto en el cual la velocidad de secado en función del tiempo aumenta.

- Período de velocidad constante:

Es este lapso la velocidad de secado permanece constante y es independiente del sólido, de modo que para las mismas condiciones externas, el proceso es similar al que se daría en la superficie de una masa de agua. Este proceso inicia cuando comienza el proceso de eliminación de agua en la superficie externa del grano y finaliza cuando la velocidad de difusión de la humedad del producto hacia la superficie llega a ser inferior a la velocidad a la cual se está evaporando el agua en la superficie del grano.[CITATION RJi97 \l 5130]. Cuando se alcanza este punto en secado se denomina contenido de humedad crítico.

- Período de velocidad decreciente:

Una vez que la humedad superficial ha sido eliminada, la humedad interna remanente o humedad ligada comienza a ser eliminada pero, en consecuencia, la velocidad del secado decrece a medida que se va perdiendo humedad interna por evaporación en la superficie. Según avanza este proceso cada vez hay menos humedad en el grano y por consiguiente es más difícil extraer la humedad interna, por tal razón la velocidad del proceso disminuye.[CITATION Pat02 \l 5130].

Las duraciones de los períodos de secado varían de un secador a otro y de un producto a otro, de tal forma que es en la práctica donde se fijan estos valores. Al disminuir la cantidad de humedad a evaporar también disminuye el tiempo de secado; otra opción de disminuir el tiempo de secado es la de aumentar la energía térmica, para que aumente la temperatura del aire y así aumente la tasa de transferencia del calor necesario para evaporar la humedad del producto. Si se quiere disminuir el tiempo de secado se debe tener cuidado de que la temperatura del aire no sea demasiado alta, ya que puede ocasionar daños al producto.

2.2.2 Fases del grano durante el secado.

A lo largo de los periodos de secado se pueden observar dos fases o estados del grano.

i. Fase higrométrica.

Esta fase se produce cuando el grano tiene un contenido de humedad superior al 30%, la temperatura del grano permanece por debajo de la temperatura del aire, ya que el calor que posee el aire se transforma adiabáticamente para evaporar la humedad del grano, que en esta etapa es significativa. El grano permanece sin mayor variación en su temperatura hasta llegar al contenido de humedad crítico.[CITATION Pat02 \l 5130].

ii. Fase higroscópica.

Esta se presenta una vez la humedad baja a menos de 30%, aquí el café presenta un equilibrio térmico con el aire de secado. Es en estos momentos cuando puede ocurrir un exceso de temperatura que vaya en disminución de la calidad del grano.[CITATION Pat02 \l 5130].

2.3 Psicrometría

La psicrometría es una rama de la termodinámica que estudia las características y el comportamiento de los procesos de las mezclas aire y vapor.

2.3.1 Conceptos Psicométricos de interés.

Para efectos de la comprensión de este trabajo se definirán algunos conceptos de importancia:

- a) Temperatura de bulbo seco (T_{bs}). Esta para nuestro caso de interés se refiere a la temperatura del aire; comúnmente se mide con un termómetro ordinario de mercurio o electrónico. El bulbo del termómetro tiene que estar en reposo y seco. Este valor se expresa en Celsius (C)
- b) Humedad Relativa (HR). La humedad relativa se define como la relación entre la presión parcial del vapor y la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas. Generalmente se expresa sobre una base porcentual, de forma que 100 por 100 de humedad corresponde a gas saturado y 0 por 100 de humedad corresponde a gas exento de vapor. Gas saturado es un gas en el que el vapor está en equilibrio con el líquido a la temperatura del gas. La presión parcial del vapor en un gas saturado es igual a la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas.[CITATION Cri06 \l 1033]
- c) Humedad absoluta (H). Definición de humedad. La humedad H de una mezcla aire-vapor de agua se define como los kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Esta definición de la humedad sólo depende de la presión parcial P_A del vapor de agua en el aire y de la presión total P . [CITATION McC91 \l 1033]
- d) Calor latente (h_{fg}). Cuando una fase líquida pasa a fase vapor con su presión de vapor a temperatura constante, se debe agregar cierta cantidad de calor que recibe el nombre de calor latente de vaporización. Diversos manuales contienen valores y tabulaciones de los calores latentes de vaporización.[CITATION Cri06 \l 1033]

2.3.2 Uso de la psicometría.

Mediante esta se pueden evaluar y analizar diferentes estados termodinámicos de la mezcla aire y vapor de agua. Su representación clásica es gráficamente donde se representan diferentes propiedades de interés. Para definir un punto en la carta psicométrica, es necesario determinar dos de estas propiedades cualesquiera, estas definirán el estado termodinámico del aire. Comúnmente los instrumentos de determinación de humedad relativa y los laboratorios determinan la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa.

En secado de granos se conocen dos procesos que se pueden representar de esta con la carta, el calentamiento y el secado. En la etapa de secado cambian la humedad absoluta y la temperatura; la humedad absoluta aumenta y la temperatura disminuye, la entalpía se mantiene constante. A esta etapa se le llama enfriamiento adiabático, es decir que se supone que toda la energía que lleva el aire se utiliza para evaporar el agua, por ende se da un incremento en la humedad del aire y la humedad relativa; la presión de vapor y la temperatura en el punto de rocío.

Esta es una suposición y estrictamente no ocurre de esa manera, por causas como perdidas de calor y de aire en el sistema de secado y por esto algunas veces los resultados reales se alejan de los calculados.

Conforme avanza el proceso de secado avanza se da un calentamiento del grano, cuando se pasa del punto crítico. En este momento se considera que el proceso deja de ser adiabático.

2.4 Parámetros más influyentes.

El secado de granos presenta una serie de variables que definen el balance de energía del proceso. Existe un grupo de parámetros que son determinantes para controlar el proceso de secado de café y son:

- i. Caudal de aire de secado.
- ii. Temperatura de aire de secado.
- iii. Contenido de humedad del aire inicial y final.
- iv. Espesor de la capa de grano.

Según la combinación de estos factores se determina el desarrollo del proceso de secado. Las variables como calidad del grano, tiempo de secado y eficiencia son afectadas directamente por estos factores.

2.4.1 Caudal de aire.

La optimización del flujo requerido de aire es importante, ya que es el aire en contacto con el producto, el encargado de extraer humedad. La temperatura inicial de la corriente de aire desciende conforme avanza en el secador. A lo largo de su recorrido en el secador el aire aumenta su humedad relativa. Para

un proceso de secado ideal, esta humedad relativa debe llegar a ser lo más próxima posible a la humedad de saturación. En un proceso eficiente y dado que la circulación de aire lleva un costo, es necesario determinar el flujo másico de aire óptimo para secar el producto en el menor tiempo posible, el cual va a depender de la naturaleza del producto, tipo de secador, etc. Si se conocen las temperaturas existentes en diversos puntos del secador, se puede determinar aproximadamente qué tan correctamente está trabajando la corriente de aire de entrada. La corriente de aire óptima para el secado será alcanzada cuando, en el punto final del secador, la humedad del aire sea cercana a la humedad de saturación; esto sucederá cuando la temperatura en la salida del secador sea igual a la temperatura de bulbo húmedo correspondiente a las condiciones de la temperatura del flujo de aire y de humedad iniciales en la entrada del secador.[CITATION Gam13 \l 5130].

Los tiempos de secado disminuyen al aumentar el caudal específico (flujo de aire por unidad de volumen de grano) y las eficiencias en el uso de calor tienden a bajar, ya que al reducirse el tiempo de contacto entre el aire y el grano este podrá desplazar mayor humedad debido al mayor volumen de aire que circula a través del mismo. No siempre aumentar el caudal de aire resulta beneficioso ya que caudales muy altos, requieren mayor consumo de energía. Valores típicos de caudales específicos para secado en silos rondan entre 0,22 a 0,48 m³/s/m³ de grano presecado.

2.4.2 Temperatura del aire de secado.

El aumento de la temperatura del aire acelera el proceso de secado, pues reduce la humedad relativa del aire que adquiere, entonces, una gran capacidad secante. Es el argumento más empleado por los encargados de secadoras cuando se acumulan granos, volúmenes de grano húmedo en las recepciones de la planta.[CITATION FAO96 \l 5130]. El café debido a sus requerimientos de calidad no puede secarse a una temperatura mayor a los 60 grados Celsius.

La temperatura del aire es fundamental para controlar variables como la velocidad de secado, el uso de energía y la calidad final del café. La velocidad de secado como la eficiencia aumenta al aumentar la temperatura.[CITATION Bro92 \l 5130]

2.4.3 Contenido de humedad inicial y final del grano.

Las condiciones atmosféricas (humedad relativa y temperatura ambiente) bajo las cuales se realiza el secado determinan la humedad final que puede alcanzar la masa de granos, ya que cada combinación de temperatura y humedad relativa del aire corresponde a un contenido de humedad en equilibrio con el producto y este contenido varía para cada producto. Si la humedad inicial es mayor que el punto crítico de humedad, está bien utilizar temperaturas y flujos altos.

El contenido de humedad final es muy importante ya que para el café hay un óptimo para su adecuado almacenamiento, este usualmente ronda el 11% en base húmeda en café oro, además algunos clientes solicitan café a ciertos grados de humedad, por lo que saber cuándo se alcanza cierto porcentaje de humedad es clave en el proceso. Secar por debajo del valor requerido significa una pérdida de peso, calidad, energía y tiempo innecesarios. Un secado incompleto puede presentar problemas de almacenamiento y comercialización.

2.4.4 Espesor de la capa de grano.

El espesor de la capa de granos tiene una relación estrecha tanto con el flujo de aire, como con la temperatura de esta corriente de aire. Esta relación se logra notar al experimentar con diferentes espesores en el secado. Por ejemplo, un espesor grande de la capa de granos produce una mayor caída de presión en la torre de secado, lo que dificulta el paso del flujo del aire a través de la cama de secado. Además, al utilizar espesores grandes se tiene una región de sobresecado en las cercanías de la entrada del aire lo que seca en forma dispereja los granos afectando su calidad [CITATION Mon02 \l 5130]. Si la capa de grano fuese delgada, se disminuye el periodo de secado ya que la velocidad del proceso aumenta, esto limita considerablemente que se produzca sobresecado de grano en los estratos inferiores. [CITATION Bro92 \l 5130].

La variación de las condiciones psicométricas al atravesar la capa de grano produce un cambio progresivo en la velocidad de secado porque el cambio en la temperatura afecta la difusividad; la humedad relativa afecta el contenido de humedad de equilibrio y el cambio en el volumen específico a su vez afecta la masa de aire. La mayoría del secado toma lugar en un volumen que corresponde a una

zona llamada “zona de secamiento”, la cual se mueve a través del grano en la dirección del movimiento del aire.

2.5 Contenido de Humedad del grano.

Para expresar el contenido de humedad del grano en este documento será utilizará la base húmeda (CH_{bh}). Es la forma más común de expresar la humedad y también la que se utiliza comercialmente. Todas las formas de humedad, se expresan como una sola para efectos de medición.

El contenido de humedad en base húmeda se expresa como la cantidad de agua entre la cantidad de peso total, en porcentaje; El peso total está compuesto por el peso del agua más el peso del material que no contiene humedad. Este material que no contiene humedad o materia seca está compuesto por proteínas, carbohidratos, lípidos y sales inorgánicas. Representado por medio de las Ecuaciones 1 y 2.

$$CH_{bh} = \frac{m_w}{m_T} * 100 \quad (1)$$

$$CH_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_s} * 100 \quad (2)$$

Dónde:

CH_{bh} :	Contenido de humedad en base húmeda,	%
m_w :	Masa de agua presente en el grano,	kg
m_s :	Masa de la material seca,	kg
m_T :	Masa total del grano,	kg

2.6 Secador Solar

Los dos elementos básicos de una secadora solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden

diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar. [CITATION Gam04 \l 5130].

Se ha investigado el sistema económicamente más adecuado para su implementación con recursos financieros limitados, con lo que se busca el diseño más simple posible y que igualmente sea fácil de construir con materiales disponibles en la localidad para industrias a pequeña escala (Ramana Murthy, 2009).

Una desventaja significativa de los secadores solares es que no cuentan con ninguna forma de calefacción de reserva. Debido a que en los secadores solares el secado no es homogéneo, se requiere una buena estrategia de rotación de bandejas para aprovechar mejor la radiación solar disponible y mejorar las eficiencias y tiempos de secado.

2.7 Tipos de Circulación en secadores solares.

El aire circula dentro del secador con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por dos métodos: circulación forzada y por convección natural.

2.7.1 Circulación por convección natural:

Este tipo de secador solar utiliza el principio de la convección del aire, el cual al ser calentado se eleva al disminuir su densidad y este es sustituido por aire más frío y denso, lo que da como resultado corrientes de aire convectivas (Giancoli, 2006). En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo de dos secadores por convección natural. Este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar con equipos grandes. Para equipos pequeños o medianos se pueden lograr velocidades de aire de 0,4 a 1 m/s al interior de la cámara.

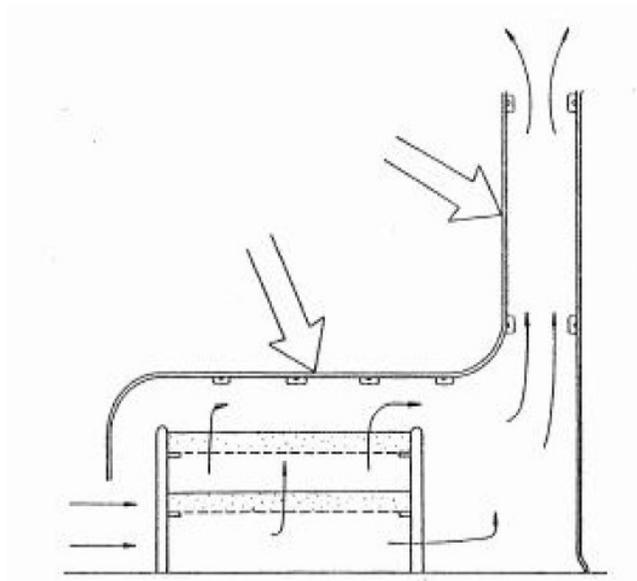
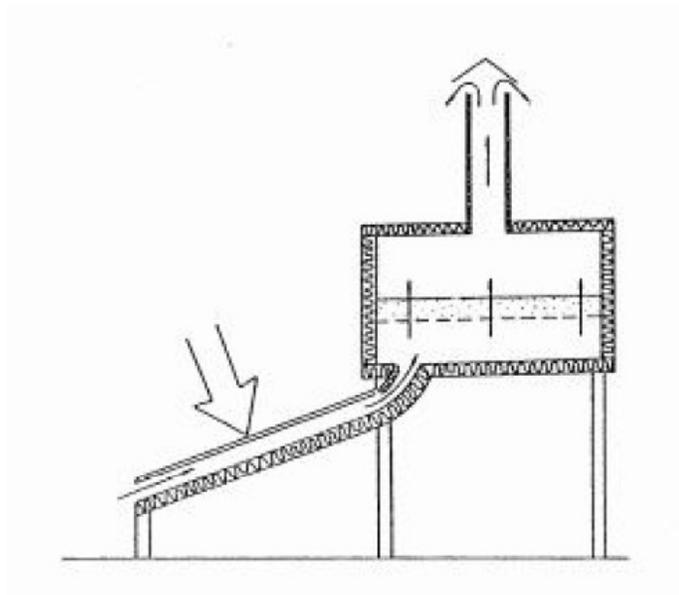


Figura 2.1. Secadores solares por convección natural. (Weiss, 2011)

Generalidades de los secadores solares de circulación natural:

- Por lo general se utilizan para aplicaciones agrícolas artesanales o no industrializadas.
- Su funcionamiento depende completamente de la energía solar por lo tanto, se pueden utilizar independiente del suministro de energía eléctrica.
- Se hace circular aire calentado por el sol a través de la cosecha, la diferencia de peso específico entre el aire de secado y el aire ambiente promueve un flujo de aire vertical.
- El flujo de aire en este tipo de secador no es suficiente para penetrar grandes volúmenes de cultivo.
- El flujo de aire se detiene durante la noche, debido a que no hay diferencia de densidad en el aire.
- El riesgo de deterioro del producto debido al ataque de hongos y reacciones enzimáticas es más alto que en otros tipos de secadores.

2.7.2 Circulación forzada:

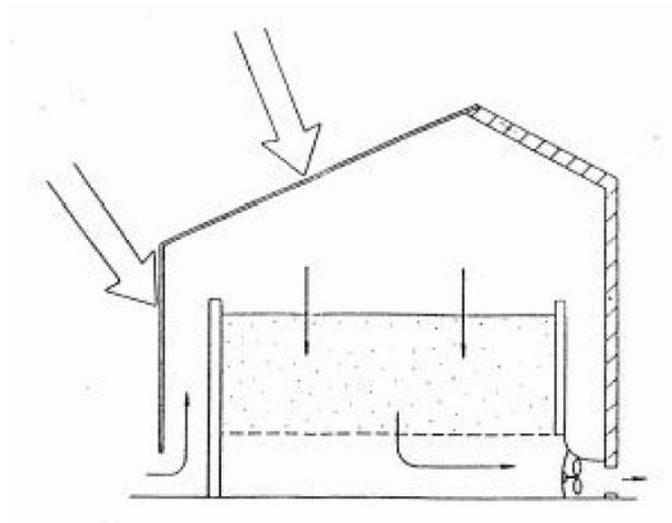
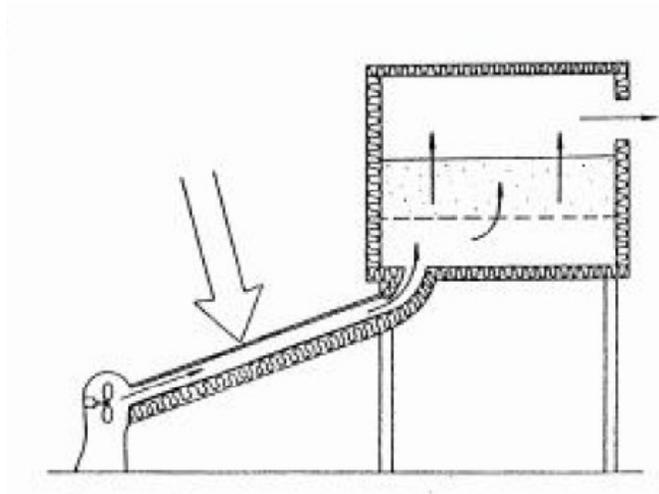


Figura 2.2 Secadores solares de convección forzada. (Weiss, 2011)

El aire es movido por un ventilador que consume energía eléctrica. Este tipo de circulación facilita el diseño en el caso de los equipos de gran tamaño, además de facilitar el control del proceso de secado. En la Figura 2.2 se muestra un esquema de dos secadores de circulación forzada. Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 1 y 3 m/s. La principal

desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica.

Generalidades de los secadores solares de circulación forzada.

- También son llamados de convección forzada.
- Se puede proporcionar un flujo de aire óptimo en la cámara de secado durante todo el proceso para controlar: temperatura, humedad y profundidad del lecho es menos restringida
- La capacidad y la fiabilidad de los secadores se incrementan considerablemente en comparación con los secadores de convección natural.
- Los secadores de convección forzada bien diseñados son más eficaces y más controlables que los de circulación natural.
- El uso de convección forzada puede reducir el tiempo de secado por tres y disminuir el área de colector requerido en un 50 %.
- Pueden ser alimentados con electricidad de la red o con un panel solar fotovoltaico.

2.8 Tipos de secadores solares.

Existe una variedad extensa de tipos de secadores solares, que usualmente se dividen en secadores de circulación natural y secadores solares de circulación forzada. Usualmente los secadores de circulación forzada tienen una mayor capacidad de secado y menores tiempos, ya que existe un elemento externo que acelera el proceso.

Algunos ejemplos de estos tipos de secadores se mencionan a continuación, es necesario mencionar que pueden existir muchas variaciones no contempladas a continuación. Los siguientes ejemplos son tomados de varios estudios bibliográficos realizados por el autor de este documento y se mencionan los que se consideraron más representativos o importantes. Existe en la literatura una inmensa cantidad de estudios y variaciones en secadores solares.

2.8.1 Secadores con circulación natural.

Caracterizados porque su fuerza motriz es la diferencia de densidad del aire, propiciada por una diferencia de temperatura, el aire caliente al ser menos denso tiende a elevarse y el aire frío descender, suelen ser los que tienen tiempos de secado más prolongados debido a que no se utiliza fuente de energía eléctrica y se suelen implementar principalmente en sistemas de secado de pequeña escala.

También son los más rudimentarios y fáciles de construir, ya que no tiene elementos móviles, sistemas de control u otro.

2.8.1.1 Secadores tipo Carpa.

Son baratos y fáciles de construir, consisten en un marco de postes de madera cubiertos con lámina de plástico, utilizan plástico negro en la pared opuesta al sol. El producto a ser secado se coloca en un estante por encima del suelo, los tiempos de secado son usualmente 25% menores al secado al aire libre, el propósito principal es proporcionar protección contra el polvo, suciedad, lluvia, y los animales. Tienen el inconveniente de ser fácilmente dañados por los fuertes vientos. Un ejemplo de este tipo de secadores se muestra en la Figura 2.3.

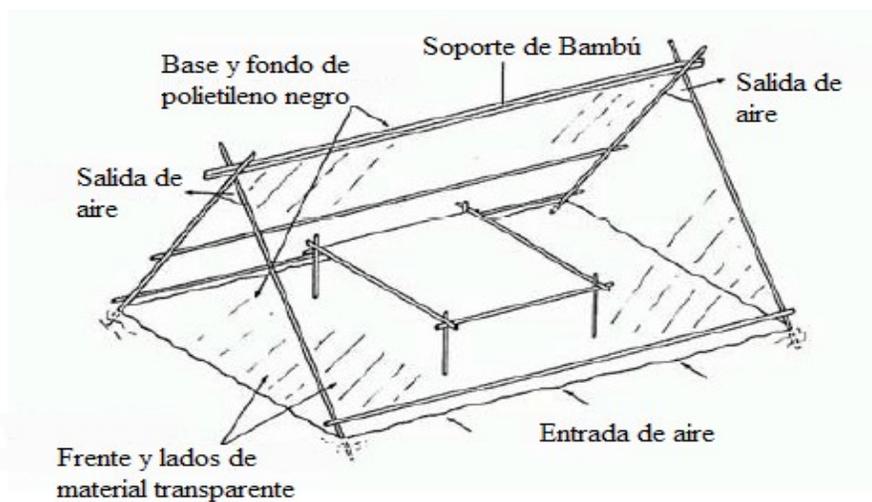


Figura 2.3. Ejemplo de secadores solares tipo carpas. (Ekechukwu, 1987)

2.8.1.2 Secador solar tipo caja.

Consiste en una caja de madera con tapa transparente y bisagra. El interior está pintado de negro y el producto es soportado sobre una malla. El aire fluye dentro de la cámara a través de agujeros en la parte

delantera y las salidas de orificios de ventilación en la parte superior de la pared posterior. Este tipo de secadores puede alcanzar altas temperaturas y los tiempos de secado más cortos, que los secadores tipo carpa. Las temperaturas de secado pueden llegar hasta los 80 °C. Un ejemplo secadores solares tipo caja se muestra en la Figura 2.4. **Figura 2.4. Ejemplo de secadores solares tipo caja. (Vanderhulst, 1990).** Este tipo de secadores son de fácil construcción, ya que no implica elementos móviles, su capacidad se ve limitada debido al tamaño y que el producto debe colocarse en una capa fina, para acelerar el secado.

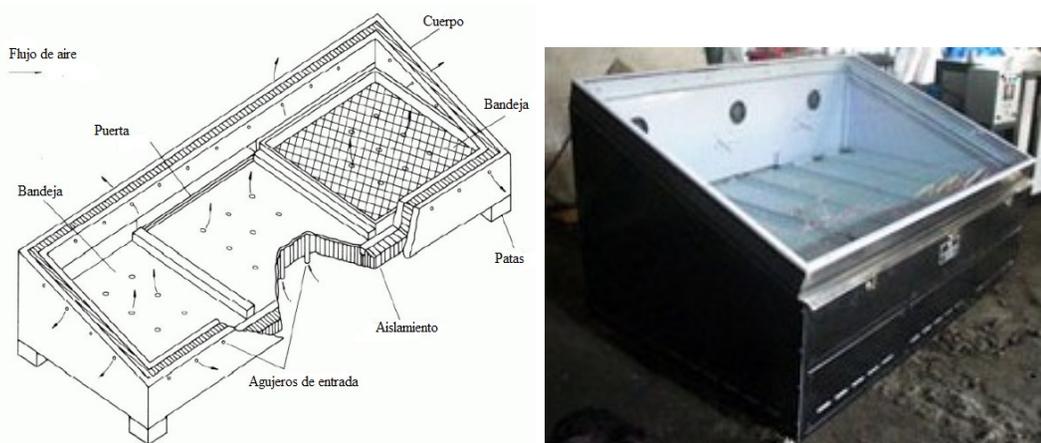


Figura 2.4. Ejemplo de secadores solares tipo caja. (Vanderhulst, 1990).

2.8.1.3 Secador solar tipo balancín.

El tradicional tiene un marco rectangular rígido, la longitud de los cuales es 3 veces la anchura. Se coloca el producto en bandejas con fondo de malla, que permitan la circulación de aire vertical y la evaporación máxima. La parte inferior está hecha de láminas de acero corrugado y pintado de negro. Las bandejas extraíbles se colocan en la parte superior. Se logra el efecto invernadero, colocando de una lámina de plástico transparente. Un ejemplo de secadores solares tipo balancín se muestra en la Figura 2.5.

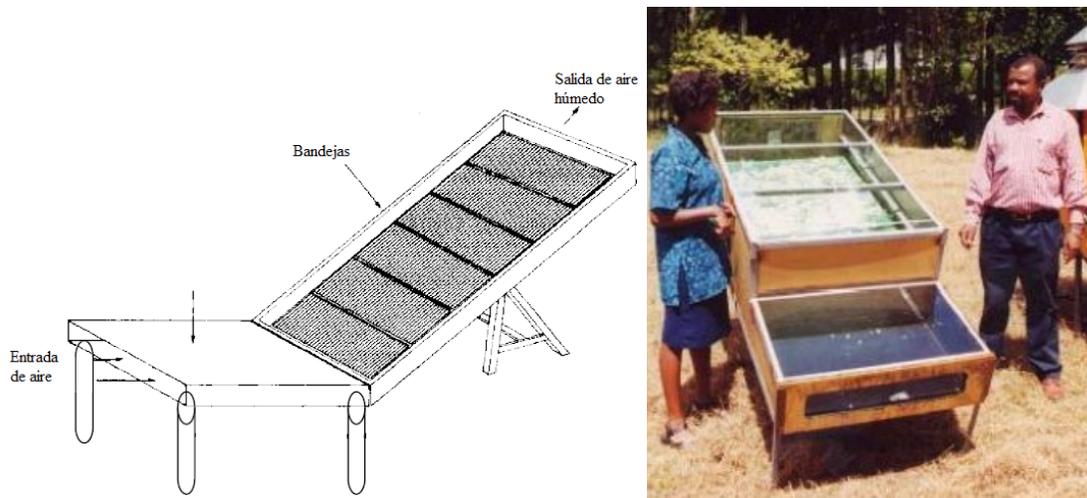


Figura 2.5. Ejemplo de secadores solares tipo balancín. (D.O.W.S, 2013).

2.8.1.4 Secador solar tipo gabinete.

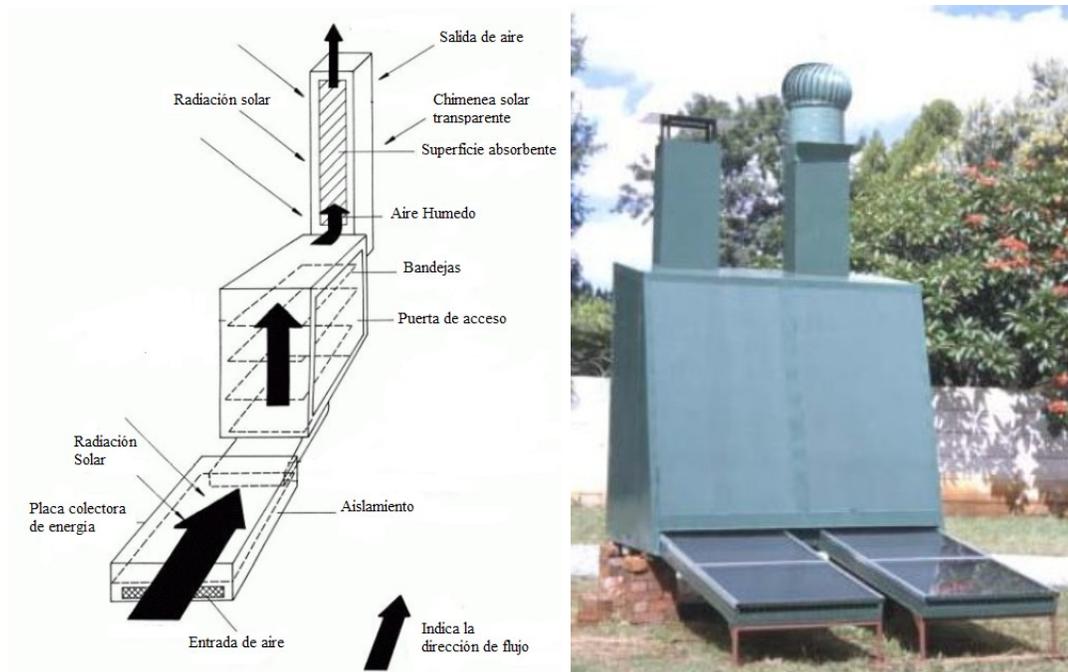


Figura 2.6. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete. (Vanderhulst, 1990).

El aire caliente fluye a través de las bandejas hasta que todo el producto está seco. El producto de las bandejas inferiores se seca primero. Bajos costos de mano de obra, cargue y descargue. El producto no necesita ser expuesto a los rayos del sol, reduciendo la pérdida de color y vitaminas. Se pueden acoplar sistemas de almacenamiento de calor. Pueden alcanzar muy altas temperaturas internas, excesivas para la mayoría de productos, hasta 70 °C en horas de mayor radiación. Un ejemplo de este tipo de secadores se muestra en la Figura 2.6.

2.8.1.5 Secador de convección natural con calentador de respaldo, utilizando biomasa como combustible.

El calentador de reserva se utiliza cuando la radiación es inadecuada y por la noche por lo que el secado continuo es posible. Los gases de combustión calientan la superficie del tambor, que a su vez calienta el aire a medida que se mueve sobre la superficie. El aire caliente se eleva en la cámara de secado y seca el cultivo. Un ejemplo de este tipo de secador se muestra en la Figura 2.7.

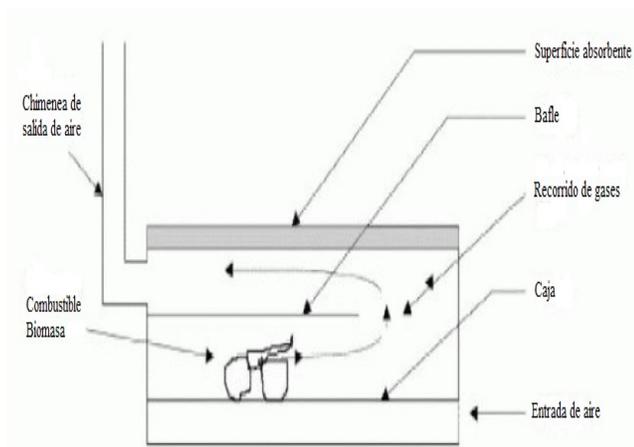
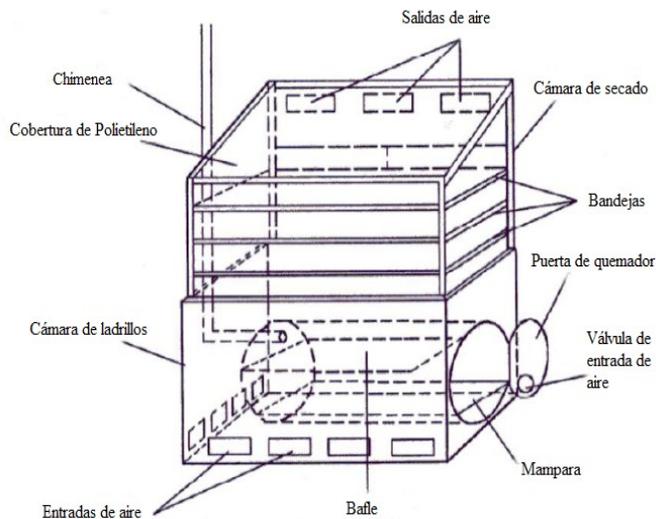


Figura 2.7. Ejemplo de secador de convección natural con calentador de respaldo, utilizando biomasa como combustible. (Weiss, 2011)

2.8.2 Secadores solares de circulación forzada.

Estos tipos de secadores se caracterizan por poseer una fuente externa que propicia la circulación del aire dentro y a través de la cámara de secado, donde se encuentra el producto deseado a deshidratar.

Usualmente se utiliza un ventilador o soplador. El mismo puede colocarse en la entrada, salida o ambos extremos. Si el elemento de ventilación se encuentra solamente a la salida del aire, se conoce como tiro inducido, si está solamente en la entrada, se conoce como tiro forzado.

2.8.2.1 Secadores solares de gabinete con ventilación activa.

Si hay electricidad de la red disponible el costo inmediato, comparado a una instalación fotovoltaica, es menor. Un controlador electrónico puede estar conectado, siendo capaz de ajustar la temperatura adecuada por velocidad variable del ventilador. La temperatura se puede ajustar para optimizar las condiciones de secado de la fruta respectiva. Un esquema de este tipo de secadores se muestra en la Figura 2.8.

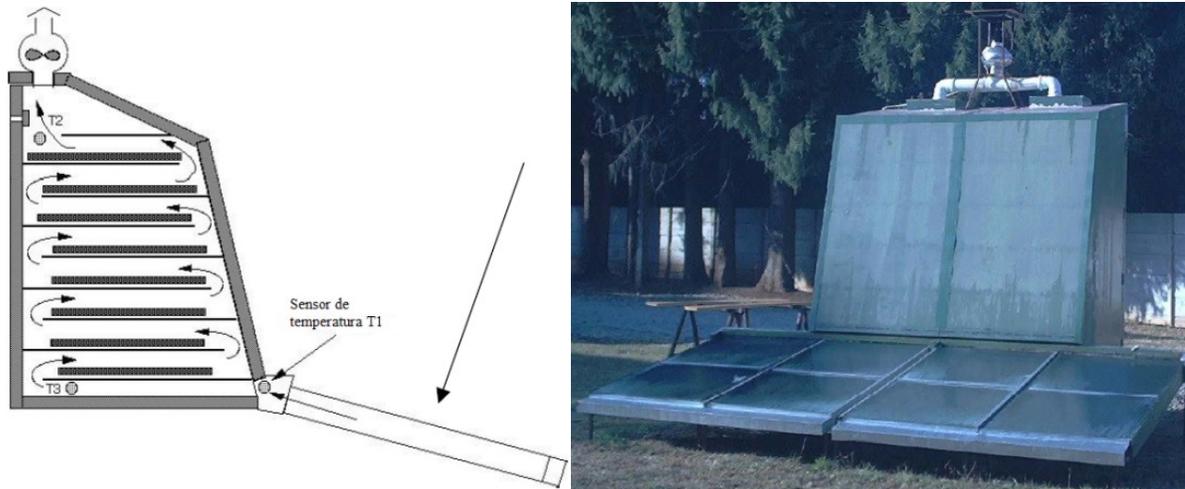


Figura 2.8. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete con ventilación activa. (Weiss, 2011).

2.8.2.2 Secadores solares de gabinete con ventilación activa utilizando un panel fotovoltaico.

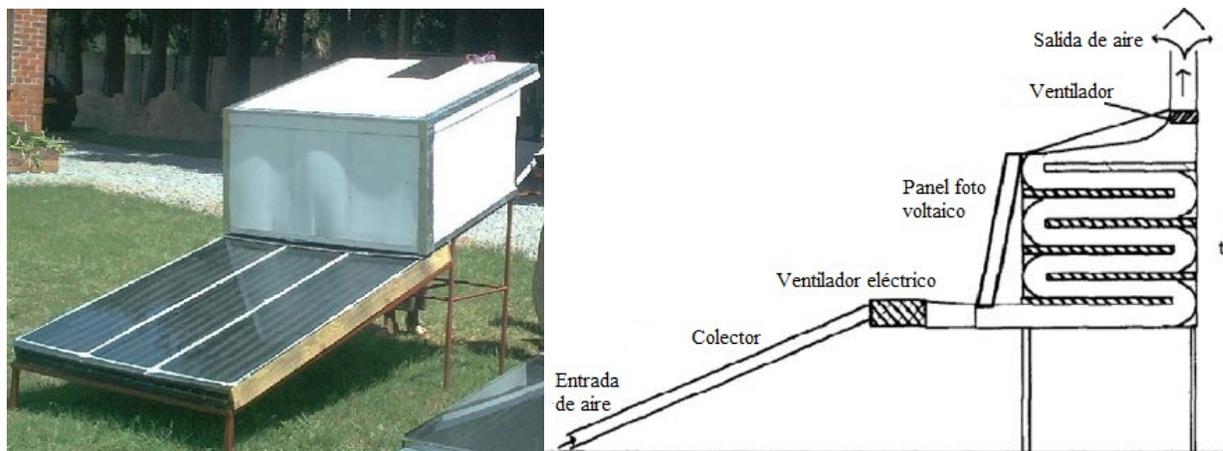


Figura 2.9. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete con ventilación activa utilizando un panel fotovoltaico. (Weiss, 2011).

El ventilador está acoplado directamente al módulo solar de trabajo, sin acumulador y controlador de carga. El aumento de la radiación solar aumenta la salida del módulo, lo que permite acelerar el ventilador. Esto tiene la ventaja de permitir un control sencillo de temperatura simplemente mediante el diseño apropiado de los componentes de la instalación fotovoltaica, obviando de este modo todos los dispositivos de control. Este tipo de secadores se muestran en la Figura 2.9.

Se disminuye el tiempo de secado porque el secado no sólo se produce durante el día. Para los productores comerciales, la capacidad de procesar continuamente y con fiabilidad es importante para satisfacer sus mercados.

La biomasa, en particular la leña, es la fuente más común de la energía en las zonas rurales, existe la necesidad de dispositivos de combustión sencillos y asequibles, que pueden utilizarse para complementar las tecnologías solares. Un ejemplo de este tipo de secador se muestra en la Figura 2.10.

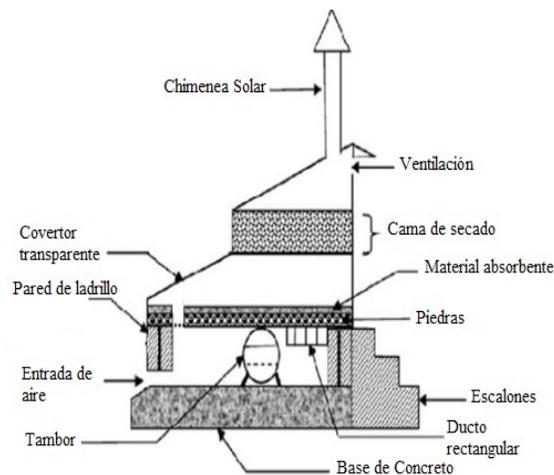
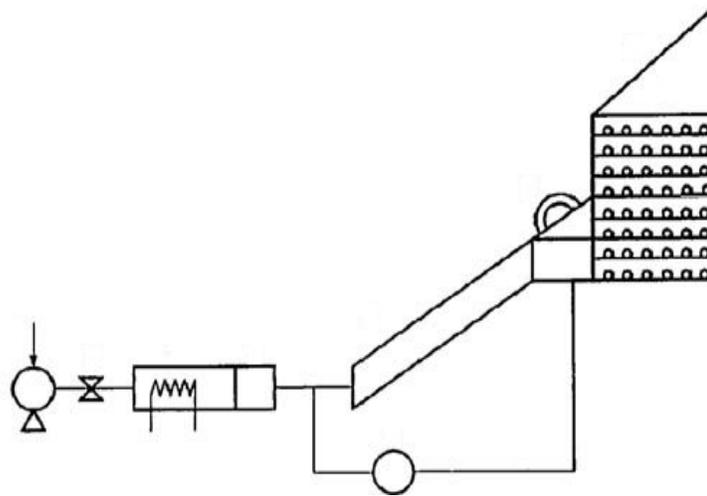


Figura 2.10. Ejemplo de secadores solares tipo gabinete con ventilación activa utilizando calefacción de apoyo. [CITATION Wer\1 1033]

2.8.3 Secadores de efecto invernadero.

El techo y la pared de este secador solar están hechos de materiales transparentes que se fijan sobre una estructura de acero, esto evita que el aire húmedo y agua de lluvia entren en la cámara de secado. Para mejorar la absorción, se pintan de negro las superficies dentro de la estructura. Se colocan ventiladores de entrada y salida, dentro de la estructura para asegurar una distribución uniforme del aire

de secado. Si se diseña adecuadamente, un secador de efecto invernadero permite un mayor grado de control sobre el proceso de secado que los secadores de gabinete de convección natural y son más apropiados para el secado a gran escala.

2.8.3.1 Secadores solares de efecto invernadero por circulación natural.

Un diseño simple típico consiste en una cámara de secado cilíndrica transparente con una chimenea cilíndrica y una puerta para la entrada de aire, el secador opera por la acción de la energía solar que incide directamente en el cultivo dentro de la secadora. El cultivo y la chimenea absorben la radiación solar y se calientan. El aire caliente se eleva y fluye hacia arriba por la chimenea hacia el exterior. La reposición de aire fresco es aspirada desde el otro extremo de la secadora. Un ejemplo de un secador de efecto invernadero de circulación natural se muestra en la Figura 2.11.

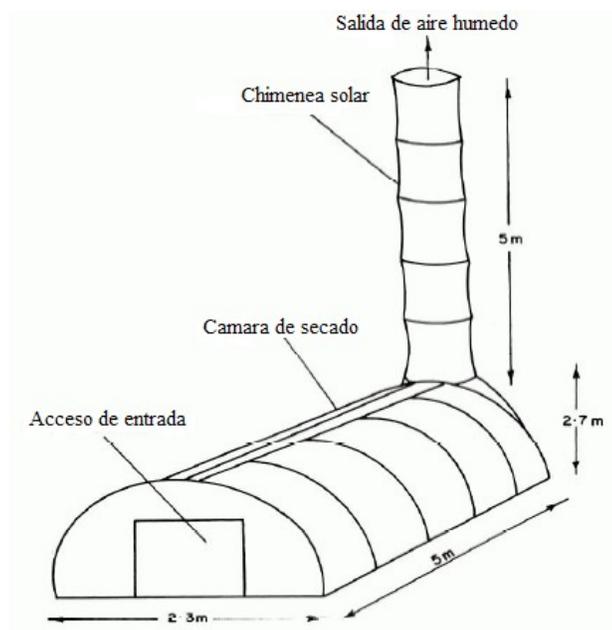


Figura 2.11. Secador solar de efecto invernadero de circulación natural. (Vanderhulst, 1990)

2.8.3.2 Secadores solares de efecto invernadero por circulación forzada.

Un ejemplo de este tipo de secadores se muestra en la Figura 2.12. En el primer sistema, específicamente se instalaron dos ventiladores 80W de entrada en la pared frontal por encima de la puerta para suministrar aire. En el segundo sistema de la Figura 2.12, se instaló una unidad de calentamiento auxiliar que consta de dos intercambiadores de calor, cada uno provisto de un soplador de

100 vatios se instalaron en la sección trasera dentro de la estructura transparente y cada uno fue conectado a un quemador de biomasa y queroseno para calentar agua.

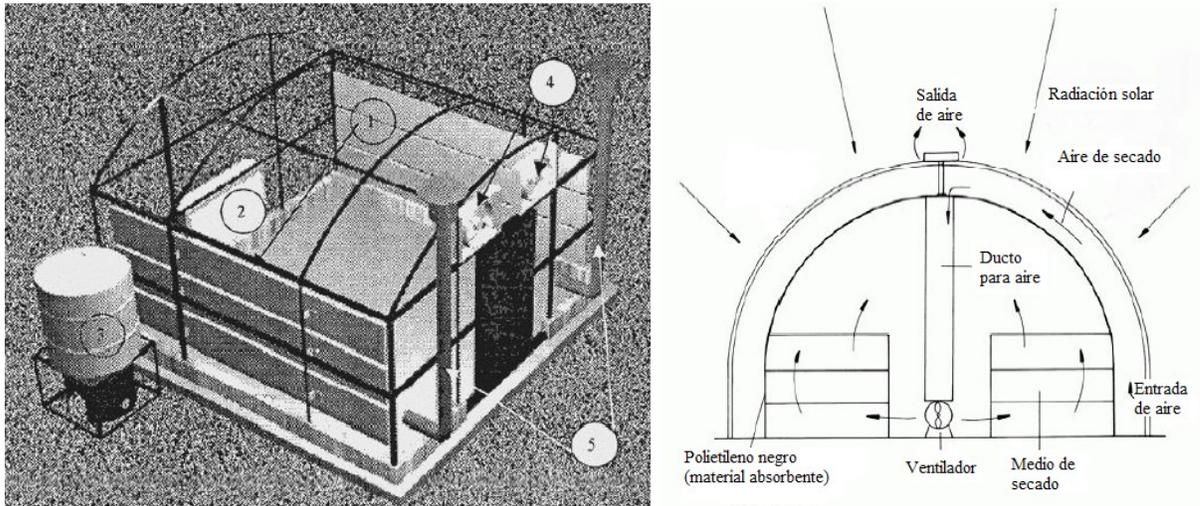


Figura 2.12. Ejemplo de Secadores solares de efecto invernadero por circulación forzada.

(Vanderhulst, 1990).

2.8.3.3 Secadores de efecto invernadero de producción continúa.

Un ejemplo de este tipo de secadores se muestra esquemáticamente en la Figura 2.13 cada día, el producto seco se retira del túnel, mientras que una cantidad igual de nuevo producto fresco se carga a través del otro extremo, el aire fluye en un sentido inverso relativo al movimiento de los carros. Las bandejas reciben la radiación solar a través de las paredes transparentes, aumentando de la temperatura del producto.

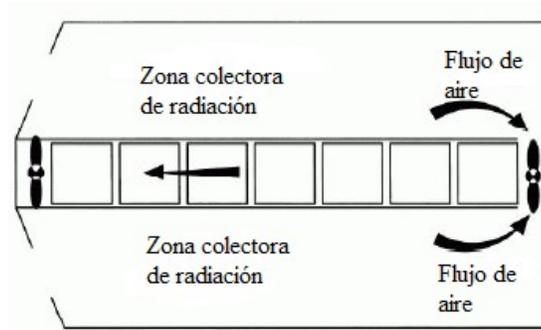
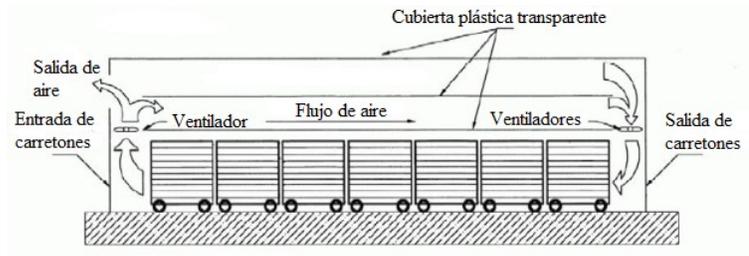


Figura 2.13. Ejemplo de Secadores solares de efecto invernadero por circulación forzada.

[CITATION Van90 \l 5130]

2.8.4 Secadores tipo túnel.

Los tres principales componentes del secador, son el colector solar, compartimiento de secado y el sistema de flujo de aire. El aire es forzado en el colector solar por los ventiladores donde se calienta por el sol, y a continuación, fluye a la sección de secado de alimentos. El cultivo se coloca en una malla de poliéster suspendido por una rejilla de alambre galvanizado. Este arreglo permite que el aire fluya por todos los lados de los alimentos, evitando la necesidad de moverlo durante el proceso de secado. Un ejemplo de secador tipo túnel se muestra en la Figura 2.14.

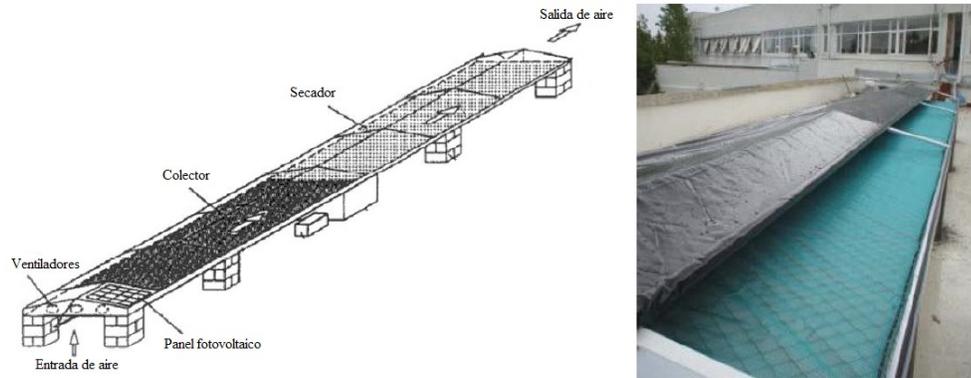


Figura 2.14. Ejemplo de Secador solar de tipo túnel. [CITATION Van90 \l 5130]

2.8.5 Secadores tipo casa.



Figura 2.15. Ejemplo de Secador solar de tipo casa. [CITATION Wer \l 5130]

Se componen de colectores solares, uno o más ventiladores y bandejas de secado. Debido a su tamaño y otros factores la construcción es similar a una casa donde el techo está construido por los colectores solares. Es posible secar diferentes cultivos, ajustando la caída de presión en la cama de granos. En la Figura 2.15 se muestra un ejemplo de secadores solares tipo casa.

2.8.6 Secadores combinados solares y biomasa.

En condiciones aptas, se utilizan colectores solares para calentar el aire de secado. Para permitir un secado continuo, durante el tiempo de la noche, el aire caliente es proporcionado por un horno de madera. Un ejemplo de este tipo de secadores se muestra en la Figura 2.16.

Un sistema avanzado de secado de café usando un horno de leña como sistema auxiliar. Debido a la dificultad de almacenamiento de agua caliente, el excedente de calor del horno de la madera que no puede ser utilizado al instante puede ser almacenado para su uso posterior.

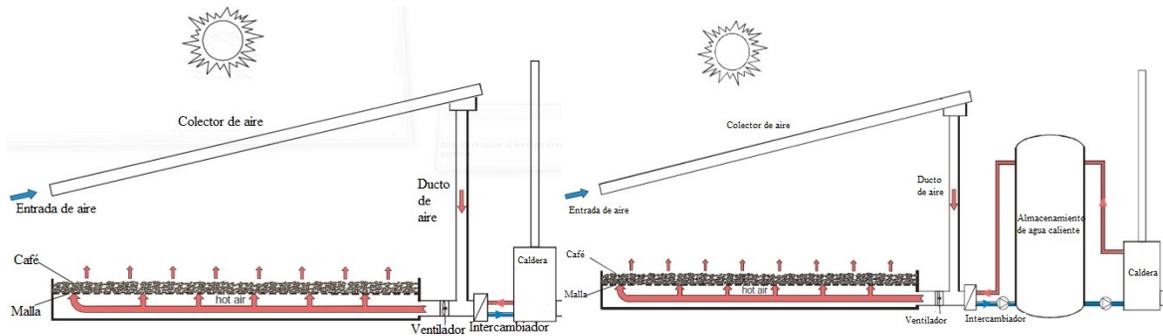


Figura 2.16. Ejemplo de Secador combinado solar y biomasa. (Mahmud, 2011)

2.9 Lechos empacados para el almacenamiento de energía.

La energía solar es una fuente de energía que depende del tiempo. La energía del sol es de carácter intermitente, a menudo difuso, lo que hace que el almacenamiento de energía críticamente importante. El almacenamiento de la energía de un proceso solar es necesario si la energía solar es satisfacer porciones sustanciales de las necesidades de energía y con el fin de disponer de un suministro ininterrumpido de energía en ausencia de la disponibilidad de la energía solar. El almacenamiento térmico de energía es de particular interés e importancia en el uso de esta técnica para aplicaciones de energía solar térmica.[CITATION TA112 \l 5130].

La energía térmica se puede almacenar como calor sensible, calor latente o energía química. En el almacenamiento de calor sensible, el calor se almacena en aumento de la temperatura del medio de almacenamiento. En caso de sistemas de almacenamiento de calor latente, la energía se almacena en el cambio de fase de materiales, conocidos por sus siglas en inglés como PCM's (phase change materials). El calor se almacena en los cambios de fase de sólido a un líquido. El termo almacenamiento de productos químicos es una técnica, que implica reacciones químicas. El calor sensible de almacenamiento es la forma más simple y barata de almacenamiento de energía aunque existen algunas ventajas de la energía de cambio de fase respecto al almacenamiento de almacenamiento de calor

sensible.[CITATION TA112 \l 5130]. Un esquema de un secador solar con almacenamiento de energía se muestra en la Figura 2.17.

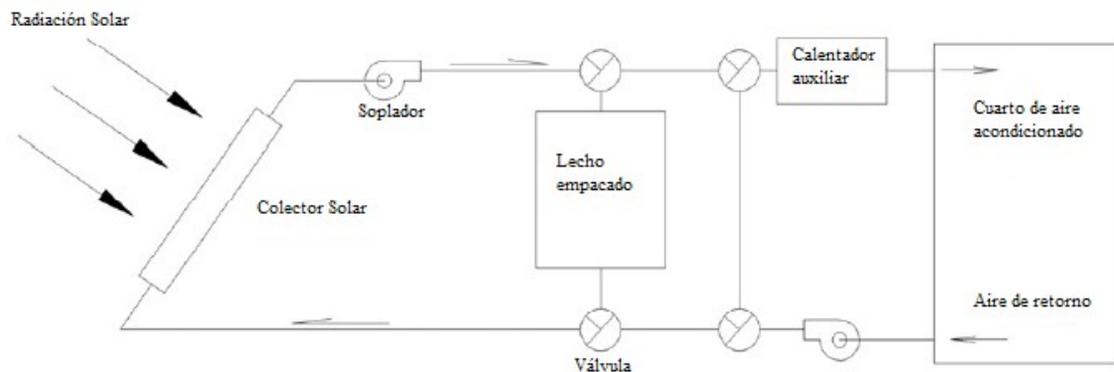


Figura 2.17. Ejemplo de Secador con lecho de almacenamiento de energía.[CITATION Wer \l 1033]



Figura 2.18. Materiales para el almacenamiento de calor con cambio de fase. (Mahmud, 2011)

Cuando la temperatura ambiente cae por debajo la temperatura de cambio de fase, los PCM se solidifican, liberando el calor almacenado. Los PCM puede almacenar de 5 a 14 veces más calor por unidad de volumen que los materiales convencionales de almacenamiento y también pueden ser más a largo plazo.[CITATION Mah11 \l 5130] Un ejemplo de materiales PCM se muestran en la Figura 2.18. Por lo general son sales hidratadas, parafinas, ácidos grasos, compuestos eutécticos orgánicos y no orgánicos.

La forma y el tamaño de los materiales son factores importantes que afectan al rendimiento del sistema y tienen que ser tenidos en cuenta para cualquier estudio de rendimiento. La fracción de vacío y el volumen del material de almacenamiento en el lecho empacado también deben ser considerados para el calor transferir y características de caída de presión.[CITATION Mah11 \l 5130].

El almacenamiento de energía térmica es una de las formas más eficientes de almacenar la energía solar para calentar el aire por medio de la energía obtenida del sol. El proceso de almacenamiento de energía puede reducir el descalce entre la oferta de energía y la demanda de energía. El calor sensible de almacenamiento es la forma más simple y barata de almacenamiento de energía aunque existen algunas ventajas de la energía de cambio de fase respecto al almacenamiento de almacenamiento de calor sensible.

Por ejemplo el rendimiento de un sistema con un lecho de roca se ve afectado por varios factores como el tamaño de la roca y la cama, el flujo de aire, la fracción de vacío, la conductividad térmica y las propiedades físicas de la roca. La capacidad de almacenamiento estándar de un calentador solar de aire es 0.25m^3 de piedras (incluyendo el espacio vacío) por unidad de área del colector. En la **Figura 2.19. Ejemplo de Secadores con almacenamiento de energía.**, se muestra un esquema de un secador solar con lecho de roca como almacenamiento de energía.

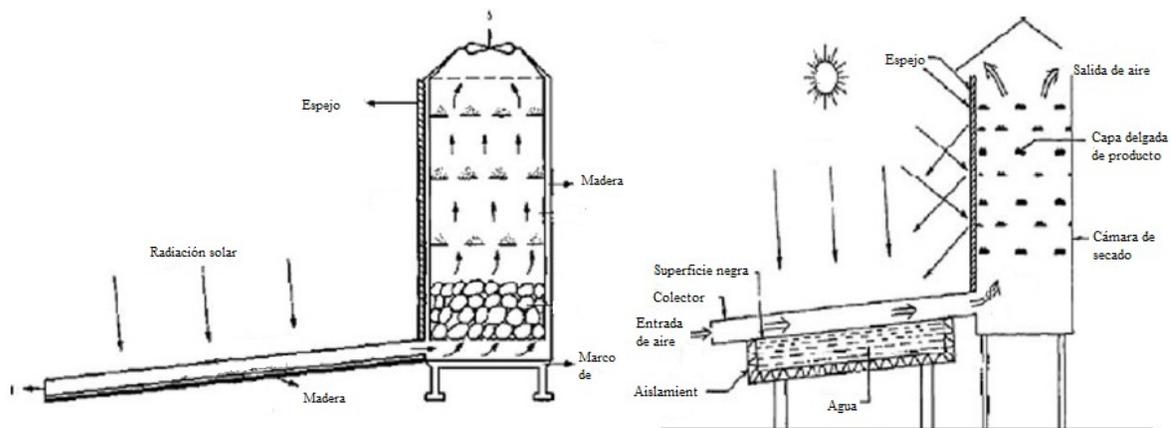


Figura 2.19. Ejemplo de Secadores con almacenamiento de energía.

Otra forma de almacenar energía es usar un volumen de agua como medio de almacenamiento de calor. Este sistema puede ser utilizado para proporcionar agua caliente en caso de que el sistema de secado no esté en funcionamiento. El calentador de agua por debajo del colector actuará como un material de almacenamiento para el secado durante horas fuera de la luz del sol. Este sistema se muestra de segundo en la Figura 2.19.

2.10 Ventilación

La ventilación puede definirse como la técnica de sustituir el aire ambiente interior de un recinto, el cual se considera indeseable por falta de temperatura adecuada, pureza o humedad, por otro que aporta una mejora. Usualmente se obtiene un flujo de aire utilizando elementos externos que consumen energía eléctrica, los más comunes para aplicaciones industriales son los sopladores y ventiladores axiales. En la Figura 2.20 se muestra, tanto un ventilador axial como un soplador.



Figura 2.20. Soplador y ventilador axial respectivamente. Fuente: (Grainger.com).

Ventiladores y sopladores de aire proporcionan un flujo de acuerdo a los requisitos de ventilación y de procesos industriales. Estos generan una presión para mover el aire (o gas) en contra de una resistencia causada por conductos, amortiguadores, u otros componentes en un sistema de ventilación. El rotor del ventilador recibe energía de un eje de rotación y lo transmite al aire.[CITATION Bur14 \l 5130]. La correcta selección de un ventilador o soplador depende de la tasa de flujo de volumen, presión, tipo de material manipulado, las limitaciones de espacio, y la eficiencia. Las eficiencias difieren de un diseño a otro y también por tipos.

2.11 Recepción de la radiación en Secadores Solares

Los secadores solares también pueden dividirse de acuerdo a la forma en que el producto a ser deshidratado recibe y la radiación solar.

2.11.1 Indirecta.

El colector y la cámara de secado están separados, como se muestra en la Figura 2.21 el aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar al producto a secar. Este secador es esencialmente un secador convectivo sobre el cual el sol actúa como fuente energética. Los secadores directos difieren de los indirectos en la transmisión de calor y la separación de vapor. Los secadores indirectos utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento. El calor se transfiere al fluido por conducción a través de una pared, casi siempre de naturaleza metálica.



Figura 2.21. Secador solar indirecto de circulación forzada. (Fuente. Julián Molina).

2.11.2 Directa

El colector y la cámara de secado, se juntan, es decir la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar, como se muestra en la Figura 2.22. En los secadores solares directos la radiación solar es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua. Esto se debe a que la presión de vapor en la superficie del producto crece por la absorción de radiación solar. Por lo tanto el gradiente de presiones de vapor entre producto y aire se hace mayor y se acelera el secado. La combinación de colector y cámara en una sola unidad puede ser más económica, especialmente en los secadores de menor tamaño. Este tipo de secadores es casi siempre con circulación de aire por convección natural. Esto hace que a veces el control del proceso sea poco confiable. Para algunos productos la acción de la

radiación solar puede destruir algún compuesto orgánico que lo compone y que tiene interés comercial. [CITATION Gam04 \l 5130].



Figura 2.22. Secador solar directo. (Montiel, 2004).

2.12 La eficiencia de secado.

La eficiencia térmica de secado y está definido según Maiti (2011) para un sistema de secado con colectores solares como "la razón de la energía utilizada para evaporar la humedad y la energía suministrada al colector"; la ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$n_s = \frac{D h_{fg}}{I_c A_c} \quad (3)$$

Dónde:

D:	Cantidad de humedad removida por tiempo,	kg/s
h_{fg} :	Calor latente de vaporización,	J/kg
I_c :	Radiación Solar,	W/m^2
A_c :	Área del colector solar	m^2
η_s :	Eficiencia de secado	$adim$

2.13 Colectores Solares.

El colector solar es un aparato de captación térmica muy usado para el calentamiento de fluidos. En otras palabras la función de un colector solar es la de transformar la radiación solar en energía térmica. Esta energía térmica se traduce en el incremento de la temperatura de un fluido, ya sea agua, aceite o

aire. Estos aparatos de captación solar no son muy sofisticados, el diseño más sencillo y más usado, es simplemente una caja de madera o metal, con un fondo de metal negro mate para absorber la radiación y una lámina de vidrio o plástico transparente para atrapar la radiación dentro del colector usando el efecto invernadero para atrapar el calor [CITATION Car061 \l 2058].

2.13.1 Experiencias previas con colectores solares contruidos con latas de aluminio.

Se documentan dos tipos de colectores solares con latas de aluminio:



Figura 2.23. Colector solar comercial (RA 240 Solar Max) hecho con latas de aluminio para calentar aire. Fuente (www.cansolarair.com).

1. Fabricado comercialmente, mismo que se muestra en la Figura 2.23. Este colector se construyó en Canadá y está diseñado para calentar un cuarto o una sala. Este colector tiene las entradas y salidas de aire en el fondo, lo que conlleva a una mayor caída e presión. La distribución de entrada y salida de aire es de esta forma, porque usualmente se lo adhiere a una pared de una casa adyacente al cuarto al que se quiere calentar, que concuerda con el ángulo de inclinación adecuado a las latitudes en las cuales esta Canadá. Cerca de 90 grados. Este colector está compuesto por un marco de metal, una cubierta transparente, aislante y como material de absorción, latas de aluminio pintadas de negro.

2. Similar pero construido con un marco de madera, este se muestra en la Figura 2.24. También utiliza como material de absorción de calor latas de aluminio, una cubierta transparente y poliestireno como material aislante. Cabe destacar que ambos tienen la misma área solar. La distribución de la entrada y salida de aire de este es a los lados, permitiendo una menor caída de presión.



Figura 2.24. Colector solar construido, con salidas de aire a los lados. (Mora, 2013)

2.13.2 Otros tipos de colectores solares.

Se han observado otros tipos de colectores solares a los construidos con latas de aluminio, aunque siempre manteniendo los componentes que los caracterizan. Un ejemplo es el colector de 5 puntos utilizado por la empresa CONA SOLAR de origen austriaco y la cual construye secadores solares.



Figura 2.25. Colector quintuple utilizado por la empresa CONA Solar. (Sandoval, 2013)

Estos colectores están compuestos de madera, internamente un intercambiador de calor quintuple a base de aluminio pintado con laca solar. Cubiertos por un vidrio solar temperado con 91% de

transparencia[CITATION Ern13 \l 5130]. Un ejemplo de los colectores usados por esta empresa se muestra en la Figura 2.25.

2.13.3 Eficiencia Térmica del Colector Solar.

El rendimiento de un colector solar, se logra evaluar por su eficiencia térmica que dicta qué también o mal esta funcionando el sistema de calentamiento. Según Ozgen y Esen (2009), la eficiencia térmica de un colector solar está definida como: la razón entre la energía recibida por el aire de secado y la radiación solar incidente en el colector solar. La siguiente ecuación representa matemáticamente esta definición:

$$n_t = \frac{m_a C_p (T_s - T_e)}{I_c A_c} \quad (4)$$

Donde:

m_a :	Flujo de aire de secado,	kg/s
C_p :	Calor específico del aire,	$J/kg * K$
T_e :	Temperatura de entrada del aire	$^{\circ}C$
T_s :	Temperatura de salida del aire	$^{\circ}C$
I_c :	Radiación Solar,	W/m^2
A_c :	Área del colector solar	m^2
n_t :	Eficiencia térmica	$adim$

Se desea secar la mayor cantidad de café en el menor tiempo posible, manteniendo la calidad y propiedades del mismo, las distintas variables de la ecuación 4 se pueden medir por medio de instrumentos o determinar de tablas a partir de mediciones.

2.14 Uso de la energía solar en agricultura.

El calor solar es atrapado con un colector solar construido con una capa de aluminio pintada de negro. El colector puede estar unido a la cámara de secado de manera que exista un espacio de aire entre el colector y la pared del secador.[CITATION GSV06 \l 5130] La energía absorbida por el colector calienta el aire que es ventilado en varios grados y es forzado a través del espacio donde está el producto. En Norte América, este tipo de secadores ha sido operado satisfactoriamente con contenido de humedad en granos de hasta 25%, hasta en días nublados.[CITATION Nas78 \l 5130]. La razón de esto es que de la energía solar que aproximadamente la mitad es luz visible y la mitad rayos infrarrojos, estos últimos pueden penetrar las nubes. En días de lluvia o nublados se puede suplementar con energía eléctrica. En países donde la cosecha es al inicio de la estación seca, el método más popular de secado es exponer la cosecha al sol. Los productos usualmente se dejan para que se sequen en el campo antes de ser cosechados.

Una forma efectiva de secado es el secado de capa fina. Esta forma de secado se logra esparciendo la cosecha en una capa sobre el suelo o en malla de alambre soportadas por encima del nivel del suelo. Estas cribas se construyen de manera que su lado más largo este de frente al viento y usualmente tienen techos para protegerlos de la lluvia.

Al momento de la cosecha, los cultivos tienen un alto contenido de humedad y no pueden ser almacenados inmediatamente debido a que se deteriorarían rápidamente, los cultivos agrícolas deben deshidratarse desde una humedad en base húmeda de entre 20 – 30 % hasta una humedad de 13 – 9 % en base húmeda.[CITATION Bha94 \l 5130].

CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NUEVO DISEÑO.

3.1 Punto de partida.

El sistema inicial cuenta con cámara de secado y colector solar, este trabaja por convección natural, por tanto sin ningún tipo de elemento eléctrico, este sistema utiliza la diferencia de densidad del aire como fuerza motriz para hacer circular el aire a través de las seis bandejas que se encuentran en la cámara de secado donde se ubica el producto que se quiere deshidratar. El plano se muestra en el Anexo 2.

Este secador se desarrolló como parte de un proyecto de investigación en conjunto la escuela de ingeniería química, el CELEQ y Coopetarrazú, para brindar una alternativa factible para pequeños productores de café sequen su producto. Este secador se probó y con algunos de los mismos instrumentos de medida se determinaron sus eficiencias, la máxima eficiencia térmica del colector, fue de 18% y la eficiencia de secado, para este sistema fue en promedio de 17,8%. [CITATION All13 \l 5130]. Además mediante el análisis de los resultados experimentales se determinó que el colector solar construido tiene una mejor eficiencia térmica que el colector canadiense.

La necesidad de modificar este secador solar surge debido a que si bien presenta varias ventajas respecto al secado en patios, la eficiencia de secado es muy baja, los tiempos para alcanzar la humedad requerida para el almacenamiento óptimo son altos, aproximadamente 5-7 días. Es por esto que se toma la iniciativa de construir un secador que pueda disminuir los tiempos de secado, manteniendo características de calidad y así poder poner el producto en el mercado en menos tiempo. Se toma como base este secador y los colectores solares con el fin de continuar con el uso de materiales de bajo costo y se cuenta con el recurso disponible.

El colector y la cámara de secado están contruidos totalmente en madera de pino, se sabe que la madera es un buen aislante, resistente a los elementos aunque tiene algunas desventajas. La descomposición es inevitable y como está construido a partir de láminas de plywood y no es muy rígido. Una fotografía del secador solar de partida se muestra en la Figura 3.1. Un plano más detallado del secador solar utilizado como punto de partida se muestra en el Anexo 2. Plano de secador de convección natural utilizado como punto de partida.



Figura 3.1. Secador solar de partida (Mora, 2013)

Las cámaras de secado son una estructura de madera plywood de pino con una base de tubo cuadrado de 2,54 cm x 2,54 cm en acero A36 y el techo está constituido por dos piezas de lámina de zinc cortado, sobre una base de madera esto para evitar que el secador y producto se humedezcan debido a las fuertes precipitaciones que hay en la zona. Las láminas de zinc se ubicaron de manera que cuando llueva con viento, las gotas de lluvia no puedan penetrar por la salida de aire del secador. Se cuenta con dos tipos distintos de colectores solares, uno construido en las instalaciones de Coopetarrazú y otro importado de Canadá y confeccionado por la empresa CanSolar.

Cuadro 3.1. Dimensiones del colector solar RA 240 Solar Max.

Equipo	Modelo	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Peso (kg)
Colector solar	RA 240 Solar	2.3	1.1	0.2 centro	35
	Max			0.1 lados	

El Cuadro 3.2 columna 2, muestra las características más relevantes del estado inicial o punto de partida del secador solar, en la columna 3 se muestran las características principales de los secadores solares de tiro forzado según varios autores. Un plano de los colectores solares se muestra en el Anexo 3.

Cuadro 3.2. Lista de componentes y características por tipo de secador.

Tipo de Secador Solar	Natural	Forzado
Fuerza Motriz	Diferencia densidad del aire	Elemento de ventilación eléctrico
Rango de Velocidades de aire	0-1 m/s	1-3 m/s
Elementos eléctricos	Ninguno	Controlador PID, Termocupla, Indicador On/Off
Elemento de calefacción de respaldo	Ninguno	Gas, Biomasa, Lecho Empacado, etc.
Eficiencia Térmica	< 20%	> 20%
Orientación del colector	10° Inclinación, dirección Sur (Para Costa Rica)	10° Inclinación, dirección Sur (Para Costa Rica)
Material para intercambio de calor	Latas de aluminio.	Aluminio, Cobre o usualmente algún un metal con alto coeficiente de transferencia de calor.
Distribución de entrada de aire	5 agujeros de 0,05m diámetro en el fondo de la cámara de secado	Distribución uniforme en de aire lateral o por la parte inferior de la cámara de secado.

3.2 Cambios y modificaciones.

Para transformar el secador solar de convección natural a uno de tiro forzado deben agregarse varios componentes al diseño, y modificar los parámetros de operación para cumplir con los requerimientos de este tipo de secadores. Un diagrama del secador solar modificado se muestra en el Anexo 1.

En los siguientes puntos se describen las modificaciones realizadas a secador original. En estos puntos se explican tanto los cambios físicos en el secador, como los cambios del sistema de secado, debido a la implementación un control automático. Los materiales electrónicos para realizar esta implementación se cotizaron y se muestra el detalle en el Anexo 6.

3.2.1 Ventilación.

Se parte de un secador de circulación natural, y se desea modificar a un secador de circulación forzada. La velocidad del aire a través del secador es un punto clave, y la principal diferencia entre ambos tipos de secadores es que el secador de circulación forzada tiene un elemento que aumenta significativamente el flujo de aire. Siendo este elemento casi siempre un ventilador de tipo axial o un soplador. Es por tanto imprescindible que se incorpore un mecanismo que pueda producir una corriente de aire a través del mismo. Mostrado en el Anexo 1.

Se espera que al incorporar este elemento en el diseño disminuya el tiempo de secado, se debe dimensionar bien el ventilador a utilizar, que rige de acuerdo al área solar disponible. Según expertos en la materia consultados por el autor, se deben utilizar una relación de 400 m³/h por cada 2 m² de área solar. El área de cada bandeja es de 0,75 m² y en cada una de estas se introdujeron 15 kg de café pergamino lavado.

Otros autores varían en sus tasas de flujo de aire, y lo expresan de diferente forma, un flujo de aire óptimo es esencial ya que un flujo bajo incrementa la temperatura del aire y un flujo muy alto puede disminuir la remoción de humedad. [CITATION MVR09 \l 5130] Considera óptimo 0,75 m³/min por cada m² de área en la bandeja.

Se decidió utilizar la relación brindada por el experto de la empresa CONA, ya que esta empresa cuenta vasta experiencia en secado de solar de varios productos y han implementado varios proyectos de secado solar en Centroamérica.

3.2.2 Distribución del aire.

Según se ha leído en la teoría de secado y se ha visto en los equipos industriales que se usan para secar café la distribución del aire es un factor clave para un secado de calidad [CITATION Pat02 \l 5130]. Se observa que el secador de convección natural tiene 5 agujeros de aproximadamente 0,05 m de diámetro en la parte inferior por donde entra el aire caliente debido a la diferencia de densidad, fuerza motriz principal para el flujo de aire.

Este arreglo resulta en una pobre y localizada distribución de aire en el volumen del secador, lo cual resulta en un secado heterogéneo, los granos cerca de estos agujeros se secan más rápido que los demás y tienen a sobre secarse.

Se plantea construir una cámara de presión, donde se distribuya uniformemente el aire a través de agujeros de 2 cm de diámetro. Esta cámara de presión debería estar aislada para evitar pérdidas de calor y estar sellada para que el aire caliente no se escape al ambiente.

3.2.3 Sistema de control automático.

Se desea utilizar un control automático de manera que se pueda controlar el proceso de secado. Por consiguiente se decidió utilizar un controlador tipo Encendido / Apagado. A continuación se describe el lazo de control en la Figura 3.2.

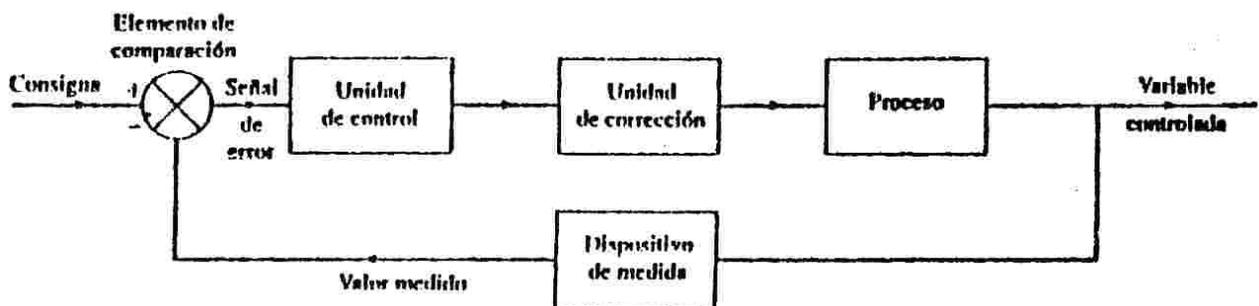


Figura 3.2 Lazo de control a utilizarse en el sistema de secador de granos.

La consigna son los límites de control superior e inferior. La unidad de control es el controlador digital TC3YT-B4R3. Esta unidad solo permite realizar control On-Off, existen controladores con variador de frecuencia y para regular el flujo de aire pero se dimitió esta opción debido al alto precio de la unidad.

La unidad de corrección es el ventilador axial. El dispositivo de medida es la termocupla tipo J. La variable manipulada es el flujo de aire que entra al secador. La variable controlada es la temperatura del aire que entra a la cámara de secado. Un diagrama del sistema se muestra en el Anexo 4 y la cotización de los materiales se encuentra en el Anexo 6.

3.2.3.1 Algoritmo de Control:

Es la secuencia lógica de acciones a seguir, para obtener un control adecuado del secado. La termocopla se encarga de monitorear el valor de la señal de salida del proceso o variable controlada, en nuestro caso es la temperatura y compararla con una de referencia (límites de control). Luego de realizar esta comparación se efectúa una medida correctiva en caso de que la medición este fuera de los límites de control previamente establecidos, si se encuentra dentro de los límites no se corrige la señal y el proceso continuo de la misma manera.

El detalle se explica por pasos a continuación:

1. Se dispone de Elemento Final de Control (EFC) que tiene solo 2 modos, encendido o apagado. En nuestro caso son dos ventiladores de 12 x 12 cm, y funcionan con corriente alterna a 115 V y 60 Hz.
2. Establece un rango de operación: De un Límite Inferior de Control (LIC) de la variable controlada en nuestro caso la temperatura y se establece en 30 °C hasta un Límite Superior de Control (LSC), el cual se establece en 75 °C.
3. Las reglas para este caso son:
 - Si el valor de la variable a controlar esta entre (LIC y LSC) mantener el estado actual del EFC (Encendido).
 - Si el valor de la variable a controlar está por encima del rango de operación (LSC) apagar el EFC. (Apagado)
 - Si el valor de la variable a controlar disminuye, por debajo del rango de operación (LIC) apagar el EFC. (Apagado)
4. La diferencia en tiempo entre las transiciones de un estado a otro del elemento final de control o (EFC) se conoce como histéresis y es muy necesario que exista para alargar la vida útil del EFC.

En nuestro caso podríamos empezar utilizando histéresis de 30 segundos. Este valor se le establece al controlador y puede ser modificado.

5. El elemento final de control, en nuestro caso son los 2 ventiladores que se encuentran entre la cámara de secado y el colector, se encenderá o apagará según la acción de este sobre la variable a controlar.

3.3 Dimensionamiento.

Como parte del proceso de modificación se deben dimensionar los cambios que se van a realizar en el secador; los elementos de ventilación y la distribución del aire, esto como parte de un proceso para lograr un adecuado secado.

3.3.1 Dimensionamiento de los ventiladores.

Utilizando como punto de partida la relación de $400 \text{ m}^3/\text{h}$ por cada 2 m^2 de área solar. Y el colector tiene $1,91 \text{ m}^2$ se encuentra que se requieren $382 \text{ m}^3/\text{h}$, para cumplir esta relación con el secador. Esta debería ser la capacidad del ventilador que se requiere para un secador de tiro forzado, dentro de los límites teóricos.

3.3.2 Dimensionamiento de la cámara de secado.

Se desea lograr una uniformidad en la distribución del aire por lo que se plantea bloquear los 5 agujeros en el fondo de la cámara de secado y realizar una cantidad de agujeros mayor manteniendo la misma área. Esto se logró trazando una cuadrícula de $10 \times 10 \text{ cm}$ en la base del secador, para alcanzar esta área 98 cm^2 se necesitarían 70 agujeros de $1,33 \text{ cm}$ de diámetro. El área de entrada del aire al secador se mantuvo igual al secador original, para evitar aumentar la caída de presión o disminuir demasiado la velocidad del aire a través del secador.

Esta cámara se muestra en el Anexo 1, en la parte inferior de la caja donde se coloca el producto a ser deshidratado.

CAPÍTULO 4. EJECUCION DE LAS MODIFICACIONES AL SECADOR SOLAR.

El primer paso fue la construcción de la cámara de presión bajo la torre de secado, utilizando lámina de 5 mm plywood el fondo de esta sirvió como parte superior de la cámara de presión, se agregaron los lados y fondo. La cámara fue acoplada con tornillos punta broca, recubierta con poliestireno de 5 cm de espesor para evitar las pérdidas de calor y se sellaron las juntas con silicón que pudiera mantener sus capacidades sellantes a las temperaturas de trabajo que pudiera alcanzar el aire dentro del secador.

La estructura está construida con madera, la manera práctica fue realizar 70 huecos con un taladro y una broca de 1,5 cm de diámetro para un área total de 123,7 cm². La Figura 4.1 muestra la cuadrícula y la cámara de secado en su etapa de construcción.



Figura 4.1. Cámara de secado en su etapa de construcción. Fuente: Julián Molina

La parte inferior por donde entra el aire se construyó en forma de trapecio, en el lado más pequeño se colocaron los ventiladores, ya que el área en este lado debía ser inferior porque todo el aire dentro de los colectores solares debe pasar por este punto. Se realizó una conexión eléctrica en paralelo de los dos ventiladores de $182 \text{ m}^3/\text{h}$, y se efectuaron 5 agujeros de 5 cm de diámetro en el lado de la succión de los elementos de ventilación. Estos elementos se fijaron con lámina de plywood ya que el poliestireno no presentada la suficiente resistencia mecánica para asegurar que no se movieran durante el traslado u operación del equipo. Esta etapa se muestra en la Figura 4.2. y el plano final en el Anexo 1.

Todas las conexiones eléctricas se realizaron con sumo cuidado, los ventiladores se fijaron por medio de tornillos a la lámina inferior, para evitar que se movieran durante su funcionamiento, se hermetizó el

comportamiento o cámara de secado para asegurarse que el aire no se escapara por algún lugar que no fueran los orificios de la cámara de secado.



Figura 4.2. Cámara de secado en su etapa de construcción. Fuente: Julián Molina

Luego se instaló la parte física del sistema de control automático dentro de una caja protectora plástica para aislar todos los elementos eléctricos de las inclemencias del tiempo como el viento, lluvia, polvo y otros. Constituido por un Controlador marca Autonics y modelo TC3YT programable. En una de las terminales se instaló una termocopla tipo J, la misma se colocó dentro de la cámara de presión, después de los ventiladores, para medir exactamente el aire que entra al secador desde el colector. El controlador tiene una pequeña pantalla donde se puede observar la temperatura en la punta de la termocopla en tiempo real, con precisión a la unidad más próxima en Celsius y un indicador de si la temperatura va subiendo o bajando.



Figura 4.3. Cámara de secado en su etapa de construcción. Fuente: Julián Molina

La conexión de 110 V al controlador también se instaló en la caja, cabe destacar el bajo consumo eléctrico de los ventiladores, un máximo de potencia de 60 W. Cercano a un bombillo de luz incandescente. A la salida de la señal del controlador se agregó un relé o amplificador electromagnético para permitir una operación confiable del accionamiento de los ventiladores debido a que la señal a la salida del controlador es muy baja 1 Amp. Este permite amplificar la señal de 1 a 3 Amp. Se agregó un interruptor de encendido y apagado con un elemento transparente de plástico para poder encender y apagar el sistema de control sin tener que abrir la caja donde está contenido el sistema de control.

El cableado, caja protectora, controlador, relé y demás elementos se muestran durante su instalación en la Figura 4.3. Otro componente del sistema es una luz verde instalada en la caja, la misma se enciende solamente cuando los ventiladores están trabajando, de esta forma se puede saber con certeza si los ventiladores están o no encendidos. Adicional a esto, se observó al momento de abrir la puerta del secador para realizar muestras de producto o agitar la capa de grano en las bandejas, el aire caliente se escapa, lo cual es una ineficiencia en el diseño ya que como se citó anteriormente el aire caliente tiene

una mayor capacidad de absorber humedad y por eso se quiere que este en contacto con los granos de café a secar. Principalmente por estas dos razones se realizaron unas pequeñas compuertas a un costado del secador y a nivel de cada una de las 6 bandejas, con espacio suficiente para poder introducir la mano y tomar una muestra del producto sí que se escape de la cámara de secado una cantidad significativa de aire. Estas se muestran en la Figura 4.4. Las compuertas se confeccionaron un poco más grandes que los agujeros para muestras y alrededor se colocó un empaque para que cerrar a presión y evitar pérdidas de aire caliente, siempre y cuando se mantuvieran cerradas.



Figura 4.4. Compuertas para la toma de muestras, abiertas y cerradas. Fuente: Julián Molina.

De hecho que se observó durante la prueba piloto, el gran cambio de temperatura que se registraba a la salida del secador cuando se abría la puerta, ya que el aire caliente fluía entonces por el camino de la menor resistencia y ráfagas de viento sustituían el aire caliente.

Este cambio fue registrado por las termocoplas tipo J y se observó que se recupera la temperatura, en unos 3 minutos aproximadamente, debido a los ventiladores se sustituyen el aire frío por el aire calentado en el colector con bastante rapidez.

Una lista resumen de las modificaciones y punto importantes en el sistema de secado se muestra a continuación:

- Confección una cámara de presión sellada y aislada en la parte inferior de la caja de bandejas. Figura 4.1
- Modificación de la distribución de entrada de aire caliente al producto, por agujeros más pequeños; 70 agujeros de 1,33 cm en lugar de 5 agujeros de 5 cm. Figura 4.1
- Instalación de 2 ventiladores de 182 m³/h de capacidad, en lugar de circulación natural. Figura 4.2
- Implementación de un sistema de control automático y medición de temperatura de aire caliente, para encendido, apagado y operación del equipo, en lugar de uno inexistente. Figura 4.3
- Instalación de 6 compuertas de muestreo de producto a un costado de la caja de bandejas. Figura 4.4
- La colocación e inclinación del colector solar fue la misma que en pruebas anteriores, viendo hacia el sur y aproximadamente 11°.
- El sistema de secado es tipo batch o por lotes.
- Se debe mover el producto en las bandejas en intervalos regulares, para evitar obtener un secado uniforme.
- No se modificó ningún elemento de los colectores solares, respecto a sus diseños originales.
- Se aislaron térmicamente los conductos de aire para evitar cualquier tipo de pérdida de calor.
- Fueron sellados físicamente con empaquetura de silicona las juntas de conductos de aire.

CAPÍTULO 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1 Metodología experimental.

Se define una metodología de experimentación que permita cuantificar y estudiar el desempeño de los secadores solares, la misma se detalla a continuación. En total se realizaron 3 pruebas idénticas, se cargó cada uno de los secadores, total 45 kg de café pergamino recién chancado, y se distribuyó 15 kg en cada bandeja para un total de 3 bandejas. Una en la parte inferior, a la mitad y en el compartimiento más alto. El café se pesó con una romana que se encontraba en el beneficio, esta se utiliza regularmente para pesar los sacos de café.

Conforme el café de las bandejas iba perdiendo humedad y se tomaron muestras representativas; 3 por día, a diferentes tiempos: mañana, medio día y tarde. Estas muestras se tomaban de cada una de las bandejas, se rotulaban y se las llevaba al laboratorio donde se les medía la humedad en base húmeda, con los equipos especializados para este fin. Una vez se obtenía un valor de humedad, las muestras se retornaban a cada una de las bandejas, de donde se obtuvieron.

Se realizaron tres pruebas de aproximadamente 4 días cada una, trabajando con ambos secadores simultáneamente, se bloquea la variable no controlable radiación solar. Se fija la cantidad de café en cada una de las bandejas, para que ambos estuvieran en las mismas condiciones y poder observar su desempeño de forma individual. Contamos con dos tipos de colectores solares, el importado desde Canadá, construido por la empresa CanSolar y el construido en las instalaciones de Coopetarrazú que se quieren evaluar.

El diseño de experimento que se aplicará se basa en la experimentación y observación. El procedimiento experimental consistirá en introducir una unidad experimental (cantidad específica de café pergamino recién chancado) en las cámaras de secado y poner a funcionar el sistema de control automático, durante su ejecución medirán diferentes variables de respuesta, hasta que los granos de café pergamino alcancen la humedad deseada, usualmente la empresa Copetarrazú termina el secado cuando la humedad del café

alcanza un 11 % en base húmeda, este valor se usara de referencia. Este es un valor seguro ya que la humedad es lo suficientemente baja para que se presente una actividad de descomposición muy baja, es un valor adecuado para eliminarle el pergamino y posterior tostado.

En la Figura 5.1 se muestra una fotografía del café a la salida de una chancadora, donde la humedad se encuentra en aproximadamente 50 %.

Una vez todo el café de una tanda alcance este valor se terminará la prueba. El aire caliente entra por la parte inferior, se espera que el café en las bandejas inferiores se seque primero. Cuando la primera bandeja alcance el valor de 11 % B.H. se extraerá de la cámara de secado y se sustituirá por la bandera que se encontraba encima y así sucesivamente hasta que todo el café dentro del secador llegue al valor deseado.

Se decidió utilizar esta metodología, ya que al tener varias pruebas se genera gran cantidad de información, se logra determinar cuáles son los factores de interés que más influyen en las variables de estudio. Si la variabilidad experimental es grande, se detectará la influencia del uso del factor (tipo de colector) cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación.

Otra razón por la cual se decidió utilizar esta metodología es que se logra controlar la variabilidad sistemática o planificada, ya que se mantienen para ambos sistemas las mismas condiciones experimentales en todo momento.

El diseño se realizó tratando de simplificar al máximo posible, el proceso de análisis de resultados posterior. De manera aleatoria se eligieron las unidades experimentales, que estaban disponibles y se las asigno a cada secador. Se determinan y especifican más adelante las medidas que permitirán cuantificar las variables de respuesta que se utilizaran. Se definió que se realizarán 3 pruebas con 3 determinaciones de humedad en base húmeda para el café y cada 30 min se tomará la radiación solar.

Esta metodología de diseño estudia cómo al variar, un factor en un proceso aumenta la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta; de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés. Las principales variables de estudio son la eficiencia térmica y

la eficiencia de secado las cuales se definieron anteriormente. Con la ayuda de gráficas, cuadros se muestra su comportamiento durante las pruebas, valores máximos, mínimos y promedios de variables de interés. Pictogramas y polígonos de frecuencias para comparar visualmente que sistema de secado presenta las mayores eficiencias.



Figura 5.1. Café a la salida de las máquinas de chancado. Fuente: Julián Molina

5.2 Equipo para la toma de datos y variables.

Para obtener valores de eficiencia de secado, mediante las cuales se evalúa el secador solar como un todo, es decir colector y cámara de secado en conjunto, se deben evaluar las siguientes variables de respuesta con los siguientes equipos:

- Humedad removida por unidad de tiempo; esta se logra cuantificar tomando muestras de las distintas bandejas donde se coloca el café por medio de las compuertas construidas para este fin y llevando una muestra del grano al laboratorio y con un medidor especial de humedad para granos de café se logra obtener el valor de humedad relativa de los granos. Se utilizaron dos medidores de humedad el Sinar Ap 6060 y el Gehaka G600i en la Figura 5.2 se muestran estos dos medidores de humedad respectivamente.



Figura 5.2. Medidores de humedad utilizados en las pruebas de determinación de Humedad base húmeda café pergamino y oro.

- La radiación solar, se obtiene por medio de un piranómetro apuntándolo en el mismo ángulo al que se encuentran las latas de aluminio del colector se obtiene una medición real. El piranómetro es un aparato que permite la medición de la radiación solar directa, esta es la que brinda la energía necesaria para el calentamiento del flujo de aire. Este aparato es un piranómetro TES-1333 Solar Power meter con rango de 0 a 2000 W/m² y capacidad para guardar hasta 99 mediciones. Se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5.3. Piranómetro TES 1333 Solar Power meter.

Las variables fijas son:

- Área del colector solar; esta es solamente el área comprendida por las latas de aluminio, y esta no comprende una parte superior e inferior del colector que no contiene latas.

- El calor latente de vaporización se tomó como una variable fija, ya que este no varía significativamente con la temperatura y se supone que la presión atmosférica se mantiene constante.

Para obtener la medición de eficiencia térmica mediante la cual se evalúa al colector solar se deben medir las siguientes variables de respuesta:

- Velocidad del aire: Esta se midió por medio de un termoanemómetro con registrador de datos, marca: Extech, modelo: SDL350 el cual se colocó en a la salida de la torre de secado por donde salía todo el aire proveniente del colector, este se puede programar para guardar las mediciones de velocidad del aire directamente en una tarjeta SD, en ciertos intervalos de tiempo programables. Se muestra en la Figura 5.4.



Figura 5.4. Termoanemómetro Extech SDL350 de hilo caliente con datalogger.

- Temperaturas y humedades relativas del aire de entrada y salida; se midieron con datalogger Marca: Lascar. Modelo: EL-USB-2-LCD que se conectan por medio de un puerto USB una computadora para descargar los datos, y por medio de un software el dispositivo se puede programar para realizar una medición en un rango desde una vez cada 10 segundos, a una vez cada 12 horas. Este modelo de medidor se muestra en la Figura 5.5.



Figura 5.5. Medidor de temperatura y humedad relativa. Lascar EL-USB-2-LCD.

- Masa de café en cada una de las bandejas se midió con una romana antes y después de cada una de las pruebas, por diferencia se encontró la cantidad de humedad total removida. En la Figura 5.6 se presenta una fotografía de la romana utilizada para pesar el café.



Figura 5.6. Romana utilizada para pesar la masa de café utilizada en cada una de las bandejas durante las pruebas de secado. Fuente Julián Molina.

CAPITULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 Radiación y temperatura.

En la Figura 6.1 se observa un comportamiento típico para un día de secado despejado, donde no existió influencia de nubes grandes o lluvia que eviten que la radiación alcance el colector solar. Los datos de temperatura del aire son recopilados justo a la entrada de la cámara de secado, es decir a la salida del colector solar.

De esta figura se puede extraer información importante y destacar aspectos para considerar este tipo de secadores como una opción para el secado de granos de café. La temperatura máxima alcanzada para el colector construido en Canadá fue de 64,5 °C y el secado “tico” 63,0 °C este valor es apropiado para el secado de estos granos, ya que no permite que los granos se deshidraten demasiado rápido como para perder las propiedades que los caracterizan, calidad y valor. Ambos máximos se alcanzaron cerca de a las 12:30 p.m. cuando los rayos solares golpean directamente con un ángulo de 0 grados el colector solar, esta prueba que se realizó el 19/01/2014. La radiación solar máxima registrada para ese día fue de 1300 W/m² a las 12:00 m.d.

La Figura 6.1 describe el comportamiento típico de la radiación recibida en San Marcos durante un día despejado, donde al inicio de la mañana la radiación es leve y va alcanzando su máximo cuando se llega a la mitad del día, después de este punto la radiación recibida empieza a disminuir paulatinamente hasta que este valor llega a 0 W/m² al final del día. Se observa también que la radiación disminuye más rápidamente después de la mitad del día que la temperatura a la salida de los calentadores, esto probablemente se debe a que en esos se almacena calor. En el café y en los materiales de los cuales está construido el calentador, paredes, techo y fondo. El material aislante de cada uno de los secadores evita que la pérdida de calor se dé aceleradamente.

Se observa una leve diferencia de temperaturas entre los secadores, a pesar de que ambos tienen una misma pendiente de descenso de temperatura, el colector canadiense mantiene mejor aislado el calor debido al material del cual está construido.

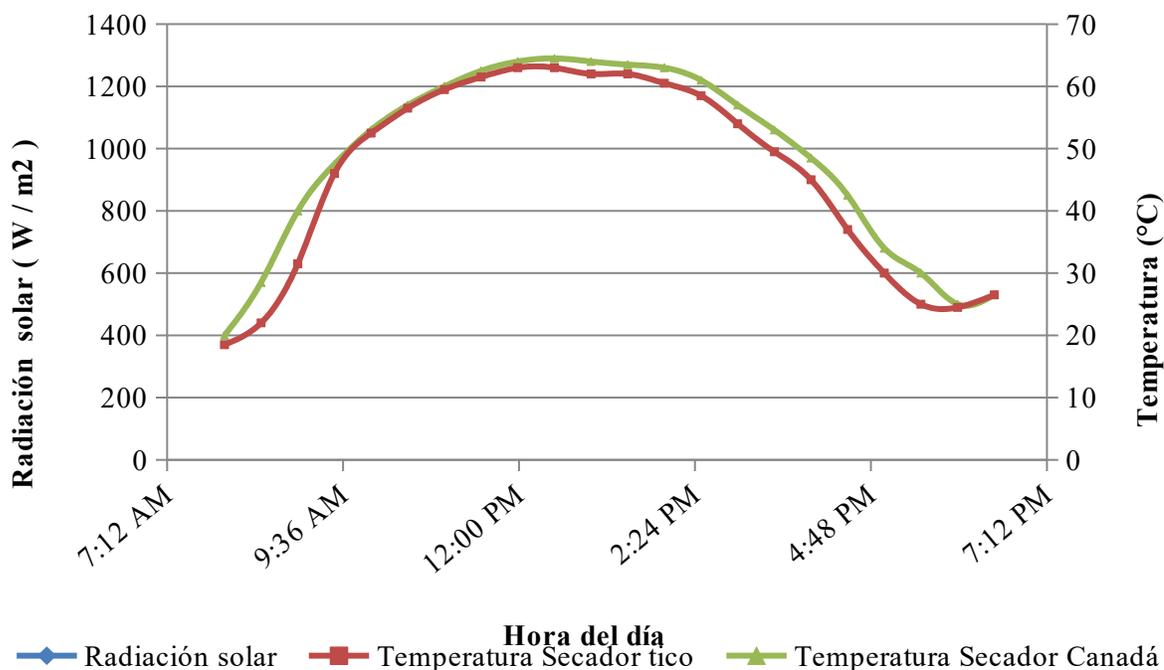


Figura 6.1. Temperatura de entrada en secadores y radicación solar por hora del día.19/01/2014

6.2 Velocidad del aire.

Como se menciona en el marco teórico esta variable es de gran importancia para el secado de los granos de café, ya que es el aire caliente que extrae la humedad de los mismos, a continuación se presentan una serie de gráficos que muestran el comportamiento durante algunas de las pruebas realizadas por el experimentador, estos datos se tomaron con un anemómetro de hilo caliente y se promedió la velocidad respecto a la medición de varios puntos en el área de salida del aire caliente.

Se observa como la trayectoria de los conductos de aire tiene una marcada influencia en la velocidad de salida del aire debido a la caída de presión.

Se puede observar en la Figura 6.2 la diferencia entre las velocidades del aire a la salida de un secador a otro, durante la prueba el día 19 de enero del 2014.

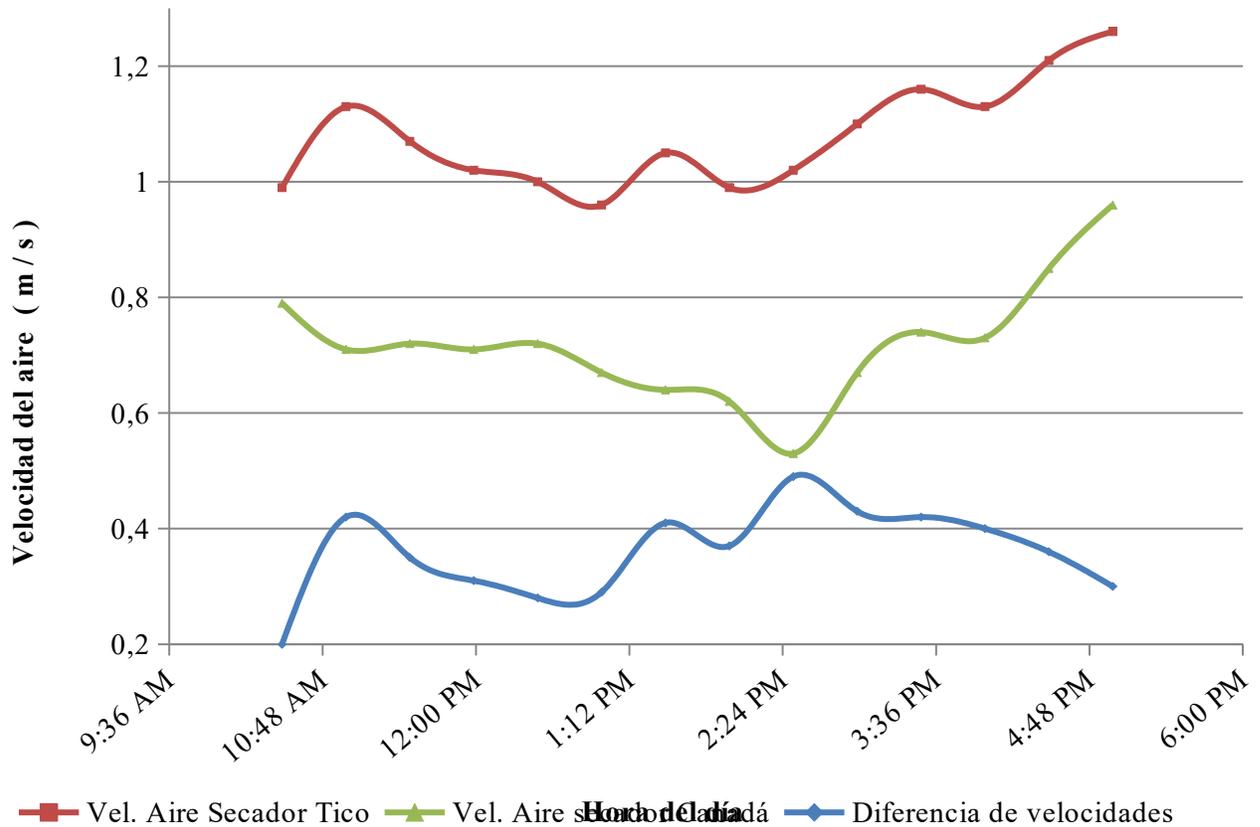


Figura 6.2. Velocidad del aire de salida de ambos secadores y diferencia de velocidades. Para el 19 de enero del 2014.

Se nota durante la ejecución de las pruebas que la mayoría del tiempo el secador tico presentaba una mayor velocidad del aire a la salida que el canadiense, esto debido a que la caída de presión en el segundo secador es mayor, por la resistencia del fluido caliente al flujo a través de los accesorios por donde se conduce. Los datos de velocidad del aire para el secador tico usualmente sobrepasan 1 m/s mientras que los del secador canadiense están en promedio por debajo de este valor. Una medición in situ realizada el 14 de febrero del 2014 mientras se realizaba la experimentación a las 9:47 a.m. se observa en la Figura 6.3 para el secador tico y canadiense respectivamente. Cabe destacar que las cámaras de secado de ambos secadores son idénticas, lo único que cambia de un secador a otro es el colector solar. En este caso se observa como la medición del secador tico marca 1,18 m/s y 33,2 °C y el secador canadiense 0,79 m/s y 30,9 °C.



Figura 6.3. Fotografías de termooanemómetros de hilo caliente durante la realización de una prueba de secado de café, para el secador tico y canadiense respectivamente.

Durante la realización de las corridas experimentales, se observó que los ventiladores se encendían a eso de las 9:00 a.m., ya que a esta hora usualmente el nivel de radiación era suficiente para calentar el secador hasta el punto donde la lógica del controlador indicaba que empezaran a funcionar, 30 °C. En la Figura 6.4 se observa la forma como se colocaron los termooanemómetros de hilo para la medición de velocidad del aire de salida y verificación de temperatura de salida del aire.

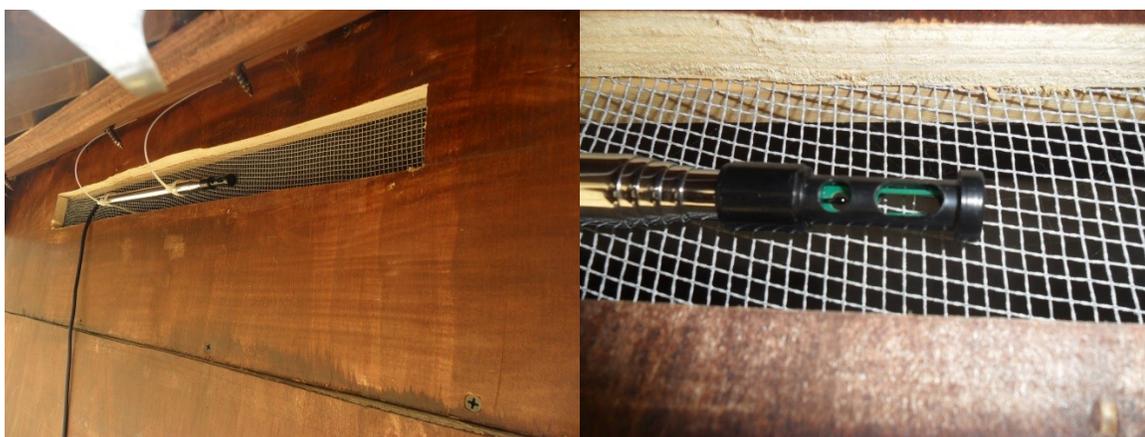


Figura 6.4. Fotografías durante la Medición de velocidad del aire y temperatura a la salida de la cámara de secado.

Lo esperado de acuerdo a las especificaciones seguidas era un flujo de $0,101 \text{ m}^3/\text{s}$ a la salida para cumplir con los parámetros de diseño. A continuación se presenta una gráfica de flujo volumétrico típica para ambos sistemas, en la Figura 6.5 el flujo volumétrico se encontró promediando la velocidad de

salida de aire en varios puntos y multiplicando por el área de salida, que corresponde a 0,0375 m². Este cálculo se realizó con la ecuación 5.

$$F_v = v_s * A_s \quad (5)$$

Dónde:

F_v = flujo aire de salida (m³/s)

v_s = velocidad de salida del aire (m/s)

A_s = Área de salida del secador solar (m²)

Esta diferencia de flujos era sensible al tacto, es decir al colocar la mano sobre la salida de ambos secadores se siente la diferencia por la presión que ejerce el aire sobre la mano. En la Figura 6.5 se muestra el comportamiento típico que se mostró en las corridas realizadas. La velocidad del aire para ambos presenta un comportamiento regular y varía poco, las variaciones presentes se pueden deber principalmente a que el termomanómetro es muy sensible y aunque este se encontraba protegido, las rafas de viento intermitentes pudieron afectar las mediciones.

Puede notarse que el flujo a la salida de ambos secadores es apreciablemente menor al deseado, esto se debe a las caídas de presión y resistencia al flujo del fluido dentro del secador. Aunque los ventiladores están para la capacidad deseada, fue difícil pronosticar la caída de presión en el secador.

El café sobre las bandejas presenta un impedimento al paso del aire y además el diseño por sí mismo del secador presenta diferentes caídas de presión. La principal es la cámara de presión en la parte inferior del secador. La diferencia más notable entre ambos secadores son los codos a la salida del secador canadiense, ausentes en el secador tico y son los causantes de la diferencia, ya que los demás componentes son prácticamente idénticos.

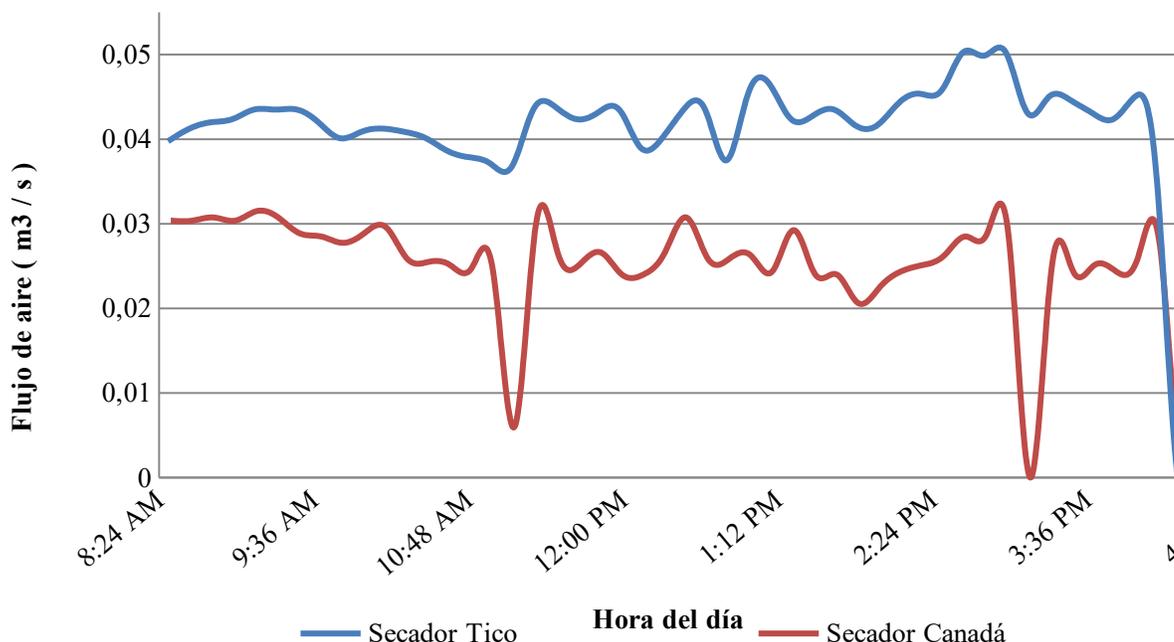


Figura 6.5. Gráfica de Flujo de aire a la salida de los secadores solares en m³/s durante la corrida el 07 de febrero del 2014.

6.3 Pérdida de Humedad.

El flujo de aire que pasa entre los granos de café en las bandejas absorbe humedad de los mismos, conforme se desarrolla el proceso los granos van perdiendo humedad a una velocidad variable. Inicialmente se pierde la humedad que se encuentra en la superficie del grano y una vez se ha removido esta humedad, se empieza a evaporar el tipo de humedad conocida como humedad ligada, más difícil de remover.

6.3.1 Humedad del aire.

En la Figura 6.6 se observa el porcentaje de humedad relativa del aire que entra en la cámara de secado, este aire sale del colector solar y es forzado dentro de la cámara de presión del secador solar, esta cámara permite que el flujo de aire seco sea uniforme en la cama de granos dispuesta sobre las bandejas, lo que permite que el grano se deshidrate más apropiadamente. La temperatura del aire está dentro de los límites que recomiendan diversos autores respecto a este tema. Durante los ensayos y al observar el producto final se demuestra congruencia con la teoría. Durante las primeras horas de la mañana cuando

el sol no incide directamente el intercambio calórico es menor, hay menos energía disponible para calentar el aire, la diferencia más grande se observa cerca del mediodía y es en este momento cuando se evapora la mayor cantidad de humedad de los granos. Al finalizar el día la radiación va disminuyendo y de la misma manera lo hace la diferencia de humedad, el aire caliente tiene un potencial más alto de extraer la humedad de los granos por eso en horas cuando la radiación es mayor y el aire está más caliente, la diferencia de humedades del aire en el secador es más grande.

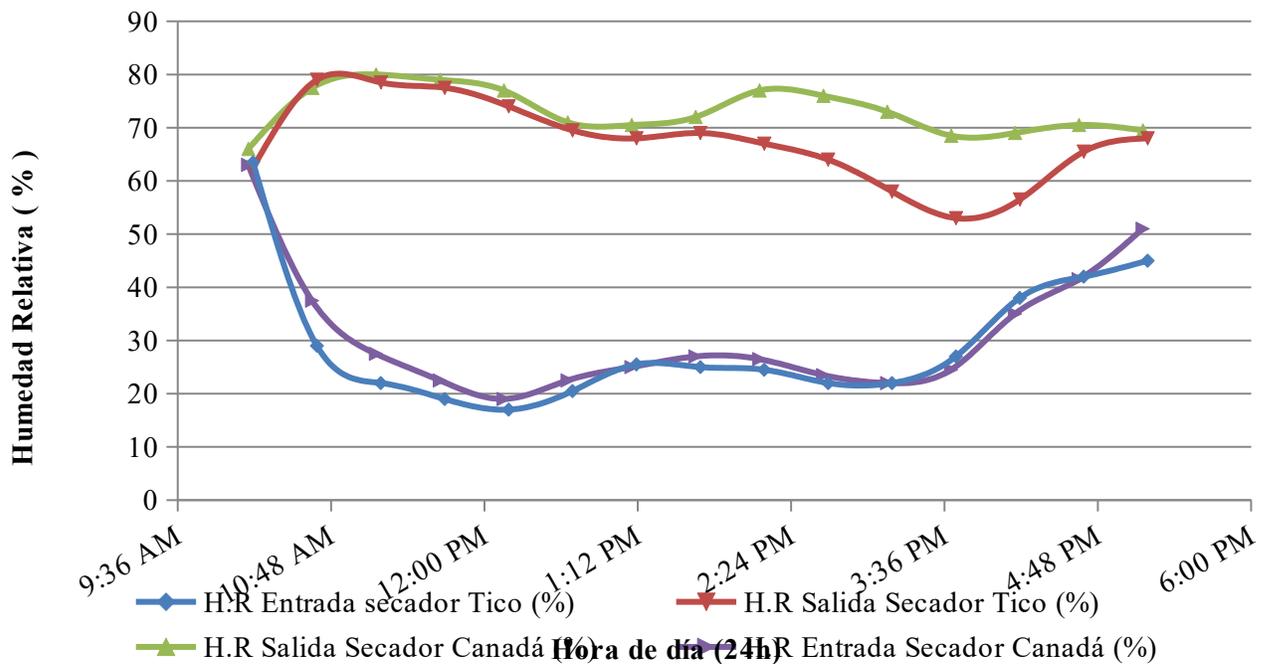


Figura 6.6. Gráfica de humedades relativas de entrada y salida del secador tico y canadiense durante el 5 de febrero del 2014.

La diferencia es apreciable en ambos secadores a la entrada la humedad es baja lo que implica que ha adquirido una capacidad importante para absorber la humedad, vemos como el comportamiento es prácticamente idéntico para ambos secadores. El aire con humedad baja absorbe la humedad de los granos de café y a la salida del secado la humedad relativa del aire es mucho más alta.

La temperatura del aire tiene un comportamiento inverso al de la humedad, como podemos observar en la Figura 6.7 la temperatura de entrada es alta y varía de acuerdo a la radiación solar que incide sobre el área de latas, cuando el aire caliente entra en contacto con los granos este absorbe humedad lo cual hace

disminuir la temperatura de salida del aire. El cambio de fase que ocurre, la evaporación del agua sobre los granos implica un intercambio de calor importante que disminuye la temperatura del aire.

Tanto el comportamiento de la humedad como el de la temperatura son normales en el proceso de secado. En las anotaciones de campo durante esta prueba se menciona explícitamente que a eso de las 13 horas la radiación solar empezó a ser intermitente lo refleja la disminución de temperatura cerca de ese punto.

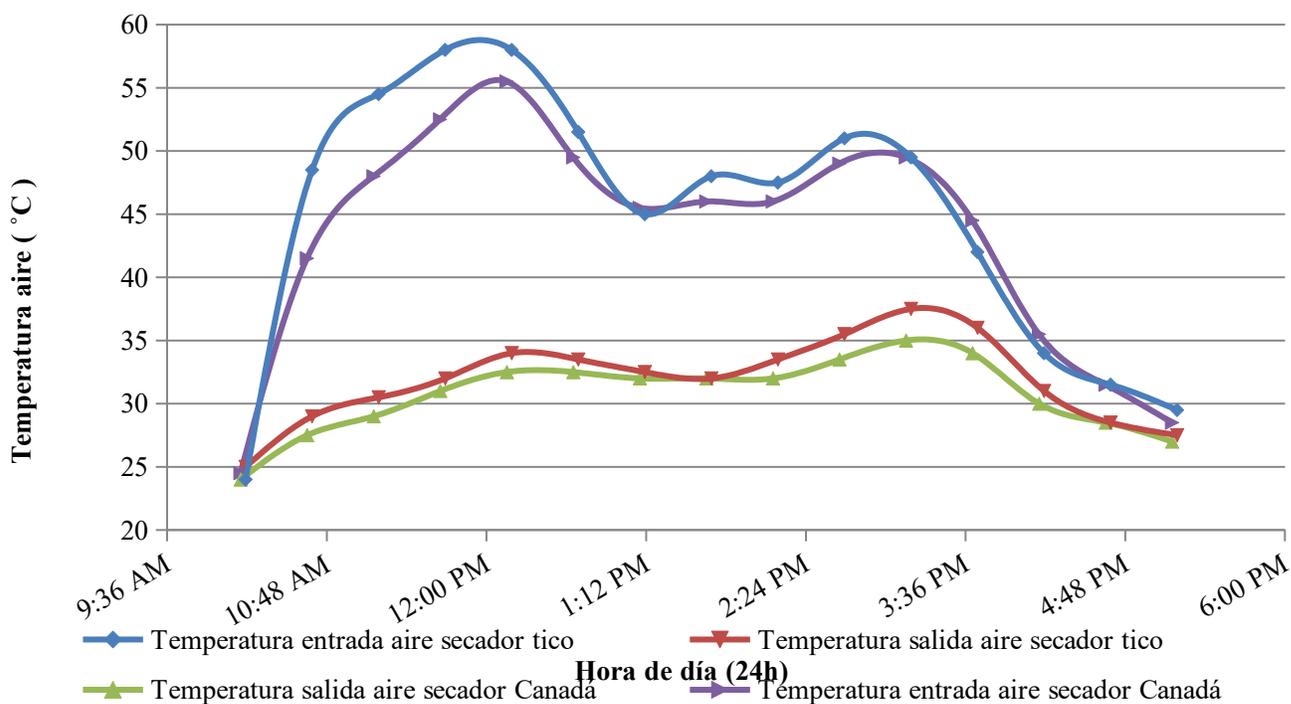


Figura 6.7. Temperaturas de entrada y salida del secador tico y Canadiense durante la prueba realizada el 05 de febrero del 2014.

6.3.2 Perdida de humedad por bandeja.

Como es de esperarse las bandejas más cercanas a la entrada del aire caliente perdían humedad más rápido que las cercanas a la salida, ya que cuando el aire caliente entra a la cámara de secado, choca inicialmente con la primer bandeja donde se transfiere humedad de los granos al aire, cuando este aire llega a la segunda bandeja, su capacidad de absorber humedad es menor que cuando ingreso, debido a que ya absorbió humedad y su capacidad de retener agua disminuye, así de esta misma forma con la bandeja #3. En la Figura 6.8 bandeja 1 se observa como la pendiente del día 1 de la prueba es mucho

más empinada que las de las otras dos figuras, para la bandeja 1 y el primer día de secado la humedad disminuye desde 50% B.H hasta 19,7% y 21,3%, para el secador tico y canadiense respectivamente, también es importante resaltar que al día 3 de la prueba la humedad en el mismo orden la bandeja 1 alcanzo 7,8 % y 8,1 %.

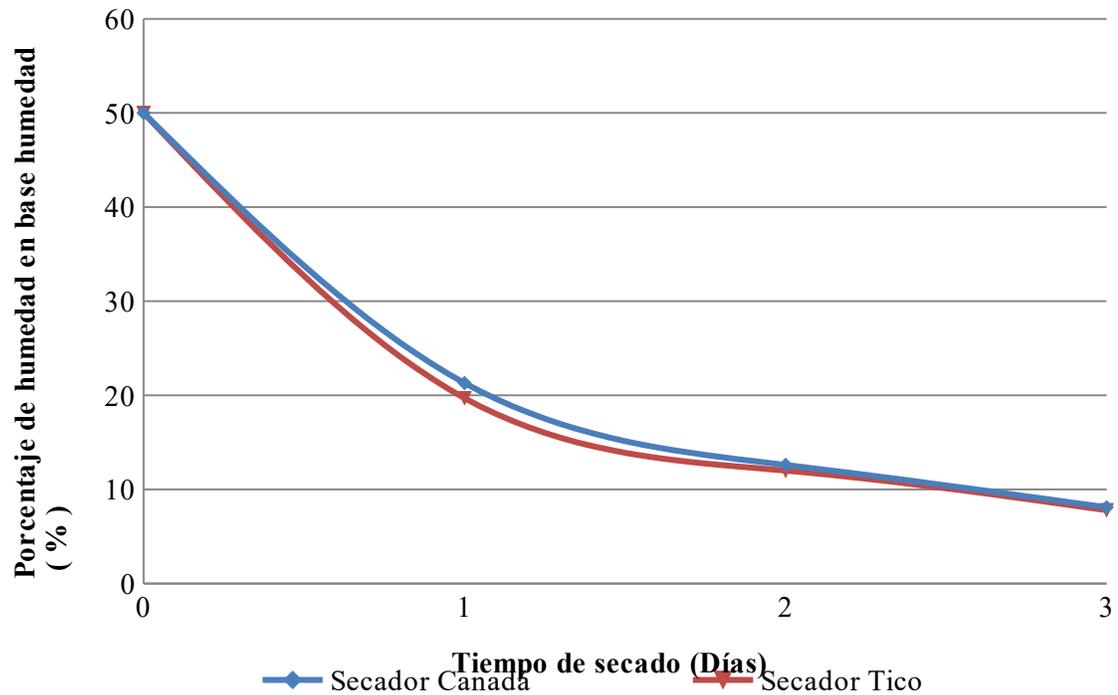


Figura 6.8. Humedad en granos % B.H. en el secador, para la bandeja 1, prueba piloto.

Las bandejas 2 y 3 presentaron para el primer día de secado una disminución muy parecida de aproximadamente 20 % en cada una de las bandejas, en la bandeja 2 se extrajo más humedad de los granos en cada uno de los secadores que en la bandeja 3. Se observa que estas pequeñas diferencias entre bandejas, se acumulan al final de los 3 días de secado. Se alcanzaron humedades B.H. de 15,5 % y 17,1 % en la bandeja 2 y 18,4 % y 20,5 % para la bandeja 3 presentando estos datos anteriores en el orden de los secadores tico y canadiense.

Esto se puede observar en las Figuras 6.9 y Figura 6.10 para la prueba piloto. Estas tendencias se cumplieron también para las otras pruebas, de las corridas 1 y 2.

Se puede observar como en todas las gráficas la extracción de humedad disminuye respecto al tiempo, conforme los granos van perdiendo humedad la capa que rodea el grano de café llamada pergamino se va separando del grano conocido como oro, esto hace que se forme una región de aire entre la capa del pergamino y el grano oro, lo cual se cree dificulta aún más la transferencia de calor al grano oro, del cual se quiere extraer la humedad, ya que es ahí donde se encuentra esta y no en el pergamino.

Existen métodos empíricos para determinar cualitativamente cuando el café se encuentra en su punto óptimo de humedad, esto se logra mediante el método de observación y apretando los granos de café entre las manos para eliminar la capa de pergamino y exponer el grano oro este se puede observar y probar, con experiencia suficiente se comprobó que se puede determinar aceptablemente cuando se ha alcanzado un punto de humedad adecuado. Aunque no exacto, si no se cuenta con un laboratorio y equipo especializado, se puede realizar de esta forma.

Otra forma de determinación empírica es removiendo el pergamino del grano oro, e introducirlo en la boca y morderlo con los incisivos, ya que conforme más seco está el grano, más duro se pone.

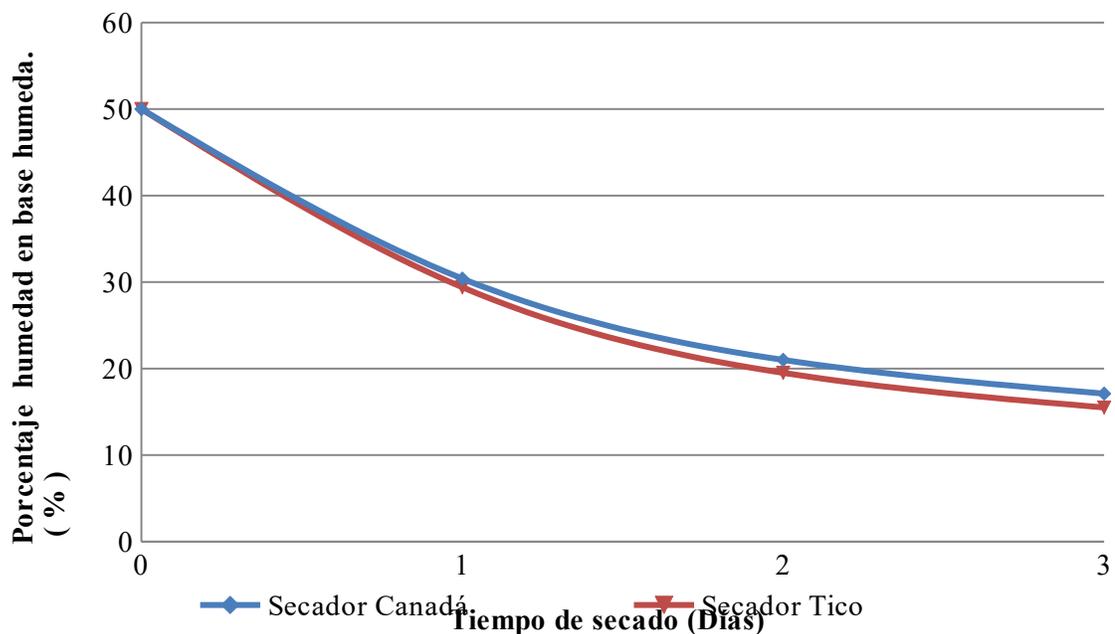


Figura 6.9. Humedad en granos % B.H. en el secador, para la bandeja 2, prueba piloto.

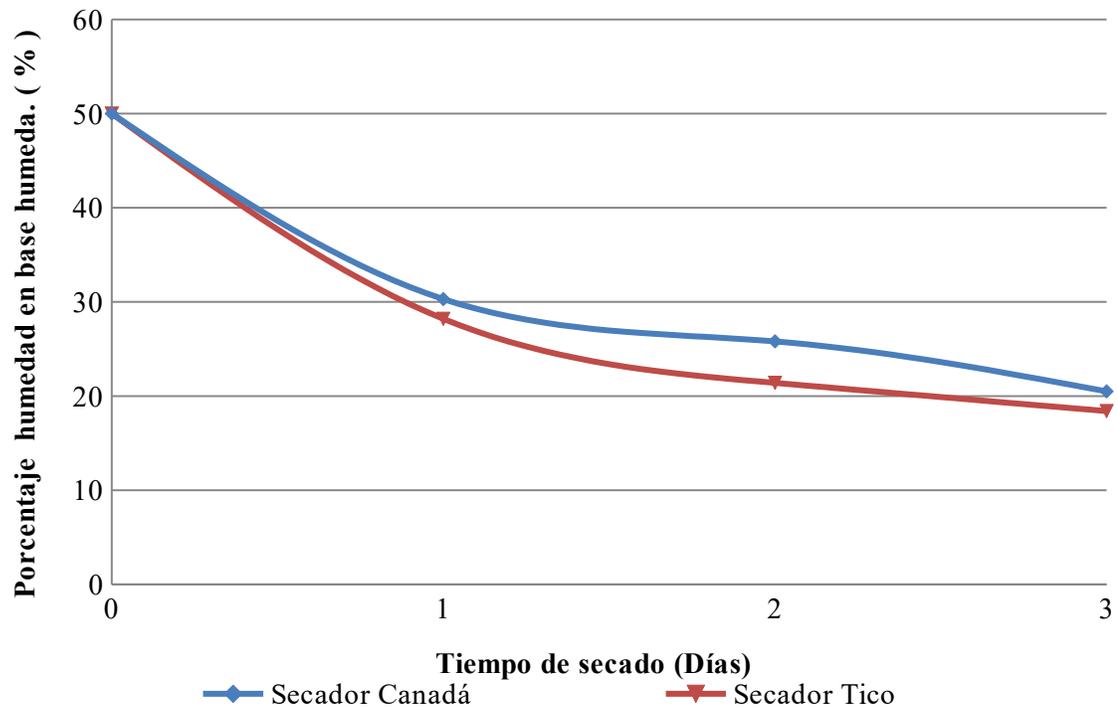


Figura 6.10. Humedad en granos % B.H. en el secador, para la bandeja 3, prueba piloto.

En las Figuras 6.11 y 6.12 se observa la disminución de humedad en los granos de café para la corrida 1 y 2 respectivamente. Se puede observar en ambas corridas un comportamiento muy similar, donde en el día uno de secado se observa una pendiente más vertical que en el resto de los días. Esto se debe a que la humedad que se remueve inicialmente es la que se encuentra en la superficie exterior del grano y también humedad la cual se transporta del interior del grano a la superficie. Esto a una velocidad en la cual se sustituye simultáneamente la humedad que se elimina de la superficie, por humedad que proviene desde dentro del grano. Esta velocidad de secado se considera constante.

Para los siguientes días de secado, se podría deducir que la humedad que se está eliminando es la humedad ligada, ya que se observa en las gráficas como la pendiente de la velocidad de secado se vuelve más horizontal y la velocidad de difusión de la humedad del interior del grano al exterior del mismo se vuelve menor. Se observa conforme avanza el tiempo que la velocidad de secado decrece. En la Figura 6.12 se observa que el secador tico removió más humedad en el mismo periodo que el secador canadiense.

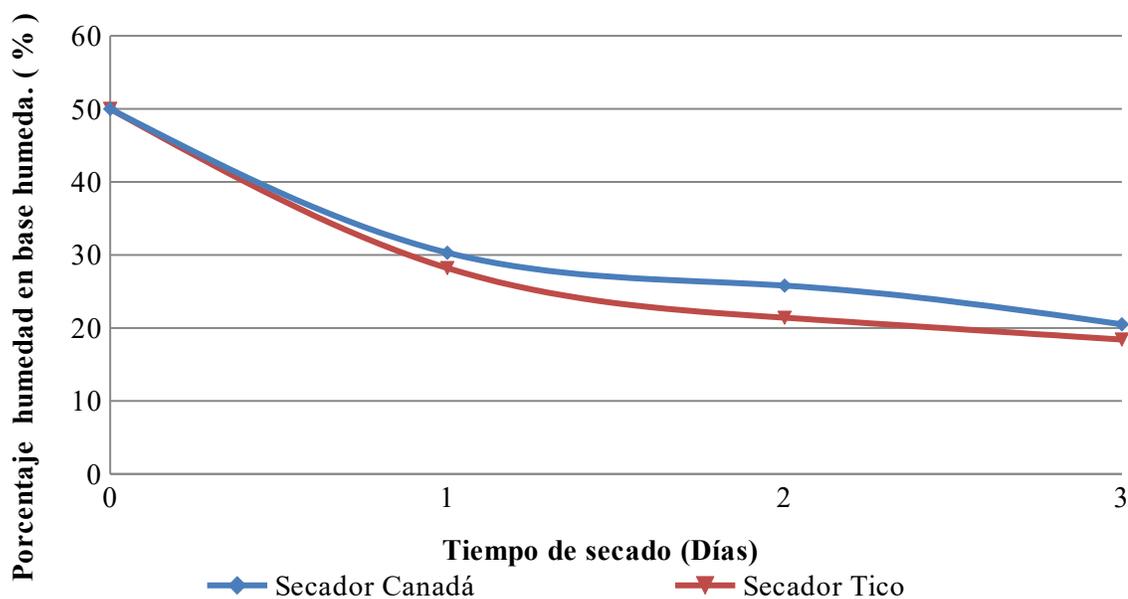


Figura 6.11. Gráfica de Humedad en granos en % B.H. en el secador, para la corrida 1.

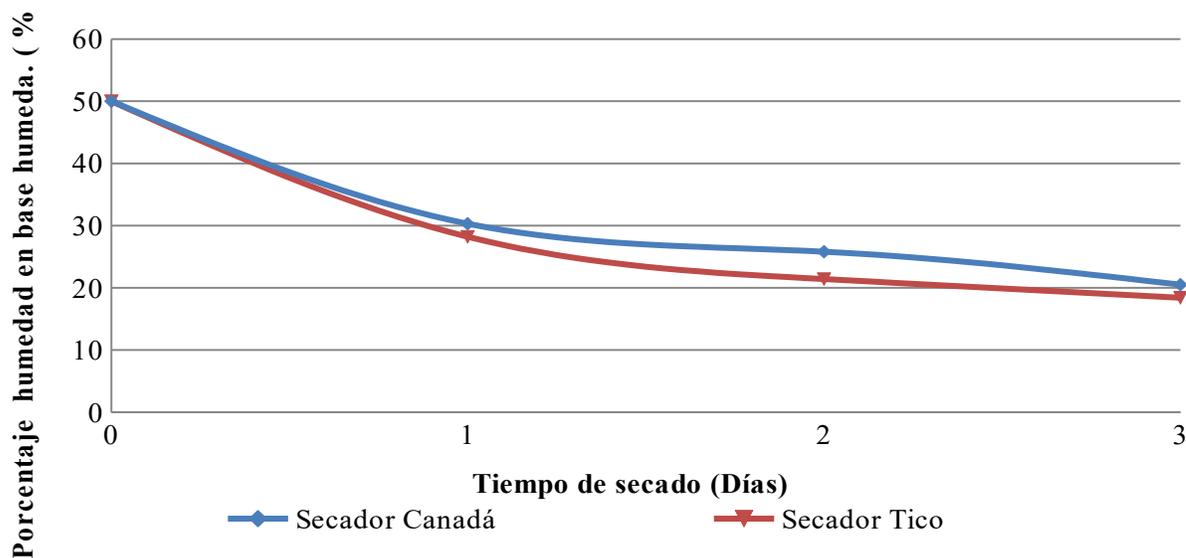


Figura 6.12. Gráfica de Humedad en granos en % B.H. en el secador, para la corrida 2.

Para realizar comparaciones entre distintos secadores solares se utiliza la eficiencia de secado, relación matemática expresada con la ecuación 3, donde se evaluará la remoción de humedad por unidad de tiempo y relaciona área solar del secador y la radiación solar recibida en ese tiempo. Para nuestros secadores la variable de radiación solar es la misma, ya que las pruebas se desarrollaron simultáneamente, el área solar se mantiene constante y es la misma para ambos secadores.

6.3.3 Relación entre café pergamino y café oro.

Parte del proceso de secado consiste en encontrar el valor deseado de humedad del café oro para que luego pueda ser tostado adecuadamente, si la humedad del café oro es muy baja o muy alta la calidad final después del tostado no sería la mejor. Durante los ensayos se determinó la relación que existe entre el café pergamino y el café oro, el experimento consistió en tomar la humedad del café pergamino y cuando se creía que estaba en su punto pelarlo y después medir la humedad del café oro, a partir de estos datos se generó una correlación, representada por la ecuación 6 y la gráfica aparece en la Figura 6.13.

$$W_{oro} = 0,1315 W_{Per}^2 - 0,9731 W_{Per} + 9,9082 W_{Per} \quad (6)$$

Dónde:

W_{oro} = Humedad del café oro (%)

W_{Per} = Humedad del café oro (%)

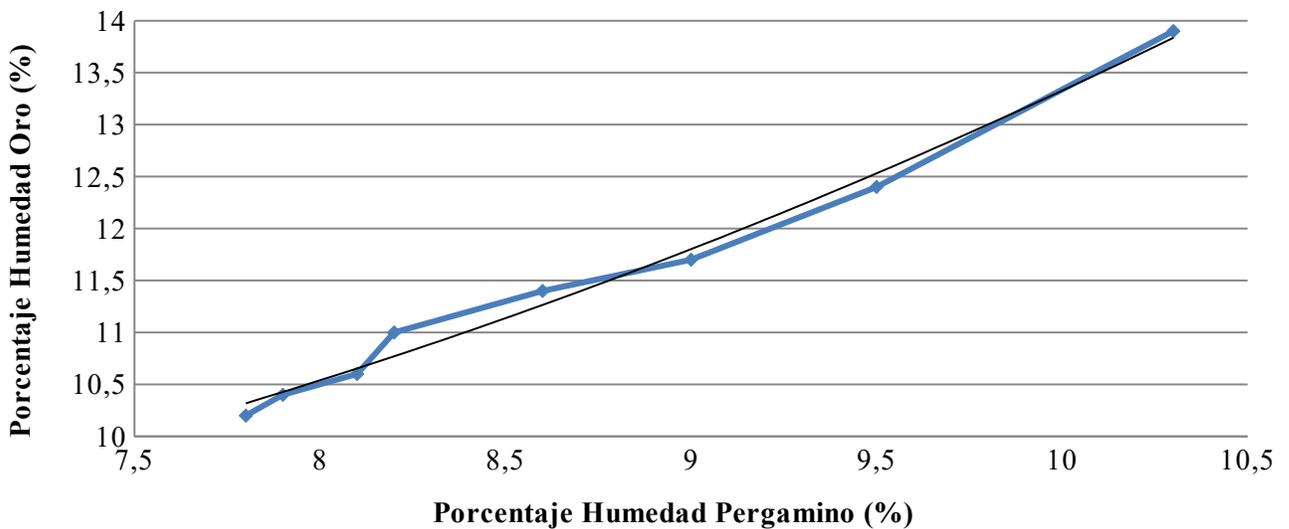


Figura 6.13. Gráfica de Humedad pergamino vs. Humedad oro.

El valor deseado de humedad en base húmeda para el café oro es entre 10% y 13% de acuerdo a la ecuación 6 del gráfico con un coeficiente de correlación de 0,9886 el rango de humedad en base húmeda de café pergamino es entre 7,49 % y 9,80 %.

6.4 Eficiencia de secado.

Para relacionar los datos, se determinó la eficiencia de secado para cada día del proceso. Esta se determina mediante la ecuación 3. Debido a la naturaleza del proceso de secado, se observa que los valores más altos se dan el primer día de cada una de las corridas realizadas por ejemplo para el secador solar tico en el día 1 para dos corridas idénticas los valores de eficiencia de secado fueron 61% y 77%. Removiendo humedad a una velocidad de $4,88 \times 10^{-4}$ kg/s y $4,89 \times 10^{-4}$ kg/s respectivamente. Es interesante notar que para estas corridas la radiación promedio fue en el mismo orden de $805,04 \text{ W/m}^2$ y $701,98 \text{ W/m}^2$. Notamos que con una radiación relativamente baja se pueden obtener un buen secado, este punto podría servir como referencia para instalar este tipo de secadores solares en lugares donde se conozca la radiación promedio diaria.

Después del primer día de secado la eficiencia va disminuyendo gradualmente, ya que cada vez es más difícil remover la humedad de los granos, probablemente humedad ligada. Para el día 2 en eficiencia de secado se reporta 17 % y 29 %, removiendo una cantidad de humedad de 3,8 kg y 4,2 kg para el día 2 de secado. Las radiaciones para estos días correspondientemente fueron de $929,29 \text{ W/m}^2$ y $599,35 \text{ W/m}^2$. Ambos secadores removieron prácticamente la misma cantidad de humedad, la diferencia másica de humedad removida fue de solo 0.4 kg, la eficiencia se ve afectada ya que un día hubo más radiación. Lo más probable en este punto, es que la limitante de la velocidad de secado, sea la velocidad de difusión de la humedad del centro del grano al exterior del mismo. Ya que no hay diferencia significativa cuando se suministra más energía.

Para el día 3 la eficiencia de secado llegó a ser 18% y 15% para la corrida piloto y corrida 1 del secador tico. Este día la remoción de humedad fue baja para la corrida 2 debido a que la radiación solar a la hora mayor incidencia fue baja, ya que el cielo se encontraba parcialmente nublado y el grano ya tenía un porcentaje de humedad bajo, y se encontraba removiendo humedad ligada lo cual disminuye sustancialmente la velocidad de secado, otra razón por la cual la corrida 2 es de menor eficiencia es que el café pergamino de la primer bandeja alcanzo un valor de 7,9 % de humedad B.H. Lo cual significo un 10,4 % de humedad B.H. café oro, es decir café pergamino pelado. Este valor se encuentra dentro del rango deseado de humedad para el empaque entre 10 y 13 % según Pereira, (1991). Por lo cual se decidió extraer el café que se encontraba en esta bandeja y almacenarlo. Posteriormente, se sustituyeron las bandejas de los niveles superiores. La bandeja 1, la cual se encontraba más cerca a la entrada de aire

caliente proveniente del intercambiador de calor se extrajo y se sustituyó por la bandeja 2, la cual estaba a la mitad de la cámara de secado. La bandeja 3 que se encontraba en el nivel superior y más alejado de la entrada de aire caliente se colocó en el lugar de la bandeja 2. Este mismo procedimiento se llevó a cabo en la corrida 1, en el día 4 de prueba.

En la Figura 6.14 se muestran las eficiencias de secado para ambos secadores durante las 2 corridas que se realizaron la corrida 1 y la prueba piloto, como se observa en la gráfica la eficiencia de secado siempre fue mayor para el secador tico, el secador canadiense se encuentra cerca pero debido a la facilidad del paso del aire, este siempre presenta un eficiencia menor al secador Tico.

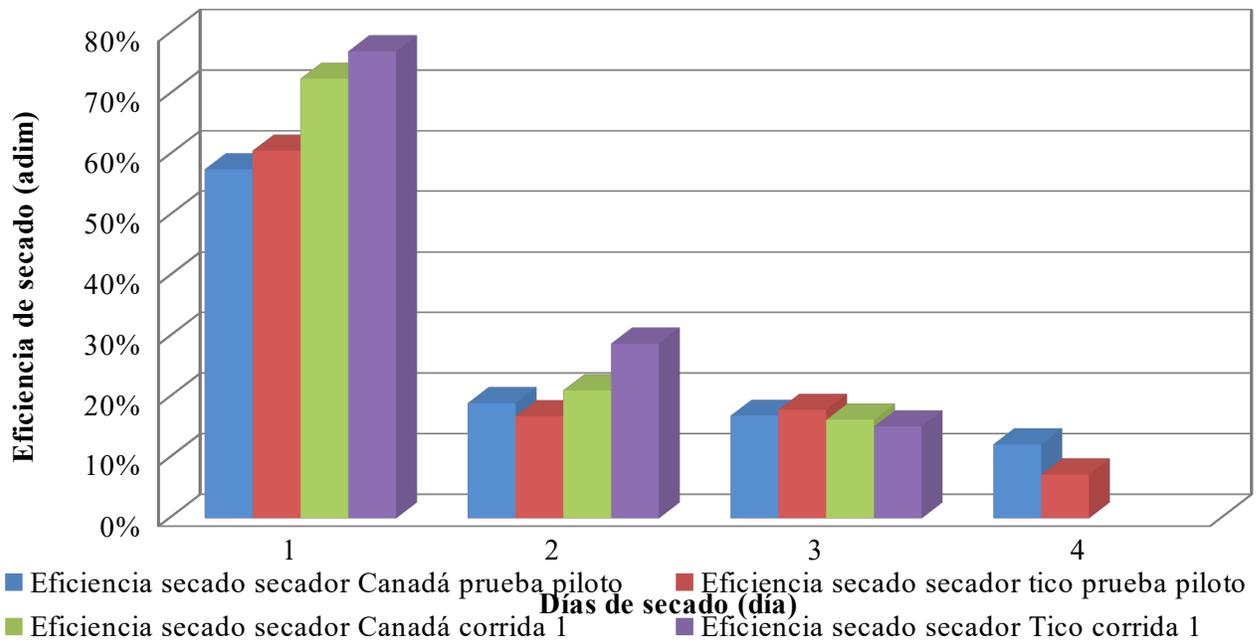


Figura 6.14. Eficiencia de secado para 2 corridas durante la prueba.

6.5 Eficiencia de térmica del colector solar.

Esta se calculó para ambos secadores y todas las corridas, esta eficiencia se podría usar de referencia al momento por ejemplo cuando se quiera adquirir un terreno con el fin de ahorrar en costos, para un proyecto de este tipo y comparar con otros tipos de secadores.

Esta eficiencia se determinó cada media hora puntual y para el día 5 de febrero del 2014, el secador tico en promedio presenta una mayor eficiencia que el canadiense, cabe destacar que en algunas ocasiones durante la medición de radiación al pasar una nube y darle sombra al área, esta disminuía notablemente dependiendo de qué tan grande y densa fuera, al igual que la duración de la misma dando sombra depende de su tamaño y la velocidad con la que viaje. Se midieron disminuciones de radiación por efectos de una nube de hasta 800 W/m^2 es decir más del 50% de la radiación máxima registrada.

Este efecto hace que algunos valores den eficiencias de más de 100%. En el siguiente gráfico de barras se observan las eficiencias durante el día 5 de Febrero del 2014 correspondiente a la Figura 6.15.

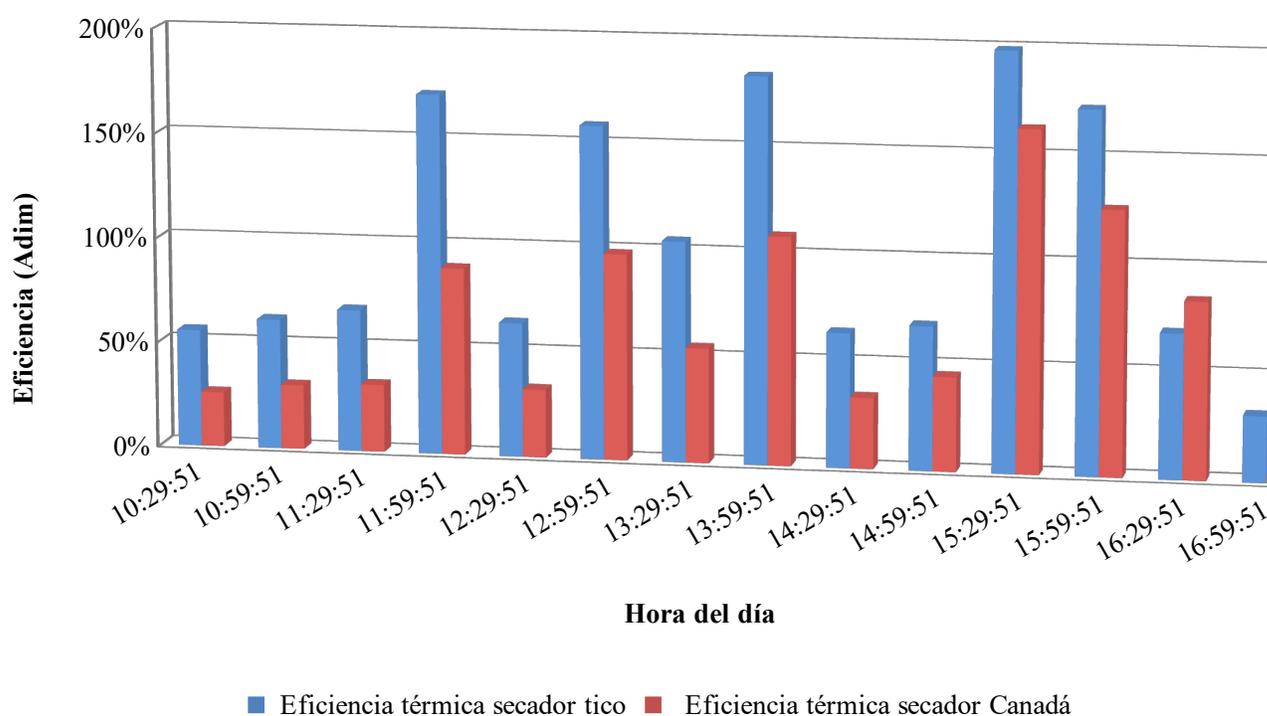


Figura 6.15. Eficiencia térmica de colectores tico y canadiense para el 05/02/14

Para este día el colector tico presenta un promedio de eficiencia térmica de 1,07 mientras que el canadiense 0,63. La eficiencia térmica aumenta al aumentar el flujo de aire a través del secador, y como el secador tico tiene un mayor flujo este presenta una mayor eficiencia.

Se observa como simultáneamente en distintas horas de medición la eficiencia fue alta esto debido a que la radiación solar disminuye súbitamente por efecto de una nube, el calor transmitido sería el de la medición instantánea lo cual provoca un aumento súbito en la eficiencia.

CAPÍTULO 7. MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

El equipo de secado es sumamente simple y fácil de utilizar, este solo requiere una conexión de 110V A/C, 60Hz y Luz solar para poder secar el café efectivamente, el control automático está programado para que los abanicos se enciendan y/o apaguen cuando se alcance la temperatura adecuada para la operación y un proceso en el cual se obtenga un secado de calidad.

7.1 Pasos para el inicio del secado.

7.1.1 Ubicación del Sistema.

Con una brújula ubicar el sur y colocar el colector de forma que la entrada de aire mire este punto, y asegurándose de tener una zona amplia y que no existan objetos que puedan interferir en el paso de la luz solar, que creen una sombra sobre este. Se recomienda colocar el colector en una superficie nivelada.

7.1.2 Distribución de masa a secar.

Colocar masa que se desea secar en las bandejas, se recomienda colocar la misma masa de café en cada bandeja, y lo más cerca a la salida de la cámara de presión.

7.1.3 Encendido e inicio del secado.

Conectar toma corriente a una fuente de corriente alterna y tocar el botón de encendido de color rojo, colocado en la caja gris que se encuentra adherida al secador solar. Una vez los abanicos empiecen a trabajar se encenderá una luz verde, que indica cuando estos están trabajando. Los mismos se apagan automáticamente cuando la temperatura disminuye a menos de 30 °C en la cámara de secado.

7.1.4 Operación durante el secado.

Se recomienda mover la masa en cada bandeja en lapsos iguales y realizarlo al menos 3 veces por día, para lograr un secado homogéneo. Para esto se debe abrir las puertas laterales, para evitar que el aire caliente se escape por la puerta de carga. Preferiblemente no abrir la puerta principal durante el secado.

El café se irá secando más rápidamente en las bandejas más cercanas a la cámara de presión, cuando esto ocurra se debe remover la bandeja y las bandejas en los niveles superiores se deben colocar en el nivel inmediato inferior.

7.1.5 Apagado del Sistema.

Para el apagado del sistema, por un periodo largo, transporte o mantenimiento la forma de apagado es apretar el botón de apagado en la caja eléctrica y luego desconectarlo de la toma corriente. Si se va secar producto por varios días no es necesario desconectar el sistema, ya que el sistema de control automático se encargará de apagar y encender los ventiladores cuando la temperatura para el secado se la adecuada.

7.2 Mantenimiento del sistema.

Para alargar la vida útil del sistema de secado y asegurar que este trabaje en óptimas condiciones se le debe dar un mantenimiento adecuado.

7.2.1 Mantenimiento diario.

Una vez al día, cuando los abanicos se hayan apagado, se debe retirar la cascarilla de café que quedo sobre la malla de secado que se coloca sobre la cámara de presión, para evitar que la cascarilla entre en esta e interfiera con el flujo de aire. Se debe chequear que las mangueras estén bien ajustadas a los orificios de salida del colector y entrada a los abanicos.

7.2.2 Mantenimiento semanal.

Se recomienda limpiar la superficie del colector con un paño húmedo, para eliminar el polvo que se deposita e interfiere con los rayos solares que inciden en la superficie receptora. De observarse que se deposite mucha cantidad de polvo por día aumentar la frecuencia de limpieza.

7.2.3 Mantenimiento Mensual.

- Buscar por el colector y secador solar posibles entradas de aire indeseables, y sellarlas con poliuretano impermeable, esto para evitar que entre aire frío a la cámara de secado.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A raíz de lo aprendido durante este proyecto se pueden deducir algunas pautas importantes referentes a la implementación del secado solar para café y se llegó a conclusiones importancia para las partes implicadas.

También se realizan recomendaciones para futuras etapas del proyecto o personas interesadas en construir algún tipo de secador solar similar.

8.1 Conclusiones.

El secado solar es una tecnología efectiva para el secado de granos de café, la misma puede implementarse utilizando materiales de bajo costo y reutilizando latas de aluminio.

En comparación el secador tico es más eficiente que el canadiense, principalmente debido a la caída de presión por la cual fluye el aire caliente. El secador tico logro remover humedad de los granos con una velocidad de $5,09 \times 10^{-4}$ kg/s y el secador canadiense alcanzo una velocidad máxima de $4,88 \times 10^{-4}$ kg/s.

La influencia de distribución del aire dentro del secador es significativa, se quiere que el secado sea homogéneo. Cuando no hay movimiento de granos estos se secan más de un lado que de otro, lo que altera su color, propiedades y calidad.

La disminución de humedad en el café es significativamente mayor en la primera etapa de secado de los granos donde se elimina la humedad superficial del grano de café, en esta etapa se logró remover hasta 14,6 kg de humedad en 10 horas.

Se lograron realizar 3 corridas donde secaron 45 kg de café pergamino en cada una hasta un valor de humedad dentro de un rango adecuado para su venta de entre 13 % y 11 % en 4 días.

El uso de ventiladores de alta eficiencia para forzar un flujo de aire a través de una cama de granos de café es eficaz para disminuir su humedad y disminuye el tiempo de secado, respecto al secado por convección natural.

Se lograron eficiencias de secado de 80 % y 76 % para el secador tico y secador canadiense respectivamente. Los que representa diferencias respecto al secador de convección natural tico de 62 %.

8.2 Recomendaciones.

Se recomienda mover los granos dentro de secadores de café constantemente o al menos periódicamente, para que el aire choque contra todas las caras del grano y así obtener un producto de calidad.

Se recomienda que al dimensionar el equipo de ventilación se tomen en cuenta las caídas de presión a lo largo de la tubería, ya que el caudal de aire disminuye con las caídas de presión.

Se recomienda implementar un sistema con movimiento para el secado de granos y un variador de frecuencia en el equipo de ventilación, para ajustar las condiciones de secado.

Cuando se pretenda construir un secador solar se recomienda agregarle una capa aislante que minimice las pérdidas de calor al ambiente.

CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, P. P. (Marzo de 2002). *Análisis de sistemas existentes e implementación de nuevas tecnologías de secado de café pergamino a nivel de beneficio a gran escala*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Brooker. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York, E.E.U.U.: A.V.I. Publishing Company Inc.
- Bureau of energy efficiency*. (2014).
- Carreras, R., & Montserrat, S. (2006). *Tecnología Energética y Medio Ambiente. (volumen 1)*. Barcelona : Ediciones UPC.
- Cengel, Y. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw Hill.
- Cleves. (1998). *Tecnología en beneficiado de café*. San José.
- Cléves, R. (1986). *El secamiento Mecánico del café*. San José, Costa Rica: Instituto del Café.
- D.O.W.S. (2013). *Wood Anatomy Lab Glossary*. Kyungpook: Drying Tecnology Center University of Zimbabwe.
- Ekechukwu, O. (1987). *Experimental studies of integral type natural circulation solar energy tropical crop dryers*. London.
- FAO. (1996). Recuperado el 07 de 02 de 2014, de <http://www.fao.org/docrep/x5028s/X5028S06.htm#1>.
Introducción
- Geankoplis, C. (2006). En C. Geankoplis, *Procesos de transporte y principios de separacion*. Mexico: CECSA.
- Jiménez, R. (1997). Material del curso de "Ingeniería Poscosecha Granos I". En *La Humedad y las relaciones de humedad de los productos Agrícolas*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

- KULKARNI, D. (2009). *Cane sugar manufacture in India*. NEW DELHI, INDIA: THE SUGAR TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION OF INDIA.
- Mahmud M. Alkilani *, K. S. (2011). *Review of solar air collectors with thermal storage units*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1476–1490.
- MJ, N. (1978). *Cereal grains, legume grains and oil seeds*. In: *Crop Conservation and Storage*. Drying Cereal Grains, 27-79.
- Montiel, G. M. (2004). *Manual de instrumentación para una secadora solar*.
- Montoya. (2002). *Análisis de cuatro sistemas de secamiento utilizados en el beneficiado de café (Coffea arabica) en Costa Rica*. San José: Tesis Lic. Ing Agrícola. Universidad de Costa Rica.
- Moreno, G. (2013). *MANUAL DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UNA SECADORA SOLAR*. Seminario de Proyectos II, Ing. en Energía, UAM-I.
- Murthy, M. R. (2009). *A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 835-844.
- Nandwani, S. (2010). *Secadores Solares en Costa Rica*. Heredia : Universidad Nacional.
- Pereira, J. A. (1991). *Principios de secado de granos psicometria higroscopia*. Santiago, Chile.
- Raghavan, G. S. (2006). *Commercial Grain Dryers*. Handbook of postharvest technology.
- Ramaswamy, H. &. (2003). *Handbook of Postharvest Technology*. India: CRC Press.
- Sandoval, E. (2013). *Presentación CONA SOLAR*. Santa María de Dota.
- Smith, M. C. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería química*. En W. McCabe. McGraw-Hill.
- T. Alam, R. a. (2012). *Packed Bed Solar Energy Storage: A State-of-Art Review*. *An International Journal of Science & Technology*.
- Vanderhulst, P. L. (1990). *Solar Energy - Small scale applications in developing countries*. Amsterdam.

Vindas, A. G. (2013). *Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha de un sistema de secado de granos de café con uso de colectores solares*. San José, Costa Rica.

Visavale, G. L. (2012). *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations*. India.

Weiss, W. (2011). *SOLAR DRYING*. Austria: Institute for sustainable technologies.

www.grainger.com. (s.f.). Recuperado Febrero de 2014, de http://www.grainger.com/search?gclid=CKrukIuu5rwCFVfo7Aod8gQAIQ&searchQuery=Dayton+Fan&cm_mmc=PPC:+Google+Supplier-_-Spanish%3EDayton%3EDayton-_-Spanish%3EDayton%3EFan%3EBroad-_-Dayton%20Fan&ef_id=UTZy4AAABYVt9O9p:20140225034242:s

CAPÍTULO 10. NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Área	m ²
C	Calor	J/kg*K
D	Cantidad de humedad removida por tiempo	kg/s
G	Masa de Granos de café	kg
M	Masa de agua	kg
I	Radiación Solar	W/m ²
v	Velocidad	m/s
T	Temperatura	°C
H	Humedad Base Húmeda	kg agua/kg totales
h	Entalpía	J/kg
m	Flujo Másico	kg/s

t	Tiempo	s
Δ	Cambio	Adimensional
Ángulo Inclinación		°
η	Eficiencia	Adimensional
ρ	Densidad	kg/m ³
Subíndices	Descripción	
p	Promedio	
c	Colector	
a	Aire	
w	Agua	
t	Total	
e	Entrada	
s	Salida	
T	Térmica	
s	Secado	
fg	Latente	
bh	Base Húmeda	

APENDICES.

A. Datos experimentales.

Cuadro A.1. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto, día 18 de enero del 2014.

Hora	Radiación	Sec Can	Sec Tic	Sec. Can	Sec. Tic.	Temp. Amb
24h	(W/m ²)	Temperatura (°C)		Velocidad aire (m/s)		(°C)
8	913,7	26	26	0,06	0,06	26
830	945,3	27	27	0,06	0,06	27
9	988,1	29,2	29,8	0	0,02	28
930	1100	27,7	27,8	0,01	0,01	23
10	1181	30	29,5	0,03	0,03	28
1030	1253	30,2	30,4	0,73	1	28
11	1288	31,9	31,6	0,76	1,04	27

1130	1313	32,7	33,4	0,66	1,01	28
12	1282	33	32	0,67	1,31	27
1230	1284	33,8	33	0,72	1,27	26
13	1174	34	32,5	0,71	1,36	26
1330	1130	34,1	32,8	0,7	1,23	26
14	1070	34	33,1	0,71	1,32	26
1430	1008	34,2	33,6	0,72	1,3	27
15	798	33,4	33,4	0,73	1,2	26
1530	679,6	32,2	32,5	0,8	1,25	27
16	613,8	31,3	31,8	0,79	1,22	23
1630	387,1	29,1	29,4	0,89	1,22	22
17	29,8	26,6	26,6	0,92	1,17	20
1730	9,1	24	24,5	0,04	0,07	18

Cuadro A.2. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 19 de enero del 2014.

Hora 24h	Radiación (W/m²)	Sec Can Temperatura (°C)	Sec Tic Temperatura (°C)	Sec. Can Velocidad aire (m/s)	Sec. Tic. Velocidad aire (m/s)	Temp. Amb (°C)
8	688,8	19,5	19,6	0	0	25
830	689,9	20,2	20,1	0	0	24
9	689,1	23,4	22,7	0	0	26
930	796	26,1	27,2	0	0	25
10	1153	33,3	32,9	1,87	0,26	26
1030	1203	33,9	34	0,79	0,99	26
11	1289	36,1	34,5	0,71	1,13	24

Cuadro A.2. (Continuación). Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 19 de enero del 2014.

Hora 24h	Radiación (W/m²)	Sec Can Temperatura (°C)	Sec Tic Temperatura (°C)	Sec. Can Velocidad aire (m/s)	Sec. Tic. Velocidad aire (m/s)	Temp. Amb (°C)
1130	1298	37,8	36,3	0,72	1,07	26
12	1300	39,1	37,2	0,71	1,02	26,5
1230	1287	39,5	37,6	0,72	1	25
13	1195	39,2	38	0,67	0,96	27
1330	1154	39,7	38,4	0,64	1,05	26
14	1065	40	38,4	0,62	0,99	29
1430	894	39	37,8	0,53	1,02	24
15	802,4	38,4	36,7	0,67	1,1	24
1530	648,9	37	35,6	0,74	1,16	24
16	516	35,7	34,5	0,73	1,13	24
1630	333	33	32	0,85	1,21	22
17	24,8	29,6	28,9	0,96	1,26	20

1730	1,9	24,9	25	0	1,16	18
------	-----	------	----	---	------	----

Cuadro A.3. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 20 de enero del 2014.

Hora	Radiación	Sec Can	Sec Tic	Sec. Can	Sec. Tic.	Temp. Amb
24h	(W/m ²)	Temperatura (°C)		Velocidad aire (m/s)		(°C)
9	917,4	27,4	25	0,67	1,2	24
930	996	31,5	29,8	0,78	1,23	24
10	1150	34,6	33,8	0,71	1,29	24
1030	1222	36,4	36,3	0,67	1,23	24
11	1309	38,1	37,9	0,61	1,36	24
1130	1320	40,1	40,6	0,47	0,89	24
12	1389	41,2	42,2	0,51	0,73	26
1230	741,2	42	42,7	0,46	0,71	28
13	787,7	41,5	42,4	0,44	0,77	27
1330	339,6	38,2	37,9	0,67	0,94	25
14	589,8	35,6	35	0,71	1,05	25
1430	1096	37,2	36,8	0,7	1,01	26
15	790,4	37,8	36,9	0,62	1,22	23
1530	625	36,3	36,2	0,7	1,24	23
16	587,3	35	35,1	0,67	1,25	22
1630	393,2	32,6	32,5	0,8	1,24	22
17	15	26,4	29,2	0,7	1,2	20
1730	8,3	25,5	24,8	0,87	0,03	18

Cuadro A.4. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 21 de enero del 2014.

Hora	Radiación	Sec Can	Sec Tic	Sec. Can	Sec. Tic.	Temp. Amb
24h	(W/m ²)	Temperatura (°C)		Velocidad aire (m/s)		(°C)
830	771,9	24,3	23,9	0	0,07	24
9	905,5	31,7	30,1	0,77	1,19	24
930	423,6	34,5	34,1	0,72	1,14	24
10	495,6	35	34,9	0,69	1,11	26
1030	523,7	36,1	37,8	0,66	1,05	26
11	541,6	35,8	37,6	0,65	1,02	24
1130	114,5	39,5	42,8	0,52	0,8	26

12	465,8	38,4	39,7	0,53	0,9	25
1230	316,2	35,5	35,8	0,73	1,11	25
13	276,8	33,3	33,6	0,79	1,18	23
1330	140,6	31,3	31,3	0,81	1,17	22
14	142,3	28,3	28,2	0,97	1,13	22
1430	302,1	27,1	27,5	1,01	1,13	22
15	91,5	25,8	26,3	0,9	1,16	22
1530	110,6	24,9	25,9	0	0	20

Cuadro A.5. Datos de radiación, temperatura de aire de salida con termoanemómetro, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida piloto día 22 de enero del 2014.

Hora 24h	Radiación (W/m²)	Sec Can Temperatura (°C)	Sec Tic Temperatura (°C)	Sec. Can Velocidad aire (m/s)	Sec. Tic. Temperatura (°C)	Temp. (°C)
8	629,8	23,2	23,3	0	0	22
830	710,3	26	24,5	0,85	1,17	23
9	920,7	30,4	30,7	0,87	1,24	24
930	1046	34,2	35,5	0,75	1,23	24
10	1144	37,2	37,7	0,58	0,9	25
1030	1233	39,4	39,8	0,53	0,88	25
11	1241	41,8	42,2	0,43	0,7	25
1130	1333	43,8	44,6	0,32	0,55	26
12	1370	45,8	44,4	0,38	0,73	26

Cuadro A.6. Temperaturas entrada y salida, humedad entrada y salida de cámara de secado para corrida piloto en el secador tico, día 18 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:19:16 a.m.	24,5	59	28	56,5
08:49:16 a.m.	26	61,5	28	72
09:19:16 a.m.	28	57,5	29,5	71

Cuadro A.6. (Continuación). Temperaturas entrada y salida, humedad entrada y salida de cámara de secado para corrida piloto en el secador tico, día 18 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida	Hum. Salida (%)
09:49:16 a.m.	50	23	29	71
10:19:16 a.m.	58	16	29,5	74
10:49:16 a.m.	61	14	30,5	78
11:19:16 a.m.	63	13	31,5	79,5

11:49:16 a.m.	65	13	32	78,5
12:19:16 p.m.	56	20	31,5	80
12:49:16 p.m.	57,5	18,5	32	80,5
01:19:16 p.m.	58	18	32,5	82
01:49:16 p.m.	58	18	34	85
02:19:16 p.m.	56	18,5	35,5	80
02:49:16 p.m.	53,5	19,5	36,5	76,5
03:19:16 p.m.	50	21	36,5	72
03:49:16 p.m.	46	24	36	67
04:19:16 p.m.	41,5	28	35	62
04:49:16 p.m.	35	36	31	63,5
05:19:16 p.m.	28,5	47,5	27,5	64,5
05:49:16 p.m.	23,5	46	23	65,5
06:19:16 p.m.	22	50,5	22	65

Cuadro A.7. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador canadiense, día 18 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:19:16 a.m.	25,5	67	25,5	66,5
08:49:16 a.m.	29,5	61	33	67
09:19:16 a.m.	31	56	35,5	60,5
09:49:16 a.m.	45	28,5	34,5	67
10:19:16 a.m.	54	18,5	32,5	72
10:49:16 a.m.	57,5	16	31,5	75
11:19:16 a.m.	59	15	31,5	73
11:49:16 a.m.	61	14	32	76,5
12:19:16 p.m.	60	14	31	78
12:49:16 p.m.	61	13,5	32	78,5
01:19:16 p.m.	60,5	14	32	78,5
01:49:16 p.m.	59,5	14,5	32,5	77,5
02:19:16 p.m.	55,5	16,5	32,5	74,5
02:49:16 p.m.	53	17,5	32	72,5
03:19:16 p.m.	48	20,5	31,5	70,5
03:49:16 p.m.	43	25,5	31	68
04:19:16 p.m.	36	34,5	30	66
04:49:16 p.m.	29,5	46	28,5	64,5
05:19:16 p.m.	24,5	58	26,5	65
05:49:16 p.m.	22	60	23,5	57,5

Cuadro A.8. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador tico, día 19 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
-------------	---------------------------	-------------------------	--------------------------	------------------------

07:58:57 a.m.	18,5	79,5	19	81
08:28:57 a.m.	22,0	74,5	19	82
08:58:57 a.m.	31,5	52,5	22	83,5
09:28:57 a.m.	46,0	26,0	23,5	78,5
09:58:57 a.m.	52,5	20,0	26	80
10:28:57 a.m.	56,5	17,5	28	80
10:58:57 a.m.	59,5	16,0	30	75,5
11:28:57 a.m.	61,5	14,5	33	70
11:58:57 a.m.	63,0	14,0	34,5	66,5
12:28:57 p.m.	63,0	14,0	35,5	64
12:58:57 p.m.	62,0	14,5	36	65,5
01:28:57 p.m.	62,0	14,5	37,5	64,5
01:58:57 p.m.	60,5	14,5	39	61,5
02:28:57 p.m.	58,5	15,5	40,5	57,5
02:58:57 p.m.	54,0	17,5	41	53
03:28:57 p.m.	49,5	20,0	41	49,5
03:58:57 p.m.	45,0	24,0	41	47,5
04:28:57 p.m.	37,0	32,0	40	45,5
04:58:57 p.m.	30,0	42,5	36	45,5
05:28:57 p.m.	25,0	53,0	33	49,5
05:58:57 p.m.	24,5	65,5	27	66

Cuadro A.9. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador canadiense, día 19 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:01:14 a.m.	20	80,5	19,5	89,5
08:31:14 a.m.	28,5	55,5	20,5	77,5
09:01:14 a.m.	40	35,5	23,5	81,5
09:31:14 a.m.	47,5	23,5	25,5	80,5
10:01:14 a.m.	53	19,5	27,5	81
10:31:14 a.m.	57	17	29	81,5
11:01:14 a.m.	60	15,5	30,5	81
11:31:14 a.m.	62,5	14,5	31,5	81
12:01:14 p.m.	64	13,5	32,5	80
12:31:14 p.m.	64,5	13,5	33	78,5
01:01:14 p.m.	64	13,5	33	79
01:31:14 p.m.	63,5	13,5	34	81
02:01:14 p.m.	63	13,5	36,5	78

Cuadro A.9. (Continuación). Temperaturas entrada y salida, humedad entrada y salida de cámara de secado para corrida piloto en secador canadiense, 19 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
02:31:14 p.m.	61	14	38	71,5
03:01:14 p.m.	57	15,5	38,5	65,5
03:31:14 p.m.	53	17,5	38,5	61
04:01:14 p.m.	48,5	21	38,5	57,5
04:31:14 p.m.	42,5	25,5	36	55
05:01:14 p.m.	34	35	31,5	57,5
05:31:14 p.m.	30	37,5	28	60
06:01:14 p.m.	25	61,5	24,5	72,5

Cuadro A.10. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador tico, día 20 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada	Temp. Salida	Hum. Salida (%)
08:48:36	22,0	74,0	22	72,5
09:18:36	42,0	34,0	25	77
09:48:36	51,5	22,0	27	76,5
10:18:36	56,5	17,5	29,5	75
10:48:36	61,0	15,0	31,5	73
11:18:36	63,0	14,0	33	67,5
11:48:36	62,5	13,5	35	63
12:18:36	63,5	13,5	36	62
12:48:36	61,0	14,0	37	60
01:18:36	55,0	16,0	36,5	58,5
01:48:36	45,5	22,0	35	55,5
02:18:36	43,0	26,0	33,5	57,5
02:48:36	47,0	21,5	35	58,5
03:18:36	47,5	20,5	37	51,5
03:48:36	44,5	22,5	38	47
04:18:36	38,0	28,5	37,5	44,5
04:48:36	31,5	37,5	35	43
05:18:36	26,5	47,0	31	45
05:48:36	26,0	42,0	27	51,5

Cuadro A.11. Temperaturas entrada y salida, humedad entrada y salida de cámara de secado para corrida piloto en secador canadiense, día 20 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada(°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:51:18 a.m.	26	58,5	25,5	62,5
09:21:18 a.m.	45,5	28	26,5	76

Cuadro A.11. (Continuación). Temperaturas entrada y salida, humedad entrada y salida de cámara de secado para corrida piloto en secador canadiense, 20 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada(°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida	Hum. Salida (%)
09:51:18 a.m.	53	20	28,5	77
10:21:18 a.m.	58,5	16	30,5	76,5
10:51:18 a.m.	62,5	14	32	75,5
11:21:18 a.m.	65	12,5	33,5	72
11:51:18 a.m.	66	12	34	69,5
12:21:18 p.m.	67	11,5	34,5	69
12:51:18 p.m.	65,5	11,5	35,5	67
01:21:18 p.m.	59	13,5	35,5	63
01:51:18 p.m.	48,5	19	34	60
02:21:18 p.m.	46	21	33	64
02:51:18 p.m.	51	17,5	35	63
03:21:18 p.m.	51,5	17,5	36,5	60
03:51:18 p.m.	48,5	18,5	37	54,5
04:21:18 p.m.	43	22,5	36	50,5
04:51:18 p.m.	37	28,5	32,5	52
05:21:18 p.m.	30	37,5	29	52,5
05:51:18 p.m.	27	44,5	25,5	58

Cuadro A.12. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador tico, día 21 de enero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:28:03 a.m.	24,00	73,00	24,5	73
08:58:03 a.m.	29,00	58,50	25	71,5
09:28:03 a.m.	45,00	28,00	29	71,5
09:58:03 a.m.	45,00	25,00	31	66
10:28:03 a.m.	45,00	25,00	33,5	54,5
10:58:03 a.m.	44,50	25,50	34,5	51,5
11:28:03 a.m.	51,50	21,50	37	49,5

11:58:03 a.m.	53,00	18,50	39,5	44,5
12:28:03 p.m.	43,00	26,50	36,5	47
12:58:03 p.m.	38,00	33,00	34	49,5
01:28:03 p.m.	35,50	37,00	32	52
01:58:03 p.m.	29,00	50,00	30	55
02:28:03 p.m.	27,50	56,00	28	57,5
02:58:03 p.m.	28,50	50,00	27,5	59
03:28:03 p.m.	26,50	57,00	26,5	61
03:58:03 p.m.	26,00	59,00	25,5	63
04:28:03 p.m.	25,50	56,00	25	63
04:58:03 p.m.	25,00	55,50	24,5	63,5
05:28:03 p.m.	24,50	53,00	23,5	64

Cuadro A.13. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida piloto en el secador canadiense, día 21 de enero del 2014

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:20:31 a.m.	21	75,5	21	80
09:20:31 a.m.	31,5	47	25,5	72,5
09:50:31 a.m.	47	25,5	29	75
10:20:31 a.m.	47	22,5	31	67
10:50:31 a.m.	45,5	23	32	61,5
11:20:31 a.m.	45	23,5	32,5	59,5
11:50:31 a.m.	48,5	22	33	60
12:20:31 p.m.	57	16,5	35,5	60
12:50:31 p.m.	48,5	20,5	34,5	54,5
01:20:31 p.m.	42,5	26,5	33	55,5
01:50:31 p.m.	39	30,5	31,5	56,5
02:20:31 p.m.	33	41	30	57,5
02:50:31 p.m.	29	50	28	59,5
03:20:31 p.m.	29	49	27	62
03:50:31 p.m.	28,5	51,5	26	64
04:20:31 p.m.	27	68,5	25	74,5
04:50:31 p.m.	26,5	54	25	72
05:20:31 p.m.	26	54	24,5	74
05:50:31 p.m.	25	52	24	73,5

Cuadro A.14. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1, día 5 de febrero del 2014.

Hora	Radiación	Sec Can	Sec Tic	Sec. Can	Sec. Tic.	Temp.
-------------	------------------	----------------	----------------	-----------------	------------------	--------------

24h	(W/m²)	Temperatura (°C)		Velocidad aire (m/s)		Amb (°C)
1030	1184	28,8	29,5	0,76	1,15	25
11	1252	30,6	31,4	0,74	1,19	25
1130	1317	32,5	33,2	0,71	1,18	25
12	498	34,3	34,9	0,67	1,09	26
1230	1206	33,5	32,6	0,68	1,21	24
13	416,9	32,1	31,6	0,76	1,25	22
1330	665,8	32,4	32,2	0,7	1,24	23
14	351,6	30,9	31	0,68	1,23	25
1430	1045	32,3	32,7	0,77	1,17	26
15	871,8	32,3	32,2	0,75	1,16	27
1530	244,2	30,6	30,7	0,7	1,2	24
16	147,4	27,8	26,9	0,85	1,12	25
1630	159,9	26	26,8	0,78	0,3	24
17	24,5	24,2	26	0,1	0	24

Cuadro A.15. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1 día 6 de febrero del 2014.

Hora	Radiación	Sec Can	Sec Tic	Sec. Can	Sec. Tic.	Temp. Amb
24h	(W/m²)	Temperatura (°C)		Velocidad aire (m/s)		(°C)
930	998,4	25,6	27,5	0,8	1,26	25
10	105,9	28,6	30,8	0,84	1,32	26
1030	1313	30,1	31,4	0,89	1,25	28
11	701,9	31,4	33,2	0,81	1,27	27
1130	1364	32	34,1	0,71	1,01	29
12	1053	33,6	35,5	0,74	1,1	28
1230	818,9	35	36,6	0,69	1,17	27
13	459,8	35,4	36,8	0,65	1,16	28
1330	314,1	35,8	38	0,65	1,31	26
14	1245	35,3	36,8	0	0,08	27
1430	194,2	31,7	34,1	0	0	23
15	150,3	30,2	27,7	0	0	23
1530	138,9	30,4	30,7	0,87	1,39	21
16	96,1	27,9	28,5	0,85	1,3	22
1630	63,3	25,7	26,6	0,05	0,11	21

Cuadro A.16. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1 día 7 de febrero del 2014.

Cuadro A.17. Datos de radiación, temperatura de aire de salida, velocidad de aire y temperatura ambiente para la corrida 1 día 8 de febrero del 2014.

Hora 24h	Radiación (W/m²)	Sec Can Temperatura (°C)	Sec Tic Temperatura (°C)	Sec. Can Velocidad aire (m/s)	Sec. Tic. Velocidad aire (m/s)	Temp. (°C)
830	633,8	22,2	28,3	0,86	1,23	21
9	443	26,8	34,7	0,85	1,23	24
930	462,6	29,6	37,2	0,81	1,13	26
10	470	30,7	37,2	0,76	1,15	27
1030	1591	31,7	37,1	0,73	1,10	28
11	482,1	33,3	39,2	0,69	0,95	26
1130	260,7	29,7	35	0,8	0,82	25
12	541,4	31,9	36,6	0,83	1,12	25
1230	421,8	34	30,8	0,78	1,07	26
13	1217	35,4	39,8	0,69	1,01	28
1330	690,2	36,7	42,2	0,59	0,96	21
14	405,4	36,8	42	0,57	0,92	27
1430	433,9	34,5	37,9	0,66	1,11	24
15	309	34,4	37,6	0,69	1,17	26
1530	856,2	33,4	35,8	0,69	1,2	25

16	80,5	33,1	34,2	0,68	1,11	24
----	------	------	------	------	------	----

Cuadro A.18. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 5 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida
10:11	24,0	63,5	25,0	62,5
10:41	48,5	29,0	29,0	79,0
11:11	54,5	22,0	30,5	78,5
11:41	58,0	19,0	32,0	77,5
12:11	58,0	17,0	34,0	74,0
12:41	51,5	20,5	33,5	69,5
13:11	45,0	25,5	32,5	68,0
13:41	48,0	25,0	32,0	69,0
14:11	47,5	24,5	33,5	67,0
14:41	51,0	22,0	35,5	64,0
15:11	49,5	22,0	37,5	58,0
15:41	42,0	27,0	36,0	53,0
16:11	34,0	38,0	31,0	56,5
16:41	31,5	42,0	28,5	65,5
17:11	29,5	45,0	27,5	68,0

Cuadro A.19. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 5 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
10:09	24,5	63,0	24,0	66,0
10:39	41,5	37,5	27,5	77,5
11:09	48,0	27,5	29,0	80,0
11:39	52,5	22,5	31,0	79,0
12:09	55,5	19,0	32,5	77,0
12:39	49,5	22,5	32,5	71,0
13:09	45,5	25,0	32,0	70,5
13:39	46,0	27,0	32,0	72,0
14:09	46,0	26,5	32,0	77,0
14:39	49,0	23,5	33,5	76,0
15:09	49,5	22,0	35,0	73,0
15:39	44,5	24,5	34,0	68,5
16:09	35,5	35,0	30,0	69,0

16:39	31,5	41,5	28,5	70,5
17:09	28,5	51,0	27,0	69,5

Cuadro A.20. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 6 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida
08:19	19,5	76,5	19,0	81,5
08:49	36,5	31,5	22,5	76,0
09:19	42,0	27,0	24,5	75,5
09:49	50,5	18,5	27,0	76,0
10:19	53,5	19,0	29,0	66,5
10:49	60,0	14,5	30,5	74,5
11:19	55,5	16,0	31,5	70,5
11:49	59,0	14,0	32,5	70,5
12:19	63,5	12,5	33,5	70,0
12:49	63,0	13,0	35,0	67,0
13:19	62,5	13,5	35,0	67,0
13:49	59,0	16,0	36,0	64,0
14:19	52,0	21,0	36,0	71,0
14:49	49,5	22,0	37,5	69,5
15:19	44,0	24,0	33,5	67,0
15:49	36,5	32,5	31,0	64,0
16:19	33,5	35,5	29,5	61,5
16:49	32,0	36,0	27,0	65,0
17:19	25,0	55,5	24,0	69,0

Cuadro A.21. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 6 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:20	20,0	71,5	19,5	73,0
08:50	26,5	51,0	21,5	73,5
09:20	35,5	36,5	23,0	75,5
09:50	44,0	25,0	26,0	75,5
10:20	47,5	23,0	28,0	75,5
10:50	55,5	18,0	29,5	78,0
11:20	54,0	17,5	30,5	75,5
11:50	56,5	16,0	32,0	75,0
12:20	60,0	14,5	33,0	74,0
12:50	61,5	14,0	34,0	71,0

13:20	59,5	15,0	34,0	71,0
13:50	59,0	16,0	34,5	69,0
14:20	51,0	21,0	34,5	74,0
14:50	46,0	24,0	36,0	72,0
15:20	40,5	28,0	33,0	70,0
15:50	36,0	34,5	31,0	73,0
16:20	33,0	37,5	29,5	69,0
16:50	30,5	40,0	27,0	69,5
17:20	26,0	54,0	23,5	70,5

Cuadro A.22. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 7 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida
08:26	17,5	69,5	17,5	69,0
08:56	47,0	20,5	21,5	78,0
09:26	53,5	16,0	25,5	77,0
09:56	59,0	13,0	28,5	73,0
10:26	62,0	11,5	30,5	70,0
10:56	65,5	11,0	32,0	68,0
11:26	69,0	9,5	34,0	65,5
11:56	66,0	11,0	34,5	62,0
12:26	64,5	10,5	35,5	59,0
12:56	52,0	16,0	34,5	55,0
13:26	56,5	15,0	34,0	57,5
13:56	63,0	11,5	35,5	60,0
14:26	41,0	23,5	34,5	51,0
14:56	46,0	19,5	34,5	53,5
15:26	47,5	20,0	35,5	53,0
15:56	41,5	24,0	37,5	49,0
16:26	35,0	30,0	34,0	50,5

Cuadro A.23. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 7 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida
08:27	18,5	65,0	18,5	68,5
08:57	36,0	34,0	20,0	79,0
09:27	45,0	24,0	23,5	81,5
09:57	51,5	18,5	26,5	80,0
10:27	55,5	15,5	28,5	77,0
10:57	59,5	14,0	30,5	76,0

11:27	63,0	12,5	32,5	74,5
11:57	62,5	13,0	33,0	72,0
12:27	63,0	12,0	33,0	70,5
12:57	52,5	16,0	32,5	70,0
13:27	53,5	17,5	32,5	70,0
13:57	61,0	13,5	33,5	75,0
14:27	46,5	19,0	32,5	65,5
14:57	46,5	19,0	33,0	67,5
15:27	47,0	21,0	34,0	67,5
15:57	46,5	20,0	36,5	61,5
16:27	36,5	29,0	32,5	58,0

Cuadro A.24. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador tico, día 8 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada (°C)	Hum. Entrada (%)	Temp. Salida (°C)	Hum. Salida (%)
08:37	20,5	84,0	20,5	82,5
09:07	48,0	25,5	28,0	71,5
09:37	54,5	19,0	32,0	64,0
10:07	58,5	16,0	34,5	58,0
10:37	61,0	14,0	35,5	56,5
11:07	62,5	13,0	36,5	53,0
11:37	63,0	13,5	36,0	55,0
12:07	65,5	12,0	37,5	53,5
12:37	66,0	12,0	38,0	51,0
13:07	65,5	12,5	38,5	50,0
13:37	66,0	12,0	39,5	49,5
14:07	64,5	12,5	40,5	47,0
14:37	61,0	14,0	41,5	41,5
15:07	58,0	14,5	44,5	37,5
15:37	50,0	19,5	42,0	38,5
16:07	41,5	26,0	39,5	39,0
16:37	35,0	32,5	34,5	43,5

Cuadro A.25. Temperaturas de entrada y salida, humedad de entrada y salida de la cámara de secado para la corrida 1 en el secador canadiense, día 8 de febrero del 2014.

Hora	Temp. Entrada	Hum. Entrada	Temp. Salida	Hum. Salida
08:37	21,5	76,0	20,5	79,5
09:07	40,0	35,5	26,5	77,5

09:37	47,5	26,0	30,5	71,0
10:07	53,0	21,0	33,5	66,5
10:37	56,0	18,0	35,5	63,0
11:07	54,0	16,5	35,5	51,5
11:37	57,0	17,5	30,5	84,0
12:07	60,5	15,5	32,0	88,5
12:37	62,0	15,0	33,5	87,5
13:07	62,5	14,5	34,5	87,0
13:37	63,0	14,0	35,0	87,0
14:07	63,0	13,5	35,5	87,0
14:37	61,5	13,0	36,0	81,5
15:07	58,0	15,0	35,5	77,5
15:37	52,5	18,0	36,0	70,5
16:07	47,0	21,0	35,5	64,0
16:37	38,5	28,5	32,5	62,5

Cuadro A.26. Áreas del sistema de secado, para ambos secadores

Área de sistema de secado	Diámetro (m)	Agujeros (unid)	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m ²)
Intercambio de calor	N/A	N/A	1,96	0,975	1,911
Entrada al colector solar	0,05	70	N/A	N/A	0,0098
Salida de secador	0,015	70	N/A	N/A	0,0375
Entrada a cámara de secado	0,05	5	N/A	N/A	0,0124

Cuadro A.27. Masa de café recién chancado por bandeja en secador al inicio de pruebas de secado.

Bandeja	Masa de café a secar (kg)		
	Prueba Piloto	Corrida 1	Corrida 2
1	15	15	5
2	0	0	5
3	15	15	5
4	0	0	5
5	15	15	5
6	0	0	5
Total	45	45	30

B. Resultados Intermedios.

Cuadro B.1. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en bandeja 1, para corrida piloto.

Tiempo de secado (día)	Café Pergamino % Humedad		Humedad en granos kg	
	Secador Canadá Bandeja 1	Secador Tico Bandeja 1	Secador Bandeja 1	Secador Bandeja 1
0	50	50	7,5	7,5
1	26,1	24,3	3,19	2,95
2	13,5	12	1,89	1,8
3	8,1	7,8	1,215	1,17

Cuadro B.2. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 2, para la corrida piloto.

Tiempo de secado (día)	Café Pergamino % Humedad		Humedad en granos (kg)	
	Secador Canadá Bandeja 2	Secador Tico Bandeja 2	Secador Canadá Bandeja 2	Secador Tico Bandeja 2
0	50	50	7,5	7,5
1	30,4	29,4	4,56	4,41
2	21	19,5	3,15	2,925
3	17,1	15,5	2,565	2,325

Cuadro B.3. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 3, para la corrida piloto.

Tiempo de secado (día)	Café Pergamino % Humedad		Humedad en granos (kg)	
	Secador Canadá Bandeja 3	Secador Tico Bandeja 3	Secador Bandeja 3	Secador Bandeja 3
0	50	50	7,5	7,5
1	30,3	28,2	4,545	4,23
2	25,8	21,4	3,87	3,21
3	20,5	18,4	3,075	2,76

Cuadro B.4. Masa de Humedad en secador al inicio de la prueba, para la corrida piloto.

Tiempo de secado (día)	Humedad total en el secador (kg)	
	Secador Canadá	Secador Tico
0	22,5	22,5
1	12,3	11,595
2	8,91	7,935
3	6,855	6,255

Cuadro B.5. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 1, para la corrida 1.

Tiempo de secado (día)	Café Pergamino % Humedad		Humedad en granos kg	
	Secador Canadá Bandeja 1	Secador Tico Bandeja 1	Secador Canadá Bandeja 1	Secador Tico Bandeja 1
0	50	50	7,5	7,5
1	22	20	3,3	3
2	18	14	2,7	2,1
3	13,3	7,9	1,995	1,185

Cuadro B.6. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 2, para la corrida 1.

Tiempo de secado (día)	Café Pergamino % Humedad		Humedad en granos kg	
	Secador Canadá Bandeja 2	Secador Tico Bandeja 2	Secador Canadá Bandeja 2	Secador Tico Bandeja 2
0	50,0	50,0	7,5	7,5
1	31,6	30,5	4,74	4,575
2	25,4	18,2	3,81	2,73
3	18,3	14,0	2,745	2,1

Cuadro B.7. Porcentaje Humedad de granos de café y humedad en kg, por secador en la bandeja 3, para la corrida 1.

Tiempo de secado (día)	Café Pergamino % Humedad		Humedad en granos kg	
	Secador Canadá Bandeja 3	Secador Tico Bandeja 3	Secador Canadá Bandeja 3	Secador Tico Bandeja 3
0	50	50	7,5	7,5
1	33,8	31,2	5,07	4,68
2	28,4	27,0	4,26	4,05
3	21,9	19,4	3,285	2,91

Cuadro B.8. Peso de Humedad en secador desde el inicio de la prueba en kg de agua, para la corrida 1.

Tiempo de secado (día)	Humedad total en el secador (kg)	
	Secador Canadá	Secador Tico
0	22,5	22,5
1	13,11	12,255
2	10,88	8,97
3	8,73	7,11

Cuadro B.9. Porcentaje de humedad promedio, masa removida en kilogramos, peso de granos de café por día de secado para la corrida piloto.

Tiempo de secado (día)	% de humedad promedio		Masa removida (kg/día)		Peso granos por día de secado (kg)	
	Secador Canadá	Secador Tico	Secador Canadá	Secador Tico	Secador Canadá	Secador Tico
0	50	50	0	0	45	45
1	28,93	27,30	13,3	14,1	31,7	30,9
2	21,43	20,57	4,3	3,8	27,4	27,1
3	15,23	13,90	3,3	3,5	24,1	23,7
4	13,67	12,97	0,8	0,5	23,3	23,2

Cuadro B.10. Masa removida y eficiencia de secado por día de secado para la corrida piloto.

Tiempo de secado (día)	Masa removida (kg/s)		Eficiencia de secado	
	Secador Canadá	Secador Tico	Secador Canadá	Secador Tico
1	$4,63 \times 10^{-4}$	$4,88 \times 10^{-4}$	0,58	0,61
2	$1,49 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-4}$	0,19	0,17
3	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-4}$	0,17	0,18
4	$2,84 \times 10^{-4}$	$1,68 \times 10^{-4}$	0,12	0,07

Cuadro B.11. Porcentaje de humedad promedio, masa removida en kilogramos, peso de granos de café por día de secado para la corrida 1.

Tiempo de secado (día)	% de humedad promedio		Masa removida (kg/día)		Peso granos por día de secado (kg)	
	Secador Canadá	Secador Tico	Secador Canadá	Secador Tico	Secador Canadá	Secador Tico
1	29,13	27,23	13,3	14,1	31,7	30,9
2	23,93	19,73	3,1	4,2	28,7	26,7
3	17,83	13,77	3,3	3,1	25,3	23,6

Cuadro B.12. Masa removida y eficiencia de secado por día de secado para la corrida 1.

Tiempo de secado (día)	Masa removida (kg/s)		Eficiencia de secado	
	Secador Canadá	Secador Tico	Secador Canadá	Secador Tico
1	$4,60 \times 10^{-4}$	$4,89 \times 10^{-4}$	0,72	0,77
2	$1,07 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-4}$	0,21	0,29
3	$1,16 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	0,16	0,15

Cuadro B.13. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 18 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m ³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,1663	0,0437	1006,46	30	0,55
11	1,1626	0,0453	1006,51	34	0,63
1130	1,1554	0,0438	1006,61	35	0,61
12	1,1590	0,0569	1006,56	38	0,89
1230	1,1554	0,0550	1006,61	30	0,68
13	1,1590	0,0591	1006,56	32	0,84
1330	1,1590	0,0535	1006,56	32	0,80
14	1,1554	0,0572	1006,61	32	0,90
1430	1,1554	0,0563	1006,61	30	0,87
15	1,1554	0,0520	1006,61	28	0,94
1530	1,1590	0,0543	1006,56	23	0,97
16	1,1626	0,0532	1006,51	23	1,05
1630	1,1699	0,0535	1006,40	20	1,42
17	1,1807	0,0518	1006,25	15	13,74

Cuadro B.14. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 18 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m ³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,1663	0,0319	1006,46	26	0,35
11	1,1626	0,0331	1006,51	31	0,41
1130	1,1590	0,0287	1006,56	31	0,35

12	1,1554	0,0290	1006,61	34	0,41
1230	1,1554	0,0312	1006,61	34	0,44
13	1,1517	0,0307	1006,66	35	0,48
1330	1,1517	0,0302	1006,66	35	0,49
14	1,1517	0,0307	1006,66	34	0,51
1430	1,1517	0,0311	1006,66	29	0,47
15	1,1554	0,0316	1006,61	27	0,56
1530	1,1590	0,0348	1006,56	21	0,57
16	1,1626	0,0344	1006,51	20	0,59
1630	1,1699	0,0390	1006,40	14	0,74
17	1,1807	0,0407	1006,25	10	6,84

Cuadro B.15. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 19 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m ³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η _c
1030	1,1517	0,0428	1006,66	31	0,57
11	1,1517	0,0488	1006,66	36	0,71
1130	1,1444	0,0459	1006,77	36	0,66
12	1,1408	0,0436	1006,82	37	0,65
1230	1,1408	0,0428	1006,82	38	0,67
13	1,1372	0,0409	1006,87	35	0,63
1330	1,1372	0,0448	1006,87	36	0,74
14	1,1372	0,0422	1006,87	32	0,66
1430	1,1408	0,0436	1006,82	35	0,89
15	1,1444	0,0472	1006,77	30	0,93
1530	1,1481	0,0499	1006,72	26	1,03
16	1,1517	0,0488	1006,66	21	1,05
1630	1,1590	0,0526	1006,56	15	1,25
17	1,1736	0,0555	1006,35	10	11,78

Cuadro B.16. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 19 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m ³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η _c
-------------	-------------------------------	----------------------	--------------	---------	--------------------------------------

1030	1,1554	0,0342	1006,61	31	0,46
11	1,1444	0,0305	1006,77	36	0,45
1130	1,1408	0,0308	1006,82	37	0,46
12	1,1335	0,0302	1006,92	38	0,46
1230	1,1335	0,0306	1006,92	40	0,50
13	1,1335	0,0285	1006,92	37	0,46
1330	1,1335	0,0272	1006,92	38	0,47
14	1,1299	0,0263	1006,98	34	0,44
1430	1,1335	0,0225	1006,92	37	0,49
15	1,1372	0,0286	1006,87	33	0,62
1530	1,1408	0,0317	1006,82	29	0,75
16	1,1481	0,0314	1006,72	25	0,79
1630	1,1554	0,0368	1006,61	21	1,19
17	1,1699	0,0421	1006,40	14	12,53

Cuadro B.17. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 20 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,1444	0,0528	1006,77	33	0,74
11	1,1408	0,0582	1006,82	37	0,87
1130	1,1299	0,0377	1006,98	39	0,59
12	1,1226	0,0307	1007,08	37	0,43
1230	1,1226	0,0299	1007,08	36	0,75
13	1,1226	0,0324	1007,08	34	0,74
1330	1,1408	0,0402	1006,82	30	1,87
14	1,1481	0,0452	1006,72	21	0,83
1430	1,1444	0,0433	1006,77	17	0,35
15	1,1444	0,0524	1006,77	24	0,84
1530	1,1444	0,0532	1006,77	25	1,10
16	1,1481	0,0538	1006,72	23	1,09
1630	1,1590	0,0539	1006,56	16	1,16
17	1,1699	0,0526	1006,40	12	21,27

Cuadro B.18. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 20 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,1444	0,0288	1006,8	35	0,43
11	1,1372	0,0260	1006,9	39	0,40
1130	1,1299	0,0199	1007,0	41	0,33
12	1,1262	0,0215	1007,0	40	0,33
1230	1,1226	0,0194	1007,1	39	0,54
13	1,1262	0,0186	1007,0	39	0,48
1330	1,1372	0,0286	1006,9	34	1,51
14	1,1481	0,0306	1006,7	24	0,64
1430	1,1408	0,0299	1006,8	20	0,29
15	1,1408	0,0265	1006,8	28	0,50
1530	1,1444	0,0300	1006,8	29	0,72
16	1,1481	0,0288	1006,7	27	0,69
1630	1,1590	0,0348	1006,6	21	0,98
17	1,1807	0,0310	1006,3	17	18,51

Cuadro B.19. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida piloto el día 21 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,1408	0,0449	1006,82	19	0,86
11	1,1408	0,0436	1006,82	21	0,87
1130	1,1226	0,0337	1007,08	26	3,95
12	1,1335	0,0383	1006,92	28	1,21
1230	1,1481	0,0478	1006,72	18	1,43
13	1,1554	0,0511	1006,61	15	1,46
1330	1,1626	0,0510	1006,51	14	2,58
14	1,1736	0,0497	1006,35	7	1,29
1430	1,1772	0,0499	1006,30	6	0,48
15	1,1807	0,0514	1006,25	7	1,92
1530	1,1842	0,0000	1006,20	7	0,00
16	1,2931	0,0000	1005,60	6	0,00
1630	1,2931	0,0000	1005,60	5	0,00
17	1,2931	0,0000	1005,60	5	0,00

Cuadro B.20. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida piloto el día 21 de enero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,1444	0,0283	1006,77	20	0,56
11	1,1481	0,0280	1006,72	21	0,57
1130	1,1335	0,0221	1006,92	23	2,29
12	1,1372	0,0226	1006,87	32	0,82
1230	1,1481	0,0314	1006,72	24	1,23
13	1,1554	0,0342	1006,61	20	1,27
1330	1,1626	0,0353	1006,51	17	2,25
14	1,1736	0,0427	1006,35	11	1,74
1430	1,1772	0,0446	1006,30	7	0,54
15	1,1842	0,0400	1006,20	7	1,61
1530	1,1886	0,0000	1006,18	9	0,00
16	1,2931	0,0000	1005,60	7	0,00
1630	1,2931	0,0000	1005,60	6	0,00
17	1,2931	0,0000	1005,60	6	0,00

Cuadro B.21. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 05 de febrero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,170	0,0531	1006,40	24	0,56
11	1,163	0,0497	1006,51	30	0,62
1130	1,155	0,0511	1006,61	33	0,68
12	1,152	0,0505	1006,66	32	1,71
1230	1,159	0,0530	1006,56	28	0,64
13	1,163	0,0545	1006,51	23	1,58
1330	1,159	0,0530	1006,56	25	1,05
14	1,163	0,0545	1006,51	23	1,84
1430	1,159	0,0509	1006,56	25	0,64
15	1,159	0,0504	1006,56	23	0,69
1530	1,166	0,0512	1006,46	18	1,99
16	1,181	0,0536	1006,25	9	1,72
1630	1,181	0,0279	1006,25	8	0,69

17	1,181	0,0027	1006,25	6	0,31
----	-------	--------	---------	---	------

Cuadro B.22. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 05 de febrero del 2014.

Hora	Densidad	Flujo másico	Cp	ΔT	Eficiencia térmica
24h	kg/m³	kg/s	J/kg K	K	η_c
1030	1,174	0,0352	1006,35	17	0,26
11	1,166	0,0315	1006,46	23	0,30
1130	1,159	0,0291	1006,56	28	0,32
12	1,152	0,0285	1006,66	30	0,89
1230	1,155	0,0290	1006,61	26	0,32
13	1,159	0,0330	1006,56	24	0,98
1330	1,159	0,0300	1006,56	23	0,55
14	1,166	0,0346	1006,46	21	1,09
1430	1,159	0,0291	1006,56	23	0,34
15	1,159	0,0330	1006,56	23	0,45
1530	1,166	0,0367	1006,46	21	1,63
16	1,177	0,0336	1006,30	11	1,26
1630	1,181	0,0341	1006,25	8	0,84
17	1,189	0,0004	1006,18	5	0,04

Cuadro B.23. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 06 de febrero del 2014.

Hora	Densidad	Flujo másico	Cp	ΔT	Eficiencia térmica
24h	kg/m³	kg/s	J/kg K	K	η_c
1030	1,163	0,0427	1006,51	9	0,15
11	1,155	0,0537	1006,61	15	0,61
1130	1,152	0,0536	1006,66	22	0,44
12	1,148	0,0521	1006,72	26	0,66
1230	1,144	0,0485	1006,77	33	1,03
13	1,144	0,0541	1006,77	28	1,70
1330	1,137	0,0554	1006,87	33	3,07
14	1,144	0,0009	1006,77	37	0,01

1430	1,152	0,0017	1006,66	40	0,19
15	1,177	0,0124	1006,30	40	1,71
1530	1,166	0,0604	1006,46	38	8,70
16	1,174	0,0585	1006,35	30	9,63
1630	1,181	0,0009	1006,25	29	0,21

Cuadro B.24. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 06 de febrero del 2014.

Hora	Densidad	Flujo másico	Cp	ΔT	Eficiencia térmica
24h	kg/m³	kg/s	J/kg K	K	η_c
1030	1,166	0,0346	1006,46	20	0,27
11	1,163	0,0323	1006,51	29	0,69
1130	1,159	0,0300	1006,56	25	0,29
12	1,155	0,0321	1006,61	29	0,46
1230	1,148	0,0284	1006,72	33	0,60
13	1,148	0,0288	1006,72	34	1,11
1330	1,148	0,0280	1006,72	34	1,57
14	1,148	0,0004	1006,72	32	0,01
1430	1,163	0,0000	1006,51	28	0,00
15	1,166	0,0000	1006,46	23	0,00
1530	1,166	0,0376	1006,46	20	2,78
16	1,177	0,0384	1006,30	14	2,95
1630	1,184	0,0000	1006,20	12	0,00

Cuadro B.25. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 07 de febrero del 2014.

Hora	Densidad	Flujo másico	Cp	ΔT	Eficiencia térmica
24h	kg/m³	kg/s	J/kg K	K	η_c
1030	1,144	0,0459	1006,77	37	0,73
11	1,137	0,0422	1006,87	38	0,59
1130	1,141	0,0501	1006,82	42	0,74

12	1,137	0,0495	1006,87	38	0,72
1230	1,144	0,0498	1006,77	39	2,85
13	1,144	0,0519	1006,77	26	2,46
1330	1,141	0,0488	1006,82	31	0,61
14	1,141	0,0475	1006,82	39	4,79
1430	1,152	0,0527	1006,66	14	0,31
15	1,152	0,0574	1006,66	20	0,67
1530	1,148	0,0517	1006,72	24	0,83
16	1,155	0,0490	1006,61	21	7,50
1630	1,184	0,0000	1006,20	15	0,00

Cuadro B.26. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 07 de febrero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	Cp J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_c
1030	1,159	0,0296	1006,56	31	0,39
11	1,152	0,0281	1006,66	32	0,33
1130	1,152	0,0307	1006,66	36	0,39
12	1,148	0,0276	1006,72	35	0,36
1230	1,152	0,0354	1006,66	37	1,95
13	1,155	0,0303	1006,61	27	1,47
1330	1,148	0,0276	1006,72	28	0,31
14	1,152	0,0259	1006,66	37	2,48
1430	1,159	0,0304	1006,56	20	0,25
15	1,159	0,0330	1006,56	21	0,39
1530	1,159	0,0283	1006,56	23	0,44
16	1,163	0,0301	1006,51	26	5,73
1630	1,181	0,0000	1006,25	17	0,00

Cuadro B.27. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector tico durante la corrida 1 el día 08 de febrero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	C_p J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_e
1030	1,141	0,0462	1006,82	33,0	0,5
11	1,134	0,0434	1006,92	36,5	1,7
1130	1,148	0,0375	1006,72	38,0	2,9
12	1,144	0,0451	1006,77	40,5	1,8
1230	1,166	0,0494	1006,46	40,0	2,5
13	1,134	0,0404	1006,92	37,5	0,7
1330	1,123	0,0404	1007,08	45,0	1,4
14	1,123	0,0413	1007,08	37,5	2,0
1430	1,141	0,0488	1006,82	37,0	2,2
15	1,141	0,0501	1006,82	32,0	2,7
1530	1,148	0,0521	1006,72	25,0	0,8
16	1,152	0,0536	1006,66	17,5	6,1
1630	1,293	0,0567	1005,60	10,0	6,3

Cuadro B.28. Densidad, flujo másico, capacidad calorífica del aire, delta de temperatura entre la entrada y salida del colector solar y eficiencia térmica, para colector Canadá durante la corrida 1 el día 08 de febrero del 2014.

Hora 24h	Densidad kg/m³	Flujo másico kg/s	C_p J/kg K	ΔT K	Eficiencia térmica η_e
1030	1,163	0,0301	1006,51	28,0	0,3
11	1,155	0,0286	1006,61	28,0	0,9
1130	1,170	0,0382	1006,40	32,0	2,5
12	1,163	0,0283	1006,51	35,5	1,0
1230	1,152	0,0341	1006,66	36,0	1,5
13	1,148	0,0263	1006,72	34,5	0,4
1330	1,144	0,0270	1006,77	42,0	0,9
14	1,144	0,0335	1006,77	36,0	1,6
1430	1,152	0,0289	1006,66	37,5	1,3
15	1,152	0,0294	1006,66	32,0	1,6
1530	1,155	0,0282	1006,61	27,5	0,5
16	1,155	0,0329	1006,61	23,0	5,0
1630	1,293	0,0369	1005,60	13,5	5,5

Cuadro B.29. Radiación promedio por día de secado para la prueba piloto.

Radiación Promedio Prueba Piloto				
(W/m²)				
Día 1 18/01/14	Día 2 19/01/14	Día 3 20/01/14	Día 4 21/01/14	Día 5 22/01/14
950,74	929,29	800,37	275,06	1069,76

Cuadro B.30. Radiación promedio por día de secado para la corrida 1.

Radiación Promedio Corrida 1			
(W/m²)			
Día 1 05/02/14	Día 2 06/02/14	Día 3 07/02/14	Día 4 08/02/14
749,97	599,36	844,07	614,54

C. Memorias de Cálculos.

C.1 Interpolación de densidad del aire.

La densidad del aire se encuentra interpolando de las tablas de propiedad del libro de [CITATION Yun06 \l 1033], para presiones a 1 atm, hay un leve error debido a la variación en la presión atmosférica, pero este no es significativo.

$$\rho_a = \frac{T_a - T_1}{T_2 - T_1} * (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 \quad \text{C.1}$$

Utilizando los datos de las tablas, obtenemos:

$$\rho_a = \frac{42,2 - 41}{43 - 41} * (1,1190 - 1,1262) + 1,1262 = 1,1226 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dato que se tabula en el cuadro A.3 fila 9, columna 4 y su resultado aparece en el cuadro B.17 fila 6, columna 2.

C.2 Interpolación de la capacidad calorífica del aire.

Similar a la interpolación de la densidad del aire, la capacidad calorífica se encuentra interpolando los datos respecto a la temperatura ambiente registrada en ese momento. Se observa que esta no varía significativamente dentro del rango de temperaturas dentro de las cuales trabaja el secador solar, lo cual justifica que se utilice solamente la temperatura de entrada para ambos secadores.

$$C_{pa} = \frac{T_a - T_1}{T_2 - T_1} * (C_{p2} - C_{p1}) + C_{p1} \quad \text{C.2}$$

Utilizando los datos de las tablas, obtenemos:

$$C_{pa} = \frac{42,2 - 41}{43 - 41} * (1007,1 - 1007,0) + 1007,1 = 1007,1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Dato que se tabula en el cuadro A.3 fila 9, columna 4 y su resultado aparece en el cuadro B.17 fila 6, columna 4.

C.4 Flujo másico de aire a la salida del secador

El flujo másico de aire se calcula en kg de aire por segundo y se determina multiplicando la velocidad promedio de salida, por el área de salida por la densidad del aire de salida.

$$M_a = v_s * A_s * \rho_a \quad \text{C.3}$$

El flujo másico de aire se utiliza en la fórmula de la eficiencia térmica y para el secador tico el día 8 de febrero del 2014 a las 12 horas para el secador tico se calcula. Datos de velocidad del aire del cuadro A.17 Fila 10 Columna 6. Área de salida y Datos de densidad del aire de cuadro B.27 fila 6 columna 2.

$$M_a = 1,12 * 0,0375 * 1,144 = 0,0451 \frac{kg}{s} \quad \text{C.3}$$

Resultado aparece en el cuadro B.27 fila 6, columna 4.

C.4 Humedad en kg de agua remanentes en cada bandeja.

Los kg de agua remanentes por día de secado son es la cantidad total de agua en kg que queda en cada una de las bandejas, después de un día completo de secado, hasta la finalización de la prueba por ese día. Esta se calcula como el porcentaje de humedad en base húmeda por la masa inicial que se coloca en cada bandeja al inicio de la prueba.

$$M_w = \frac{\%H_{B.H.} * M_i}{100} \quad \text{C.4}$$

Para el cálculo del día se toman los datos del cuadro B.1 fila3 columna 2 y cuadro A.26 fila3 columna 2.

$$M_w = \frac{21,3 * 15}{100} = 3.195 \text{ kg}$$

Dato que se muestra en el cuadro B.1 fila 3 columna 4.

C.5 Humedad promedio.

La humedad promedio en el secador se determina sumando el porcentaje de humedad en cada bandeja dividido entre la cantidad de bandejas en el secador.

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^n H_1 + H_2 \dots H_n}{n} \quad \text{C.5}$$

Los datos para el día 18 de enero del 2014. Los datos se toman de, Cuadro B.1 fila 3 columna 2, Cuadro B.2 fila 3 columna 2 y cuadro B.3 fila 3 columna 2.

$$H_p = \frac{26,2 + 30,4 + 30,3}{3} = 28,9\%$$

Resultado que aparece en el cuadro B.9 fila 3, columna 2.

C.6 Radicación promedio.

La radiación promedio recibida por el colector se calcula sumando todas las mediciones de radiación registradas durante la prueba, divididas entre el número de mediciones totales durante ese día.

$$I_p = \frac{\sum_{i=1}^n I_1 + I_2 \dots I_n}{n} \quad \text{C.6}$$

Los datos de cada una de las radiaciones se extrajeron del cuadro A.3 del día 20 de enero del 2014 a partir de las 10:30 a.m. a partir de donde se realiza el promedio de los datos.

$$I_p = \frac{1222+1309+1320+1389+741,2+787,7+339,2+589,8+1096+790,4+625+587,3+393,2+15}{14} = 800$$

C.7 Masa de agua removida en kilogramos por día.

La masa de agua removida por día de secado se determina multiplicando la masa total de café al iniciar la corrida por la diferencia de humedades, entre cien menos la humedad con la cual se terminó la corrida al final del día.

$$M_w = \frac{M_t (\% H_{p1} - \% H_{p2})}{(100 - \% H_{p2})} \quad \text{C.7}$$

En este cálculo los datos se toman de: Cuadro A.26 fila 9 columna 2, Cuadro B.9 fila 2 columna 2 y Cuadro B.9 fila 3 columna 2. Su resultado se digita en el cuadro B.9 fila 3 columna 4.

$$M_w = \frac{45 * (50 - 28,93)}{(100 - 28,93)} = 13,341 \text{ kg}$$

C.8 Cálculo de masa removida por segundo.

Esta se calcula tomando la humedad removida por día de secado dividida entre la cantidad de horas de la prueba durante ese día por la cantidad de segundo que hay en una hora.

$$D = \frac{M_w}{t} \quad \text{C.8}$$

Los valores para este cálculo se encuentran en: Cuadro B.9 fila 3 columna 4, dividido entre el lapso de duración de la prueba en horas y la cantidad de segundos en una hora.

$$D = \frac{13,341}{8 * 3600} = 4,632 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Resultado que se muestra en cuadro B.10 fila 2 columna 2.

C.9 Cálculo de la eficiencia de secado.

Es la energía que se requiere para evaporar la cantidad de agua que se extrae de los granos dividida entre la energía que recibe el secador solar, para calcularla se toma la cantidad de agua removida por segundo y se multiplica por la entalpia de cambio de fase del agua dividida entre la energía radiación solar por el área del colector.

$$n_s = \frac{D h_{fg}}{I_c A_c} \quad \text{C.9}$$

Datos para este ejemplo se toman de la corrida piloto el día 2, correspondientemente: Cuadro B.10 fila 2 columna 2, Cuadro B.29 fila 4 columna 2, Cuadro A.26 fila 2 columna 6.

$$n_s = \frac{4,632 \times 10^{-4} * 2257 * 1000}{929,29 * 1,91} = 0,58$$

C.10 Cálculo de la eficiencia térmica del colector solar.

Para determinar la eficiencia térmica se multiplica la masa de aire que sale del colector solar por la capacidad calorífica del aire por la diferencia de temperaturas de entrada y salida del colector solar esto se divide entre la radiación solar y el área de recepción de radiación solar.

$$n_T = \frac{m_a C_p (T_s - T_e)}{I_c A_c} \quad \text{C.10}$$

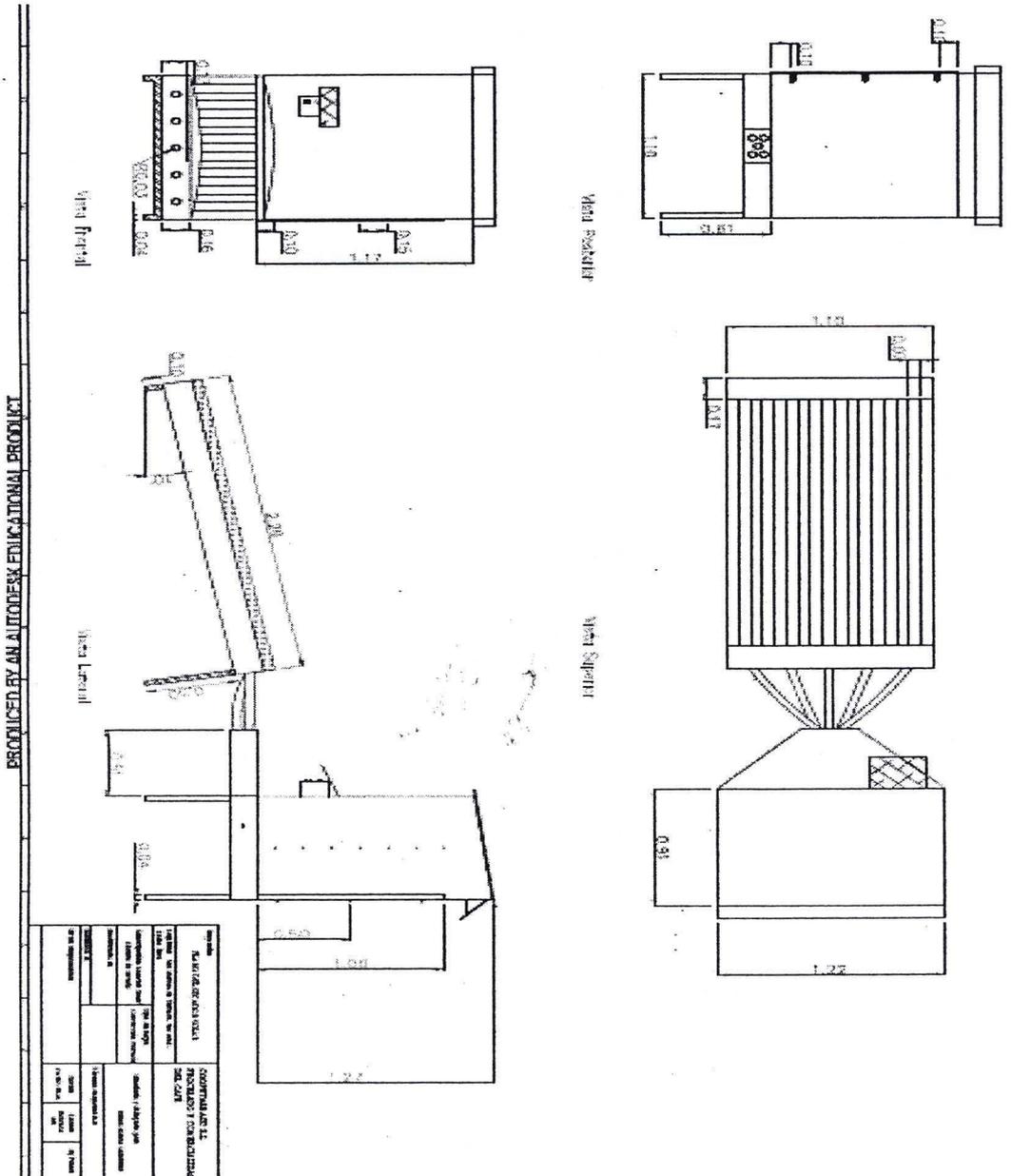
Datos que se toman de los cuadros B.13 fila 8 columna 3, Cuadro B.13 fila 8 columna 4, Cuadro B.13 fila 8 columna 5, Cuadro A.1 fila 13 columna 2 y Cuadro A.26 fila 2 columna 6.

$$n_T = \frac{0,0591 * 1006,56 * 32}{1174 * 1,91} = 0,84$$

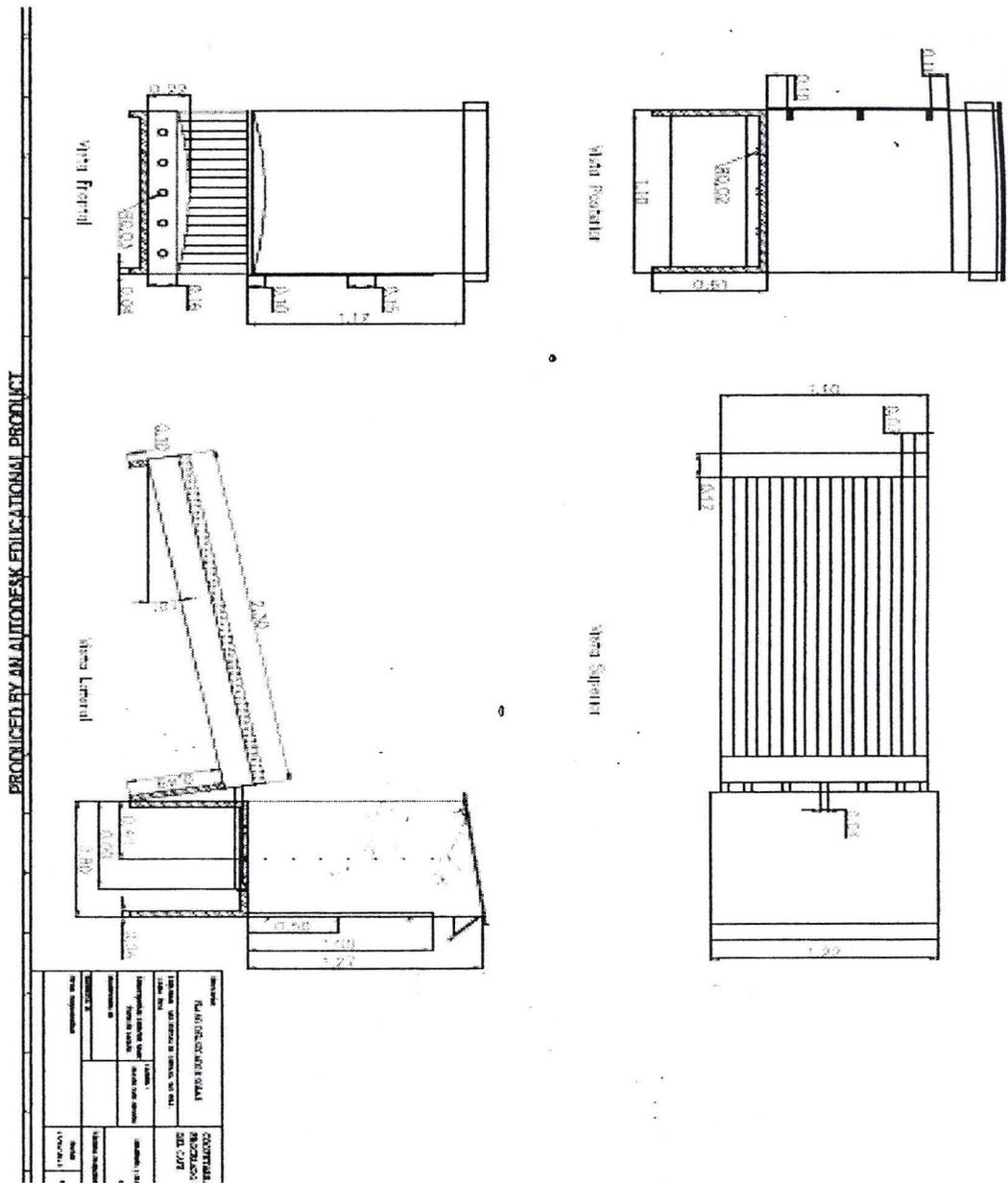
Resultado que se encuentra en el cuadro B.13 fila 8 Columna 6.

ANEXOS

Anexo 1. Plano de secador Modificado.

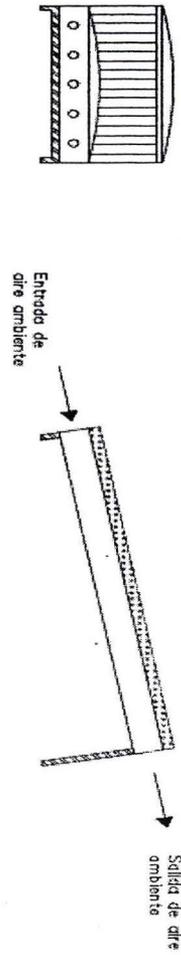


Anexo 2. Plano de secador de convección natural utilizado como punto de partida.

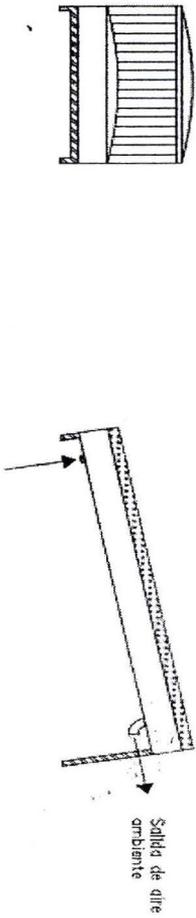


Anexo 3. Plano de colectores solares utilizados.

Colector Tico contruido en Copetarrazú

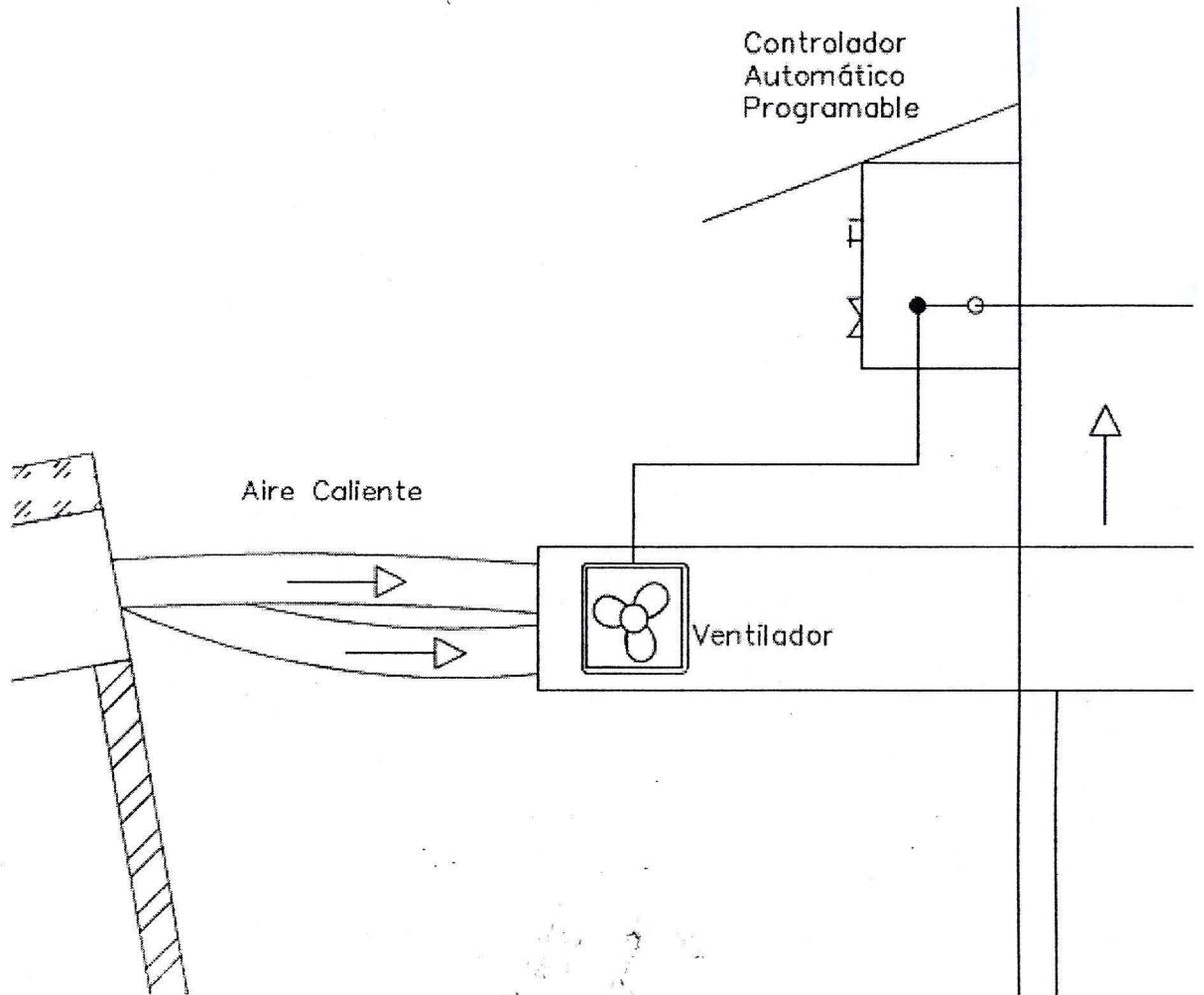


Colector Tico importado contruido en Canadá



Proyecto:	PLANO DEL SECAADOR SOLAR	COPETARRAZÚ
Escuela:	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COPIPETARRAZÚ	DEL CAJÓN
Asignatura:	MECÁNICA DE FLUIDOS	SECAADOR
Alumno:	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX
Fecha:	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX

Anexo 4. Diagrama de Control automático del secador solar modificado.



Anexo 5. Presupuesto de un secador solar modificado.

Proveedor	Cantidad	Descripción	P. Unitario	Desglose	Total
Electro MAZ LTDA	1	Controlador de Temperatura PID	₺ 35.005	₺ 35.005	
	1	Termocupla tipo J	₺ 7.602	₺ 7.602	
	1	Gabinete	₺ 3.725	₺ 3.725	
	1	Luz piloto	₺ 1.014	₺ 1.014	
	1	Ventilador 107CFM	₺ 13.197	₺ 13.197	
	2	Manguito prensa cable 11MM	₺ 96	₺ 193	
	1	Manguito prensa cable 6MM	₺ 76	₺ 76	
	1	Interruptor	₺ 659	₺ 659	
	1	Relay 4 pines 110VAC	₺ 1.693	₺ 1.693	
			Suma	₺ 63.164	
		Descuento	₺ 3.501		
		Imp. D. ventas	₺ 7.756		
		Sub. Total		₺	67.419
Ferretería Coopetarrazú	2	Lamina Plywood 5 mm X 2,44 m X 1,22 m	₺ 35.240	₺ 70.480	
	2	Lamina Poliestireno 5,08 cm X 2,44 m X 1,22 m	₺ 3.500	₺ 7.000	
	50	Tornillo Puntabroca 6,35 cm	₺ 35	₺ 1.750	
	6	Silicone sellante 300 ml	₺ 3.250	₺ 19.500	
	1	Manguera plástica 5 m X 5 cm	₺ 4.320	₺ 4.320	
			Suma	₺ 103.050	
		Descuento	₺ -		
		Imp. D. ventas	₺ 13.397		
		Sub. Total		₺	116.447
Mano de Obra	20	Hora de mano de Obra carpintero	₺ 2.200	₺ 44.000	
		Suma	₺ 44.000		
		Sub. Total		₺	44.000
Total				₺	227.866

Anexo 6. Cotización de MAZCR para 1 secador.

 <p>MAZ cr.com</p> <p><i>Atendidos con la Industria</i></p>	<p>ELECTRO MAZ LTDA</p> <p>3-102-186-909</p> <p>75m. Este de la Antigua Plywood, Colima de Tibas, San Jose CR.</p> <p>TELS: 2236-9038, 2235-9706 FAX: 2235-6666 WWW.MAZCR.COM</p>																																																		
	<p>PROFORMA No. 10018340</p>																																																		
<p>Cliete: COOPETARRAZU</p> <p>Tel: _____ Fax: _____</p> <p>Contacto: _____</p> <p>Dirección: _____</p> <p>o</p>	<p>TIPO CLIENTE: CONTADO</p> <p>ORDEN COMPRA: _____</p> <p>TECNICO ASESOR: LISETH CALDERON</p> <p>FECHA: 14/10/2013</p> <p>MONEDAD: CRC</p> <p>USUARIO: L CALDERON</p>																																																		
<p>Observaciones:</p>																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">LINCOD.</th> <th style="text-align: left;">CANTIDAD</th> <th style="text-align: left;">DESCRIPCION</th> <th style="text-align: right;">P. UNITARIO</th> <th style="text-align: right;">TOTAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>2-34-0129</td> <td>1.00 CONTROLADOR DE TEMPERATURA DIGITAL 48X48 100-240 VAC MD-SSR 1</td> <td style="text-align: right;">35,005.37</td> <td style="text-align: right;">35,005.37</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1-47-0002</td> <td>1.00 TERMOCUPLA TIPO J 5/16 X 10 MM BAYONETA/FIHING 2 MTS CABLE (05411)</td> <td style="text-align: right;">7,602.15</td> <td style="text-align: right;">7,602.15</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3-86-0003</td> <td>1.00 GABINETE TADU M.EX:135X145X107 M.INT:115X125X90 GRIS (01064)(1084)</td> <td style="text-align: right;">3,725.05</td> <td style="text-align: right;">3,725.05</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>3-80-0099</td> <td>1.00 LUZ PILOTO 110 VAC 22 MM VERDE (07312)(7312)</td> <td style="text-align: right;">1,013.62</td> <td style="text-align: right;">1,013.62</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1-06-0024</td> <td>1.00 VENTILADOR 12 X 12 X 3.8CM 107 CFM 115VAC 0.21/0.18A (01809)(1809)</td> <td style="text-align: right;">13,197.33</td> <td style="text-align: right;">13,197.33</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>3-20-0174</td> <td>2.00 MANGUITO PRENSA CABLE PLASTICO 11MM ROSCA 3/8 NPT (01092)(1092)</td> <td style="text-align: right;">96.29</td> <td style="text-align: right;">192.59</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>3-20-0172</td> <td>1.00 MANGUITO PRENSA CABLE PLASTICO 7MM ROSCA 1/16 NPT (01090)(1090)</td> <td style="text-align: right;">76.02</td> <td style="text-align: right;">76.02</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>3-38-0175</td> <td>1.00 INTERRUPTOR DE EMPOTRAR 2P X 16A 125VAC ON-OFF BOTON CAPUCHON LUZ</td> <td style="text-align: right;">658.83</td> <td style="text-align: right;">658.83</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>3-14-0044</td> <td>1.00 RELAY 4 PINES DE PODER 110VAC 30A (00120)(0120)</td> <td style="text-align: right;">1,692.75</td> <td style="text-align: right;">1,692.75</td> </tr> </tbody> </table>	LINCOD.	CANTIDAD	DESCRIPCION	P. UNITARIO	TOTAL	3	2-34-0129	1.00 CONTROLADOR DE TEMPERATURA DIGITAL 48X48 100-240 VAC MD-SSR 1	35,005.37	35,005.37	4	1-47-0002	1.00 TERMOCUPLA TIPO J 5/16 X 10 MM BAYONETA/FIHING 2 MTS CABLE (05411)	7,602.15	7,602.15	5	3-86-0003	1.00 GABINETE TADU M.EX:135X145X107 M.INT:115X125X90 GRIS (01064)(1084)	3,725.05	3,725.05	6	3-80-0099	1.00 LUZ PILOTO 110 VAC 22 MM VERDE (07312)(7312)	1,013.62	1,013.62	7	1-06-0024	1.00 VENTILADOR 12 X 12 X 3.8CM 107 CFM 115VAC 0.21/0.18A (01809)(1809)	13,197.33	13,197.33	8	3-20-0174	2.00 MANGUITO PRENSA CABLE PLASTICO 11MM ROSCA 3/8 NPT (01092)(1092)	96.29	192.59	9	3-20-0172	1.00 MANGUITO PRENSA CABLE PLASTICO 7MM ROSCA 1/16 NPT (01090)(1090)	76.02	76.02	10	3-38-0175	1.00 INTERRUPTOR DE EMPOTRAR 2P X 16A 125VAC ON-OFF BOTON CAPUCHON LUZ	658.83	658.83	11	3-14-0044	1.00 RELAY 4 PINES DE PODER 110VAC 30A (00120)(0120)	1,692.75	1,692.75	
LINCOD.	CANTIDAD	DESCRIPCION	P. UNITARIO	TOTAL																																															
3	2-34-0129	1.00 CONTROLADOR DE TEMPERATURA DIGITAL 48X48 100-240 VAC MD-SSR 1	35,005.37	35,005.37																																															
4	1-47-0002	1.00 TERMOCUPLA TIPO J 5/16 X 10 MM BAYONETA/FIHING 2 MTS CABLE (05411)	7,602.15	7,602.15																																															
5	3-86-0003	1.00 GABINETE TADU M.EX:135X145X107 M.INT:115X125X90 GRIS (01064)(1084)	3,725.05	3,725.05																																															
6	3-80-0099	1.00 LUZ PILOTO 110 VAC 22 MM VERDE (07312)(7312)	1,013.62	1,013.62																																															
7	1-06-0024	1.00 VENTILADOR 12 X 12 X 3.8CM 107 CFM 115VAC 0.21/0.18A (01809)(1809)	13,197.33	13,197.33																																															
8	3-20-0174	2.00 MANGUITO PRENSA CABLE PLASTICO 11MM ROSCA 3/8 NPT (01092)(1092)	96.29	192.59																																															
9	3-20-0172	1.00 MANGUITO PRENSA CABLE PLASTICO 7MM ROSCA 1/16 NPT (01090)(1090)	76.02	76.02																																															
10	3-38-0175	1.00 INTERRUPTOR DE EMPOTRAR 2P X 16A 125VAC ON-OFF BOTON CAPUCHON LUZ	658.83	658.83																																															
11	3-14-0044	1.00 RELAY 4 PINES DE PODER 110VAC 30A (00120)(0120)	1,692.75	1,692.75																																															
<p>DE: c3500 a c5000 EN MOTO, 25000 A c10000 EN CARRO SEGUN KILOMETRAJE (AREA METROPOLITANA)</p> <p>Haga constar que las descripciones de importaciones o fabricación de resistencias aquí descritas son correctas así como las cantidades solicitadas</p> <p style="text-align: center;">Firma Cliente: _____</p> <p>BANCO NACIONAL DOLARES 100-00-000-617343-9 BANCO NACIONAL COLONES 100-01-008-215349-4 BANCO COSTA RICA (COLONES) 001-0220967-8 BAC SAN JOSE COLONES 900711763 BAC SAN JOSE DOLARES 903558136</p> <p>50% DE ADELANTO CLIENTE DE CONTADO POR FABRICAR CLIENTES DE CREDITO MONTO MINIMO \$20 FAVOR INDICAR EL NUMERO DE PROFORMA EN SU ORDEN DE COMPRA NO SE ACEPTAN CHEQUES</p> <p>Al otorgarse una orden de compra o recibo de dinero y bienes en esta proforma por entendido que el cliente acepta las características técnicas y demás del Producto por lo que no se aceptan cambios o devoluciones</p>																																																			
<p>OFERTA VALIDA POR 8 DIAS HABILES</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">SUB-TOTAL</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">€</td> <td style="width: 35%; text-align: right;">63,163.75</td> </tr> <tr> <td>DESC:</td> <td style="text-align: center;">€</td> <td style="text-align: right;">3,500.54</td> </tr> <tr> <td>IMP.VENTAS:</td> <td style="text-align: center;">€</td> <td style="text-align: right;">7,756.22</td> </tr> <tr> <td>TRANSPORTE:</td> <td style="text-align: center;">€</td> <td style="text-align: right;">0.00</td> </tr> <tr> <td>TOTAL:</td> <td style="text-align: center;">€</td> <td style="text-align: right;">67,419.41</td> </tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: small;">SESENTA Y SIETE MIL CUATROCIENTOS DIECINUEVE COLONES CON 41/100</p>	SUB-TOTAL	€	63,163.75	DESC:	€	3,500.54	IMP.VENTAS:	€	7,756.22	TRANSPORTE:	€	0.00	TOTAL:	€	67,419.41																																			
SUB-TOTAL	€	63,163.75																																																	
DESC:	€	3,500.54																																																	
IMP.VENTAS:	€	7,756.22																																																	
TRANSPORTE:	€	0.00																																																	
TOTAL:	€	67,419.41																																																	
<p>Página 1 de 1</p>																																																			