



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Doctorado

Secador híbrido solar-gas para granos de café

**presentada por
MC. Danier Santizo Díaz**

**como requisito para la obtención del grado de
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

**Director de tesis
Dra. José Jassón Flores Prieto**

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2025.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor., 07/agosto/2025

Oficio No. SAC/195/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

DANIER SANTIZO DÍAZ
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

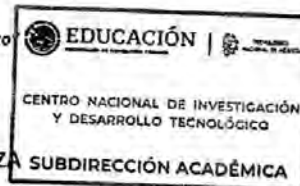
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Secador híbrido solar-gas para granos de café"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 61400, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4164.
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet@tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., a 01 de julio de 2025

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

AT'n: **DR. MIGUEL ANGEL CHAGOLLA ARANDA**
PRESIDENTE DEL CLAUSTRO DOCTORAL
DEL DEPARTAMENTO DE ING. MECÁNICA

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del estudiante **Danier Santizo Díaz** manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado **"Secador híbrido solar-gas para granos de café"** realizado bajo la dirección de **Dr. José Jassón Flores Prieto**, el trabajo se ACEPTA para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE

DR. MIGUEL ANGEL CHAGOLLA ARANDA
CENIDET

DR. RAFAEL CAMPOS AMEZCUA
CENIDET

DR. JOSÉ JASSÓN FLORES PRIETO
CENIDET

DRA. SARA LILIA MOYA ACOSTA
CENIDET

DR. Hugo Estrada Esquivel
CENIDET

c.c.p: Mtra. Verónica Sotelo Boyas Jefa del Departamento de Servicios Escolares
c.c.p: Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza Subdirector Académico
c.c.p: Expediente



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Intermado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2108,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet@tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Agradecimientos

Dios, YHWH, gracias por darme un espíritu de valentía, por ser mi fortaleza en este proyecto de investigación, que, sin duda alguna, este proyecto ha sido parte del propósito de vida y de tu plan perfecto.

Agradezco a mi asesor **Dr. José Jassón Flores Prieto** por transmitir su conocimiento y experiencia de forma profesional a este proyecto de investigación científica; que, sin duda alguna, este proyecto estuvo acompañado de motivaciones, emociones, aprendizajes y retos, que forjaron el carácter, la forma de pensar, analizar y ver la vida, gracias Dr.

Agradezco a mi comité revisor, Dra. Sara Lilia Moya Acosta, Dr., Rafael Campos Amezcua, Dr., Miguel Ángel, Chagolla Aranda, y Dr., Hugo Estrada Esquivel, que, sin duda alguna, cada comentario y observación realizado contribuyó al mejoramiento del proyecto de investigación científica.

Agradezco a mis padres Osiel Santizo Villatoro y Eldaì Adalila Díaz López, y hermanos quienes forman parte de mis motivaciones más influyentes sobre cada reto y logro, también, por el ejemplo de esfuerzo y valentía.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la oportunidad de poder continuar con mi formación académica.

Sra. Roció Salazar Ruiz agradezco su apoyo incondicional y amistad.

A mi equipo de trabajo del Laboratorio de Energía Solar, gracias por formar parte de este proyecto de investigación, por lo comentarios que ayudaron a mejorar esta tesis doctoral, así también, a mis compañeros y amigos todo CENIDET, gracias.

Contenido	pág.
Lista de Figuras	I
Lista de Tablas	II
Nomenclatura	II
Resumen	5
Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Generalidades	8
1.1.1 Importancia del café	8
1.1.2 Producción de café en México	8
1.1.3 Importancia de optimizar la energía específica	14
1.1.4 Oportunidades del secado solar de café en la Sierra Mariscal	15
1.2 Estado del arte	16
1.2.1 Calidad del café	16
1.2.2 Métodos de secado de café (protocolo, lugares, y combustibles)	18
1.2.3 Tiempos de secado en relación con la capacidad de volumen de secado y espesores de cama	20
1.2.4 Consumos térmicos-económicos y optimización energéticos	26
1.2.5 Conclusión del estado del arte	27
1.2.7 Hipótesis	29
1.3 Objetivos	30
1.3.1 Objetivo general	30
1.3.2 Objetivos específicos	30
1.3.3 Alcances	31
1.3.4 Productos	31
1.4 Estructura de Tesis	32
Capítulo 2. Materiales y método	33
2.1 Fundamentos teóricos	34
2.2 Caso de estudio	35
2.2.1 Selección de muestra de café, condiciones ambientales y método de secado ..	35
2.2.2 Selección de métodos de secado para el caso de referencia	37

2.2.3 Cinética de secado.....	42
2.2.4 Propuesta de sistema de secado híbrido.....	44
2.3. Método de optimización termo-económica del secador híbrido (FS_h , C_{sc} , P_b).....	46
2.3.1 Modelo térmico calentadores solares (Qu_{ag} y Qu_{ai})	51
2.3.2 Modelo de optimización de calentador híbrido solar agua-aire-gas (FS_h)	54
2.3.3 Modelo económico costos de secado y periodo de recuperación de la inversión	56
Capítulo 3. Construcción de estrategias de optimización	60
3.1. Construcción del simulador térmico y económico.....	61
3.1.1 Simulador térmico	61
3.1.2 Simulador económico	66
3.2 Validación del simulador térmico y económico	68
3.2.1 Simulador térmico	68
3.2.2 Simulador económico	72
3.3 Estrategia de optimización térmica del calentador híbrido solar-gas.....	74
3.3.1 Estrategia de optimización térmica del calentador solar híbrido	75
3.3.2 Estrategia de optimización del calentador solar-agua con almacenamiento $SR-SC_{ag}$	78
3.3.3 Estrategia de optimización del calentador del calentador solar-aire $SR-SC_{ai}$..	79
Capítulo 4. Resultados	81
4.1 Análisis estadístico de correlación de Pearson y de importancia	82
4.2 Nomogramas de diseño del caso de estudio (FS_h y Qu_h)	84
4.2.1 Nomograma de diseño de calentador de agua.....	84
4.1.2 Nomograma de diseño del calentador de aire.....	87
4.1.3 Nomograma de diseño del calentador híbrido solar-gas.....	89
4.2 Comparativo económico patio, invernadero e híbrido (C_{sc} y P_b)	91
Capítulo 5. Conclusiones	93
5.1 Conclusiones.....	94
5.1 Recomendaciones para trabajos futuros.....	96
Referencias	97

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.1</i>	<i>Producción de café cereza en México, 2008/09 – 2018/19 (Millones de toneladas)</i>
<i>Figura 1.2</i>	<i>Producción de café en Chiapas</i>
<i>Figura 1.3</i>	<i>Porcentaje de producción de café por municipios de la Sierra Mariscal</i>
<i>Figure 2.1</i>	<i>Condiciones ambientales</i>
<i>Figura 2.2</i>	<i>Métodos de secado de referencia</i>
<i>Figura 2.3</i>	<i>Flujos de calor en la cama de café en patio</i>
<i>Figura 2.4</i>	<i>Flujos de calor en camas de secado en invernadero</i>
<i>Figura 2.5</i>	<i>Modelo físico del secador híbrido solar-gas propuesto</i>
<i>Figura 2.6</i>	<i>Optimización de la propuesta tecnológica</i>
<i>Figura 2.7</i>	<i>Modelo físico del sistema de secado propuesto</i>
<i>Figura 3.1</i>	<i>Calentador solar-agua con almacenamiento térmico</i>
<i>Figura 3.2</i>	<i>Calentador solar-aire</i>
<i>Figura 3.3</i>	<i>Sistema híbrido solar-agua-gas</i>
<i>Figura 3.4</i>	<i>Simulador económico</i>
<i>Figura 3.5</i>	<i>Validación del calentador solar-agua con almacenamiento</i>
<i>Figura 3.6</i>	<i>Validación del tanque de almacenamiento térmico con T_7</i>
<i>Figura 3.7</i>	<i>Validación del calentador solar-aire</i>
<i>Figura 3.8</i>	<i>Datos simulados y experimentales del VPN</i>
<i>Figura 3.9</i>	<i>Método de optimización térmica del calentador solar híbrido</i>
<i>Figura 3.10</i>	<i>SR-SC_{ag} de optimización térmica del calentador solar-agua con almacenamiento</i>
<i>Figura 3.11</i>	<i>SR-SC_{ai} de optimización térmica del calentador solar-solar</i>
<i>Figura 4.1</i>	<i>Análisis estadístico de correlación de Pearson e importancia sobre las figuras de mérito</i>
<i>Figura 4.2</i>	<i>Nomogramas de diseño del calentador de agua y almacenamiento térmico</i>
<i>Figura 4.3</i>	<i>Nomograma de diseño del calentador solar-aire</i>
<i>Figura 4.4</i>	<i>Nomograma de diseño del calentador híbrido solar-agua-gas</i>
<i>Figura 4.5</i>	<i>Optimización económica</i>

Lista de Tablas

		Pág.
Tabla 1.1	<i>Estados productores de café</i>	11
Tabla 1.2	<i>Regiones cafetaleras de Chiapas</i>	12
Tabla 2.1	<i>Encuesta experimental de tiempo, cantidad y costos de secado en campo</i>	39
Tabla 2.2.	<i>Suministro de calor según el requerimiento solar</i>	45
Tabla 3.1	<i>Características de los componentes del sistema solar-agua con almacenamiento.</i>	65
Tabla 3.2.	<i>Características de los componentes del calentador solar-aire</i>	66
Tabla 3.3	<i>Condiciones ambientales de los días de prueba del calentador solar-agua</i>	69
Tabla 3.4	<i>Condiciones ambientales de los días de prueba del calentador solar-aire</i>	72
Tabla 3.5	<i>Costos unitarios del caso de referencia</i>	73
Tabla 3.6	<i>Simulador económico</i>	73

Nomenclatura

parámetro	Descripción	Unidad
a_0	Primer término de la ecuación de eficiencia del colector solar de aire	-
a_1	Segundo término de la ecuación de eficiencia del colector solar de aire	W/m^2K
a_2	Tercer término de la ecuación de eficiencia del colector solar de aire	W/m^2K
A_{Cag}	Área de calentamiento solar-agua	m^2
A_{Cai}	Área de calentamiento solar-aire	m^2
A_{cd}	Área de secado	m^2
A_{Ch}	Área de calentamiento solar hibridado	m^2
B_1	Bomba hidráulica 1	-
B_2	Bomba hidráulica 2	-
C_a	Costo anualizado	\$
C_{ac}	Costo capital del secador	\$
C_{ar}	Capacitancia térmica	J/K
C_I	Costo total de inversión	\$
C_{kWh}	Costo de la energía eléctrica	$\$/kWh$
$C_{l,p}$	Costo por kilogramo de gas l.p	$\$/kg-l.p$
$C_{p_{ag}}$	Calor específico del agua	kJ/kgK
$C_{p-l,p}$	Poder calorífico del gas L.P (55 000.0 $kJ/kg-l.p$)	$kJ/kg-l.p$
C_{sc}	Costo de secado del café	$\$/kg$

C_{se}	Costo unitario eléctrico	\$MX/kg
C_{sg}	Costo unitario por combustible gas	\$MX/kg
C_{sm}	Costo por manejo del equipo	\$MX/kg
d	Tasa de descuento	%
DE	Desviación estándar	-
E	Error máximo permitido, 10%	
F_c	Fracción por combustible	-
fm_{ag}	Flujos de recirculación del calentador solar-agua	kg/h
FS_{ag}	Fracción solar del calentador solar-agua	-
FS_{ai}	Fracción solar del calentador solar-aire	-
FS_h	Fracción solar híbrida	-
G	Irradiancia solar sobre la superficie	W/m ²
IR	Índice de rentabilidad	-
k	Constante de secado	-
$LMTD$	Logaritmo de la temperatura promedio	-
$M_{(0)}$	Contenido de humedad inicial	w.b
$M_{(t)}$	Contenido de humedad en un instante de tiempo	w.b
m_{ag}	Masa de agua caliente almacenada	kg
M_e	Contenido de humedad de equilibrio	w.b
MR	Radio de humedad	-
n	Muestra encuestada	-
N	Personal durante un año en la Sierra Mariscal (N=300)	
n	Vida útil del secador	años
P_b	Tiempo de retorno de la inversión	años
P_{jr}	Pago del jornalero	\$/kg
$Q_{ai,mx}$	Energía solar máxima del calentador de aire	kWh/m ² -a
Q_{alm}	Energía almacenada	MJ
Q_c	Energía generada por combustible	MJ
Q_{ev}	Energía de evaporación de la muestra	MJ
Q_G	Energía solar	MJ
$Q_{h,mx}$	Máximo aporte energético por unidad de área de captación solar	kWh/m ² -a* FS_h
Q_p	Pérdida de energía al ambiente $Q_p = (Q_G - Q_{ev})$	MJ
Q_r	Energía requerida de secado	MJ
Q_{sp}	Energía específica de secado de café	MJ/kg
$Q_{u_{ag}}$	Energía útil del calentador solar-agua	kWh/m ² -a
$Q_{u_{ai}}$	Energía útil del calentador solar-aire	kWh/m ² -a
Q_{u_c}	Energía útil solar de los calentadores de agua	MJ
Q_{u_h}	Energía útil híbrido	kWh/m ² -a

R^2	<i>Coefficiente de determinación</i>	-
R_u	<i>Razón de uso</i>	l/m^2
R_v	<i>Razón de volumen</i>	l/m^2
S	<i>Capital residual por la venta del café</i>	\$
S_a	<i>Ahorro anual</i>	\$
$SR-SC_{ag}$	<i>Subrutina de optimización del calentador solar-agua</i>	-
$SR-SC_{ai}$	<i>Subrutina de optimización del calentador solar-aire</i>	-
t	<i>Tiempo</i>	h
t_1	<i>Tiempo inicial</i>	h
t_2	<i>Tiempo final</i>	h
T_a	<i>Temperatura ambiente</i>	$^{\circ}C$
t_d	<i>Tiempo de secado</i>	h, d
TIR	<i>Tasa de retorno de la inversión</i>	-
T_p	<i>Temperatura promedio</i>	$^{\circ}C$
U_{Lt}	<i>Coefficiente de pérdida de calor del tanque</i>	W/m^2K
VAN	<i>Valor actual neto</i>	-
V_t	<i>Volumen del tanque de almacenamiento térmico</i>	m^3
W_0	<i>Peso inicial de la muestra de café</i>	kg
W_{cd}	<i>Condiciones ambientales</i>	-
W_t	<i>Peso de la muestra en un instante de tiempo</i>	kg
W_w	<i>Masa de agua removida de la muestra de café $W_w = (W_0 - W_t)$</i>	kg
$Z_{\alpha/2}$	<i>Grado de fiabilidad 95% =1.96 $p=50\%$ (0.5)</i>	-
η_d	<i>Eficiencia térmica de secado</i>	-
ε	<i>Efectividad del intercambiador de calor</i>	-

Resumen

La Sierra Mariscal en Chiapas es una zona considerada con alto índice de marginación, dentro de sus principales actividades económicas está la producción de café, logrando generar empleos en la temporada de cosecha y secado. La zona cuenta con un clima tropical que favorece a la producción de café, sin embargo, prolonga los tiempos de secado debido a las naturales fluctuaciones del recurso solar. Para comercializar el café es importante cumplir con normas de calidad que se definen en el método de secado. En este trabajo se presenta un estudio de viabilidad termo-económica del secado de granos de café con un secador híbrido solar-gas optimizado, en la Sierra Mariscal en Chiapas en términos de los costos de secado y el tiempo de retorno de la inversión, considerando la fracción solar, y la energía específica. El secado basado por lotes utilizando el secado en patio e invernadero abierto, como referencias. El diseño del secador considera tecnología de calentamiento solar de aire y solar-agua con almacenamiento de energía acoplado a un auxiliar de gas. El secador híbrido propuesto se optimizó para cubrir una demanda energética de 5.36 MJ/kg , para secar 90.5 (500.0 kg/lote), 31.0 (174.0 kg/lote) y 21.0 (63.0 kg/lote) lotes buscando reducir los costos de secado y el tiempo de retorno de la inversión en la temporada de cosecha. El método de optimización se realiza mediante un análisis paramétrico y nomogramas de diseño para los calentadores solar-aire y solar-agua que complementan al secador híbrido solar-gas. Los nomogramas relacionan la fracción solar, la energía útil, el costo de secado y el retorno de inversión con la razón de uso y razón de volumen para el calentador solar-agua con almacenamiento; y para el calentador solar-aire, el área de captación solar. El menor costo de secado con el calentador híbrido resultó de $2.97 \text{ \$/kg}$ con un tiempo de retorno de inversión de 63.5 años secando 90.5 lotes (500.0 kg/lote) en la temporada de cosecha. El secador híbrido logra reducir el costo de secado 51.0-63.0% comparado con el costo obtenido por encuestas a los caficultores de la región. El calentador híbrido logra secar 3.0 y 4.11 veces más que el secado en patio y en invernadero en la temporada de cosecha, aunque el costo de secado incrementó 1.8 y 2.65 respectivamente, debido al costo de mano de obra. El menor costo de secado se logra a mayor capacidad de secado con un tiempo de retorno de inversión similar al patio e invernadero debido al mayor flujo de efectivo por venta del café seco, cumpliendo las normas sanitarias. El calentador híbrido solar-gas logra una fracción solar óptima de 0.43, con una energía útil solar de $354.0 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$, para 90.5 lotes, lo que resulta en un área de captación solar hibridada de 130.0 m^2 con un costo de secado de $2.97 \text{ \$/kg}$. Se observó que, la fracción solar disminuyó de forma exponencial de 0.90 a 0.43 cuando la demanda de secado incrementó de 22.0 a 90.5 lotes. El calentador solar-agua con almacenamiento térmico presentó una fracción solar óptima de 0.16, una energía útil de $219.89 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$ con una razón de uso y razón volumétrica de 20 l/m^2 . Lo que resulta en un área de

50.0 m^2 , con un volumen de almacenamiento de 1.0 m^3 , un flujo de recirculación de 2,500.0 $kg\text{-agua}/h$ para la primera bomba hidráulica y 416.0 kg/h para la segunda. El calentador solar-aire resultó con una fracción solar óptima de 0.27, una energía útil solar de 229.8 $kWh/m^2\text{-a}$, con un área de captación solar-air e 80.0 m^2 , y un flujo de aire de 1600.0 kg/h . El calentador híbrido solar-gas logra suministrar el 43.0% de la demanda energética con energía solar y el 57.0% con gas L.P, para secar 90.5 lotes (45,250.0 kg) en la temporada de cosecha con un costo de secado de 2.97 $\$/kg$. El secador híbrido solar-gas logra secar mayor cantidad de lotes comparado con el patio e invernadero en la temporada de cosecha con un costo de recuperación de la inversión similar, cumpliendo las normas sanitarias.

Capítulo 1. Introducción

En este Capítulo 1 se presentan las generalidades del proyecto, el estado del arte, objetivos y productos. La revisión del estado del arte se clasifica en calidad del café, métodos de secado de café, los tiempos de secado en relación con espesor, los consumos térmicos y económicos, así como un análisis global de los tópicos.

1.1 Generalidades

1.1.1 Importancia del café

A nivel mundial el café es uno de los productos más consumidos en el comercio internacional, resalta entre los principales productos agrícolas y es de gran importancia cultural, social y económica para los productores [1]. En México, los meses de mayor producción son diciembre-marzo [2]. Los métodos de secado continúan siendo el secado al sol directo en patios y el secado mecánico [3]. Donde el secado, define la calidad del producto reduciendo los microorganismos y contaminantes [4], [5]. El tiempo que se puede almacenar el café depende de la calidad del secado donde se evita la degradación fisicoquímica acelerada. Así, la forma y método de secado definen la calidad del producto [6]. Sin embargo, la oferta y la demanda obliga a los productores al almacenamiento del grano en seco en espera de mejores precios, de acuerdo con los costos del mercado internacional. La producción de café en la Sierra Mariscal en Chiapas representa el 24% de la producción nacional, un distintivo en calidad es importante para dar mayor valor agregado como detonante en el desarrollo económico, social y cultural [7].

1.1.2 Producción de café en México

Actualmente, la organización internacional de café sitúa a México dentro de los primeros seis países con mayor producción y exportación de café, de 3.89 millones de sacos de 60.0 kg en el año 2024/2025 [8]. En el 2024/2025, México participó en el comercio internacional de café con un volumen de exportación promedio anual de 2.7 millones de sacos de 60 kg y 1.86 millones de sacos de 60.0 kg [8]. En cuanto a la exportación, México es el principal proveedor mundial; Estados Unidos, Alemania, Holanda, Suiza, Japón, Italia, Dinamarca, España, Francia, Australia, Inglaterra y Bélgica [9]. Los meses de mayor exportación son de marzo a mayo con 4,400.0-4,520.0 t, y los de importación van de mayo a junio con

560.0-580.0 t [9]. Para el 2030, el incremento de la producción de café se estima de 4.70 millones de toneladas, lo que representará un crecimiento acumulado de 13.26% [10], [11].

En México se cultivan dos variedades de arbusto de cafeto, que son la arábica y robusta. Las variedades del cafeto arábigo son Bourbon, Caturra, Maragogipe, Mundo Novo, Garnica y Typica. Sin embargo, se han introducido nuevas variedades de porte bajo con mayor producción como el Catimor, Catuai, Sarchimor, Anacafe 14, Costa rica, y Oro azteca, entre otros. Cada variedad posee diferencias de calidad, volumen, rendimiento, resistencia a las plagas y a enfermedades, aroma y acides [11]. En México, el 96.0% del café producido es de variedad Arábica y el 4.0% es robusta. Así es posible identificar que los granos de café que preponderantemente se cosechan en México son de la variedad arábica.

En México, las regiones de producción de café se encuentran en cuatro zonas, que en conjunto abarcan 480 municipios y más de 500.0 mil productores de café: a) Golfo de México, b) Océano Pacífico, c) Centro-norte y d) Sureste de México de acuerdo con SIAP-SADER. En la producción nacional de café, el 35.0% la superficie se ubica en altitudes mayores a los 900 metros sobre el nivel del mar, considerada como café de altura, el 44.0% se cultiva entre los 600.0 y 900.0 metros sobre el nivel del mar. Las temporadas de cosecha de café se reportan a principios de noviembre a finales de marzo, en alguno de los casos, dependiendo de la altura y condiciones climáticas del lugar puede a ser hasta abril.

En México, los estados de producción de café son Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca, y Guerrero, entre otros (Hidalgo, San Luis Potosí, Nayarit, Colima, Tabasco, Jalisco, México, Morelos, Querétaro), la superficie de producción de café a nivel nacional es de 710,400.0 hectáreas, de lo cual 539,300.0 hectáreas de la superficie es cosechada. En la **Figura 1.1** se muestran los principales estados que mayor aportan al total nacional, el Estado de Chiapas con una aportación de 37.8%, Veracruz con 28.8%, Puebla 14.3%, Oaxaca 10.2%

y Guerrero con 3.3% [12]. La producción de café depende de las superficies sembradas, y de la cantidad de productores de café en cada Estado. Chiapas, Oaxaca, Veracruz, Puebla y Guerrero aportan el 90.0% de la producción nacional anual, mientras que las entidades con menor producción son San Luis Potosí, Nayarit, Colima, Tabasco, Jalisco, México, Morelos y Querétaro, que en su conjunto solo aportan el 10%. Resaltando la producción de café por entidad, Chiapas se identifica como el principal productor, representando 40.0% de la producción nacional, que hace resaltar la importancia del estudio de la optimización energética en sus procesos.

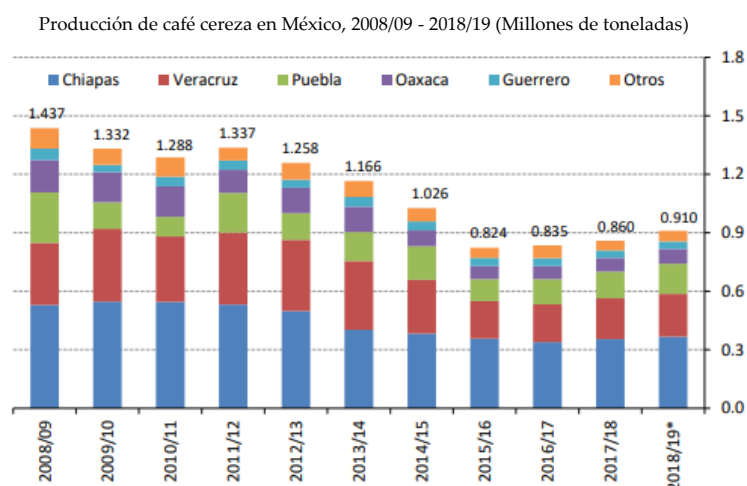


Figura 1.1. Producción de café cereza en México, 2008/09 – 2018/19 (Millones de toneladas)

(Fuente: SIAP-SADER).

Las regiones cafetaleras que le siguen se encuentran en región del Estado de Veracruz del Golfo de México, la región de Puebla del Centro-norte, y Guerrero del Océano Pacífico.

Tabla 1.1. Estados productores de café.

Nº	Estado	Producción (t/a)	Productores	Superficies sembradas (ha)
1	Chis	377,255.0	180,856.0	253,318.0
2	Ver	155,716.0	86,000.0	144,582.0
3	Pue	77,585.0	40,973.0	69,652.0
4	Oax	55,941.0	70,000.0	134,647.0
5	Hgo	18,752.0	16,461.0	23,095.0
6	Gro	17,514.0	20,000.0	45,556.0
7	S.L.P	5,598.0	17,500.0	16,149.0
8	Nay	1,736.0	5,000.0	16,090.0
9	Col	1,628.0	800.0	2,704.0
10	Tab	383.0	-	358.0
11	Jal	213.0	1,500.0	3,489
12	Edo Mex	0.0	-	539.0
13	Mor	0.0	-	27.0
14	Qro	0.0	400.0	539.0

En la **Tabla 1.1** se muestra que la región cafetalera con mayor producción de café está ubicada en el Sureste de México, en el estado de Chiapas, cuenta con una superficie sembrada de 253,318.0 hectáreas, con 180,856.0 productores y un total de producción de café de 377,255.0 toneladas al año. Así, Chiapas es el Estado que se considera el mayor productor de café en México, aportando 37.0-41.0% [13]. En la **Tabla 1.2** se muestran las 15.0 regiones que integran al Estado de Chiapas, que representan una superficie total de 70,648.68 km², de las cuales 10.0 regiones se dedican a la producción de café con un total de 377,255.0 t/a, que representa un valor de producción de 1,825,474,560.0 de pesos.

En la **Figura 1.2** se muestra la producción de café en el ámbito Estatal chiapaneco, las regiones que destacan son la región del Soconusco y la Sierra Mariscal que logran proveer más del 45.0% de la producción de café. Las regiones V, VII y XIII se sitúan en segundo lugar con el 39.3%, seguido de las regiones I, VI, XI, XII, y XV, con el 15.0%. La región

Sierra Mariscal, logra impactar con un 24.51% de la producción a nivel Nacional; es de observar que la zona es considerada con un alto índice de marginación.

Tabla 1.2. Regiones cafetaleras de Chiapas.

N.º	Región	Superficie km²	Producción (t)	% Valor de producción (miles de \$)
I	Metropolitana	1,799.0	9,140.9	2.7
II	Valles Zoque	7,393.8	-	-
III	Mezcalapa	2,655.0	-	-
IV	De los llanos	2,815.3	-	-
V	Altos Tsotsil-Tzeltal	3,723.6	51,843.8	14.9
VI	La Frailesca	8,001.4	21,659.2	7.1
VII	De los Bosques	2,354.1	-	-
VIII	Norte	3,425.5	50,802.9	12.4
IX	Istmo – Costa	5,409.2	2,459.4	0.5
X	Soconusco	4,644.0	79,365.3	18.9
XI	Sierra Mariscal	40,17.42	92,475.9	24.9
XII	Selva Lacandona	10,535.0	3,798.4	1.1
XIII	Maya	5,976.5	45,861.0	12.4
XIV	Tulijá Tzeltal Chol	4,673.0	-	-
XV	Meseta Comiteco Tojolabal	7,243.4	19,848.2	5.1
	Total	70,648.7	377,255.0	-

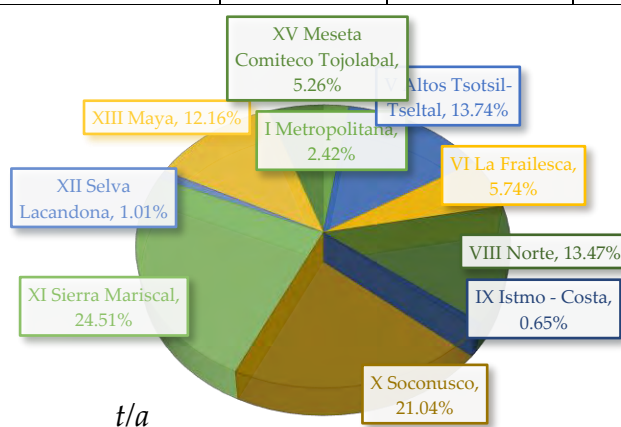


Figura 1.2. Producción de café en Chiapas.

La Sierra Mariscal se ubica al sureste de Chiapas, se integra por diez municipios y cuenta con una superficie de 4017.42 km^2 , que representa el 5.2% del Estado. En la zona, ocho de los municipios se dedican a la producción de café que aportan el 24.5% a nivel Nacional; Amatenango de La Frontera, Bejucal de Ocampo, Bella Vista, La Grandeza, Mazapa de Madero, Motozintla, El Porvenir y Siltepec. La región Sierra Mariscal cuenta con una altitud del territorio que varía entre los 670.0 m a 3080.0 m sobre el nivel del mar. En la región predominan tres tipos de climas subhúmedo, semicálido y templado húmedo, las temperaturas medias anuales se encuentran en el rango de $24.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $26.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $18.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $14.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $16.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. La precipitación pluvial oscila entre los 800 mm y los $3,000 \text{ mm}$ para los meses de mayo a octubre y 50.0 mm a 700.0 mm en el periodo de noviembre a abril. En la **Figura 1.3** se indica la producción de café por municipio de la Zona Sierra Mariscal; el distrito de Motozintla aporta el 45.68%, seguido de Siltepec con el 25.57%, Mazapa de Madero (13.98%), Bella Vista con el 13.72%, y Amatenango de la Frontera, Bejucal de Ocampo, La grandeza y el Porvenir Aportan el 1.15%. Resaltado la primera cuatro ciudades aportan prácticamente el 99.0% de la producción de la Zona Sierra Mariscal, que a nivel Estatal es el 24.0% y a nivel nacional el 9.8%.

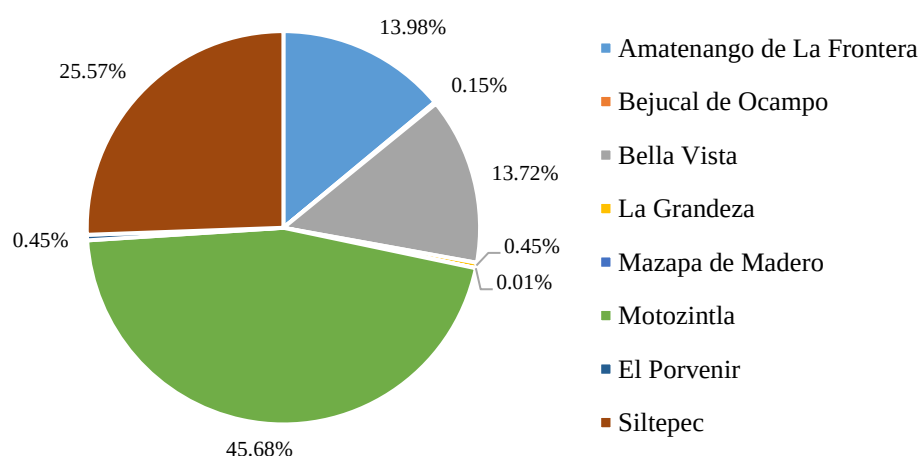


Figura 1.3. Porcentaje de producción de café por municipios de la Sierra Mariscal.

En la región Sierra Mariscal, las temporadas de producción de café van de mediados de noviembre a marzo de cada año, variando, dependiendo de las condiciones topográficas y climáticas de cada lugar. A menor altura y mayor temperatura, la temporada de cosecha inicia a mediados de noviembre y termina a finales de enero. A mayor altura y menor temperatura, la temporada inicia hasta principios de enero y termina hasta finales de abril. En general, cada temporada dura 2.5-3.0 meses, dependiendo principalmente de las condiciones climáticas, que puede retrasar la maduración. El café que preponderantemente se cosecha en la Sierra Mariscal es de la variedad arábica.

1.1.3 Importancia de optimizar la energía específica

En general, en la Sierra Mariscal los caficultores continúan secando el café a cielo abierto, bajo las fluctuaciones de las condiciones ambientales, logrando disminuir el contenido de humedad hasta 10.0% *w.b.* El método tradicional de secado al sol es relativamente lento, requiere mayores cargas energéticas y presenta pérdidas de calidad del producto [14]. El secado al sol incrementa los costos de secado debido a grandes espacios y tiempos prolongados, además disminuye la calidad fisicoquímica del grano de café, siendo un factor importante en los costos de compraventa para el productor. El tiempo de secado influye considerablemente en los costes de secado para los caficultores. En el patio, el tiempo de secado oscila entre unas 56.0-120.0 *h* para el café pergamino en zonas tropicales con un grosor de lecho de 25.0-30.0 kg/m^2 [15]; en Sierra Mariscal con un grosor de lecho de 2.0-20.0 kg/m^2 , el tiempo de secado fue de 11.3-38.0 *h* [15]. En Brasil y Sri Lanka, con un espesor de lecho de 25.0-30.0 kg/m^2 , el tiempo de secado de las cerezas de café fue de 80.0-168.0 *h* [15].

En el patio, la energía específica de secado en Sierra Mariscal es de 7.1-54.4 MJ/kg [15], y para café cereza es de 17.0 MJ/kg , según la Organización de las Naciones Unidas para la

Agricultura y la Alimentación, FAO. Por secado mecánico continuo, la energía específica de secado en Veracruz, México es de 2.96 MJ/kg, utilizando gas L.P. [16]. En Honduras, la energía específica de secado utilizando biomasa es de 12.60 MJ/kg en secadores rotatorios, 7.46 MJ/kg en secadores verticales y 3.91 MJ/kg en secador estático [17]. En Colombia, la energía específica termoeléctrica es de 6.9 y 1.4 MJ/kg, respectivamente, con un menor costo de secado del 80.0% que el sistema tradicional (0.4 USD/kg) [18]. El costo de secado de café de patio en la Sierra Mariscal es de 0.4 a 0.09 USD/kg utilizando un espesor de lecho de 2.0-20.0 kg/m² [19]. El tiempo de secado y la energía específica afectan considerablemente el costo de producción del café. En la Sierra Mariscal, como en muchos otros lugares, los métodos tradicionales más utilizados para el secado del café son el secado al sol y el secado mecánico [16].

En Colombia, en 2020, Suherman *et al.* [20], [18], [21] combinaron tecnología solar-gas para granos de café con capacidad de 1.2 kg distribuidos en charolas. El aire caliente se manejó a 50.0-60.0 °C, logrando tiempos de secado a 15.0 h, y energías específicas de 4.8-11.03 MJ/kg. Así, el avance tecnológico ha logrado reducir los tiempos de secado hasta 24.0-100.0 h utilizando combustibles fósiles, energía eléctrica, y la energía solar [22], [23], [24], [25], [26], [27]. Sin embargo, la tecnología y el combustible llegan a representar el 75.0% de los costos del secado [28]. Aún así, la combinación de tecnología solar-gas ha logrado disminuir los consumos energéticos de secado de café en un 35.0-70.0% comparado con el secado al sol (17.0 MJ/kg). En el secado del café, la optimización de la energía específica es un factor importante en la viabilidad de proyectos [29].

1.4.4 Oportunidades del secado solar de café en la Sierra Mariscal

En la Sierra Mariscal, cuando la demanda de secado se incrementa considerablemente, algunos productores suelen hacer presecado de lotes de café, que es reducir el contenido de humedad aproximadamente de 53.0% a 25.0%; se almacena el café durante 10.0-15.0

días esperando la disminución de carga de secado. Luego, ya con menos carga, los productores suelen terminar el secado de café hasta lograr el contenido de humedad 11.0-12.0%. Sin embargo, en la comunidad es sabido que el café presecado conlleva granos con manchas, mal aroma, y consecuentemente el precio de venta disminuye. En general, el porcentaje de defectos del café presecado se estima que puede llegar a ser hasta del 20.0% en muchos de los productores.

La factibilidad del secado de café en la Sierra Mariscal requiere de sistemas cada vez más optimizados para las condiciones del lugar, con el fin de lograr costos competitivos. En general, en la escala mundial, los estudios se han enfocado a la evaluación de sistemas para cubrir las cargas térmicas en secadores de café, dando poca atención a la optimización donde se realiza el secado. La integración de tecnología solar híbrida con sistemas de captadores solares de aire y agua para secar café ha venido siendo escasa, mostrando que el suministro energético híbrido es una alternativa para la factibilidad.

1.2 Estado del arte

La revisión del estado del arte presenta los avances en la optimización del secado de granos de café en la región de la Sierra Mariscal en Chiapas. En la **Sección 1.2** se presentan como: **Sección 1.2.1** calidad del café, **Sección 1.2.2** métodos de secado de café, **Sección 1.2.3** tiempos de secado en relación con la capacidad de volumen de secado, y en la **Sección 1.2.4** consumos y optimización energética. En la **Sección 1.2.5** se presenta un análisis global de los temas y conclusiones del estado del arte.

1.2.1 Calidad del café

La calidad del café se define por las propiedades fisicoquímico-organolépticas que se potencializan en el método de secado [30], definiendo el precio de compra y venta en el mercado local y la aceptación del cliente. El método de secado afecta significativamente

a las propiedades fitoquímicas, los compuestos volátiles, la grasa y los ácidos orgánicos de los granos de café robusta [31]; por lo contrario, los compuestos fenólicos de las cerezas de café disminuyen un 24.0% con el secado al sol [32]. En el proceso de secado, el uso de temperaturas más altas (50.0-60.0 °C) causa alteración en la estructura física del endospermo de la semilla de café [33]; así, la temperatura de secado en el rango de 30.0-40.0 °C no cambia la estructura celular, y el contenido de sacarosa tiene poca variabilidad [34]. El análisis sensorial-químico de los granos de café arábica-robusta muestra que la calidad general del sabor de los granos secados al sol difiere en comparación con el secado en bandeja (50.0 °C) [35]; los métodos de secado no afectan al contenido de cafeína, pero influyen en los niveles de aminoácidos [36]. Además, el color, sabor y aroma de los granos de café dependen del tiempo de almacenamiento y de la bolsa [37], [38]. Por esta razón, la Sierra Mariscal debe asegurar la calidad fisicoquímico-sensorial en el proceso de secado con equipos optimizados que aumenten la viabilidad de los granos de café y el costo en el mercado internacional.

Los diferentes procesos y métodos de secado han logrado mantener y mejorar la calidad física, sensorial, química y organoléptica del café. Sin embargo, de acuerdo con estos aspectos se deben priorizar las acciones que garanticen el sostenimiento de calidad exigidos por el mercado, desde el proceso de recolección de granos de café hasta el proceso de secado. De acuerdo con lo revisado, el secado de granos de café en la zona Sierra Mariscal se realiza con el secado al sol en un 80.0%, lo que disminuye la calidad física, química y sensorial del café. Sin embargo, el secado de café en la zona Sierra Mariscal, requiere de equipos optimizados que puedan mejorar la calidad física, química, y sensorial, así como, la viabilidad de los granos del café y los costos en el mercado local.

1.2.2 Métodos de secado de café (protocolo, lugares, y combustibles)

El secado de los granos de café se ha venido realizando con el método tradicional al sol [39], secado con invernadero [40], secado mecánico [41], y los secadores solares híbridos [20]. Los métodos de secado de granos de café y el uso de los combustibles dependen considerablemente de la zona de producción, la demanda de secado y las condiciones climáticas del lugar.

El secado de café en patio es el proceso de secado de granos de café más utilizado a nivel mundial. Se considera el más ecológico; sin embargo, requiere de espacios considerables y está sujeto a condiciones climáticas variables que reducen la calidad del café [24], [42]. En la actualidad, la mayor parte del secado del café se realiza extendiendo los granos en patios, en el suelo o en bandejas [5], removiendo los granos durante el proceso de secado para aumentar la pérdida de humedad [43], [44], y envasando por la noche o en épocas de lluvia para reducir las pérdidas de calidad. La cantidad de secado depende del espacio disponible con áreas de 150.0-250.0 m^2/t [39], [45], [39]. El secado de café en patio continúa siendo el proceso de secado principal, sin estudios de optimización, de acuerdo con las condiciones climáticas durante la temporada de cosecha en el lugar de producción, como lo sigue siendo en la Sierra Mariscal de Chiapas, donde la producción de café representa el 24.0% dentro del Estado y el 9% dentro de México [46].

En el caso de México, en la zona Sierra Mariscal se producen 275,000.0 *t-café/año*, donde el 80% se continúa secando a sol abierto [47]. En la temporada de cosecha, la capacidad de producción de café pergamino por productor es de 1.5-3.0 toneladas por hectárea. La capacidad de secado es de alrededor de 250.0-500.0 *kg* de café verde por día o producciones inferiores a 5 *t* de café al año por productor [39].

El secado con invernaderos ha logrado mejorar la calidad fisicoquímica de los granos café, que definen el costo de compraventa en el mercado local e internacional [48], [40]. El secado se realiza sobre bandejas, o charolas de madera, que evitan el contacto con el suelo, cumpliendo las normas sanitarias NOM-116-SSA1 6276. Los invernaderos son tipo domos, parabólicos, túnel solar con una estructura metálica, con una cubierta plástica transparente, con bases de cemento [49], [50]. La radiación solar incide sobre la superficie de la cubierta de plástico o vidrio, el aire se calienta y circula de forma natural o por convección forzada, utilizando ventiladores [51]. La radiación que se transfiere incrementa la temperatura del producto y reduce el contenido de humedad de los granos [52], [53]. Hasta el momento, el secado de café con invernaderos ha logrado mejorar la viabilidad de los granos secos y cumple con normas sanitarias básicas comparado con el secado al sol directo.

Los secadores mecánicos se reportan desde 1989 [54], logrando evolucionar en diseño, capacidades, combustibles y control del proceso hasta el año 2024. Los secadores mecánicos para café se caracterizan por el uso de combustibles fósiles; generalmente calientan el aire con quemadores que funcionan con carbón mineral, cisco de café, leña, gas L.P, y electricidad en casos de volúmenes muy reducidos [54], [55]. Los secadores mecánicos se integran a cámaras de secado, estáticas o rotativas, ventiladores que impulsan aire caliente a las cámaras de secado. El uso de energías fósiles implica utilizar equipos sofisticados para no tener contacto directo con el producto y afecte su calidad, o en muy pocos casos se integran intercambiadores de calor [56], [27], [29], [23]. Usualmente, los controles son termostatos para establecer la temperatura en la cámara de secado en el intervalo de 48.0-60.0 °C [55]. La tecnología de secadores mecanizados se utiliza comúnmente para producciones de café mayores a 5 t anuales, o donde la energía solar es insuficiente. En México, los secadores más utilizados son los secadores cilíndricos rotatorios tipo guardiola con capacidades de secado de 5.0 a 15.0 *Quintales* de café [16].

Sin embargo, para la zona Sierra Mariscal, la tecnología mecanizada se considera con alto costo energético y por lo tanto poco rentable.

Los sistemas solares híbridos para secado de café usualmente calientan aire con captadores solares de aire y lo transportan a cámaras de secado, mecanizadas o invernaderos [57]. Los sistemas híbridos también cuentan con sistemas de captación solar de agua y almacenamiento de energía con intercambiadores de calor. En la diversificación de combustibles se resalta la hibridación de la energía solar-solar, solar-biomasa, solar-gas y solar-eléctrico [18], [21]. El aire caliente alcanza temperaturas de secado de 40.0-70.0 °C [20], para capacidades de 0.3 a 90.0 kg de café seco. Los trabajos recientes se han enfocado en disminuir los tiempos de secados, los consumos energéticos, y los costos asociados a procesos de secado completo, aunque por los costos energéticos actuales, la tecnología solar híbrida se considera poco competitiva para el secado de café. La implementación de sistemas híbridos en épocas y lugares específicos del año se ha reportado competitivo para algunos productos [58]. En la Sierra Mariscal en Chiapas-México donde el secado demanda mejoras, la implementación de sistemas híbridos podría mejorar la viabilidad térmica y económica en el secado de café.

1.2.3 Tiempos de secado en relación con la capacidad de volumen de secado y espesores de cama

Los tiempos de secado del café se han encontrado en función del espesor de la cama de secado, las condiciones de trabajo, la tecnología, el tipo de combustible y de las condiciones climáticas del lugar. Como línea base se consideran los tiempos y capacidades de secado de café con el secado al sol [59]. En el patio, el tiempo de secado oscila entre unas 56.0-120.0 h para el café pergamino en zonas tropicales con un grosor de lecho de 25.0-30.0 kg/m² [15]; en Sierra Mariscal, Chiapas-México, con un grosor de lecho

de 2.0-20.0 kg/m^2 , el tiempo de secado fue de 11.3-38.0 h [15]. El tiempo de secado sobre una superficie de hormigón ennegrecidas se reportó de 40.0 h a temperaturas promedio de 40.0 °C con una energía solar de 17.0-20.5 MJ/m^2-d , para secar 90.0 a 120.0 kg/m^2 al mes [60]. En Costa de Marfil, los tiempos de secado de café cereza a sol en patio se reportan de 12.0 a 32.0 días con espesores de 10 a 60 kg/m^2 , el contenido de humedad final de la muestra fue de 11.0-12.0%. Los autores también mencionan que cargas menores de 20.0 kg/m^2 evita el desarrollo de hongos y Ocratoxina A [45]. En Brasil y Sri Lanka, con un espesor de lecho de 25.0-30.0 kg/m^2 , el tiempo de secado de las cerezas de café fue de 80-168 h [20]. Hasta el momento, la tecnología solar directa continúa siendo el método más utilizado, sin embargo, no se reportan estudios enfocados a la optimización energética en el secado de café al sol [61].

La tecnología solar con invernadero ha logrado evolucionar en diseño y capacidad, logrando tiempos de secado de café de 16.0-245.0 h del 2003 al 2024. En el 2003, en Chiapas-México se reportó el tiempo de secado de 40.0-192.0 h con un secador de 13.5 m^3 cubierto de nailon, distribuyendo el café en charolas de 2.25 m^2 (0.3-0.5 m), con capacidad de secado de 200.0 $kg/lote$ [62]. En el 2005, en Colombia se reportó el tiempo de secado de 112.0 h , con un secador parabólico para 227.0 kg de café [49]. En el 2006, en Ecuador se reportó el tiempo de secado de café de 48 h utilizando un secador con seguimiento solar de menor escala 0.4 kg con temperatura máxima de 70.0 °C, reduciendo 0.4 veces el tiempo respecto al secado al sol [63]. En el mismo año, se implementa el secado de café con paseras tipo invernadero con capacidades de 90.0 a 540.0 kg de café, con espesor de 0.03 a 0.3 m , logrando tiempos de secado de 173.0 a 245.0 h [64]. En 2011, el tiempo de secado se reportó de 16 h , con un secador parabólico (150.0 m^3) para 200.0 kg de café con ventilación forzada, logrando disminuir en un 50.0% el tiempo de secado respecto al sol abierto [65]. Para 2016 en Australia, se reportó el tiempo de secado de 24.0 h utilizando

invernaderos de menor escala 1.2 m^3 para 0.8 kg con camas de 0.06 m de café [66]. En 2017, en Puebla-México se reportó tiempos de secado de 24.0 h de secado de café con un secador tipo invernadero con captación solar de aire de 5.8 m^3 con una capacidad de 262.0 kg [40]. Para 2019, en Perú se reportó el tiempo de secado de 48.0 h en un secador tipo invernadero (32.0 m^2) con un sistema de aire continuo impulsado por energía fotovoltaica, alcanzando una temperatura promedio de $37.0 \text{ }^\circ\text{C}$ en la cámara de secado [67]. En 2020, en Ecuador se reportó el tiempo de secado de 70.0 h para 93.0 kg de café, anualmente 1500.0 kg con un secador parabólico de 18.0 m^2 de secado [68]. En el 2022 en North Aceh Regency se reportan tiempos de secado de 53.0 h , para una capacidad de 120.0 kg de café con un secador invernadero tipo parabólico [69]. En el CIES, el tiempo de secado de café se reportan de 30.0 a 50.0 h con espesores de 5.65 a 14.2 kg/m^2 con un secador de tambor rotatorio por convección natural a temperaturas menores de $50.0 \text{ }^\circ\text{C}$ [70]. Donde, el tiempo de secado incremento 1.5 veces al incrementar 2.5 veces la capacidad de secado y 0.7 veces más que el secado al sol, sin embargo, mantiene la calidad física del grano [70]. En el 2018, los estudios en los secadores solar invernadero se han enfocado en evaluar la energía incorporada para el secado de café resultando de 115.78 MJ con acero inoxidable y 72.60 MJ utilizando madera para un secador con volumen de 14 m^3 [52]. En 2022, en Perú [71], el tiempo de secado de café Honey se reportó de 240.0 h con un espesor de 0.03 m en 48.0 m^2 con un secador solar tipo túnel auto controlado a temperatura máxima de $35.0 \text{ }^\circ\text{C}$ y mínima de $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$. Lo que representó un puntaje en la calidad en taza de 82.7. A nivel mundial, el uso de la tecnología solar con invernaderos se reporta 55.0% de utilidad en los procesos de secado y 8.0% en México. El uso del secador solar invernadero reduce hasta en 40.0-60.0% el tiempo de secado respecto al secado tradicional [40]. En México, en la región Sierra Mariscal en Chiapas, no se reportan estudios del secado solar de granos de café con solar invernaderos incluyendo los tiempos de secado, capacidades, y espesores de cama. Donde, los tiempos de secado y capacidades de secado se consideran de referencias para la implementación de tecnología solar híbrida.

El secado mecánico ha logrado evolucionar en diseño, capacidad de secado y condiciones de operación, logrando reducir tiempos de 48.0 a 24.0 *h* con capacidades de 725.0 a 22.3 *kg* de café. Dentro de los primeros secadores mecánicos, en 1989 en Colombia se reportó por primera vez el secador mecánico solar-rotativo, para una cantidad de secado de 25.0 *kg*, distribuyendo el café en una cama de 0.05 *m* entre dos mallas, el tiempo de secado se reportó de 48.0 *h* [54]. Para 1991 el tiempo de secado se reportó de 38.0 *h* con el uso de carro secadores con capacidad de secado 725.0 *kg*, con camas de secado de 0.06 a 0.24 *m*, con una temperatura en la cámara de secado de 43.0 °C y un caudal de aire de 1.3 *m*³/*s* [22]. Para 2006 el tiempo de secado de café se reportó de 72.0 *h* con un secador tipo horno de 125.0 *kg*, con una temperatura en la cámara de secado de 43.0 °C, utilizando combustibles fósiles [27]. En 2009, el tiempo de secado de café se reportó de 24.0 *h* con un secador mecánico con combustibles fósiles para 94.0 a 3000.0 *kg* con espesores de 0.7 *m* y temperaturas de 50.0 °C [28]. En Indonesia, el tiempo de secado mecánico continuo del café pergamino es de 10.0 *h* a 47.0 °C [72].

En 2010 se reportan los primeros estudios optimización y automatización a nivel laboratorio por microprocesadores de temperatura y humedad relativa a un secador tipo silo, en Labview [55]. El tiempo de secado se reportó de 24.0 *h*, para una carga de café de 22.3 *kg*, a temperaturas de 50.0 °C y flujos de aire de 0.08 *m*³/*s* [55]. Para el 2013 en Indonesia se reportó tiempo de secado de 10.0-33.0 *h* con un secador de bandejas de pequeña escala para 0.3 *kg* a temperaturas de 47.0 °C [72]. En 2018, el tiempo de secado se reportó de 24.0 *h*, a temperaturas de 50.0 °C para 94.0 *kg*, en el estudio la conductividad eléctrica, lixiviación de Potasio y Acidez Grasa de granos secos de café no presentaron modificaciones [67]. Para el 2018 los estudios se enfocaron en estudiar la distribución de la temperatura y velocidad del flujo utilizando Dinámica de Fluidos Computacionales CFD [73].

Los estudios en el secado de granos de café se han venido enfocando en los tiempos y en las propiedades termo físicas del secado con secadores convectivos a nivel laboratorio. En 2014, se reportó el tiempo de secado de 3.0 a 5.0 *h*, para 0.5 *kg* a 45.0 °C, con una difusividad efectiva en el intervalo de 4.48×10^{-8} - 7.73×10^{-8} *m*²/*min* para 0.5 a 1.5 *kW* [74]. En 2018, el tiempo de secado se reportó de 4.3, 3, 1, 0.83, 0.8 *h*, para potencias de 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 *kW*, para 2.0 *kg* de café [75]. En 2020, el tiempo de secado se reduce 17.0 veces con microondas comparado con un horno convencional, de 63.5 *g* en capas de 0.005 *m* a 50.0 °C [76]. Donde, el coeficiente de difusión resultó 22.0 veces mayor con microondas que el secado en horno. En 2021, el secado de café con microondas asistido con paneles fotovoltaicos reportó el tiempo de secado de 13.0, 15.0, 10.0, 17.0 *min* para 0.025, 0.050, 0.075 y 0.10 *kg*, con potencias de 600.0, 650.0 y 700.0 *W* [77]. El coeficiente de difusión efectiva resultó de 2.83, 4.69, y 7.56 (10^{-7}) *m*²/*s* para 600.0, 650.0 y 700.0 *W*. Los secadores convectivos reportan tiempos de secado de hasta 0.8 *h* y coeficientes difusivos 2.83×10^{-7} a nivel laboratorio, sin embargo, las propiedades termo físicas resultas propias de condiciones del lugar. En el caso de la Sierra Mariscal, aun no se reportan estudios térmicos del secado de granos de café.

En la última década, los secadores solares híbridos se han venido implementado en el secado de café, evaluando tiempos de secado y consumos energéticos, así también evolucionando en diseño y capacidades. Los estudios de secado con tecnología híbrida de 1965 al 2021 reportan tiempos de secado de 24.0 *h* para capacidad máxima de 90.0 *kg* de café. En 1965 que se logró hibridar solar-eléctrico con tecnología solar de aire [57]. En el estudio se reportó un tiempo de secado de 24.0 *h* para 57.5 *kg* de café, donde el sistema de captación logró disminuir 66.0% el consumo eléctrico en un con un área de 122 *m*², alcanzando temperaturas de 28.0 a 43.0 °C, y flujos de 4,077 *m*³/*h* [57]. En 2009, el tiempo de secado se reportó de 117.0 y 54.0 *h* hibridando túnel-solar con silo secador para 39.8

kg, reduciendo 66.7 y 22.4% el tiempo y 50% el consumo específico de energía con relación al secado mecánico [28].

Para 2017, el sistema híbrido solar-invernadero con una sola prueba reportó el tiempo de secado de 34.0 h y una energía específica de 5.7 MJ/kg de café para una demanda de secado de 0.5 kg de café a una temperatura en la cámara de secado de 45.0 °C [21]. Para 2020, se reportó el sistema híbrido solar-biomasa, integrado de paneles fotovoltaicos y combustión de pellet de café, para proporcionar la energía eléctrica-térmica [18]. Los tiempos de secado se reportaron de 24.0, 32.0 y 44.0 h para 90.0 kg de café a una temperatura de 70.0 °C con un contenido de humedad inicial de 40.0% (*w.b*). La energía específica eléctrica-térmica se reportó de 1.4 y 6.9 MJ/kg de café. En 2020 el secador híbrido solar-gas reportó los tiempos de secado de 14.0, 10.0 y 10.0 h para lotes de secado 300.0 g de café distribuidos en tres charolas de 0.25 m² [20]. La energía específica se reportó de 28.0, 11.03 y 4.8 MJ/kg. En el 2020, el sistema híbrido solar-eléctrica (una prueba) reportó el tiempo de secado de 60.0 h para 290.0 g distribuidos en tres charolas de 0.03 m de espesor [78]. La eficiencia general del secador se reportó de 39.7% con una temperatura en la cámara de secado de 47.0 °C. En 2021, el secador híbrido con combustible solar-geotérmico reportó el tiempo de secado de 24.0 h, para 100.0 g de café [79]. El sistema híbrido solar-geotérmico reportó una reducción del tiempo de secado en un 23.0% comparado con solo utilizar energía solar. El proceso de secado se reportó para una temperatura de agua caliente a 60.0 °C, alcanzando una temperatura del aire en la cámara de secado de 43.0-53.0 °C con una velocidad del flujo de 0.6 m/s. En el estudio se reportó una efectividad del intercambiador de calor de 0.62.

A nivel mundial, el uso de la tecnología solar híbrida se reporta 16.0% de utilidad en los procesos de secado, aunque para México no se reportan. La tecnología solar híbrida se considera competitiva y oportuna para la implementación en lugares de mayor producción como la Sierra Mariscal. Sin embargo, esta tecnología se ha visto limitada al

secado de mayor escala, por lo que se requiere de optimización térmica, que involucre el dimensionamiento óptimo del sistema bajo condiciones del lugar de estudio.

1.2.4 Consumos térmicos-económicos y optimización energéticos

Los consumos energéticos en el secado de café son factores que impactan en la viabilidad térmica-económica en los proyectos solares en el secado de café. En 2024, la energía específica de secado de café en patio en la Sierra Mariscal, Chiapas se reportó de 7.1-54.4 MJ/kg con espesores de cama de 2.0-20.0 kg/m² [20], con costos de 8.9-1.8 MX\$/kg; logrando optimizar el espesor de secado a 10.0 kg/m² y 8.8 MJ/kg; donde los caficultores usualmente utilizan espesores de 5.0 kg/m². Por otra parte, la energía específica de secado de café cereza se reporta de 17.0 MJ/kg para lotes de 25.0-30.0 kg/m², de acuerdo con FAO [15]. Sin embargo, el café pergamino es el más comercializado a nivel regional y mundial, 90.0% del café.

Los estudios térmicos-económicos en el secado de café con solar invernadero reportan para el caso de Puebla-México, un costo de secado de café de \$4.0, y recuperación de la inversión de 3 meses considerando 25.0 lotes anuales de 200.0 kg [40]. Los secadores solares invernaderos se han optimizado a menor escala 1.2 m³, logrando ahorros en mano de obra del 20.0% [66]. Aunque el secado de café con invernadero se observa prometedor en términos de costos y calidad aún faltan estudios que reporten los consumos energéticos en zonas productoras como el caso de la Sierra Mariscal.

Los secadores mecanizados han logrado disminuir el consumo energético de 25.0 MJ/kg a 2.6 MJ/kg optimizando las condiciones de operación que involucra el secado de café, y mejorando las eficiencias térmicas en el secado [3]. La energía específica en Veracruz, México con un secador mecánico usando gas L.P resultó de 2.96 MJ/kg para 2675.0 kg a 80.0 °C y 6560.0 kg-aire/h [3]. En Honduras, la energía específica con biomasa resultó de 12.60 MJ/kg en un secador rotativo, 7.46 MJ/kg en un secador vertical y 3.91 MJ/kg en un

secador estático [17]. En Colombia, la energía específica térmica-eléctrica se reportó de 6.9 y 1.4 MJ/kg , respectivamente, logrando reducir 80.0% el costo de secado respecto al secado mecánico convencional (0.4 USD/kg) [18]. La implementación de control de caudal de flujo y temperatura [29], ciclos de intermitencia térmica [23], variación del flujo de aire y temperatura [16] han logrado disminuir el consumo específico de combustible; en alguno de los casos en un 57.0-15.0%, con eficiencias de hasta 0.82 comparado con sistemas convencionales [80]. El requerimiento energético depende del diseño del equipo, capacidad de secado, tipo de combustible y de las condiciones de operación [17].

En la última década, estudios en el secado de café con tecnología solar híbrida reportan la energía específica en el secado de café de 8.3, 5.7 y 4.8 MJ/kg hibridando solar-biomasa, solar-invernadero, solar-gas, respectivamente [20]. La tecnología solar ha logrado disminuir 80.0% los costos de secado de café comparado con el secado convencional (0.8 USD/kg), reportando emisiones de 0.128 $kg-CO_2/kg-café$ [18]. Hasta el momento, la tecnología solar híbrida se limita a mayores capacidades de secado, además de la implementación en lugares de producción bajo las condiciones ambientales del lugar. Por lo que, la implementación de estrategias de optimización energética podría mejorar la viabilidad del secado.

1.2.5 Conclusión del estado del arte

El método de secado define la calidad física y química de los granos de café, así también, influye sobre los costos energéticos del secado. Sin embargo, de acuerdo con estos aspectos se deben priorizar las acciones que garanticen el sostenimiento de calidad exigidos por el mercado, desde el proceso de recolección de granos de café hasta el proceso de secado. Por lo que es importante prestar atención al secado de café con tecnología optimizada que garanticen el sostenimiento de la calidad física, química y

sensorial del café [81], [33], [34], [38], [82], [35], [83], [32], [84], cumpliendo las normas sanitarias.

El método de secado al sol continúa siendo el más utilizado por los caficultores, sin embargo, los estudios térmicos, económicos y de calidad en lugares de mayor producción como la Sierra Mariscal continúan siendo escasos. El secado con invernadero solar ha logrado mejorar la calidad física y sensorial de los granos de café, así también, reducir el tiempo de secado en un 22.0-50.0% comparado al secado a sol, en algunos casos [40], [49], [65], [66], [67]. El secado de café con secadores mecánicos a logrado reducir los tiempos de secado y la energía específica de 10.0 h y 2.3 MJ/kg, para capacidades hasta 2000.0 kg, sin embargo, la calidad física y química se ven afectadas por las altas temperaturas que involucra el secado de 80.0 °C [23], [17]. El uso de combustible eléctrico-térmico, el manejo del equipo y renta del espacio pueden llegar a representar hasta el 75% de los costos en el secado de café. Por lo que, el suministro energético híbrido muestra ser una alternativa factible y viable en el secado.

Los sistemas solares que se han logrado hibridar son; solar-eléctrico en Puerto Rico, túnel solar-silo y solar-biomasa en Colombia, solar-invernadero en Tailandia, solar-gas en Jawa Central y solar-eléctrico en Brasil. Sin embargo, la hibridación de la tecnología solar se ha limitado a satisfacer mayores demandas de secado en lugares de producción de café. La tecnología solar ha logrado disminuir 80.0% los costos de secado de café comparado con el secado convencional (0.8 USD/kg), reportando emisiones de 0.128 kg-CO₂/kg-café [18]. En alguno de los casos, los secadores solares híbridos han logrado disminuir considerablemente el consumo de la energía específica para el secado de granos de café. Sin embargo, esta tecnología se ha visto limitada al secado de mayor escala, por lo que se requiere de optimización térmica, que involucre el dimensionamiento óptimo del sistema.

A nivel mundial, el uso de la tecnología solar híbrida en el secado de café representa el 25.0%, la tecnología de secado mecánico 75.0% y la tecnología solar con invernaderos el 55%. En México el uso de la tecnología de secadores invernaderos representa el 8.0% y la tecnología con secadores mecánicos el 4.0%.

Por otra parte, el secado de granos de café en la Sierra Mariscal, Chiapas-México, continúa realizándose con la tecnología a sol abierto, en patios, que involucra tiempos largos de secado. Por lo tanto, la aplicación de un proceso alternativo en el que los granos de café no se esparzan por la superficie, como el secado con secadores solares híbridos podría mejorar la calidad, alcanzar los estándares sanitarios y reducir las pérdidas económicas. En la Sierra Mariscal se reporta una producción de 350.0 mil toneladas de café al año. La demanda de secado en la zona Sierra Mariscal requiere de equipos optimizados que resulten viables, esto con el fin de dar paso a una mejora en la calidad de vida de los productores, tanto económica, social y cultural.

Los inconvenientes al secado al sol asociados al proceso de secado de granos de café, como la inestabilidad del clima, que demeritan la calidad, donde la radiación solar no es fiable durante la temporada de cosecha dejan una brecha de estudio; donde un secador solar híbrido podría continuar el proceso de secado durante horas sin sol mediante energía solar térmica o apoyo térmico con almacenamiento de calor.

1.2.7 Hipótesis

El secado de granos de café con un secador híbrido solar-gas, optimizado para la Sierra Mariscal en Chiapas, en términos de puede reducir los costos de secado y el tiempo de retorno de la inversión, considerando la fracción solar, y la energía específica; con relación al secado en patio e invernadero puede ser termo-económicamente viable.

1.3 Objetivos

De acuerdo con la revisión y análisis del estado del arte se planteó el siguiente objetivo de esta investigación científica, así también, los objetivos específicos, alcances y productos.

1.3.1 Objetivo general

Estudiar la viabilidad termo-económica del secado de granos de café con un secador híbrido solar-gas, en la Sierra Mariscal en Chiapas, en términos de los costos de secado y el tiempo de retorno de la inversión, y considerando la fracción solar, y la energía específica; el secado se realiza por lotes utilizando secado en patio e invernadero abierto, como referencias. El suministro de calor se realiza con tecnología de calentamiento solar-aire y calentamiento solar-agua.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Establecer el caso de estudio y la configuración de un sistema de secado solar.
- b) Desarrollar la estrategia de simulación térmica-económica del sistema híbrido solar-gas con colectores solares de aire y agua en función de la temperatura, humedad relativa y tiempo de secado.
- c) Establecer la metodología de optimización térmica y económica para el diseño de los calentadores solar-aire-agua del secador híbrido en términos de la fracción solar, energía específica solar-gas y costos asociados (costo de secado y tiempo de retorno de inversión).
- d) Diseñar, implementar y realizar pruebas de secado solar en la Sierra Mariscal.

1.3.3 Alcances

El secado se realiza en un sistema de calentamiento solar-aire y un sistema de calentamiento solar-agua; bajo las condiciones climáticas de la Sierra Mariscal en Chiapas, México. La optimización térmica se realiza mediante análisis paramétrico utilizando nomogramas de diseño para identificar la fracción solar óptima y la energía útil óptima; una vez optimizado térmicamente, en la parte económica se determina el costo de secado y el tiempo de retorno de la inversión en relación con los costos del secado en patio y en invernadero abierto.

El estudio aplica para el secado de granos de café procesado en pergamino y bajo las condiciones climáticas de la Sierra Mariscal, clima tropical A_w .

1.3.4 Productos

- a) Simulador termo-económico del sistema híbrido solar-gas con colectores solares de aire y colectores de agua en función de la temperatura, humedad relativa y tiempo de secado.
- b) Metodología de optimización térmica y económica para el diseño del sistema de secador solar en términos de la fracción solar, energía específica solar-gas y costos asociados.
- c) Diseño, implementación y puesta en operación del prototipo de secado solar para café.
- d) Identificar la energía específica y el costo de secado del sistema optimizado para la zona Sierra Mariscal
- e) Dos artículos JCR y dos de congreso para difusión de resultados.
- f) Grado de doctorado.

1.4 Estructura de Tesis

En el **Capítulo 1** se presenta la revisión bibliográfica que justifica el trabajo de tesis, así como, los objetivos y alcances de este trabajo. En el **Capítulo 2**, se presentan los fundamentos teóricos, las condiciones climáticas en la zona de estudio, y los modelos para realizar el diseño y dimensionamiento del sistema de captación solar, así como un sistema de referencia. En el **Capítulo 3** se presenta la estrategia de solución del modelo matemático, haciendo una descripción del simulador, planteando la configuración del sistema de referencia en la plataforma de simulación y verificando lo desarrollado. En el **Capítulo 4** se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones, el comportamiento del sistema de referencia, así como el diseño y dimensionamiento de un sistema híbrido para el secado de café en la Sierra Mariscal. El **Capítulo 5** presenta las conclusiones y recomendaciones de trabajo realizado, así como también los trabajos futuros propuestos.

En un primer artículo denominado *“Thermo-economic analysis of sun drying patio coffee in the Sierra Mariscal, Chiapas-México”* se reportó que, el rendimiento del secado al sol en el patio depende principalmente del espesor de café y de la irradiación; la energía específica más baja de 8.8 MJ/kg a 10.0 kg/m² de espesor de cama y además el espesor óptimo del lecho de café resultó de 10.0 kg/m² y el estándar de 5.0 kg/m².

En un segundo artículo denominado *“Thermo-economic comparative of open-greenhouse and sun-patio coffee drying in the Sierra Mariscal Chiapas-México”* se reportaron los siguientes hallazgos: Las normas sanitarias se pueden lograr cumplir en el secado con invernadero abierto OGH con un costo similar al del patio. La energía específica de secado promedio resultó de 10.6% menor en el invernadero abierto que en el patio. El secado en invernadero abierto permite ahorrar 14.0 veces la superficie requerida para el secado.

Capítulo 2. Materiales y método

En este Capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos, el caso de estudio, el método de optimización termo-económica del secador híbrido, así como los modelos térmicos y económicos que evalúan las figuras de mérito.

2.1 Fundamentos teóricos

Fracción solar	La fracción solar de un sistema de colección solar corresponde a la cantidad de energía solar obtenida a través de la tecnología solar que puede suministrar al proceso dividido por el total de la energía que se requiere
Cinética de secado	Cinética de secado describe los cambios del contenido de humedad de los granos de café en función del tiempo.
Energía específica	La energía específica corresponde a la energía que se requiere para evaporar la cantidad de agua por unidad de masa en MJ/kg .
Tiempo de secado	El tiempo de secado se determina gráficamente y corresponde al tiempo total que involucra reducir el contenido de humedad $M(t)$ de 53.0% hasta 10.0-11.0% de los granos de café.
Secado solar	El secado solar consiste en secar el producto en un contenedor donde la deshidratación del producto no es expuesta directamente a sol. En el secado solar se utilizan secadores invernaderos cubiertas de nailon, secadores híbridos utilizando colectores solares para el calentamiento de aire.
Secado al sol	El secado al sol se realiza esparciendo el producto sobre una superficie donde la radiación incide directamente sobre el producto, a su vez, evapora el agua del grano.

2.2 Caso de estudio

La selección de caso de estudio involucra la selección de la muestra de café (*café arábico*), la selección del método de secado de referencia, la localización, el establecimiento del tipo de clima predominante en la temporada de cosecha, y el método de secado híbrido solar propuesto.

2.2.1 Selección de muestra de café, condiciones ambientales y método de secado

El establecimiento de la energía específica y costos nivelados de referencia involucró seleccionar la muestra de café predominante en la zona, las condiciones climáticas de acuerdo con la localización y la identificación de los métodos mayormente utilizados

Selección de la muestra de café

Chiapas es el Estado que se considera el mayor productor de café en México, aportando 37.0- 41.0% [13]. En Chiapas, la región Sierra Mariscal, logra impactar con un 24.5% de la producción a nivel Nacional. La variedad de café arábica se considera la predominante en la región Sierra Mariscal de Chiapas y en el eslabón del proceso, el grano es predominante lavado.

Localización y condiciones climáticas

Este estudio involucra la caracterización del lugar de estudio y el tipo de clima predominante en la temporada de cosecha. Las condiciones climáticas de Nuevo Pacayal, Municipio de Bella Vista, Chiapas, México, (Latitud 15.66, y Longitud 92.31). El clima es tropical (A_w) según la clasificación de Köppen. La temporada de cosecha es de noviembre a abril, de acuerdo con lo encuestado a productores de la región. La **Figura 2.1 a-c** muestra

las condiciones meteorológicas anuales en el lugar de la prueba, destacando la temporada de cosecha, que va de noviembre a abril. En la **Figura 2.1a** se muestra que, en la temporada de cosecha, la irradiancia solar más baja y la más alta fueron en diciembre y abril (313.09 y 594.035 MJ/m^2), con una irradiación solar media anual de 1548.0 kWh/m^2 -año. La **Figura 2.1b** se muestra que el intervalo de temperatura ambiente de diciembre a abril es de 21.7-28.11 $^{\circ}C$. El intervalo de humedad relativa es de 51.8-81.6%; el máximo se presenta en noviembre y el mínimo en abril. En el mismo periodo, la **Figura 2.1c** muestra que el intervalo de velocidad del viento es de 0.29-1.16 m/s ; la media mínima es en noviembre (0.33 m/s) y la máxima en febrero (1.16 m/s); el intervalo de precipitación pluvial mensual es de 2.9 a 262.1 mm .

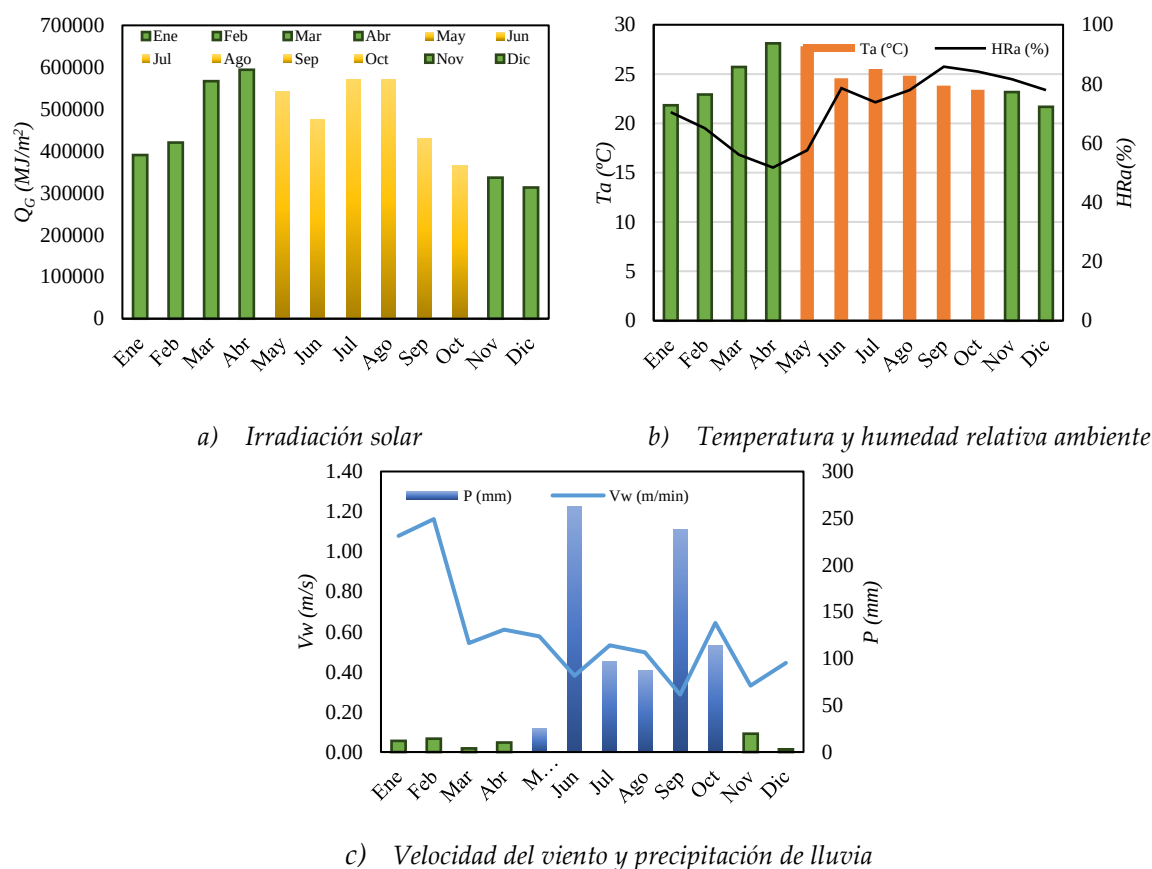


Figure 2.1. Condiciones ambientales.

En la Sierra Mariscal, Nuevo Pacayal municipio de Bella Vista cuenta con un clima A_w . El clima A_w considerado dentro del mapa de clasificación de climas descrito por Köppen-Geiger [85] es predominante en la producción de café a nivel mundial.

Selección de método de secado de referencia

El método de secado de referencia es el secado al sol en patio, el cual, es el método predominante entre los caficultores en la región de estudio, no se identificaron productores en la región que utilicen actualmente otro método. El secado en patio consiste en reducir la humedad de los granos de café de 53.0% al 11.0-12.0%. La reducción de humedad se realiza con energía solar directa sobre camas de granos de café extendidas sobre patios, con mezclado de los granos a intervalos de tiempo y haciendo almacenamiento del café durante las horas nocturnas. El espesor de cama de secado de granos de café es de 0.5-1.0 *cm* de altura, y en ocasiones hasta de 3.0-10.0 *cm*, esto, dependiendo del espacio disponible de cada productor. El contenido de humedad se monitorea de manera visual y táctil, tomando como referencia muestras caracterizadas por gravimetría. En la temporada de cosecha, el tiempo de secado usualmente es de 2.5-3.5 días.

2.2.2 Selección de métodos de secado para el caso de referencia

El caso de secado de referencia comprende determinar los costos de secado en el secado en patio tal como lo realizan los caficultores, seguido por experimentación en patio y en invernadero abierto. El estudio del método de secado en patio por caficultores comprende la determinación del costo de secado en patio, de acuerdo con una encuesta a 30 productores de la región. Luego, el costo nivelado del secado en patio se determinó

por experimentación en la temporada de cosecha, así como determinando los parámetros involucrados en el secado. Por último, el costo nivelado del secado en un invernadero abierto se determinó experimentalmente, como se indica en la **Figura 2.2**.

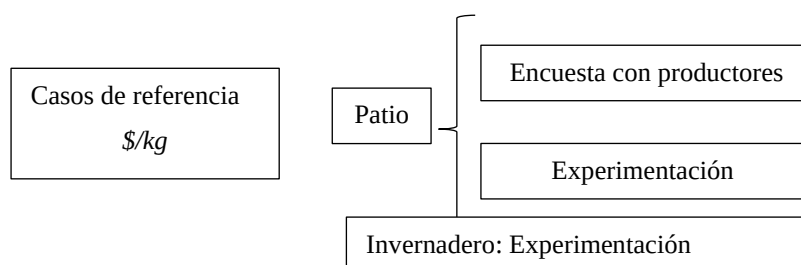


Figura 2.2. Métodos de secado de referencia.

Encuestas de secado en patio a los caficultores de la región

El costo de secado en patio por encuestas se determinó entrevistando a 30 caficultores de la región de la Sierra Mariscal del municipio de Bella Vista. En el estudio se encontró que, los caficultores disponen de patios de 100 m^2 en promedio, para secar 2.0-3.0 t de café pergamino por temporada. La cantidad de café que se pueden secar en promedio en el patio de 100.0 m^2 es de 300.0 kg/lote de café húmedo aproximadamente. Los caficultores identifican el contenido de humedad final de grano de manera visual, el 60.0% menciona almacenarlo con un contenido de humedad del 20.0%, y el otro 40.0% de los productores dice almacenarlo con un contenido de humedad final de 11.0-12.0%. Los granos secos presentan un color azul en toda la superficie y con dureza.

Como se muestra en la **Tabla 2.1**, de acuerdo con los resultados de la encuesta aplicada a los productores. El tiempo de secado fue de 3.0 a 5.0 días en los meses de diciembre a enero, y de 2.5 días en los meses de febrero a abril, ya que el clima varía considerablemente de los meses de la temporada. También, el tiempo de secado varía de

acuerdo con la cantidad del producto, humedad del grano. El costo de secado mínimo y máximo de un kilogramo de café pergamino seco resulta de 6.0-8.0 \$/kg, considerando el pago por jornalero y los días de secado. Sin embargo, en los costos, los productores no consideran aun la renta de los patios, que puede llegar a ser de 150.0-750.0 \$/lote (250.0-400.0 kg).

Tabla 2.1. Encuesta experimental de tiempo, cantidad y costos de secado en campo.

No. Productor	Tiempo de secado (d)	Cantidad (kg-húmedo)	Patio (m ²)	Humedad (%)
1	3.0-5.0	250.0-400.0	80.0-117.0	Visual
2	2.5 - 3.0	180.0	120.0	12.0
3	3.0 - 3.5	180.0-200.0	60.0-72.0	20.0
4	2.0- 3.0	345.0	18.0-15.0	10.0
5	2.5 - 3.0	180.0	144.0	20.0
6	2.5-3.5	200.0	90.0	Visual
7	3.0-4.0	400.0	120.0	12.0
8	2.0-3.5	350.0	90.0	12.0
9	3.0-3.5	400.0	100.0	Visual
10	2.5 - 3.0	350.0	120.0	20.0
Promedio		300.5	100.0	

Experimentación de secado en patio

La energía específica, el tiempo de secado, y los costos nivelados del secado se determinaron una vez que se identificaron los flujos de energía en cada una de las camas de secado, y los costos económicos involucrados en el secado. La determinación de los flujos de calor se realizó con balances de energía horarios en cada cama de secado, **Figura 2.3**. En el patio, la energía solar (Q_G) incide sobre la cama de café en el patio a razón de la potencia solar (G), incrementando la temperatura de la cama de café, lo que permite evaporar la masa de agua (Q_{ev}) dentro de los granos. La masa de agua se evapora al ambiente, así como la pérdida de calor $Q_p = (Q_G - Q_{ev})$. En este caso, en el secado en patio no se consideró la transferencia y almacenamiento de calor. En el estudio, se hizo también

un estudio paramétrico para identificar el espesor de cama de café con el menor costo y los tiempos de secado.

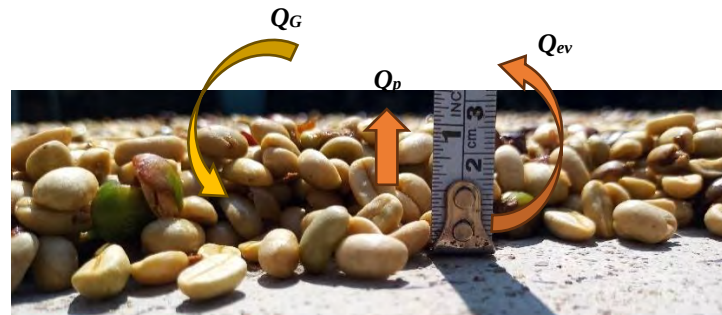


Figura 2.3. Flujos de calor en la cama de café en patio.

Para esto, en patio se utilizaron espesores de cama de 2.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 20.0 kg/m^2 . En la temporada de cosecha de enero-marzo se realizaron cinco campañas experimentales. El costo de secado de café se redujo de forma exponencial de 8.9 a 1.8 $\text{MX}\$/\text{kg}$ cuando el espesor de cama de café incrementó de 2.0 a 20.0 kg/m^2 . El intervalo de costos se debe a las variaciones del tiempo de secado que involucra cada espesor (18.0-38.0 h). En el estudio, el mejor costo de secado resultó para un espesor de cama de 10.0 kg/m^2 , después de esto, el costo de secado no fue significativo.

Experimentación de secado en invernadero abierto

La energía específica, el tiempo de secado, y los costos nivelados del secado se determinaron con los flujos de energía en cada una de las camas de secado, y los costos económicos involucrados en el secado en el invernadero ubicado en la Sierra Mariscal. La determinación de los flujos de calor se realizó con balances de energía horarios en cada cama de secado. Las pruebas experimentales se realizaron por gravimetría y balances de energía, monitoreando las condiciones de secado.

En el invernadero abierto, la energía solar (Q_G) incide sobre la superficie de nailon a razón de (G), esto incrementa la temperatura dentro del invernadero de forma convectiva a la cama de café. La masa de agua dentro de la cama de café se evapora al ambiente (Q_{ev}) por ventilación natural dentro del invernadero abierto, así también la pérdida de energía $Q_p = (Q_G - Q_{ev})$, **Figura 2.4**. En este caso, no se considera la transferencia de energía por los materiales de construcción. También se realiza un estudio paramétrico para los tiempos de secado. El costo nivelado considera los parámetros térmicos y económicos; los térmicos como el tiempo de secado y la energía específica y lo económico, el periodo de recuperación de la inversión en ambos métodos.

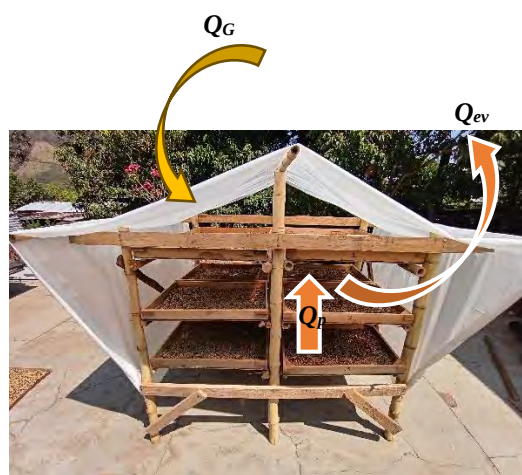


Figura 2.4. Flujos de calor en camas de secado en invernadero.

En la temporada de cosecha de marzo a abril se realizaron cuatro campañas experimentales. La capacidad de carga de café en el invernadero fue de 135.0 kg esparcidos uniformemente en 12.0 charolas de 0.71 m^2 (14.0 kg/m^2) y en el patio 10.0 kg/m^2 . El secado de café con el invernadero abierto logró reducir en promedio 10.6% la energía específica en relación con el secado en patio, lo que tiene un impacto en los costos de secado. En el invernadero abierto, la máxima y mínima energía específica fue de 5.36-10.23 MJ/kg y 7.95-10.71 MJ/kg para el secado en patio. Además, con el invernadero se logró reducir 14.0 veces el área de secado y 2.3% el tiempo de recuperación de la inversión

comparado con el patio. En el invernadero el tiempo de retorno de la inversión fue de 7.4.4 meses y 76.17 meses en el patio. En el invernadero abierto, los costos de inversión por construcción del equipo se redujeron 88.0% y el área de secado 80.0% en relación con el patio, aunque el pago del personal incremento 56.0% en el invernadero.

2.2.3 Cinética de secado

Tiempo de secado, la energía específica y el desempeño térmico experimental del secado se determina con la cinética de secado a partir de los conjuntos de datos experimentales obtenidos de acuerdo con la metodología de la **Sección 2.2.2**. La cinética de secado puede expresarse en función de la caída exponencial del radio de humedad MR para un tiempo t , descrita por la **Ec. (2.1)** [86], donde k es la constante de secado.

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.1)$$

El radio de humedad (MR) del café pergamino bajo condiciones experimentales puede determinarse como función del contenido de humedad ($M(t)$) de la muestra de café en un tiempo t , descrita por la **Ec. (2.2)**. Donde $M(t)$ es el contenido de humedad en un instante de tiempo en base humedad ($w.b$), $M(0)$ el contenido de humedad inicial ($w.b$), y M_e el contenido de humedad de equilibrio ($w.b$).

$$MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M(0) - M_e} \quad (2.2)$$

El contenido de humedad $M(t)$ de los granos de café se determina con la **Ec. (2.3)** siguiendo a [87].

$$M_{(t)} = \frac{W_0 - M_t}{W_0} \quad (2.3)$$

W_0 es el peso inicial de la muestra de café (kg) y W_t es el peso de la muestra en un instante de tiempo t .

El tiempo de secado se determina gráficamente cuando el contenido de humedad $M_{(t)}$ alcanza el 10.0-11.0%, en un tiempo t . La energía específica de secado Q_{sp} (MJ/kg) y la eficiencia térmica de secado η_d (-) se determinan con la Ec. (2.4) y (2.5) siguiendo a [20] y [88].

$$Q_{sp} = \frac{Q_G}{W_w} \quad (2.4)$$

$$Q_{sp} = \frac{Q_G}{W_w} \quad (2.5)$$

El Q_{sp} considera la irradiación solar sobre la muestra de café Q_G (MJ) a lo largo del proceso de secado, desde un contenido de humedad inicial de la muestra de café de 53.0% y final de 10.0-12.0% (*w.b*). W_w es la masa de agua removida de la muestra de café, donde $W_w = (W_0 - W_t)$. La energía solar Q_G se determinan con la Ec. (2.6), donde G es la irradiación solar en la superficie horizontal y A_{cd} es el área de secado.

$$Q_G = A_{cd} \int_{t_i}^{t_f} G \, dt \quad (2.6)$$

En las pruebas experimentales de secado de café en patio y en invernadero abierto, el monitoreo de G , $M_{(t)}$, W_0 y W_t y del resto de las condiciones meteorológicas se realiza en

pasos de tiempo específicos durante la prueba experimental. La pérdida de peso de las muestras de café W_t se registra para un paso de tiempo de 60.0 *min* con una balanza comercial (± 5 g). El monitoreo de las condiciones ambientales se realiza para cada minuto en todas las campañas experimentales y en la temporada de cosecha de enero-abril.

2.2.4 Propuesta de sistema de secado híbrido

En el caso propuesto del secador híbrido solar-gas se determinan la fracción solar y los costos de secado, y tiempo de recuperación de la inversión, considerando la energía específica similar a los casos de referencia, así como, los costos económicos por la construcción y operación del secador rotativo. El secador híbrido solar-gas para secar café se integra de un calentador solar para aire, un calentador solar de con almacenamiento de agua caliente con intercambiador de calor agua-aire, y un horno de secado convectivo-rotativo, además de un quemador para suministro auxiliar con gas L.P. La determinación de los flujos de calor se realizó mediante simulación en TRNSYS.

En el horno de secado, el contenido de humedad inicial y final de los granos de café es de 53.0% y 11.0-12.0% *w.b.* El secado se realiza por medio de aire caliente que circula dentro del horno convectivo-rotativo mediante un ventilador, facilitando la remoción de humedad de los granos. El secado convectivo-rotativo favorece a la transferencia de calor y masa, y la homogenización la temperatura de los granos mediante el mezclado continuo. En el horno-convectivo, el flujo de calor Q_r incide sobre el grano de café a razón del calor Q_c generado por combustible por una fuente externa por convección forzada. El flujo de calor incrementa la temperatura de los granos de café hasta generar la evaporación de la masa de agua Q_{ev} . La masa de agua evaporada es llevada al ambiente por ventilación forzada así también la pérdida de energía Q_p . La transferencia de energía de la envoltura del grano hacia lo interno se produce por difusión y convección, por lo

que la cinética de secado nos permite tener un mejor panorama de difusividad de humedad del grano.

El secador híbrido puede suministrar aire caliente combinando calentamiento solar-aire, solar-agua y gas, según las condiciones climáticas que puedan presentarse en el proceso de secado como soleado, parcialmente soleado, muy nublado y nocturnas. El calentamiento solar-aire directo depende de la disponibilidad solar, el calentamiento solar-agua permite calentar el aire con el agua caliente por medio de un intercambiador de calor para disponer de calor solar en momentos de nublados y durante la noche; y el calentamiento con gas para disponer de calor en días nublados y durante la noche como se muestra en **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2. *Suministro de calor según el requerimiento solar.*

	Soleado	Parcialmente soleado	Muy nublado	Noche
Solar-aire				
Solar-agua				
Gas				

El calentador solar-agua cuenta con tecnología de captadores planos de agua con vidriado simple, vidriado doble, un tanque de almacenamiento, un intercambiador de calor y dos bombas hidráulicas (B_1 , B_2) para recirculación del agua. El secador híbrido puede suministrar aire caliente de forma directa con los calentadores solar-aire y de forma indirecta con los calentadores solar-agua, y generando calor directamente con gas L.P en la cámara de secado. El secador híbrido funciona de acuerdo con el perfil de secado, y según las condiciones climáticas que puedan presentarse en el proceso de secado como soleado, parcialmente soleado, muy nublado y nocturnas. En la **Figura 2.5** se muestra el secador híbrido solar-aire con solar-agua y gas.

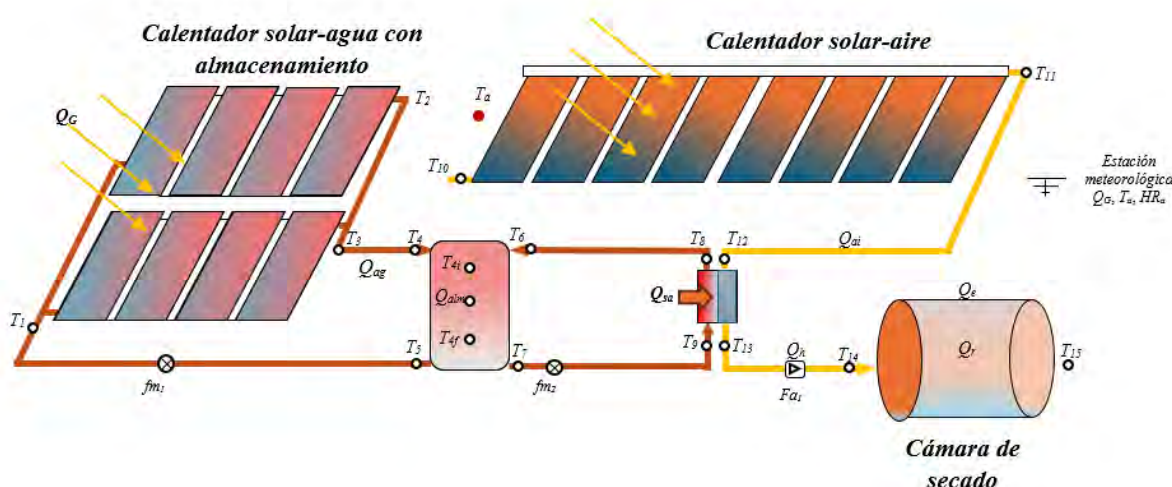


Figura 2.5. Modelo físico del secador híbrido solar-gas propuesto.

2.3. Método de optimización termo-económica del secador híbrido (FS_h , C_{sc} , P_b)

La optimización del diseño se basa en el secado por lotes en términos de la fracción solar, la energía útil solar, el costo de secado y el tiempo de recuperación de la inversión, abatiendo el costo de secado del café C_{sc} (\$/kg) y el menor tiempo de retorno de la inversión (P_b). El calentador híbrido se optimiza considerando la energía específica que involucra el secado de café en la Sierra Mariscal, en patio y en invernadero abierto. Donde se consideran adquisición de datos experimentales para determinar la curva de secado del café en patio y en invernadero abierto. El diseño del secador considera tecnología de calentamiento solar de aire y solar-agua con almacenamiento de energía acoplado a un auxiliar de gas. El método de optimización se realiza mediante un análisis paramétrico y Nomogramas de diseño para los calentadores solar-aire y solar-agua que complementan al secador híbrido solar-gas. Un análisis multivariable térmico-económico mediante la correlación de Pearson's y un análisis de importancia fue llevado a cabo para identificar los parámetros más influyentes en las figuras de mérito (FS_h , Q_{uh} , C_{sc} y P_b) siguiendo JMP V.5.0.1 System (SAS Institute, Cary, NC, USA).

En la **Figura 2.6** se muestra la metodología de optimización del calentador híbrido solar-gas, siguiendo siete etapas. En la **Etapá 1** se establece el caso de estudio y la configuración de un calentador de secado solar y en la **Etapá 2**, los procedimientos de construcción y ajuste del simulador termo-económico. La **Etapá 3** corresponde a la simulación térmica mediante variación de parámetros de los calentadores del secador híbrido, solar-agua y solar-aire. En la **Etapá 4** se construye la estrategia de optimización térmica y económica del calentador híbrido. Como datos de salida, en la **Etapá 5** se determinan las figuras de mérito térmicas y económicas optimizadas del secador híbrido.

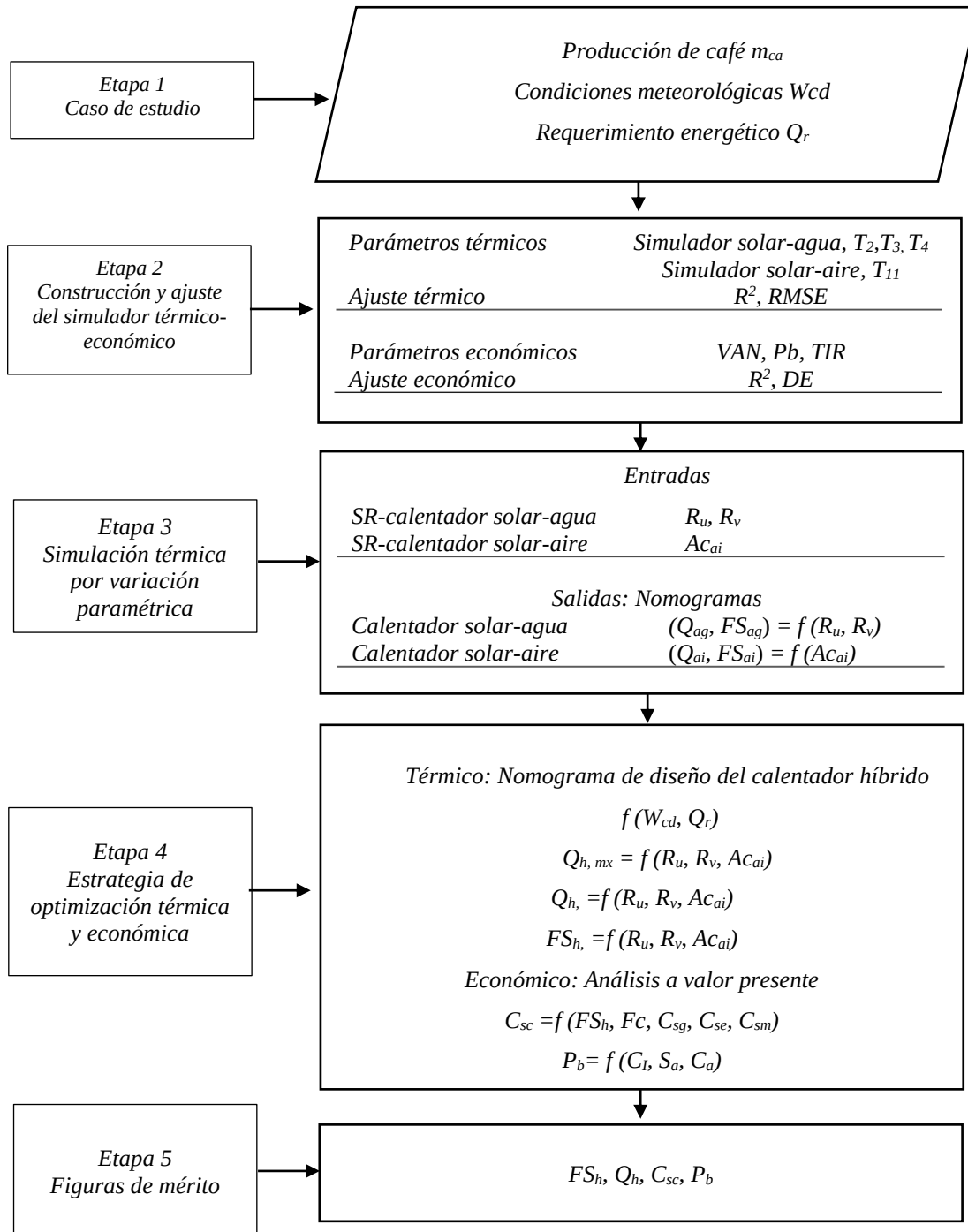


Figura 2.6. Optimización de la propuesta tecnológica.

La primera etapa, el caso de estudio se establece de acuerdo con la producción de café en la región Chiapaneca, el requerimiento energético de secado y las condiciones meteorológicas del lugar. El requerimiento energético se determina con experimentación de secado de café en patio y en invernadero abierto modelando la cinética de secado en la región Sierra Mariscal. Donde se determinan el tiempo de secado, la energía específica, costos de secado y tiempo de retorno de la inversión, presentados en la sección **Sección 2.2.2**. Así también, la configuración de un calentador de secado solar híbrido con calentadores solar-agua con almacenamiento y calentadores solar-aire similar a lo reportado por [89], presentado en la **Sección 2.2.4**.

En la segunda etapa se construye y ajusta el simulador térmico y el simulador económico de los calentadores solar-aire, solar-agua y gas que integran al secador híbrido, presentada en la **Sección 3.1**. El ajuste del simulador térmico se realiza en términos del coeficiente de determinación R^2 y la desviación estándar DE comparando la temperatura de salida de los calentadores solar-agua, T_2 , T_3 y solar-aire, T_{12} , así también solar-agua-aire T_4 respecto a los experimentales. La plataforma económica se ajusta con un caso de secado de café [40], donde se compara el valor actual neto VAN , el periodo de recuperación de la recuperación P_b y la tasa de retorno de la inversión TIR en términos de la diferencia porcentual.

En la tercera etapa se desarrolla la estrategia de simulación térmica y económica de los calentadores solar-aire, solar-agua y gas que integran al secador híbrido. La estrategia de simulación térmica se realiza por variación paramétrica, involucra variar la razón de uso R_u y razón de volumen R_v para el calentador solar-agua con almacenamiento, y el área de captación A_{cai} para el calentador solar-aire. Con los resultados del estudio paramétrico se construyen Nomogramas de diseño para los calentadores solar-agua con almacenamiento y solar-aire, correspondiente a cada lote de secado de café, **Sección 4.1**.

El Nomogramas de diseño del calentador solar-agua con almacenamiento relaciona la fracción solar FS_{ag} y la energía útil solar-agua Qu_{ag} por área de colección con la razón de uso R_u y razón de volumen R_v . Para el caso del Nomogramas de diseño del calentador solar-aire relaciona la fracción solar FS_{ai} , y la energía útil solar-aire Qu_{ai} con el área de captación solar de aire A_{cai} .

En la cuarta etapa, la estrategia de optimización térmica-económica del calentador híbrido con tecnología de calentamiento solar-aire, solar-agua y gas, involucra el secado por lotes de café en la región Sierra Mariscal en Chiapas. La parte térmica implica maximizar la energía que pueden entregar los calentadores solares por unidad de área de captación ($Q_{h,mx}$) que identifica la fracción solar híbrida óptima (FS_h); optimizado el calentador híbrido térmicamente, la parte económica, minimiza los costos unitarios del secado del café C_{sc} (\$/kg) y el tiempo de retorno de la inversión (P_b) para cada lote secado en la temporada de cosecha.

La estrategia de optimización térmica se realiza construyendo Nomogramas de diseño del calentador híbrido que cruza información de las fracciones solares de los Nomogramas de diseño del calentador solar-agua con almacenamiento y del calentador solar-aire. En el Nomograma de diseño híbrido, la fracción solar óptima FS_h , y la energía útil solar Qu_h , se identifican cuando el calentador solar híbrido alcanza la máxima energía solar por unidad de área para cada fracción solar $Q_{h,mx}$; que los calentadores solar-agua y solar-aire pueden aportar.

Por su parte, la estrategia de optimización económica relaciona los costos de secado C_{sc} y el tiempo de recuperación de la inversión P_b , con los lotes de secado (90.5, 31.0 y 22.0 lotes) que el calentador solar híbrido optimizado puede secar en la temporada de cosecha.

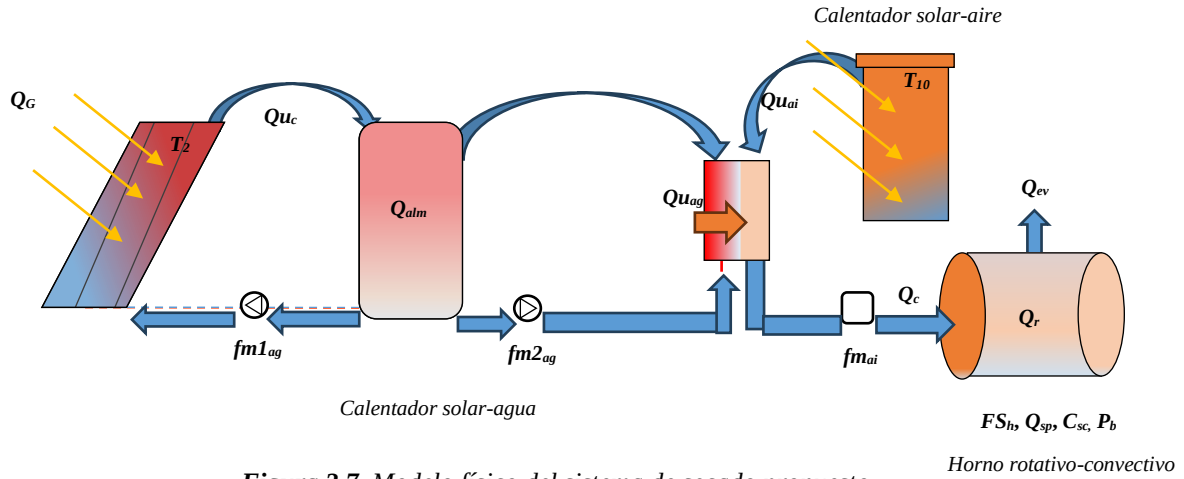
En el estudio económico se considera un escenario a 20.0 años y un subsidio del 30.0% para el caso de la tecnología solar, que, a su vez, se compara con el patio y en invernadero.

Como datos de salida, en la quinta etapa, se obtienen las figuras de mérito. Para el calentador solar-agua con almacenamiento se obtiene la fracción solar FS_{ag} , el área de captación solar Ac_{ag} , el volumen del tanque de almacenamiento V_t , los flujos de recirculación agua f_{mag} ; y para el caso de calentador solar-aire, la fracción solar FS_{ai} , el área de captación solar Ac_{ai} . En lo económico, el costo de secado C_{sc} y el periodo de recuperación de la inversión P_b del secador híbrido solar-gas.

2.3.1 Modelo térmico calentadores solares (Qu_{ag} y Qu_{ai})

La **Figura 2.7** muestra que los calentadores solar-aire reciben la radiación solar sobre superficie Q_G , ocasionando un incremento de la temperatura del aire T_{10} a razón de Q_{ai} . La energía Qu_{ai} se transporta a la cámara de secado u horno rotativo-convectivo de forma directa a razón de Q_r evaporando la masa de agua del café a razón de Q_{ev} . Si la energía requerida Q_r para el secado es insuficiente, la energía Qu_{ag} del calentador solar-agua se transfiere por medio del intercambiador de calor a razón de Qu_{sa} . La Q_r es la suma de la energía del sistema de aire Qu_{ai} y la energía transferida por el intercambiador de calor Qu_{ag} , más la energía por combustible. Por otra parte, el sistema solar-agua por medio de Q_G incrementa la temperatura del agua de salida T_2 and T_3 que se almacena en el tanque térmico a razón de Q_{alm} . La Q_{alm} se transfiere al aire de secado por medio del intercambiador de calor a razón de Qu_{ag} , si la Qu_{ag} es menor que la energía requerida Q_r para secar, el calentador auxiliar por gas L.P incrementa la temperatura del aire para equilibrar el intercambio de la energía a razón de Q_c . Para días insuficiente irradiancia se considera un calentador auxiliar por gas L.P adicional para suministrar calor al sistema de aire. La fracción solar del sistema híbrido FS_h se determina relacionando la energía

proporcionada por el sistema de aire Qu_{ai} , y la energía transferida por el sistema de agua Qu_{ag} más la energía Q_c con la energía requerida de secado Q_r .



Calentador solar-agua con almacenamiento térmico (Q_{uc})

La energía útil Q_{uc} de los calentadores solares de agua se determina con la Ec. (2.7).

$$Q_{uc} = \int_{t_1}^{t_2} \left(a_0 + a_1 \left(\frac{T_p - T_a}{G} \right) - a_2 \left(\frac{(T_p - T_a)^2}{G} \right) \right) Q_G dt \quad (2.7)$$

donde, la T_p (°C) corresponde a la temperatura promedio dado por $(T_1 - T_2) / 2$, G es la irradiancia solar (W/m^2), a_0 , a_1 , a_2 los coeficientes ópticos y pérdidas de calor del campo de colección, y T_a (°C) la temperatura ambiente. La energía solar Q_G (MJ) se determina con la Ec. (2.8).

$$Q_G = \int_{t_1}^{t_2} (G A c_{ag}) dt \quad (2.8)$$

Ac_{ag} indica el área de captación solar de los calentadores solar-agua, t_1 y t_2 corresponde al tiempo inicial y final de secado en la simulación, en este caso se considera de 7:30 *a.m* a 17:30 *p.m* en la temporada de cosecha de noviembre-abril.

Almacenamiento térmico

En el tanque, la energía almacena Q_{alm} (MJ) se determina con la Ec. (2.9). Donde, m_{ag} es la masa de agua caliente almacenada (kg), Cp_{ag} el calor específico del agua (kJ/kgK), T_{4i} y T_{4f} la temperatura inicial y final en el tanque de almacenamiento (°C).

$$Q_{alm} = m_{ag} Cp_{ag} (T_{4i} - T_{4f}) \quad (2.9)$$

El coeficiente de pérdida de calor del tanque U_{Lt} se determina con la Ec. (2.10). Donde, LMTD corresponde al logaritmo de la temperatura promedio siguiendo a [89] y T_a la temperatura ambiente. En el estudio, U_{Lt} se considera de 3.21 W/m²K.

$$U_{Lt} = \frac{m_{ag} Cp_{ag} (T_{4i} - T_{4f})}{T_a (A_t LMTD)} \quad (2.10)$$

Intercambiador de calor

En el intercambiador de calor, la energía solar transferida del agua Qu_{ag} al aire de secado se determina con la Ec. (2.11).

$$Qu_{ag} = \int_{t1}^{t2} \varepsilon C_{ar} (T_{11} - T_{10}) dt \quad (2.11)$$

ε es la efectividad del intercambiador de calor, C_{ar} la capacitancia térmica, T_{13} y T_{12} la temperatura de entrada y salida del aire de secado. La ε se considera de 0.39 ± 0.16 a partir de los datos experimentales reportados por [89].

Calentadores solar-aire

En los calentadores solar-aire, la energía útil Qu_{ai} (MJ) se determina con la Ec. (2.12), siguiendo a [89]. La T_p corresponde a la temperatura promedio $(T_{11}-T_{10}) / 2$, G es la irradiancia solar, a_0 , a_1 , a_2 los coeficientes ópticos y perdidas de calor de los calentadores de aire, y T_a la temperatura ambiente.

$$Qu_{ai} = \int_{t_1}^{t_2} \left(a_0 + a_1 \left(\frac{T_p - T_a}{G} \right) - a_2 \left(\frac{(T_p - T_a)^2}{G} \right) \right) Q_{G(ai)}, dt \quad (2.12)$$

La energía solar $Q_{G(ai)}$ (MJ) sobre la superficie de los calentadores de aire se determina con la Ec. (2.13).

$$Q_{G(ai)} = \int_{t_1}^{t_2} (G A c_{ai}) dt \quad (2.13)$$

donde, $A c_{ai}$ es el área útil de los calentadores solares de aire, t_1 y t_2 corresponde al tiempo inicial y final de simulación a partir del perfil de secado.

2.3.2 Modelo de optimización de calentador híbrido solar agua-aire-gas (FS_h)

El modelado térmico consta en determinar la fracción solar óptima FS_h , la energía útil solar Qu_h , cuando el calentador solar híbrido alcanza la máxima energía solar por unidad

de área para cada fracción solar $Q_{h,mx}$; que los calentadores solar-agua y solar-aire pueden aportar.

El máximo aporte energético que el calentador solar híbrido $Q_{h,mx}$ ($kWh/m^2-a * FS_h$) puede aportar se determina con la Ec. (2.14).

$$Q_{h,mx} = Qu_h * FS_h \quad (2.14)$$

Para los calentadores solar-agua con almacenamiento térmico la $Q_{ag,mx}=Qu_{ag}*FS_{ag}$; y para los calentadores solar-aire la $Q_{ai,mx}=Qu_{ai}*FS_{ai}$, donde Qu_h (kWh/m^2-a) corresponde a la suma de la energía útil solar de los calentadores solar-agua con almacenamiento y la energía útil solar de calentador solar-aire sobre el área de colección total Ac_h , $Qu_h = Qu_{ag} + Qu_{ai}$.

El modelo de optimización de la fracción solar del calentador híbrido solar-gas FS_h corresponde a la Ec. (2.15), donde, F_c corresponde a la fracción por suministro de combustible, en este caso gas L.P.

$$FS_h = 1 - F_c \quad (2.15)$$

La fracción por combustible F_c se determina siguiendo la Ec. (2.16), donde, FS_{ai} corresponde la fracción solar del calentador solar-aire y FS_{ag} a la fracción solar de calentador solar-agua con almacenamiento térmico.

$$F_c = 1 - (FS_{ai} + FS_{ag}) \quad (2.16)$$

FS_{ai} y FS_{ag} se determinan con las Ec. (2.17) y (2.18).

$$FS_{ai} = \frac{Qu_{ai}}{Q_r} \quad (2.17)$$

$$FS_{ag} = \frac{Qu_{ag}}{Q_r} \quad (2.18)$$

Q_r (MJ) corresponde a la energía requerida para el secado de café en el horno rotativo-convectivo. Q_r se determina con la Ec. (2.19).

$$Q_r = \frac{W_w}{Q_{sp}} \quad (2.19)$$

donde W_w (kg) corresponde a la masa de agua a remover del lote de café y Q_{sp} (MJ/kg) la energía específica de secado de café, en este caso se considera la menor energía específica del secado en invernadero abierto.

2.3.3 Modelo económico costos de secado y periodo de recuperación de la inversión

La optimización económica se basa en el secado por lotes de café abatiendo los costos de secado de café C_{sc} (\$/kg) y el menor tiempo de retorno de la inversión (P_b) que el calentador solar híbrido optimizado puede secar en la temporada de cosecha. En el estudio económico se considera un escenario a 20.0 años y un subsidio del 30.0% para el caso de la tecnología solar, que, a su vez, el C_{sc} y P_b se comparan con el patio y el invernadero. El costo de secado C_{sc} , y el periodo de recuperación de la inversión P_b , se determinan partiendo de la fracción solar híbrida optimizada FS_h y la fracción por combustible F_c gas L.P. En el costo de secado C_{sc} se consideran los costos unitarios por combustible gas L.P C_{sg} , costo eléctrico C_{se} , costo por manejo del equipo C_{sm} , y en el periodo de recuperación de la inversión se consideran el costo total de inversión C_I (\$), el ahorro anual S_a y el costo anual C_a . El costo de secado de café C_{sc} (\$/kg) se determina con la Ec. (2.20).

$$C_{sc} = C_{sg} + C_{se} + C_{sm} \quad (2.20)$$

El costo por combustible C_{sg} (\$/kg) se determina con la Ec. (2.21). En la Ec. (2.21) se involucran la fracción solar del calentador híbrido FS_h que permite determinar la cantidad de café seco por combustible y la F_c permite determinar el costo total por el uso de combustible gas L.P en el secado. $C_{p-l.p}$ corresponde al poder calorífico del gas L.P (55,000.0 kJ/kg-l.p), y $C_{l.p}$ costo por kilogramo de gas L.P (\$/kg-l.p).

$$C_{sg} = \frac{(1 - FS_h) * lotes * C_{p-l.p}}{F_c * Q_r * C_{l.p}} \quad (2.21)$$

El costo de secado por energía eléctrica C_{se} se determina a partir del tiempo de secado que involucra cada lote t_d (h), el consumo energético kWh_{eq} de los equipos que integran al calentador híbrido solar-gas, (bombas hidráulicas y ventiladores), y el costo de la energía C_{kWh} . C_{se} se determina con la Ec. (2.22).

$$C_{se} = \frac{t_d * kWh_{eq} * C_{kWh}}{lote} \quad (2.22)$$

El costo de secado por manejo del equipo C_{sm} se determina Ec. (2.23).

$$C_{sm} = \frac{t_d * P_{jr}}{lote} \quad (2.23)$$

El C_{sm} involucra el tiempo de secado t_d (días) totales en la temporada de cosecha en este caso 181.0 días, P_{jr} el pago del jornalero. El P_{jr} se determina realizando encuestas a los caficultores locales para determinar el pago por día del secado de café. La muestra encuestada n se determina con la Ec. (2.24), siguiendo a [90].

$$n = \frac{NZ_{\alpha/2}^2 pq}{NE^2} + Z_{\alpha/2}^2 + pq \quad (2.24)$$

N es el total del personal durante un año en la Sierra Mariscal ($N=300.0$), E es el error máximo permitido, $Z_{\alpha/2}$ es el grado de fiabilidad 95% =1.96 $p=50\%$ (0.5), $q=1-p=1-0.5=0.5$ y E es el error permitido para el 10.0% (0.1).

El periodo de recuperación de la inversión P_b se determina con la **Ec. (2.25)** para los casos del secado en patio, invernadero abierto y el secador híbrido. El P_b considera el costo total de inversión C_I (\$), el ahorro anual S_a y los costos anual C_a .

$$P_b = \frac{\sum \text{Costo de inversión } (C_I)}{\sum \text{ahorro anual } (S_a) - \text{costo anual } (C_a)} \quad (2.25)$$

donde, el costo de inversión total C_I (\$) considera la inversión por construcción del quipo C_{cs} (\$), la inversión por renta del espacio (\$), y la inversión que involucra el secado de café C_{sc} .

El ahorro anual S_a o valor residual anualizado se determina con la **Ec. (2.26)** y el costo anual o conocido como el costo anualizado C_a se determina con la **Ec. (2.27)** siguiendo a [91] .

$$S_a = \frac{S * d}{(1 + d)^{n-1}} \quad (2.26)$$

$$C_a = C_{ac} + C_c + C_e + C_m - S_a \quad (2.27)$$

donde, d es la tasa de descuento, n es la vida útil del secador (*años*), S es el capital residual por la venta del café. C_{ac} se determina con la **Ec. (2.28)**. donde C_{cs} corresponde al costo capital del secador.

$$C_{ac} = \frac{C_{cs} * d(1 + d)^n}{(1 + d)^{n-1}} \quad (2.28)$$

Capítulo 3. Construcción de estrategias de optimización

El Capítulo 3 presenta la construcción del simulador térmico-económico de los calentadores solar-aire y solar-agua que forman parte del calentador híbrido para el secado de café; la validación del simulador térmico y económico, y el desarrollo de la estrategia de optimización de ambos calentadores utilizando nomogramas.

3.1. Construcción del simulador térmico y económico

En esta sección se presenta la construcción del simulador térmico y del simulador económico de los calentadores solar-aire, solar-agua y gas que integran al secador híbrido. El simulador térmico permite obtener la energía útil Q_u de los calentadores solares y el simulador económico el costo de secado C_{sc} y retorno de la inversión P_b . El simulador térmico se construye en TRNSYS 18, en un entorno gráfico, basado en análisis por componentes [92]. El simulador económico se construye en una hoja de cálculo de Excel, basado en análisis a valor presente.

3.1.1 Simulador térmico

El calentador híbrido solar-gas para secar café se integra de un calentador solar-aire, un calentador solar-agua con almacenamiento, un intercambiador de calor agua-aire, y un horno de secado convectivo-rotativo tipo Guardiola; así como de un quemador de gas como se presenta en la **Figura 2.5** de la **Sección 2.2.4**. Ambos sistemas se desarrollan por circuitos, y componentes que se encuentran en la librería de TRNSYS 18, modelados por subrutinas e interconectados.

Simulador del calentador solar-agua con almacenamiento térmico

La **Figura 3.1** muestra la plataforma de simulación térmica de los calentadores solar-agua con almacenamiento térmico, que se divide en dos circuitos; circuito de captación solar de agua, y circuito de almacenamiento térmico con entrega de calor al proceso de secado. En el primer circuito, el campo de captación solar de agua con captadores planos calienta el agua por medio de la radiación solar incidente sobre la superficie, lo que incrementa la

temperatura del fluido de trabajo, en este caso agua, **Figura 3.1 a**. El agua caliente es transportada por la primera bomba hidráulica y se almacena en el tanque de almacenamiento del segundo circuito, **Figura 3.1 b**. El circuito considera dos divisores de flujo de agua de forma paralela a la entrada y salida del campo de colección, impulsada por la bomba B_1 .

En la **Figura 3.1 b** se muestra el circuito de almacenamiento térmico y entrega de calor al proceso de secado. El circuito cuenta con un termotanque, un intercambiador de calor agua-aire y una segunda bomba de recirculación de agua B_2 . El segundo circuito funciona de acuerdo con el perfil de trabajo que depende de las horas del proceso de secado, entregando calor al proceso por medio del intercambiador de calor agua-aire recirculando el agua con la segunda bomba hidráulica.

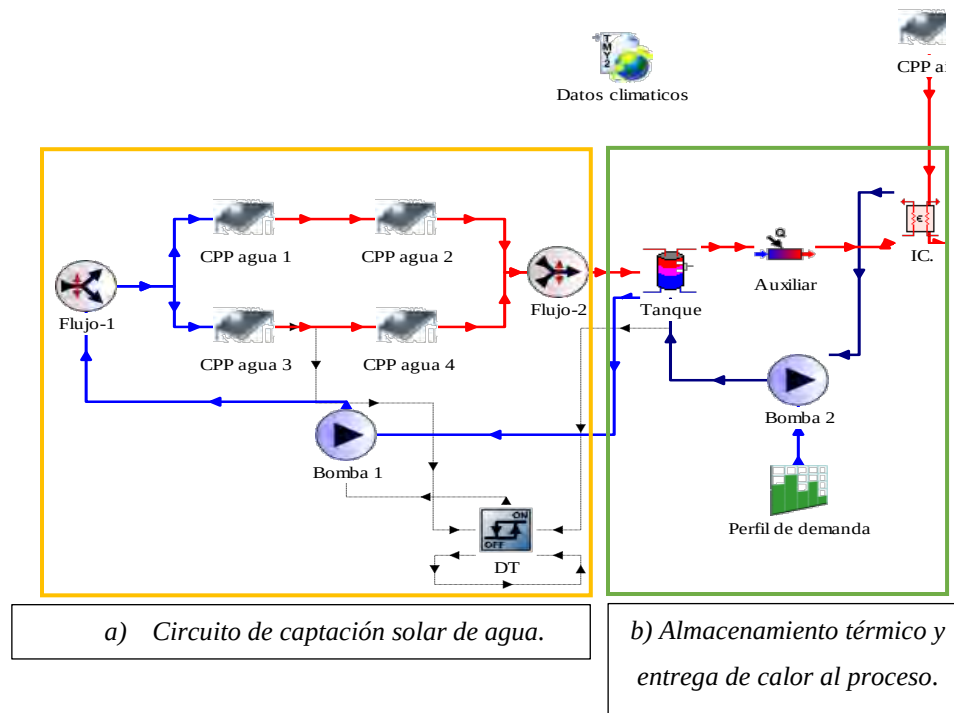


Figura 3.1. Calentador solar-agua con almacenamiento térmico.

Simulador de calentador solar-aire directo

En la **Figura 3.2** se muestra el circuito de calentadores solar-aire, que se integra de un campo de captadores de placa plana de aire, un ventilador de aire y un horno de secado

convectivo-rotativo. Los calentadores solares planos incrementan la temperatura del aire por la radiación solar incidente sobre la superficie. El aire caliente es transportado por medio de un ventilador al horno de secado, donde es utilizado para la remoción de humedad de los granos de café.

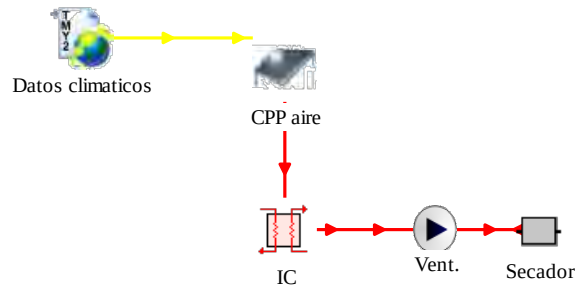


Figura 3.2. Calentador solar-aire.

Simulador de calentador híbrido solar-gas acoplado

La **Figura 3.3** muestra calentador híbrido solar-gas para secar granos de café acoplado a los circuitos del calentador solar-agua con almacenamiento térmico y los calentadores solar-aire, donde adicionalmente, se muestra un controlador diferencial de temperatura DT . El controlador permite la operación del campo de colectores planos de agua con la primera bomba hidráulica B_1 censando la temperatura de salida del campo de colección de agua y la temperatura en la parte inferior del tanque de almacenamiento. El controlador activa la B_1 con un diferencial de temperatura de $+10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, si la temperatura del campo de colección es menor que el tanque de almacenamiento por $+3$ la B_1 se apaga. La segunda bomba hidráulica B_2 funciona de acuerdo con el perfil del proceso de secado de café. Por último, se imprimen los datos de salida de forma gráfica y de texto.

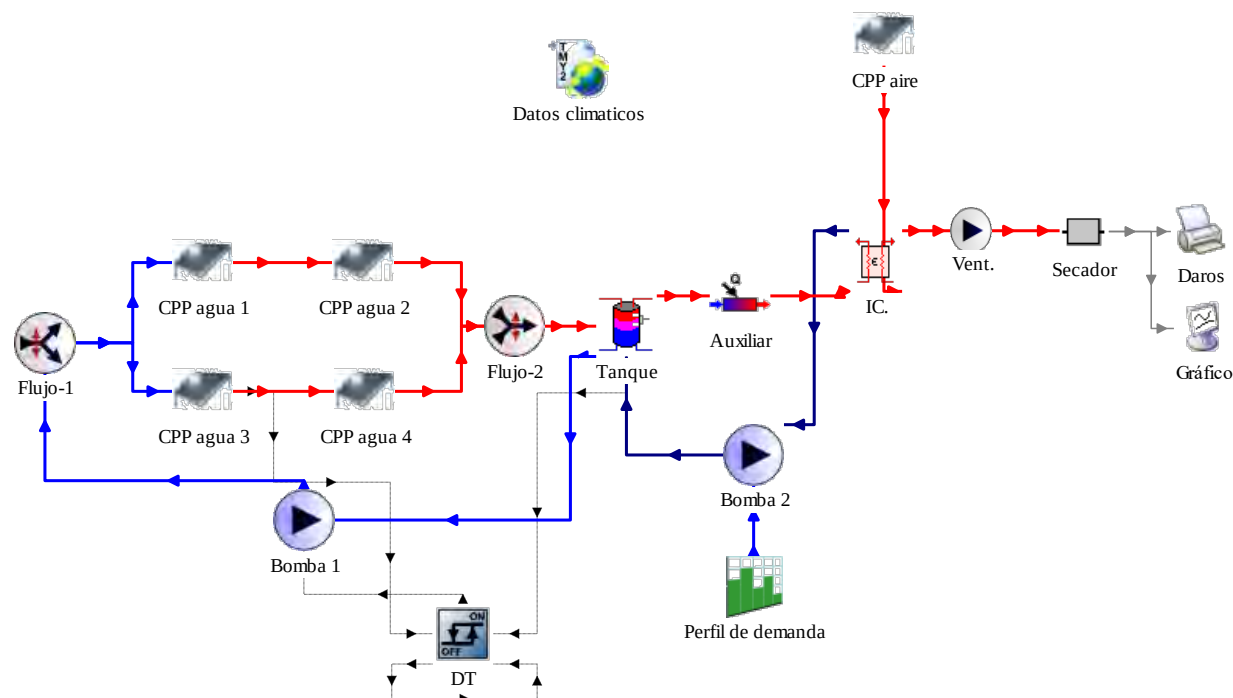


Figura 3.3. Sistema híbrido solar-agua-gas.

Características de los componentes calentador solar-agua con almacenamiento

En la **Tabla 3.1**, se describen las características y propiedades termo físicas de los calentadores solar-agua con almacenamiento térmico, como; el campo de colectores, tanque de almacenamiento, bombas e intercambiador de calor. El campo de colección corresponde a 18.6 m^2 de área neta colectores de placa plana de agua de vidrio simple y 18.6 m^2 de área neta de vidrio doble, con una configuración semi paralela. El tanque de almacenamiento térmico de 2.5 m^3 , las bombas de recirculación de agua B_1 y B_2 con frecuencia variable de 0.37 kW , que recirculan el agua a los colectores solares y al intercambiador de calor.

Tabla 3.1. Características de los componentes del sistema solar-agua con almacenamiento.

<i>Colectores solares de agua vidrio simple</i>		<i>Tanque de almacenamiento</i>	
<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Número de colectores	8.0	Altura, m	1.60
a_0 (-)	0.7468	Diámetro, m	1.55
a_1 , W/m ² K	3.42	Volumen, m ³	2.0
a_2 , W/m ² K	0.013	Eficiencia del calentador auxiliar	0.91
Azimuth, °	0.0		
Grado, °	18.0		
<i>Colectores solares de agua vidrio doble</i>			
<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Número de colectores	8.0	a_0 (-)	0.6738
C_p , kJ/kg K	4.19	a_1 , W/m ² K	2.0513
A_c , m ²	2.326	a_2 , W/m ² K	0.0010

Características del calentador solar-aire.

En la **Tabla 3.2** se describen las características y propiedades termo físicas de los calentadores solar-aire, integrado de un campo de calentadores solares de placa plana de aire y un ventilador impulsor de aire a entrada de la cámara de secado. El calentador solar-aire cuenta un área de 37.2 m² de superficie neta corresponde a 16.0 calentadores. El aire fluye a través de un sistema de calefacción solar a la cámara de secado con un ventilador de 2.23 kW con variador de frecuencia.

Tabla 3.2. Características de los componentes del calentador solar-aire.

Colectores solares de aire	
Parámetros	Valor
Número de colectores	16.0
C_p , kJ/kg K	1.01
A_c , m ²	2.326
a_o (-)	0.5421
a_1 , W/m ² K	5.1838
a_2 , W/m ² K	0.0011

3.2.2 Simulador económico

El simulador económico se construye en una hoja de cálculo de Excel. La optimización económica se realiza una vez optimizado el calentador híbrido solar-gas, abatiendo los costos de secado C_{sc} y el menor tiempo de retorno de la inversión P_b . En el simulador económico se consideran cuatro parámetros que determinan la viabilidad de un proyecto productivo; a) el valor actual neto VAN , b) la tasa de retorno de la inversión TIR y c) el tiempo de retorno de la inversión P_b . El simulador económico nos permite conocer el costo de secado por kilogramo de café C_{sc} , incluyendo los costos por combustible C_{sg} , el costo eléctrico C_{se} , y por manejo del equipo C_{sm} .

En la **Figura 3.4** se muestra la metodología general de construcción del simulador económico en cinco etapas. En la primera etapa, base de datos termo-físicos del sistema híbrido optimizado. En la segunda etapa se determinan los costos de cada componente del secador optimizado y los costos unitarios. La tercera etapa corresponde a la evaluación económica a un escenario de 20.0 años. Por último, en la tercera etapa se determinan los costos de secado de café C_{sc} y el menor periodo de recuperación de la inversión P_b . determinan los indicadores de viabilidad de un proyecto productivo.

En la primera etapa, en la base de datos termo físicas se consideran la fracción solar híbrida FS_h , la fracción por combustible F_c del calentador híbrido, el área de captación

solar Ac_{ag} , el volumen del tanque V_t , flujos de las bombas hidráulicas Fm_{ag} , del calentador solar-agua; así también, el área de captación solar Ac_{ai} del calentador solar-aire optimizados. En la segunda etapa involucra la recolección de los costos por componentes del calentador híbrido optimizado, los costos unitarios del secado de café por equipo, combustible y energía eléctrica, también, el costo del café en el mercado internacional. La tercera etapa consiste en la evaluación económica que involucra determinar el costo de inversión total C_I , el valor residual anualizado S_a , y el costo anual o costo anualizado C_a , considerando la tasa de descuento d , una vida útil del secador n (20.0 años), y un subsidio del 30.0%. Como datos de salida, en la cuarta etapa, se determinan los costos del secado de café por kilogramo C_{sc} (\$/kg), y el menor tiempo de recuperación de la inversión (P_b).

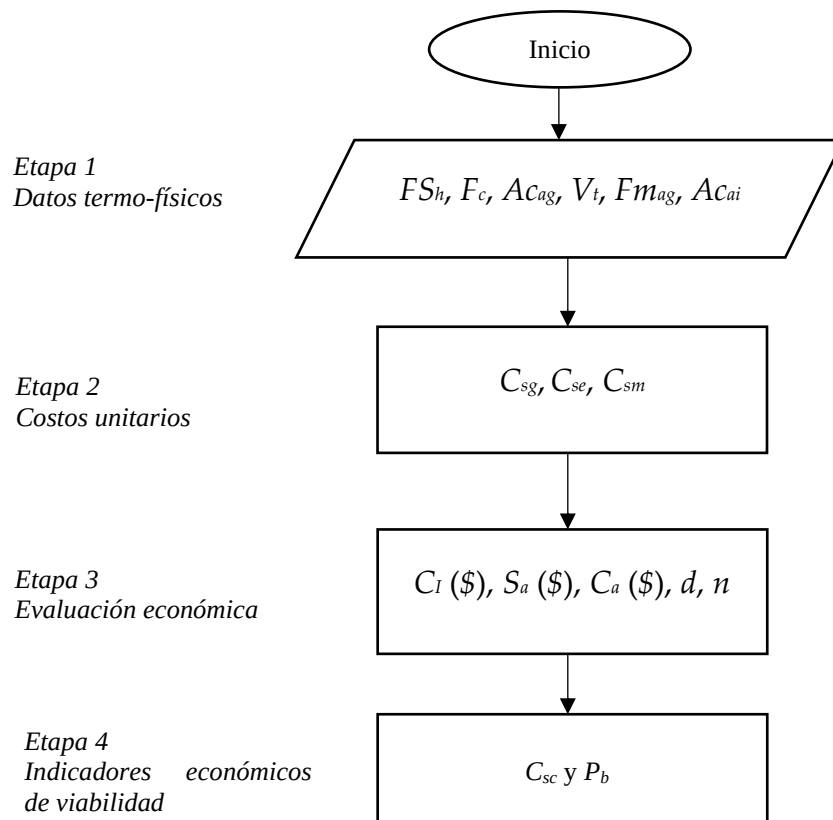


Figura 3.4. Simulador económico.

3.2 Validación del simulador térmico y económico

En esta sección se presenta la validación el simulador térmico y económico del secador híbrido. El simulador térmico se valida comparando los datos de salida de temperaturas de los calentadores solar-agua, y calentadores solar-aire con datos experimentales de un caso de referencia; los parámetros de comparación son el coeficiente de determinación R^2 y la desviación estándar DE .

El simulador económico se valida comparando el valor actual neto VAN , el periodo de recuperación P_b y la tasa de retorno de la inversión TIR con un caso de secado de café [40], en términos de la diferencia porcentual. en términos de la desviación estándar.

3.2.1 Simulador térmico

El simulador térmico se válida para los calentadores solar-agua con almacenamiento y solar-aire que complementan al secador híbrido solar-gas presentado en la **Sección 3.1.1** comparando los datos de salida con datos experimentales con un caso de referencia. Los datos de comparación son las temperaturas de salidas de los calentadores solar-agua con almacenamiento térmico que corresponde a T_2 , T_3 , T_4 , y del calentador solar-aire a la T_{11} , siguiendo la **Figura 2.5**.

Calentador solar-agua con almacenamiento

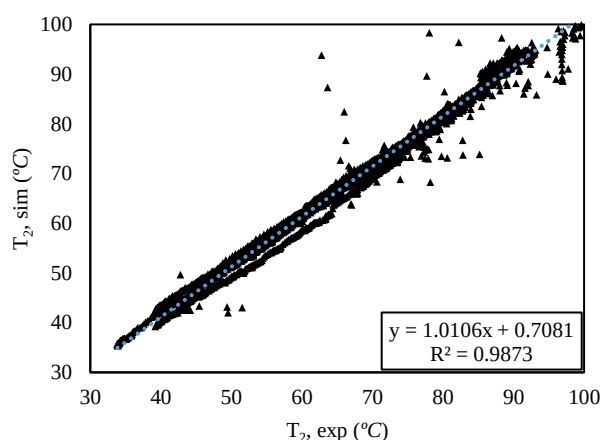
En la **Figura 2.5** se muestran la ubicación de los puntos de medición de las temperaturas de comparación del circuito de calentamiento de agua. El comparativo corresponde a una campaña de experimentación de 10.0 días a lo largo del 2020. Las condiciones promedio del ambiente de los días de prueba se presentan en la **Tabla 3.3**.

En la **Figura 3.5** se muestra el comparativo de T_2 , T_3 , y T_4 , de los calentadores de vidriado simple, vidriado doble, y mixto, para diez campañas de simulación. En la **Figura 3.5 a**, la

T_2 simuladas del campo de colección con vidriado simple presentaron un coeficiente de determinación R^2 de 0.98 con una desviación estándar de 1.72 °C respecto a los datos experimentales. En la **Figura 3.5 b**, la T_3 simuladas del campo de colección con vidriado doble presentaron un coeficiente de determinación R^2 de 0.98 con una desviación estándar de 2.17 °C respecto a los datos experimentales. Por último, en la **Figura 3.5 c**, la T_4 simuladas del campo de colección mixto presentaron un coeficiente de determinación R^2 de 0.97 con una desviación estándar de 2.36 °C respecto a los datos experimentales. En la campaña de simulación, las desviaciones máximas corresponden a la T_4 del campo de colección mixto con una desviación del 3.1%, respecto a los datos experimentales. Las menores desviaciones se presentaron en el campo de colección de vidriado doble llegando a ser únicamente del 2.6%. Por lo que, en este caso, se considera para la simulación térmica el caso de vidriado doble.

Tabla 3.3. Condiciones ambientales de los días de prueba del calentador solar-agua.

Día	T_a (°C)	HR (%)	G (W/m ²)
27 abril 2020	28.38 - 25.82	40.5 - 53.5	581.65 - 925.63
7 julio 2020	25.65 - 31.82	36.73 - 54.27	626.65 - 900.00
14 julio 2020	21.90 - 30.7	51.65 - 77.50	551.8 - 908.7
4 agosto 2020	26.57 - 32.37	51.65 - 65.90	597.19 - 911.27
1 noviembre 2020	18.08 - 26.29	40.0 - 53.90	536.41 - 925.63
7 noviembre 2020	23.84 - 30.84	44.04 - 57.61	642.07 - 888.96
8 noviembre 2020	23.70 - 31.52	40.96 - 59.33	442.70 - 881.48
15 noviembre 2020	23.40 - 31.39	35.16 - 49.26	196.37 - 880.09
1 diciembre 2020	22.3 - 30.15	36.7 - 55.56	489.6 - 1025.96
2 diciembre 2020	25.67 - 29.58	38.65 - 60.61	1178.46 - 438.59



a) Comparativo de T_2 de la campaña de simulación con vidrio simple (11:00 – 6:00 h).

Figura 3.5. Continúa.

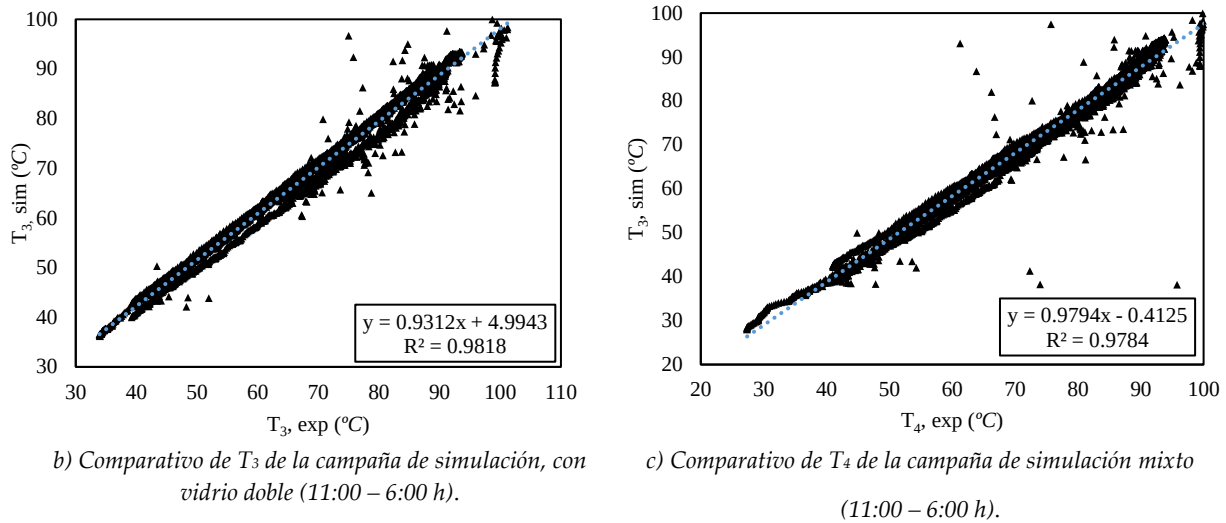


Figura 3.5. Validación del calentador solar-agua con almacenamiento.

Tanque de almacenamiento térmico

El tanque de almacenamiento térmico se validó comparando la T_7 con los datos experimentales de ocho campañas experimentales a lo largo 2020, de acuerdo con [89] y siguiendo la **Figura 2.5**.

La **Figura 3.6** muestra el comparativo de la temperatura del tanque T_7 simuladas respecto a los datos experimentales. La temperatura del tanque T_7 simuladas presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0.96 y una desviación estándar de 3.7 °C, respecto a los datos experimentales.

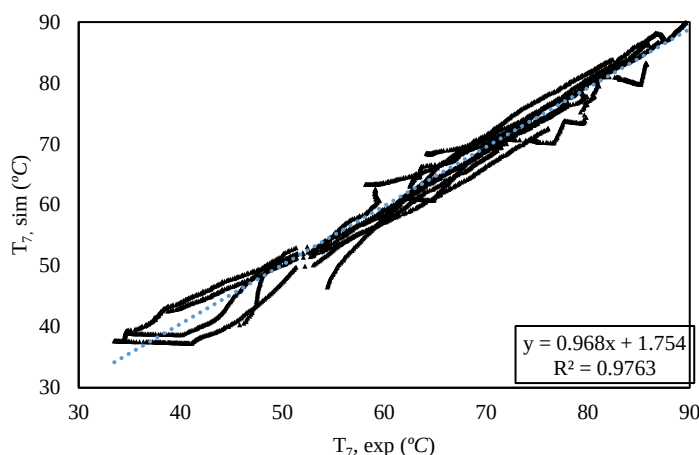


Figura 3.6. Validación del tanque de almacenamiento térmico con T_7 .

Calentador solar-aire

El calentador solar-aire se validó comparando a la temperatura de salida de los calentadores T_{11} durante ocho campañas experimentales a lo largo del año 2020 comparados con [89]. Las condiciones ambientales T_a (°C), $RH\%$ (°C), G (W/m^2), de los días de prueba se presentan en la **Tabla 3.4**.

La **Figura 3.7** muestra la T_{11} simuladas del campo de calentamiento solar-aire con un coeficiente de determinación R^2 de 0.80 y una desviación estándar de 1.89 °C respecto a los datos experimentales. En la **Figura 3.8** se observa qué, en las primeras dos terceras partes se presenta una mejor correlación entre 35.0 a 50.0 °C, mientras que en el último tercio (>50.0 °C), el índice de correlación disminuye, indicando que el desempeño del simulador después de los 50.0 °C se reduce a medida que se incrementa.

Tabla 3.4. Condiciones ambientales de los días de prueba del calentador solar-aire.

Día	T_a (°C)	HR (%)	G (W/m ²)
13 julio 20	25.32 - 30.00	41.44 - 60.01	696.46 - 932.23
15 julio 20	24.30 - 30.83	49.63 - 73.54	726.02 - 910.83
24 julio 20	23.16 - 28.86	54.44 - 72.60	210.00 - 947.08
9 octubre 2020	22.16 - 29.92	47.74 - 69.32	409.13 - 874.74
14 octubre 2020	24.59 - 29.94	50.08 - 59.61	541.20 - 912.10
28 octubre 2020	23.60 - 30.06	45.21 - 62.75	696.58 - 892.88
11 noviembre 2020	18.08 - 26.98	39.58 - 53.90	509.92 - 925.63
15 noviembre 2020	20.69 - 31.39	35.16 - 55.32	245.56 - 880.09

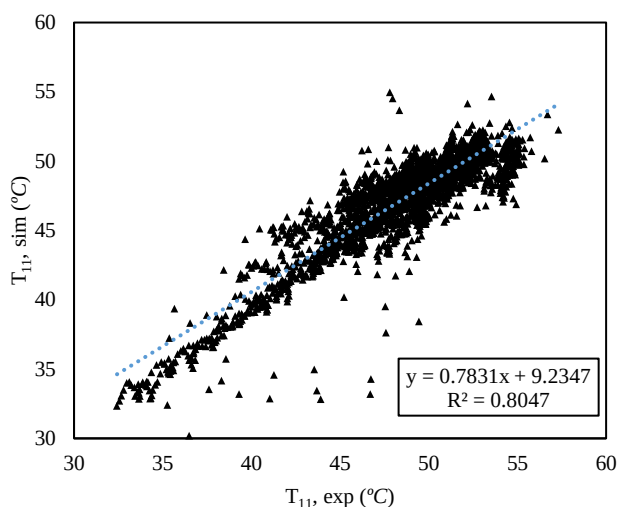


Figura 3.7. Validación del calentador solar-aire.

3.2.2 Simulador económico

El simulador económico se valida comparando el valor actual neto VAN , el tiempo de retorno de inversión Pb y el índice de rentabilidad IR con un caso de secado de café [40]; el comparativo se realiza en términos del coeficiente de determinación R^2 y la desviación estándar DE . El caso de estudio corresponde a un secador tipo invernadero de granos de café pergamino, donde se consideran los gastos de operación, el capital de inversión y la tasa de descuento.

Datos del caso de estudio: gastos de operación

En el estudio, la capacidad de secador corresponde 25.0 lotes anuales de 200.0 kg/lote, con una vida útil de 5 años. Los gastos del proceso de secado por lote son de 3,200.0 \$/lote con un costo inicial de inversión de 25,000.0 \$. El costo de secado de café se reportó de 4.0 \$/kg en función de los insumos energéticos, del costo de mantenimiento, y de los costos de maquinaria. El costo del café pergamino seco en el mercado se consideró de 32.5 \$/kg. En la **Tabla 3.5** se muestran los costos de secado por lotes.

Tabla 3.5. Costos unitarios del caso de referencia.

Lote (kg)	Costo de secado (\$/kg)	Costo total del secado (\$/lote)	Precio café sin secar (\$/lote)	Costo total café pergamino (\$/lote)
200.0	4.0	800.0	2,400.0	3,200.0

Ingresos por secado

Con el secador, el café seco en el mercado genera un ingreso de 6,500.0 \$/año, con una utilidad de 3,300.0 \$/año y un flujo neto de 57,500.0 \$/año.

Simulador económico: presente estudio-caso de referencia

La **Tabla 3.6** compara el valor presente neto o flujo acumulado del presente estudio y el caso de referencia. En el presente estudio, la mayor y la menor desviación del valor presente neto fue de 0.009 y 0.003%, respectivamente. El periodo de recuperación de la inversión P_b y el índice de rentabilidad IR mostraron desviaciones despreciables cercanos a cero respecto a los datos reportados.

Tabla 3.6. Simulador económico.

Años	Inversión (\$)	Flujo del proyecto (\$)	Flujo de efectivo actualizado anual (\$)	Flujo de efectivo actualizado anual (\$)	Valor presente o Flujo acumulado (\$)		% de diferencia
			Inversión	Flujo del proyecto	Caso de referencia	Presente estudio	
0	25,000.00	57,500.00			57,500.00	57,500.00	
1	5,000.00	74,500.00	4,629.63	68,981.48	64,351.85	64,352.00	0.00
2	5,000.00	74,500.00	4,286.69	63,871.74	59,585.05	59,587.00	0.00
3	5,000.00	74,500.00	3,969.16	59,140.50	55,171.34	55,172.00	0.00
4	5,000.00	74,500.00	3,675.15	54,759.72	51,084.57	51,088.00	0.01
5	5,000.00	74,500.00	3,402.92	50,703.45	47,300.53	47,305.00	0.01
Valor presente neto (\$)					334,993.35	334,993.35	335,004.00
Periodo de recuperación de la inversión (años)					0.43	0.43	0.00
Índice de rentabilidad anual					2.30	2.30	0.00

La **Figura 3.8** muestra VAN del presente estudio respecto a los datos reportados. Donde se obtuvo un coeficiente de correlación R^2 cercano a 1, indicando que el simulador es adecuado para determinar los costos de secado C_{sc} y el tiempo de retorno de la inversión P_b del presente estudio.

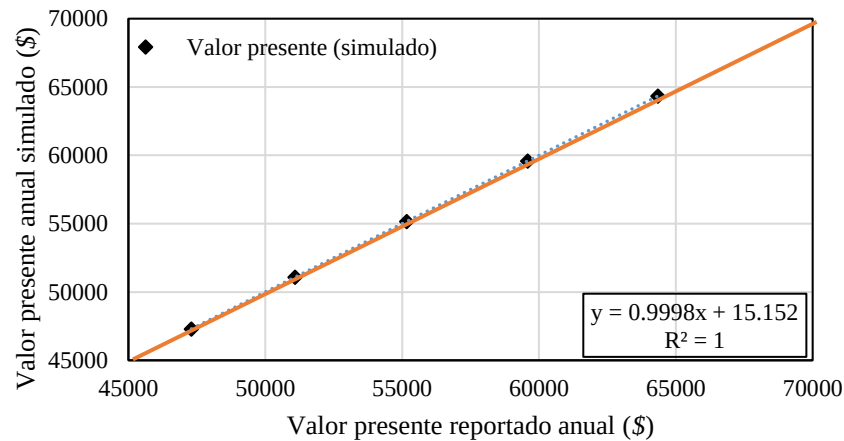


Figura 3.8. Datos simulados y experimentales del VPN.

3.3 Estrategia de optimización térmica del calentador híbrido solar-gas

La estrategia de optimización térmica del calentador híbrido solar-gas se realiza mediante simulación térmica y variación paramétrica para los calentadores solar-agua con almacenamiento y solar-aire que complementan al secador. La variación paramétrica permite obtener la energía útil Q_{uag} del calentador solar-agua para cada iteración de la R_u y R_v ; y para el caso del calentador solar-aire permite obtener la Q_{uai} variando el área de colección de aire A_{cai} . Con los datos de simulación se construyen Nomogramas de diseño correspondientes, que relacionan la fracción solar y la energía útil en función de la razón de uso R_u y volumen R_v para el caso del calentador solar-agua; y para el caso del calentador solar-aire con el área de captación de aire A_{cai} .

La estrategia de optimización mediante simulación térmica se realiza para el calentador híbrido, calentador solar-agua con almacenamiento y calentador solar-aire abasteciendo la demanda energética de secado, bajo las condiciones ambientales de la Sierra Mariscal, Chiapas-México.

3.3.1 Estrategia de optimización térmica del calentador solar híbrido

La **Figura 3.9** muestra la estrategia de optimización mediante simulación térmica y variación paramétrica del calentador híbrido solar-gas basado en el secado por lotes de café, siguiendo cuatro pasos. El primer paso corresponde al suministro de datos, el segundo paso corresponde a las subrutinas de optimización y Nomogramas de diseño de optimización de los calentadores solar-agua y solar-aire. El tercer paso, corresponde a la construcción del Nomograma de diseño del calentador solar híbrido, cruzando información con los nomogramas anteriores, donde se optimizado la fracción solar híbrida. Por último, en el cuarto paso se determinan los parámetros de diseño que dimensionan al calentador solar híbrido.

En el suministro de datos se introducen la energía específica Q_{sp} de secado de café correspondiente a 5.36 MJ/kg, y la cantidad de lotes de café a secar en la temporada de cosecha de 90.5, 31.0 y 22.0 lotes (500.0, 174.0 y 63.0 kg/lote, respectivamente); así también, las condiciones ambientales W_{cd} , radiación solar G y temperatura ambiente T_a . También se establece la energía requerida de secado Q_r correspondiente a cada lote de secado.

Las subrutinas resuelven cada modelo matemático de cada componente para cada variación paramétrica del calentador solar-agua con almacenamiento $SR-SC_{ag}$ y el calentador solar-aire $SR-SC_{ai}$ que complementan al calentador híbrido solar-gas. Para el calentador solar-agua con almacenamiento se varían la razón de uso R_u y razón de volumen R_v ; y para el sistema de calentamiento de aire, el área de captación solar A_{cai} . Para cada simulación y variación paramétrica se obtiene como salida la energía útil Q_{uag}

del calentador solar-agua para cada iteración de la R_u y R_v ; y para el caso del calentador solar-aire permite obtener la Q_{uai} variando el área de colección de aire A_{cai} . Con los resultados de la simulación por variación paramétrica, se construyen los Nomogramas de diseño que relacionan la fracción solar y la energía útil del calentador solar-agua con almacenamiento y solar-aire.

El nomograma de diseño híbrido permite optimizar la fracción solar híbrida FS_h y la energía útil solar Q_{uh} basado del máximo aporte energético $Q_{h,mx}$ que los calentadores solar-agua y solar-aire pueden aportar. El nomograma de diseño del calentador solar híbrido se construye con información de la fracción solar FS_{ag} y Q_{uag} del calentador solar-agua y la FS_{ai} y Q_{uai} del calentador solar-aire para cada demanda energética Q_r hasta cumplir el criterio convergencia $abs(FS_h \leq Err)$. Como datos de salida se obtienen los parámetros de diseño optimizados que integran al calentador híbrido solar-gas, para el calentador solar-agua el área de captación A_{cag} , volumen del tanque de almacenamiento V_{tk} y los flujos de recirculación de las bombas hidráulicas F_{mag} . Para el calentador solar-aire, el área de captación solar A_{cai} .

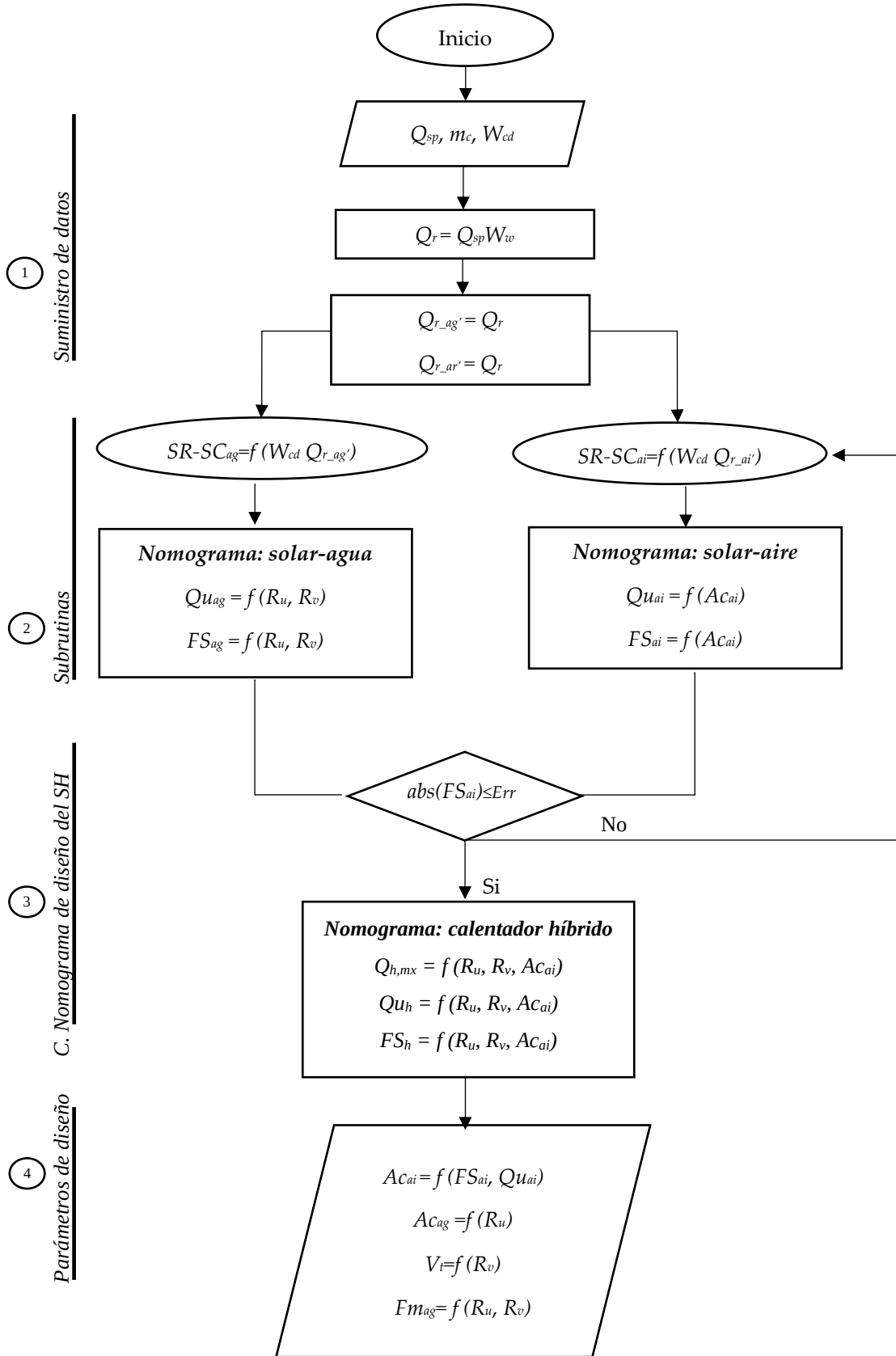


Figura 3.9. Método de optimización térmica del calentador solar híbrido.

La construcción de los nomogramas de diseño para el calentador solar-agua con almacenamiento y calentador solar-aire se presentan en la siguiente sección.

3.3.2 Estrategia de optimización del calentador solar-agua con almacenamiento $SR-SC_{ag}$

La estrategia de simulación térmica del calentador solar-agua con almacenamiento sigue la subrutina $SR-SC_{ag}$ basado en el secado por lotes de café, presentada en la **Figura 3.10**. La estrategia de simulación térmica permite obtener la energía útil solar Qu_{ag} del calentador solar-agua mediante variación paramétrica, que involucra variar la R_u y R_v del calentador. Con los resultados de la simulación y variación paramétrica, se determinan la fracción solar FS_{ag} y la energía útil Qu_{ag} del calentador solar-agua una vez identificada el máximo aporte energético solar por metro cuadrado de colección $Q_{ag, mx}$ mediante Nomogramas de diseño. La estrategia sigue tres pasos. En el primero paso corresponde al suministro de datos, el segundo a la simulación y construcción del Nomograma de diseño y tercero a los parámetros de dimensionamiento.

En el suministro de datos se exportan al simulador las condiciones ambientales W_{cd} de la Sierra Mariscal y la energía requerida Q_r de secado para 90.5, 31.0 y 22.0 lotes (500.0, 174.0 y 63.0 $kg/lote$, respectivamente), que el calentador solar-agua con almacenamiento busca proporcionar. La construcción del Nomograma de diseño se realiza mediante simulación térmica con variación paramétrica, variando la razón de uso R_u y razón de volumen R_v . Para cada simulación y variación paramétrica se obtiene como salida la energía útil solar del calentador solar-agua Qu_{ag} . Con los resultados de la simulación, se construyen los nomogramas de diseño donde se relaciona la FS_{ag} y la energía útil solar Qu_{ag} en función de R_u y R_v . También se relaciona el máximo aporte energético solar por metro cuadrado del calentador $Q_{ag, mx}$ que determina la FS_{ag} óptima. Por último, los parámetros de dimensionamiento son el área de captación de agua Ac_{ag} , el volumen del tanque V_t , y el flujo de recirculación de las dos bombas hidráulicas fm_1 y fm_2 del calentador solar-agua.

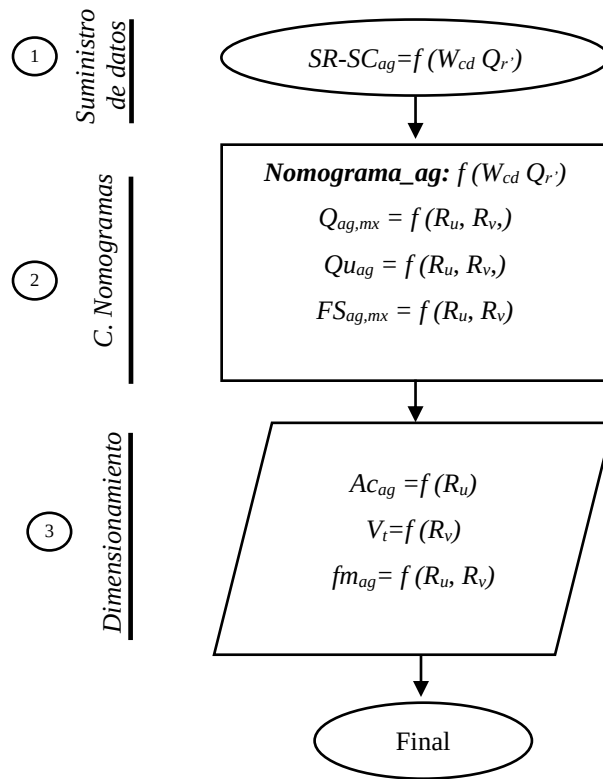


Figura 3.10. $SR-SC_{ag}$ de optimización térmica del calentador solar-agua con almacenamiento.

3.3.3 Estrategia de optimización del calentador del calentador solar-aire $SR-SC_{ai}$

La estrategia de optimización térmica del calentador solar-solar sigue la subrutina $SR-SC_{ai}$ basado en el secado por lotes de café en la temporada de cosecha, presentada en la **Figura 3.11**. La estrategia permite optimizar la fracción solar FS_{ai} , y el calor solar Q_{uai} del calentador solar-agua mediante Nomograma de diseño que se construye por variación paramétrica, siguiendo tres pasos. Los pasos corresponden, primero al suministro de datos, segundo a la construcción del Nomograma de diseño del calentador solar-aire y tercer paso, como datos de salida a los parámetros de dimensionamiento.

El suministro de datos considera las condiciones ambientales de la Sierra Mariscal W_{cd} , y la energía requerida Q_r para secar 90.5, 31.0 y 22.0 lotes (500.0, 174.0 y 63.0 kg/lote, respectivamente), que el calentador solar-aire busca proporcionar. En la W_{cd} , se consideran la irradiancia solar G , la temperatura ambiente T_a , humedad del ambiente %HR monitoreados de la Sierra Mariscal y exportados al simulador. La construcción del Nomograma de diseño del calentador solar-aire se realiza mediante simulación térmica con variación paramétrica del área de colección de placa plana A_{cai} . Para cada simulación y variación paramétrica se obtiene como salida la energía útil solar del calentador solar-aire Q_{uai} . Con los resultados de simulación se construyen Nomogramas de diseño donde se relaciona la fracción solar de aire FS_{ai} , y la energía útil solar Q_{uai} en función del área A_{cai} . También se relaciona el máximo rendimiento del calentador $Q_{ai, mx}$ para determinar la FS_{ai} óptima. Como datos de salida, se determinan el área de captación A_{cai} , la FS_{ai} , y la Q_{uai} del calentador solar-aire.

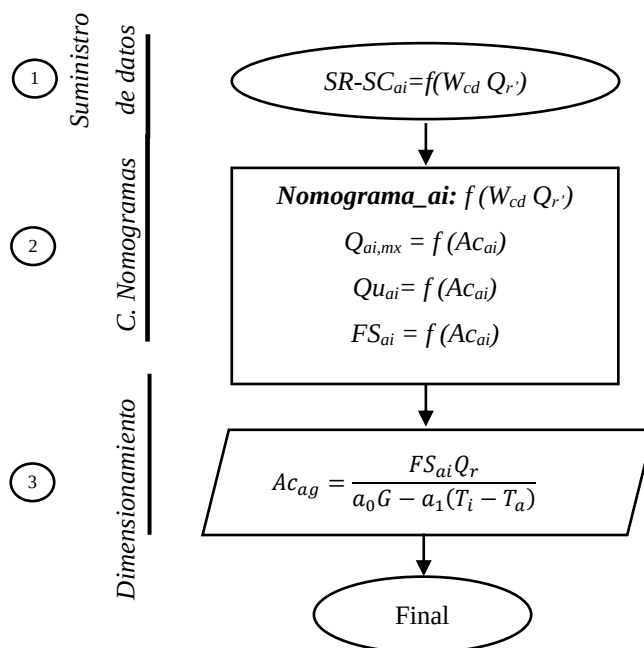


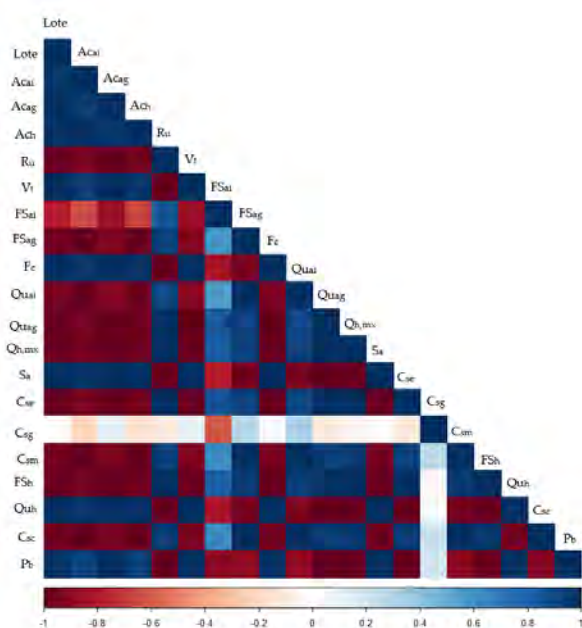
Figura 3.11. $SR-SC_{ai}$ de optimización térmica del calentador solar-solar.

Capítulo 4. Resultados

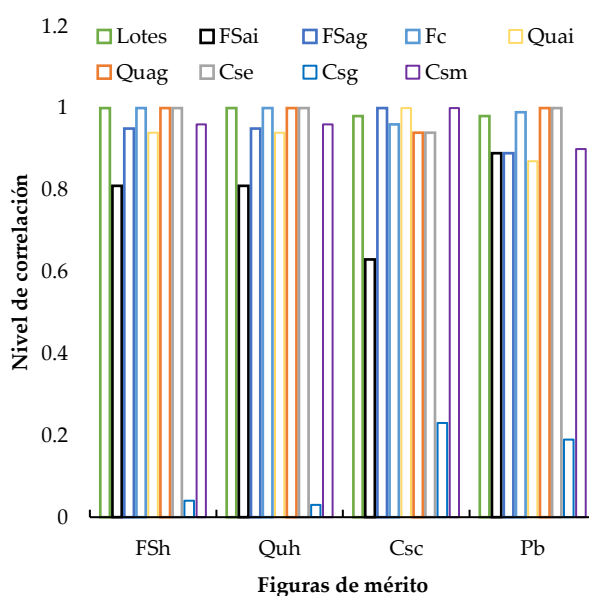
En este Capítulo 4 se presentan los resultados de la optimización utilizando los nomogramas de diseño de los calentadores solar-aire, calentador solar-agua con almacenamiento y del calentador híbrido. El nomograma de diseño se construye basado en el secado de lotes de café relacionando la fracción solar, la energía útil solar en función de la razón de uso R_u , razón de volumen R_v y área de colección A_{cai} . También, se presenta la optimización económica del calentador híbrido en términos del costo de secado C_{sc} y el tiempo de recuperación de la inversión P_b . Así también, un análisis estadístico termo-económico multivariable mediante la correlación de Pearson y análisis de importancia.

4.1 Análisis estadístico de correlación de Pearson y de importancia

La **Figura 4.1 a** muestra la matriz de correlación de Pearson que correlaciona las variables del análisis paramétrico de los calentadores solar-agua y solar-aire que integran al calentador híbrido sobre las figuras de mérito (FS_h , Qu_h , C_{sc} y P_b). En el caso del calentador solar-agua con almacenamiento térmico, el Ac_{ag} se correlaciona más con la energía útil solar $Qu_{ag}>1.0$, con la $F_c>1.0$, $FS_h>1.0$, la $Qu_h>1.0$, el $P_b>1.0$, seguido del $C_{sc}>0.94$. El V_t se correlaciona mayormente con la $Qu_{ag}>1.0$, con $F_c>1.0$, $FS_{ag}>0.92$, la $FS_h>1$, $Qu_h>1.0$, $C_{sc}>0.94$, y el $P_b>1.0$. Para el caso del calentador solar-aire, el Ac_{ai} se correlaciona más con la energía útil solar $Qu_{ai}>1.0$, el $C_{sc}>1.0$, el $P_b>0.98$, $F_c>0.97$, $FS_h>0.97$ y el $Qu_h>0.97$. Como se observa, el $Ac_{ag}>1.0$, y el $V_t>1.0$, seguido del $Ac_{ai}>0.97$ se correlación más con la fracción solar híbrida FS_h y la Qu_h . Para el caso del $Ac_{ai}>1.0$ muestra mayor correlación con el C_{sc} y el $Ac_{ag}>1.0$, y el $V_t>1.0$ con el P_b .



a) Análisis de correlación de Pearson.



b) Análisis de importancia sobre las figuras de mérito térmicas y económicas.

Figura 4.1. Análisis estadístico de correlación de Pearson e importancia sobre las figuras de mérito.

La **Figura 4.5 b** muestra el análisis de importancia que correlaciona las variables del análisis paramétrico más influyentes sobre las figuras de mérito termo-económico (FS_h , Qu_h , C_{sc} y P_b) considerando un $p < 0.05$. En la parte térmica, la capacidad de secado por *lotes* > 1.0 , la $Qu_{ag} > 1.0$, y la $F_c > 1.0$, se correlacionan mayormente con la fracción solar híbrida FS_h y la energía útil solar híbrida Qu_h . En la parte económica, el costo por manejo del equipo $C_{sm} > 1.0$, la $FS_{ag} > 1.0$, $Qu_{ai} > 1.0$, *lotes* > 0.98 , y la $F_c > 0.96$ muestran mayor correlación con el costo de secado C_{sc} . Así también, $Qu_{ag} > 1.0$, costo eléctrico $C_{se} > 1.0$, la capacidad de secado por *lotes* > 0.98 , la $F_c > 0.99$ se muestran más influyentes en el P_b .

4.2 Nomogramas de diseño del caso de estudio (FS_h y Qu_h)

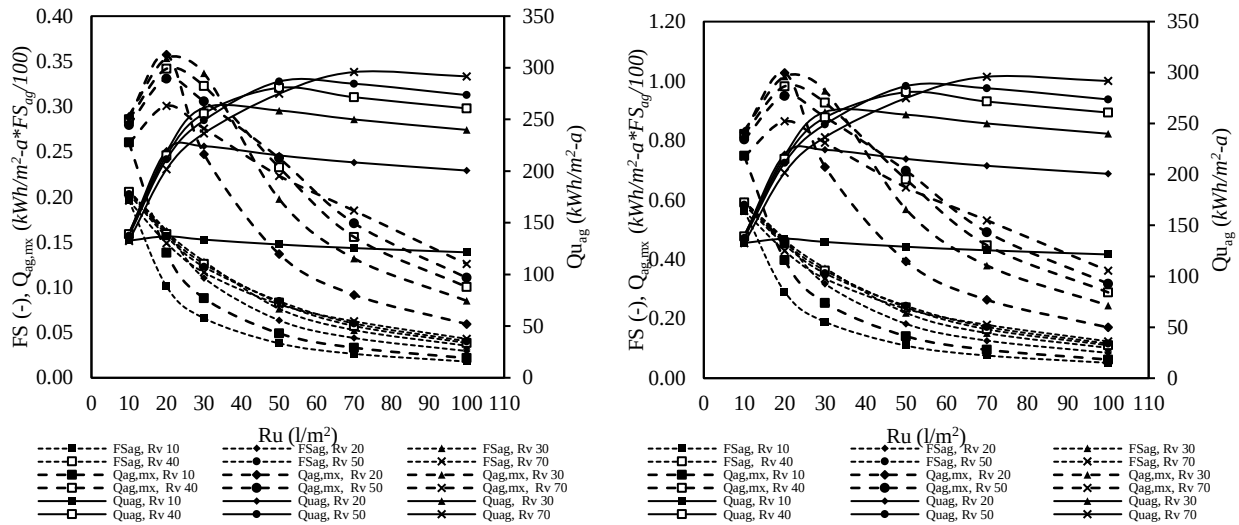
Los Nomogramas de diseño se construyen para las condiciones climáticas de Nuevo Pacayal, municipio de Bella Vista, Chiapas presentado en el **Capítulo 2**. Los Nomogramas de diseño se construyen para abastecer un suministro energético de secado de café de 5.36 MJ/kg, para secar 90.5 (500 kg/lote), 31.0 (174.0 kg/lote) y 21.0 (63.0 kg/lote) lotes de café en la temporada de cosecha. El suministro energético se considera para la temporada de cosecha de noviembre a abril, se estima 45,250.0, 15741.0, 11,426.0 kg de café pergamino seco, respectivamente. El secado se realiza en dos días (8.5 h/d) a temperatura de 39.0 °C con referencia al secado en invernadero, **Sección 4.1**. El primer Nomograma de diseño corresponde al calentador solar-agua con almacenamiento de agua, el segundo al calentador solar-aire y el tercero al acoplamiento denominado calentador solar híbrido.

4.2.1 Nomograma de diseño de calentador de agua

En la **Figura 4.1** se muestran tres Nomogramas de diseño del calentador solar-agua con almacenamiento térmico que abastecen una demanda energética para secar 90.5 (500.0 kg/lote), 31.0 (174.0 kg/lote) y 21.0 (63.0 kg/lote) lotes de café en la temporada de cosecha de noviembre a abril. El Nomograma permite optimizar la fracción solar FS_{ag} , y la energía útil solar Qu_{ag} del calentador solar-agua, considerando la energía máxima que el calentador solar-agua $Q_{ag, mx}$ puede aportar variando la razón de uso R_u y razón de volumen R_v . Como se observa en la **Figura 4.2**, la FS_{ag} disminuye exponencialmente y la energía útil solar Qu_{ag} incrementa con la R_u , además el cambio de la FS_{ag} y Qu_{ag} disminuye con el incremento de la R_v . Por su parte, la $Q_{ag, mx}$ incrementa exponencialmente con el aumento de la R_u , hasta alcanzar un punto máximo que permite identificar la FS_{ag} óptima. En la **Figura 4.2** se muestran los nomogramas de diseño del calentador solar-agua con almacenamiento para 90.5, 31.0 y 21.0 lotes de café en la temporada de cosecha. Para el caso de 90.5 lotes de café, el calentador solar de agua presenta una FS_{ag} óptima de 0.16,

una energía útil solar Qu_{ag} de $219.0 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$ y $Q_{ag, mx}$ de $0.36 \text{ kWh/m}^2\text{-a} \cdot FS_{ag}/100.0$, con un R_u y R_v de 20.0 l/m^2 , **Figura 4.2 a**. Para el caso de 31.0 lotes de café, el calentador solar de agua presenta una FS_{ag} óptima de 0.47, una energía útil solar Qu_{ag} de $220.0 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$ y $Q_{ag, mx}$ de $1.03 \text{ kWh/m}^2\text{-a} \cdot FS_{ag}/100.0$, con un R_u y R_v de 20.0 l/m^2 , **Figura 4.1 b**. Para el caso de 22.0 lotes de café, el calentador solar de agua presenta una FS_{ag} óptima de 0.64, una energía útil solar Qu_{ag} de $220.0 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$ a $Q_{ag, mx}$ de $1.41 \text{ kWh/m}^2\text{-a} \cdot FS_{ag}/100$, con un R_u y R_v de 20.0 l/m^2 , **Figura 4.2 c**.

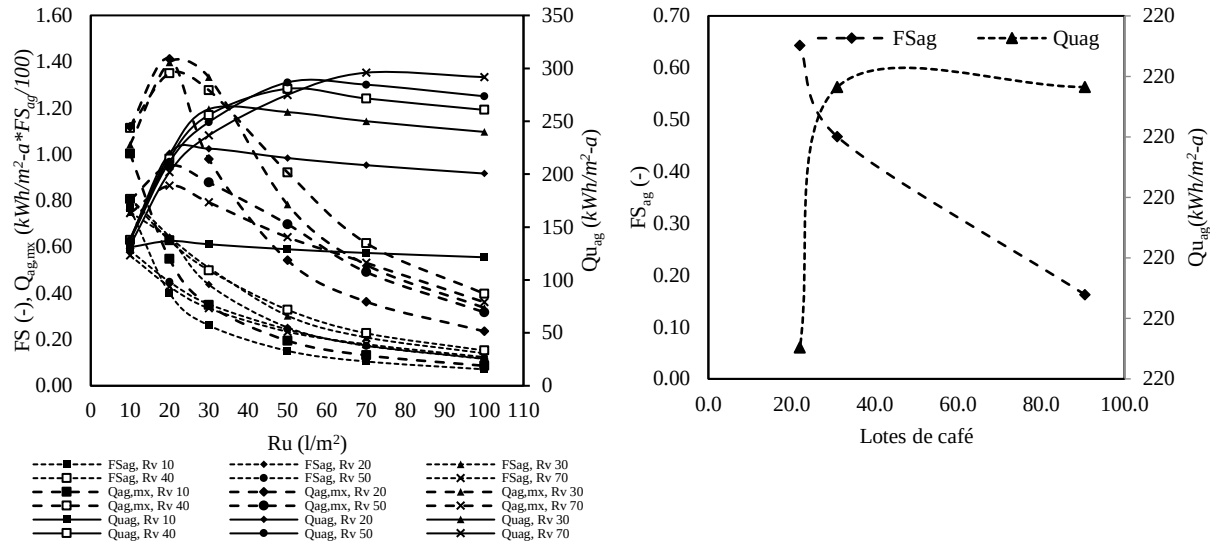
En la **Figura 4.2 d**, la fracción solar del calentador solar-agua disminuye de 0.64 a 0.16 exponencialmente cuando los lotes de secado incrementan de 22.0 a 90.5; caso contrario una energía útil solar Qu_{ag} .



a) Nomograma para calentamiento de 90.5 lotes

b) Nomograma para calentamiento de 31.0 lotes

Figura 4.2. Continúa.



c) Nomograma para calentamiento de 22.0 lotes

d) Fracción solar-agua óptimas para cada lote de café

Figura 4.2. Nomogramas de diseño del calentador de agua y almacenamiento térmico.

Con lo anterior, el calentador solar-agua logra aportar una fracción solar óptima de 0.16 que corresponde al suministro del 16.0% con energía solar-agua y el 84.0% con gas L.P, para secar 90.5 lotes en la temporada de cosecha. Para el caso de 31 lotes de secado, el calentador logra una fracción óptima de 0.47 corresponde al suministro del 47% con energía solar-agua y el 53.0% con gas L.P. Para el caso de 22.0 lotes de secado, el calentador logra una fracción óptima de 0.64 corresponde al suministro del 64.0% con energía solar-agua y el 34.0% con gas L.P.

Las fracciones solares optimizadas permiten conocer los parámetros de diseño del calentador solar-agua para las condiciones ambientales de la Sierra Mariscal. Para los casos de 90.5, 31.0 y 22.0 lotes, se obtienen un área de calentadores de agua de 50.0 m² con un volumen de almacenamiento de 1.0 m³, un flujo de recirculación de 2500.0 kg-agua/h para la primera bomba hidráulica fm_1 y 416.0 kg/h para la segunda fm_2 .

Con los datos obtenidos anteriormente, el calentador solar híbrido se optimiza acoplando los calentadores solar-aire a la cámara de secado, horno Guardiola en la siguiente sección.

4.1.2 Nomograma de diseño del calentador de aire

En la **Figura 4.3** se muestran los Nomogramas de diseño del calentador solar-aire que abastecen una demanda energética para secar 90.5 (500.0 kg/lote), 31.0 (174.0 kg/lote) y 22.0 (63.0 kg/lote) lotes de café en la temporada de cosecha de noviembre a abril. El Nomograma de diseño permite optimizar la fracción solar FS_{ai} y una energía útil solar Qu_{ai} identificando la energía máxima $Q_{ai, mx}$ que el calentador solar-aire puede aportar variando el área de captación solar de aire Ac_{ai} . En la **Figura 4.3**, la FS_{ai} incrementa de forma exponencial con el incremento del área de captación solar Ac_{ai} , caso contrario a la energía útil solar Qu_{ai} . Por su parte, la $Q_{ai, mx}$ incrementa exponencialmente con el aumento de la Ac_{ai} , hasta alcanzar un punto máximo que permite identificar la FS_{ag} óptima.

Para el caso de 90.5 lotes de café, el calentador solar-aire presenta una FS_{ai} óptima de 0.31, una energía útil solar Qu_{ai} de 208.6 kWh/m²-a a $Q_{ai, mx}$ de 0.64 kWh/m²-a/100, con un área de captación solar Ac_{ai} de 100.0 m², **Figura 4.3 a**. Para el caso de 31.0 lotes de café, el calentador solar-aire resulta con una FS_{ai} óptima de 0.53, una energía útil solar Qu_{ai} de 250.5 kWh/m²-a a $Q_{ai, mx}$ de 1.33 kWh/m²-a/100, con un Ac_{ai} de 50.0 m², **Figura 4.3 b**. Para el caso de 22.0 lotes de café, el calentador solar de agua aporta una FS_{ai} óptima de 0.51, una energía útil solar Qu_{ai} de 288.0 kWh/m²-a a $Q_{ai, mx}$ de 1.46 kWh/m²-a/100.0, con un Ac_{ai} de 30.0 m², **Figura 4.3 c**.

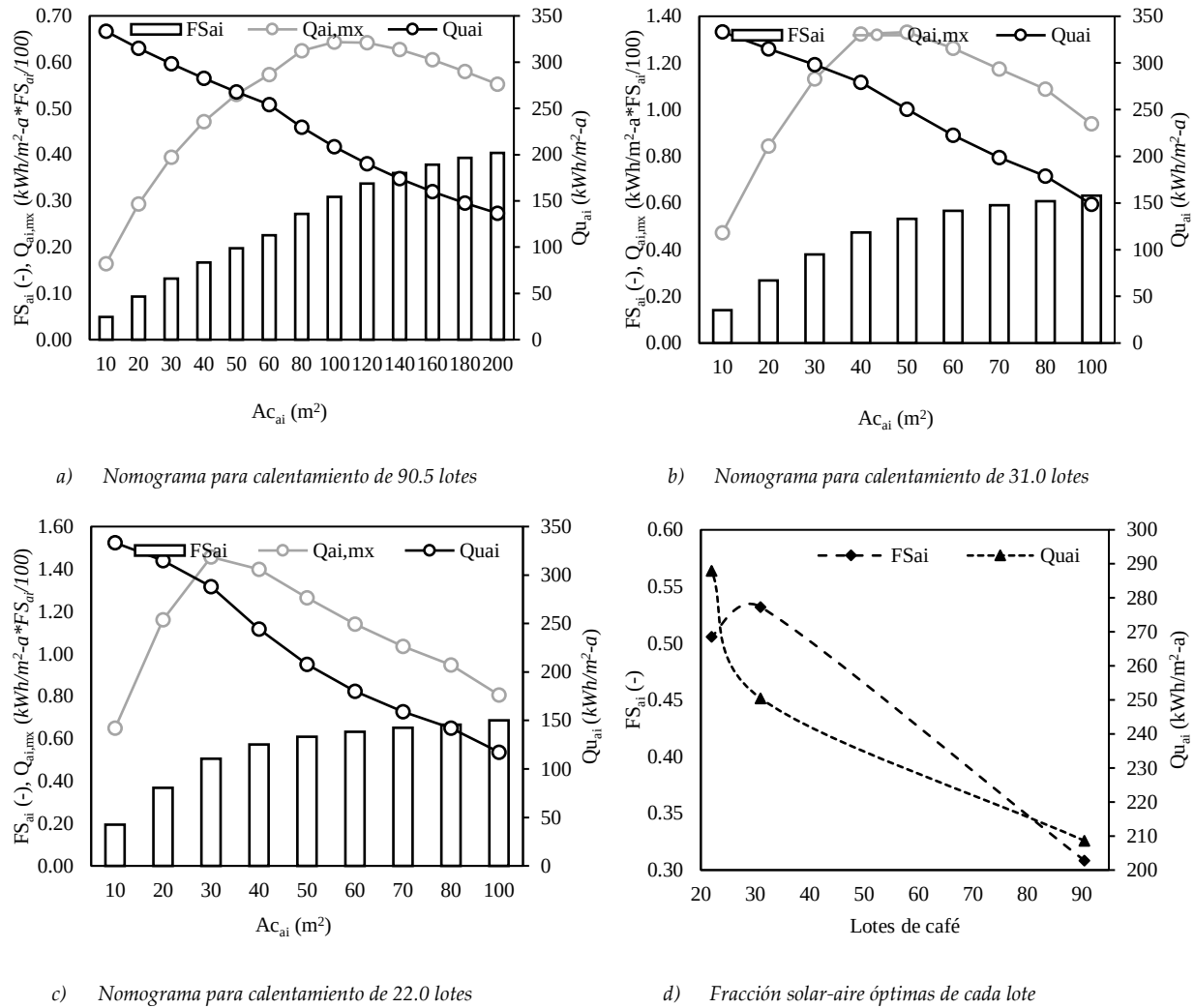


Figura 4.3. Nomograma de diseño del calentador solar-aire.

Como se observa en la **Figura 4.3 c**, la fracción solar FS_{ai} incrementa de 0.51 a 0.53 cuando aumentan los lotes de secado 22.0 a 31.0, después de esto, la FS_{ai} disminuye a 0.31 para 90.5 lotes. Por lo que el calentador solar-aire se optimiza hibridando el calentador solar-agua abatiendo el costo de secado del café C_{sc} (\$/kg) y el menor tiempo de retorno de la inversión (P_b).

4.1.3 Nomograma de diseño del calentador híbrido solar-gas

En la **Figura 4.4** se muestran tres Nomogramas de diseño del calentador híbrido solar-gas para el secado de café para 90.5 (500.0 kg/lote), 31.0 (174.0 kg/lote) y 21.0 (63.0 kg/lote) lotes de café en la temporada de cosecha de noviembre a abril. El Nomograma de diseño optimiza la fracción solar híbrida FS_h y la energía útil solar Qu_h cuando el calentador híbrido alcanza la máxima energía solar por unidad de área para cada fracción solar $Q_{h, mx}$; que los calentadores solar-agua y solar-aire pueden aportar.

En la **Figura 4.4**, se observa que la fracción solar híbrida FS_h incrementa de forma exponencial con el aumento del área de captación solar híbrida Ac_h y en el caso de la energía útil solar híbrido Qu_h disminuye de forma exponencial. La energía máxima que el calentador solar híbrido puede aportar $Q_{h, mx}$ incrementa exponencialmente con el área híbrida Ac_{ai} , hasta alcanzar un punto máximo que permite identificar la FS_{ag} óptima.

La **Figura 4.4 a** muestra el Nomograma de diseño del calentador híbrido solar-gas para una demanda de secado de 90.5 lotes en la temporada de cosecha. Como se observa, la FS_h óptima resultó de 0.43, con una energía útil solar Qu_h de 354.0 kWh/m²-a y una $Q_{h, mx}$ de 154.0 kWh/m²-a* FS_h , lo que resulta en un área de captación solar Ac_h de 130.0 m².

La **Figura 4.4 b** muestra el Nomograma de diseño del calentador híbrido solar-gas para a demanda de secado de 31.0 lotes en la temporada de cosecha. La FS_h óptima resultó de 0.86, una energía útil solar Qu_h de 288.0 kWh/m²-a y una $Q_{h, mx}$ de 248.0 kWh/m²-a* FS_h , lo que resulta en un área de captación solar Ac_h de 80.0 m².

La **Figura 4.4 c** muestra el Nomograma de diseño del calentador híbrido solar-gas para una demanda de secado de 22.0 lotes en la temporada de cosecha. La FS_h óptima resultó de 0.90, una energía útil solar Qu_h de 282.0 kWh/m²-a y una $Q_{h, mx}$ de 254.0 kWh/m²-a* FS_h , lo que resulta en un área de captación solar Ac_h de 60.0 m².

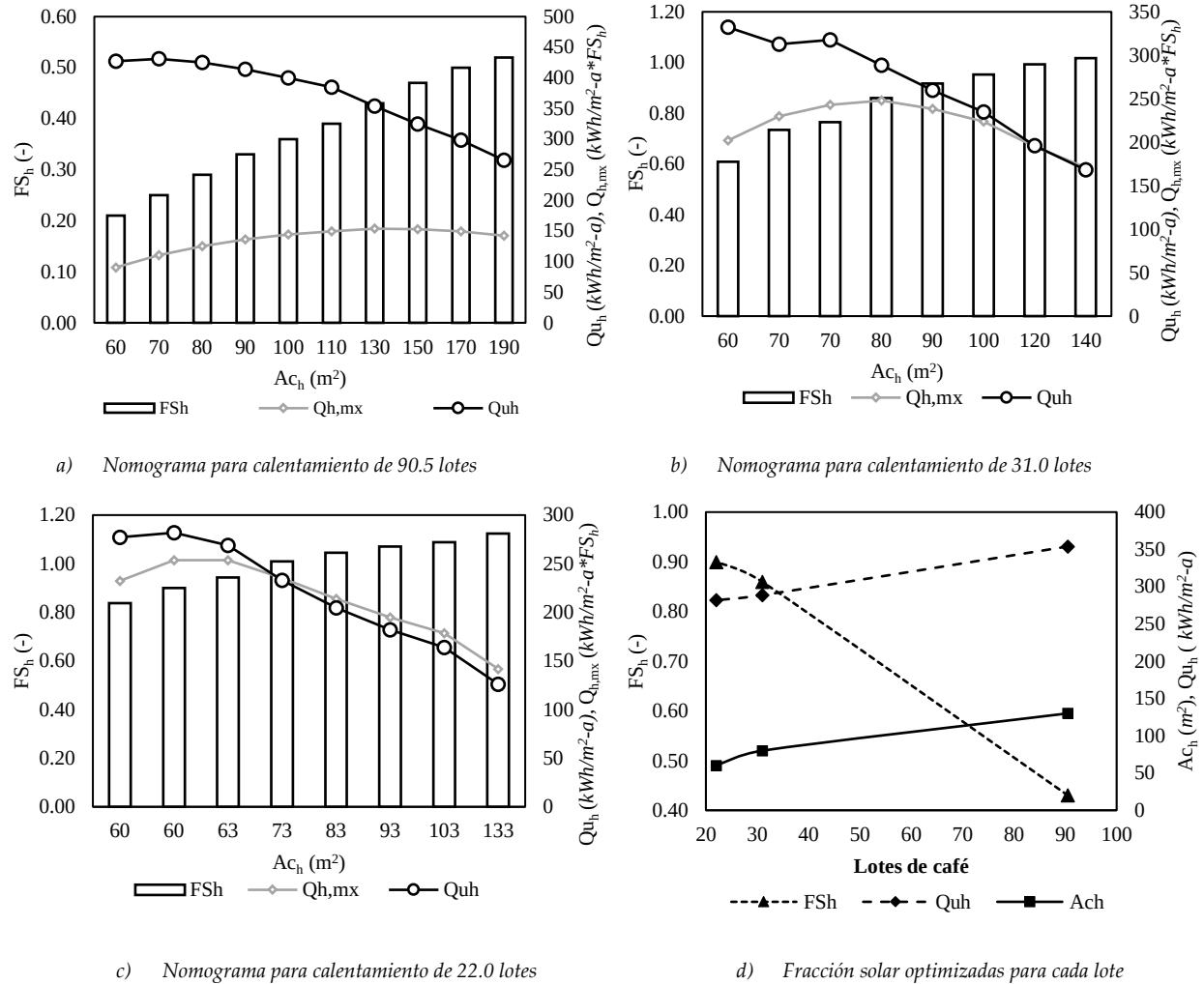


Figura 4.4. Nomograma de diseño del calentador híbrido solar-agua-gas.

En la **Figura 4.4 d**, la fracción solar híbrida FS_h disminuye de forma exponencial de 0.90 a 0.43 cuando la demanda de secado incrementa de 22.0 a 90.5 lotes en la temporada de cosecha. Por lo que también, el área total hibridada incrementa de 60.0 a 130.0 m^2 .

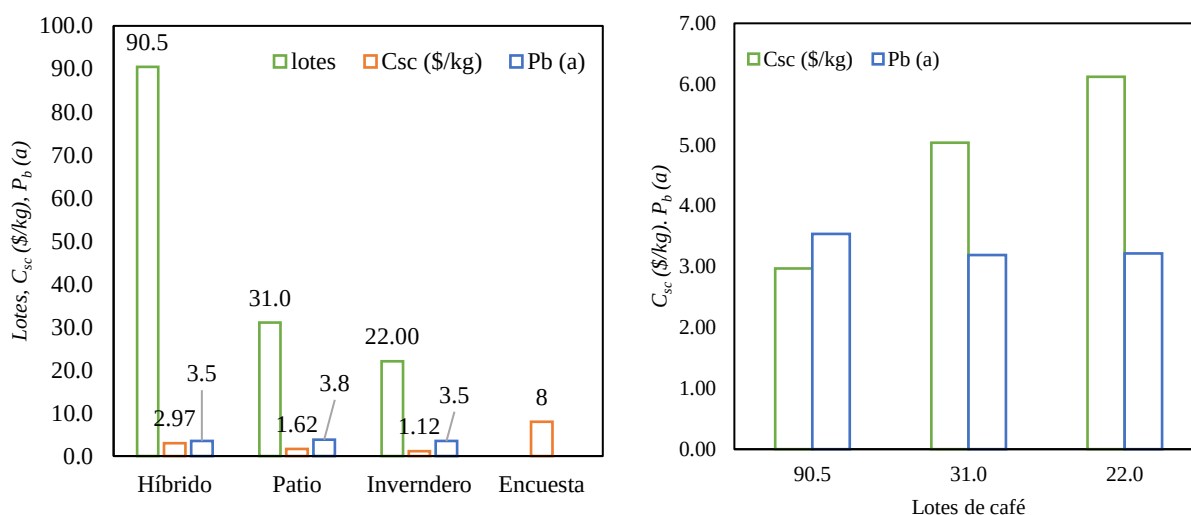
4.2 Comparativo económico patio, invernadero e híbrido (C_{sc} y P_b)

El análisis económico se realizó una vez optimizado térmicamente el secador híbrido en términos del costo de secado C_{sc} , y el tiempo de retorno de la inversión P_b , basado en el secado por lotes de café en la temporada de cosecha. En los costos de secado se consideran los costos unitarios de mano de obra, costo por combustible y el consumo eléctrico. También, la fracción solar optimizada se considera en la optimización económica. En la optimización económica se consideran dos escenarios, el primero consiste en evaluar el calentador híbrido, invernadero abierto y patio para una misma capacidad de secado de 90.5 lotes. El segundo escenario consiste en evaluar el secador híbrido solar-gas a la misma capacidad que el patio y el invernadero pueden lograr secar en la temporada de cosecha, esto corresponde a 31.0 (174.0 kg/lote) y 21.0 lotes (63.0 kg/lote) respectivamente. El análisis económico se realiza a un escenario de 20.0 años.

La **Figura 4.5 a** muestra el comparativo de los costos de secado de café C_{sc} (\$/kg), y el P_b (a) y la capacidad de secado por lotes con el secador híbrido solar-gas, invernadero abierto, patio y encuesta. El menor costo de secado resultó de 1.62 \$/kg para el secado con invernadero abierto, seguido del secado en patio de 1.62 \$/kg, para el calentador híbrido de 2.97 \$/kg y por último de 8.0 \$/kg por encuestas. El calentador híbrido logra reducir 51.0-63.0% el costo de secado comparado con el costo por encuestas, aunque siendo mayor en 1.8 y 2.65 veces al secado en patio y con invernadero abierto, respectivamente. Aunque el costo de secado con el calentador híbrido incrementó 1.8 y 2.65 veces respecto al patio e invernadero; la capacidad de secado es 3.0 y 4.11 veces mayor que el secado en patio y en invernadero abierto la temporada de cosecha.

La **Figura 4.5 b** muestra los costos de secado C_{sc} y tiempos de retorno de la inversión P_b del secador híbrido para cargas de secado de 90.5, 31.0 y 22 lotes (500.0, 174.0, y 63.0 kg/lote) en la temporada de cosecha. El costo de secado incrementó de 2.97 a 6.12 \$/kg cuando se reduce la capacidad de lotes de 90.5 a 22.0 lotes y el tiempo de retorno de

inversión se muestra equiparable de 3.5, 3.2 y 3.2 para 90.5, 31.0 y 22.0 lotes. El costo de secado incrementa a menor capacidad de secado debido al costo de mano de obra estable en todos los casos. Sin embargo, el menor costo de secado se logra a mayor capacidad de secado con un tiempo de retorno de inversión similar debido al mayor flujo de efectivo por mayor venta del café seco, cumpliendo las normas sanitarias.



a) C_{sc} y P_b del secado en híbrido, patio y en invernadero abierto.

b) C_{sc} y P_b del secador híbrido a 90.5, 31.0 y 22.0 lotes de café.

Figura 4.5. Optimización económica.

El secador híbrido solar-gas logra secar mayor cantidad de lotes comparado con el patio e invernadero en la temporada de cosecha con un P_b similar, cumpliendo las normas sanitarias. Por lo que la rentabilidad de proyectos con tecnología solar para el secado de café podría alcanzarse considerando subsidios del 30.0-40.0%. Con esto, el secador híbrido solar-gas resulta ser viable térmica y económicamente para el secado de granos de café bajo las condiciones ambientales de la Sierra Mariscal, logrando costos y tiempos de retornos de inversión equiparables.

Capítulo 5. Conclusiones

En este Capítulo 5 se presentan las conclusiones del estudio destacando los hallazgos más importantes y las recomendaciones para trabajos futuros.

5.1 Conclusiones

El estudio se enfocó en estudiar la viabilidad termo-económica del secado de granos de café con un secador híbrido solar-gas, en la Sierra Mariscal en Chiapas en términos de los costos de secado y el tiempo de retorno de la inversión, y considerando la fracción solar, y la energía específica. El secado basado por lotes utilizando el secado en patio e invernadero abierto, como referencias. Así también, el suministro calor con tecnología de colectores solar-aire y solar-agua. El secador híbrido propuesto se optimizó para cubrir una demanda energética de 5.36 MJ/kg , para secar 90.5 (500.0 *kg/lote*), 31.0 (174.0 *kg/lote*) y 22.0 (63.0 *kg/lote*) lotes buscando reducir los costos de secado y el tiempo de retorno de la inversión.

El método de optimización se realizó mediante análisis paramétrico y Nomogramas de diseño para los calentadores solar-aire y solar-agua que complementan al secador híbrido solar-gas. Los requerimientos energéticos se consideraron de acuerdo con el secado de café en invernadero que se obtuvieron de forma experimental.

El menor costo de secado con el secador híbrido resultó de $2.97 \text{ \$/kg}$ con un tiempo de retorno de inversión 3.5 años secando 90.5 lotes (500.0 *kg/lote*) en la temporada de cosecha. Sin embargo, el costo de secado incrementó de 2.97 a $6.12 \text{ \$/kg}$ cuando se reduce la capacidad de lotes de 90.5 a 22.0 lotes y el tiempo de retorno de inversión se muestra equiparable de 3.5, 3.2 y 3.2 respectivamente. El costo de secado incrementa a menor capacidad de secado debido a que el costo de mano de obra es mayor. Sin embargo, el menor costo de secado se logra a mayor capacidad de secado con un tiempo de retorno de inversión similar, debido al mayor flujo de efectivo por mayor venta del café seco, cumpliendo las normas sanitarias. El secador híbrido logra secar 3.0 y 4.11 veces más que el secado en patio y en invernadero, aunque el costo de secado con el secador híbrido incrementó 1.8 y 2.65 veces en la temporada de cosecha. Sin embargo, el secador híbrido

logra reducir el costo de secado 51.0-63.0% comparado con el costo obtenido por encuestas a los caficultores Sección 2.2.2.

De acuerdo con el análisis estadístico, el costo por manejo del equipo $C_{sm}>1.0$, fracción solar-agua $FS_{ag}>1.0$, energía útil solar-aire $Qu_{ai}>1.0$, los *lotes* de secado $lotes>0.98$, la fracción por combustible $F_c>0.96$ muestran mayor correlación con el costo de secado C_{sc} . La energía útil solar-agua $Qu_{ag}>1.0$, el costo eléctrico $C_{se}>1.0$, los *lotes* de secado $lotes>0.98$ y la fracción por combustible $F_c>0.99$ se muestran más influyentes en el P_b .

El calentador híbrido solar-gas logra una fracción solar óptima FS_h de 0.43, con una energía útil solar Qu_h de $354.0 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$, lo que resulta en un área de captación solar hibridada Ac_h de 130.0 m^2 . Se observó que, la FS_h disminuyó de forma exponencial de 0.90 a 0.43 cuando la demanda de secado incrementó de 22.0 a 90.5, así también el área total hibridada de 60.0 a 130.0 m^2 . Para el caso de 90.5 *lotes* de café, el calentador solar-agua con almacenamiento térmico presenta una FS_{ag} óptima de 0.16, energía útil solar Qu_{ag} de $219.89 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$ con un R_u y R_v de 20.0 l/m^2 . Lo que resulta en un área de 50.0 m^2 , con un volumen de almacenamiento de 1.0 m^3 , un flujo de recirculación de 2500.0 kg-agua/h para la primera bomba hidráulica fm_1 y 416.0 kg/h para la segunda fm_2 . El calentador solar-aire resultó con una FS_{ai} óptima de 0.27, energía útil solar Qu_{ai} de $229.8 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$, con un área de captación solar-air Ac_{ai} de 80.0 m^2 , y un flujo de aire de 1600.0 kg/h .

Con lo anterior, el calentador híbrido solar-gas logra aportar una fracción solar óptima de 0.43 que corresponde al suministro del 43.0% con energía solar y el 57.0% con gas L.P, para secar 90.5 *lotes* ($45,250.0 \text{ kg}$) en la temporada de cosecha. El secador híbrido solar-gas logra secar mayor cantidad de *lotes* comparado con el patio e invernadero en la temporada de cosecha con un P_b similar, cumpliendo las normas sanitarias. Por lo que la rentabilidad de proyectos con tecnología solar para el secado de café podría alcanzarse considerando subsidios del 30.0-40.0%. Con esto, el secador híbrido solar-gas resulta ser viable térmica y económicamente para el secado de granos de café bajo las condiciones

ambientales de la Sierra Mariscal, logrando costos y tiempos de retornos de inversión equiparables.

El costo de secado y el tiempo de retorno de la inversión en el secado de café con tecnología solar híbrida dependen principalmente de la energía específica de secado y el tiempo de secado. Por lo que, realizar más pruebas experimentales con secadores mecánicos en temporada de cosecha, podría reducir la incertidumbre en el rendimiento de los sistemas solares principalmente de la fracción solar, el costo y el tiempo de retorno de inversión en el secado de café.

5.1 Recomendaciones para trabajos futuros

Estudiar la cinética de secado de café con tecnología de secado horno convectivo bajo las condiciones de la Sierra Mariscal, en términos de la energía específica y costos nivelados, y el periodo de recuperación de la inversión.

Optimizar el secador solar híbrido en términos de la fracción solar, costo de secado, y el tiempo de retorno de la inversión considerando la energía específica en el secado mecánico-convectivo bajo las condiciones de la Sierra Mariscal.

Estudiar los cambios en la calidad física, química y sensorial de muestras secas de café en el secado en patio, invernadero y mecánico bajo las condiciones ambientales de la Sierra Mariscal Chiapas-México.

Estudiar las propiedades fitoquímicas, propiedades funcionales y térmicas variando los espesores de cama en el secado de café en patio, invernadero abierto y mecánico a gas L.P de la Sierra Mariscal, Chiapas-México.

Referencias

- [1] Otiniano AJ, Ventura CE, Anyosa Y, Manyari R. Una revisión sobre la roya del café (hemileia vastatrix) algunas experiencias y recomendaciones para el Perú. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Instituto Regional de Desarrollo de Selva IRD - Selva, Perú*, 2013. <https://docplayer.es/76987149-Una-revision-sobre-la-roya-del-cafe-hemileia-vastatrix-algunas-experiencias-y-recomendaciones-para-el-peru.html> (accessed August 27, 2021).
- [2] R. Elms and A. Otero. Coffee annual,”. 2021. <https://www.ico.org/prices/po-production.pdf> (accessed August 27, 2021).
- [3] Díaz HNW, Campos HJF, Jimenes RGC, Alvarado GAM. Coffee grain rotatory drying optimization. *Rev Mex Ing Quim* 2013;12:505–11.
- [4] Vijayavenkataraman S, Iniyan S, Goic R. A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:2652–70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>.
- [5] Ospina LM, Fernández GM, Hoyos MMC, Ortega SJA, Pérez ÁD. Sistema de mejoramiento continuo en la producción de café. 2009.
- [6] Ponte S. Estándares, comercio y equidad: Lecciones de la industria de los cafés especiales 2002:1–35. www.oecd.org. (accessed June 29, 2021).
- [7] H. Wilson. Coffee Origins: A Guide to Mexico - Perfect Daily Grind 2020. <https://perfectdailygrind.com/2020/03/coffee-origins-a-guide-to-mexico/> (accessed June 29, 2021).
- [8] Arniz AO y Chinh A. Report coffee annual. *United States Department Agriculture*. 2024.
- [9] Rovirosa CEJ, Narváez NAJ, y Salido VA. Reporte de planeación agrícola nacional (2017-2030), SAGARA.2017. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256426/B_sico-Caf_.pdf.
- [10] SAGARPA. Café mexicano y planeación agrícola nacional. 2017.
- [11] López-García FJ, Escamilla-Prado E, Zamarripa-Colmenero A, Cruz-Castillo GJ. Yield and quality of coffee cultivars (*Coffea arabica* L.) in Veracruz, México. *Rev Fitotec Mex* 2016;39:297–304.
- [12] FIRA. Mexican coffee continues to rebound from coffee rust disease. 2019.
- [13] Soriano VMB, Aguirre FL. Developing a solar dryer for coffee n.d.:24–5.
- [14] Quintero PIG. Buenas prácticas agrícolas para el café. *Programa de Investigación Científica, Cenicafé*, 349 2006.

-
- [15] Ghosh P, Natarajan V. Processing and drying of coffee – a review. *International Journal of Engineering Research & Technology* 2014;3:784–94.
- [16] Díaz HNW, Campos HJF, Jimenes RGC, Alvarado GAM. Coffee grain rotatory drying optimization. *Rev Mex Ing Quim* 2013;12:505–11.
- [17] Mejía FT, Fuentes JM, Mejía JT, Bonilla FH, Alemán RS, Varela I, et al. Energy evaluation of the mechanical drying of the grain of coffee arabica from Honduras. *Asian Journal of Biology* 2021;11:8–14. <https://doi.org/10.9734/ajob/2021/v11i130131>.
- [18] Manrique R, Vásquez D, Chejne F, Pinzón A. Energy analysis of a proposed hybrid solar–biomass coffee bean drying system. *Energy* 2020;202:117720. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117720>.
- [19] Santizo-Díaz D, Flores-Prieto JJ. Thermo-economic analysis of sun drying patio coffee in the Sierra Mariscal, Chiapas-México. *Case Studies in Thermal Engineering* 2024;105181. <https://doi.org/10.1016/j.CSITE.2024.105181>.
- [20] Suherman S, Widuri H, Patricia S, Susanto EE, Sutrisna RJ. Energy Analysis of a Hybrid Solar Dryer for Drying Coffee Beans. *International Journal of Renewable Energy Development* 2020;9:131–9. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.131-139>.
- [21] Deeto S, Thepa S, Monyakul V, Songprakorp R. The experimental new hybrid solar dryer and hot water storage system of thin layer coffee bean dehumidification. *Renew Energy* 2018;115:954–68. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.009>.
- [22] Buitrago Bermúdez O, Ospina M. JE, Álvarez G. J. Implementación del secado mecánico de café en carros secadores. *Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ingeniería* 1991.
- [23] Velásquez JHéctor, Rodríguez CMisael, Castaño LJL. Secado de Café en Lecho Fijo con Intermitencia Térmica y Flujo de Aire Pulsado 2011;64:6247–55.
- [24] Esper A, Hensel O, Mühlbauer W. Solar tunnel dryer. Proceedings of the Workshop on “Solar technology for every day use,” Bangkok (Thailand): 1994.
- [25] Müller J, Reisinger G, Kisgeci J, Kotta E, Tesic M, Mühlbauer W. Development of a greenhouse-type solar dryer for medicinal plants and herbs. *Solar and Wind Technology* 1989;6:523–30. [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(89\)90086-6](https://doi.org/10.1016/0741-983X(89)90086-6).
- [26] Esper A, Mühlbauer W. Solar drying - an effective means of food preservation. *Renew Energy* 1998;15:95–100. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00143-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00143-8).
- [27] Tovar MGD, Hernández ÁJR. Aprovechamiento de la energía calorífica de estufas campesinas para el secado del café en fincas. *Cenicafé* 2006;57:88–99.

-
- [28] Tascón OEC, Uribe SRJ, Gómez RAC, Martínez PEA. Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café. *Programa de Investigacion Cientifica* 2009;2.
- [29] Salazar GAC, Christian, Uribe SRJ, Tascón OEC. Control de caudal y temperatura de aire en el secado mecánico de café. *Ingeniería Agrícola Centro Nacional de Investigaciones de Café* 2010;61:281–96.
- [30] Rendón MY, De Jesus Garcia Salva T, Bragagnolo N. Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage. *Food Chem* 2014;147:279–86. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.123>.
- [31] Dong W, Hu R, Chu Z, Zhao J, Tan L. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chem* 2017;234:121–30. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.156>.
- [32] Cheng K, Dong W, Long Y, Zhao J, Hu R, Zhang Y, et al. Evaluation of the impact of different drying methods on the phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro digestion of green coffee beans. *Food Sci Nutr* 2019;7:1084–95. <https://doi.org/10.1002/fsn3.948>.
- [33] Borém FM, Marques ER, Alves E. Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. *Biosyst Eng* 2008;99:62–6. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.027>.
- [34] M K, D S. Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees 2010:500–4.
- [35] Ghosh P, Venkatachlapathy N. Changes in physico-chemical properties of coffee due to hot air assisted microwave drying. *International Journal of Processing and Ppost Harvest Technology* 2015;6:69–79. <https://doi.org/10.15740/HAS/IJPPHT/6.1/69-79>.
- [36] Murkovic M, Derler K. Analysis of amino acids and carbohydrates in green coffee. *J Biochem Biophys Methods* 2006;69:25–32. <https://doi.org/10.1016/j.jbbm.2006.02.001>.
- [37] de Sousa LHBP, da Luz JMR, da Silva M de CS, Moreli AP, Veloso TGR, Guarçoni RC, et al. Relationship between sensory and microbial profiles of fermented coffee by dry and washed methods. *Food Chemistry Advances* 2023;2:100259. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100259>.
- [38] Borém FM, Ribeiro FC, Figueiredo LP, Giomo GS, Fortunato VA, Isquierdo EP. Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. *J Stored Prod Res* 2013;52:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2012.08.004>.
- [39] Mathlouthi M. Drying using natural radiation. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* 2003:1918–22. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227055-x/00369-2>.

-
- [40] Quintanar J, Roa R. Thermal and financial evaluation of the drying process of coffee bean in a active solar dryer type greenhouse Juan. *Rev Mex De Cienc Agric* 2017;8:321–31.
- [41] Seveda MS, Jhajharia D. Design and performance evaluation of solar dryer for drying of large cardamom (*Amomum subulatum*). *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2012;4. <https://doi.org/10.1063/1.4769199>.
- [42] ICO. Informe del mercado de café (2019/20) n.d. <https://www.ico.org/es/Market-Report-19-20-c.asp> (accessed June 29, 2021).
- [43] Ekechukwu O V, Norton B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Fuel and Energy Abstracts* 1999;40:216. [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(99\)97881-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(99)97881-5).
- [44] Kumar M, Sansaniwal SK, Khatak P. Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;55:346–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>.
- [45] Kouadio IA, Koffi LB, Nemlin JG, Dosso MB. Effect of Robusta (*coffea canephora* P.) coffee cherries quantity put out for sun drying on contamination by fungi and ochratoxin A (OTA) under tropical humid zone (Côte d'Ivoire). *Food and Chemical Toxicology* 2012;50:1969–79. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.03.042>.
- [46] Rivera Rojo CR. Competitiveness of the Mexican coffee in international trade: a comparative analysis with Brazil, Colombia, and Peru (2000 -2019). *Análisis Económico* 2022;37:181–99. <https://doi.org/10.24275/uam/azc/dcsh/ae/2022v37n94/Rivera>.
- [47] Programa regional de desarrollo: región XI sierra mariscal n.d. <http://www.haciendachiapas.gob.mx/planeacion/Informacion/Desarrollo-Regional/prog-regionales/SIERRA-MARISCAL.pdf> (accessed June 29, 2021).
- [48] Morphology TC. Beneficio del café II: Secado del café pergamino. n.d.
- [49] Burbano JC. Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos 2005:127–32.
- [50] Magem JB. Secado solar de café. 2017.
- [51] Ghazanfari A, Tabil L, Sokhansanj S. Evaluating a solar dryer for in-shell drying of split pistachio nuts. *Drying Technology* 2003;21:1357–68. <https://doi.org/10.1081/DRT-120023183>.
- [52] Agrícola MRC, Olguin JQ, Patricia AS. Determinación de energía incorporada para el análisis de secadores solares tipo invernadero 2018:63–7.
- [53] Sharma A, Chen CR, Vu Lan N. Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:1185–210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>.
- [54] Alvarez J, González F, Alvarez-Hernández J, Fernandez A, López-Alzate R, Roa-Mejía G. El Secado Solar Rotativo para Café. *Cenicafe* 1989;144:8.

-
- [55] Henao JD, Soto A, Góngora R. MA, Cortés C. F. Automatización de secador de café (Tipo Silo) de laboratorio. *Ingeniería y Región* 2010;7:73–83. <https://doi.org/10.25054/22161325.802>.
- [56] Roa MG, Álvarez GJ. Secado del café. 1999.
- [57] Phillips AL. Drying coffee with solar-heated air. *Solar Energy* 1965;9:213–6. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(65\)90051-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(65)90051-4).
- [58] Gunawan FE, Budiman AS, Pardamean B, Djuana E, Romeli S, Hananda N, et al. Design and energy assessment of a new hybrid solar drying dome - enabling low-cost, independent and smart solar dryer for Indonesia agriculture 4.0. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 998, IOP Publishing Ltd; 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/998/1/012052>.
- [59] Belessiotis V, Delyannis E. Solar drying. *Solar Energy* 2011;85:1665–91. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>.
- [60] Fonseca FS, Abdala RLJ, Ferro FRV, Pantoja J, Torres A. Estudio comparativo del secado solar del café en plazoletas tradicionales y ennegrecidas. *Tecnología Química* 2003;XXIII:48–54.
- [61] Olmos LC, Duque EA, Rodriguez E. State of the art of coffee drying technologies in Colombia and their global development. *Espacios* 2017;38.
- [62] Berrueta-Soriano V, Limon-Aguirre F, Fernandez-Zayas J. Peasants participation in the design and construction of a solar coffee dryer. *Nat Resour Forum* 2003;37:95–106.
- [63] Mwithiga G, Kigo SN. Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability. *J Food Eng* 2006;74:247–52. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.018>.
- [64] Zambrano-Franco DA, López-Posada U, Rodríguez-Valencia N, Ramírez-Gómez CA. Paseras solares de bajo costo para secar café. *Cenicafe* 2006:12.
- [65] Janjai S, Intawee P, Kaewkiew J, Sritus C, Khamvongsa V. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renew Energy* 2011;36:1053–62. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2010.09.008>.
- [66] Suzihaque MUH, Driscoll R. Effects of solar radiation, buoyancy of air flow and optimization study of coffee drying in a heat recovery dryer. *Procedia Eng* 2016;148:812–22. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.617>.
- [67] Prada Á, Vela CP, Bardález G. Effectiveness of a coffee drying process using solar dryers with a Continuous air 2019;30:85–92.
- [68] Briceño-Martínez B, Castillo-Calderón J, Carrión-Jaura R, Díaz-Sinche D. Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada. *Ingenius* 2020:36–48. <https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.04>.

-
- [69] Kembaren ET. The economic rehabilitation with greenhouse drying system of coffee beans during pandemic in gampong reuleut timur, muara batu district, north aceh 2022:25–32.
- [70] Luis J, Rodríguez A, Fonseca SF, Pantoja Enríquez J, Torres AG. Secado de café pergamino en secadores solares multipropósito y de tambor rotatorio. vol. XXIII. 2003.
- [71] 2022 Secador solar tipo túnel con microclima auto controlado para café (coffea arabica) Honey de alto valor en taz.pdf n.d.
- [72] Muhidong J, Mursalim, Rahman A. The effect of air flow rate on single-layer drying characteristics of Arabica coffee. *Int Food Res J* 2013;20:1633–7.
- [73] Siagian P, Napitupulu FH, Setyawan EY, Siagian L, Napitupulu RAM, Ambarita H. Analysis of temperature and velocity distributions in a solar drying box coffee beans. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2018;420:012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012035>.
- [74] Glosch Payel, Venkatachalapathy N. Thin Layer drying of hot-air assisted microwave drying of parchment coffee. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology* 2014;4:121–33.
- [75] Dong W, Cheng K, Hu R, Chu Z, Zhao J, Long Y. Effect of microwave vacuum drying on the drying characteristics, color, microstructure, and antioxidant activity of green coffee beans. *Molecules* 2018;23. <https://doi.org/10.3390/molecules23051146>.
- [76] Muñoz-Neira MJ, Roa-Ardila MF, Correa-Celi CR. Comparative analysis of drying coffee beans using microwave and conventional oven. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 2019:100–8. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191151>.
- [77] Fudholi A. Solar-Assisted Microwave Convective Dryer for Coffee Cherries 2021;11.
- [78] Paes JL, Vargas BC, Cunha JPB, Silva DSC, Ferraz GAS, Braz MRS, et al. Thermal performance of a solar hybrid dryer for conilon coffee (*Coffea canephora*). *Agronomy Research* 2020;18:2166–84. <https://doi.org/10.15159/AR.20.164>.
- [79] Gunawan Y, Margono KT, Rizky R, Putra N, Faqih R Al. Enhancing the performance of conventional coffee beans drying with low - temperature geothermal energy by applying HPHE : an experimental study 2021:807–18.
- [80] Coradi PC, Marstens S, Rodrigues EH, Leal FA, , Costa da R, Borém FM. Development and validation of a heated drying air diffusion system to optimize rotary dryers and final coffee quality 2021.
- [81] Farah A, Donangelo CM. Phenolic compounds in coffee. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 2006;18:23–36. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100003>.

-
- [82] Rendón MY, De Jesus Garcia Salva T, Bragagnolo N. Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage. *Food Chem* 2014;147:279–86. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.123>.
- [83] Dong W, Hu R, Chu Z, Zhao J, Tan L. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chem* 2017;234:121–30. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.156>.
- [84] Kulapichitr F, Borompichaichartkul C, Suppavorasatit I, Cadwallader KR. Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chem* 2019;291:49–58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.152>.
- [85] Zhang M, Gao Y. Time of emergence in climate extremes corresponding to Köppen-Geiger classification. *Weather Clim Extrem* 2023;41. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100593>.
- [86] Janjai S, Intawee P, Kaewkiew J, Sritus C, Khamvongsa V. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renew Energy* 2011;36:1053–62. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.09.008>.
- [87] Yassen TA, Al-Kayiem HH. Experimental investigation and evaluation of hybrid solar/thermal dryer combined with supplementary recovery dryer. *Solar Energy* 2016;134:284–93. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.011>.
- [88] Bennamoun L. An Overview on application of exergy and energy for determination of solar drying efficiency. *International Journal of Energy Engineering* 2012;2:184–94. <https://doi.org/10.5923/j.ijee.20120205.01>.
- [89] Álvarez-sánchez F, Flores-prieto J, García-valladares O. Annual thermal performance of an industrial hybrid direct–indirect solar air heating system for drying applications in morelos-méxico. *Energies* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/en14175417>.
- [90] Stephens L, Spiegel M. Schaum's Outline of Statistics, fifth ed., McGraw-Hill 2014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1036/9780071822770>.
- [91] Singh PP, Singh S, Dhaliwal SS. Multi-shelf domestic solar dryer. *Energy Convers Manag* 2006;47:1799–815. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.002>.
- [92] Ren H, Lu Y, Zhang Y, Chen F, Yang X. Operation simulation and optimization of distributed energy system based on TRNSYS. *Energy Procedia* 2018;152:3–8. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.050>.