

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

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

Irene Montero Puertas

TESIS DOCTORAL

Badajoz, Noviembre de 2005

***Edita: Universidad de Extremadura  
Servicio de Publicaciones***

Caldereros 2. Planta 3<sup>a</sup>  
Cáceres 10071  
Correo e.: [publicac@unex.es](mailto:publicac@unex.es)  
<http://www.unex.es/publicaciones>

TESIS DOCTORAL

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

Por

**Irene Montero Puertas**

Presentada en la  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

de la  
**UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA**

Para la obtención del  
**GRADO DE DOCTOR**

Directores de Tesis

**Dr. D. Sebastián Rojas Rodríguez**  
**Dr. D. Antonio Ruiz Celma**

Badajoz, Noviembre de 2005



TESIS DOCTORAL

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

Por

**Irene Montero Puertas**

Directores

**Dr. D. Sebastián Rojas Rodríguez  
Dr. D. Antonio Ruiz Celma**

**TRIBUNAL CALIFICADOR**

Presidente

**Dr. D. Santiago Aroca Lastra**

Secretario

**Dr. D. Julián Blanco Gálvez**

Vocales

**Dr. D. Antonio Ramiro González  
Dr. D. Francisco Cuadros Blázquez  
Dr. D. José Manuel Palomar Carnicero**

Badajoz, Noviembre de 2005



*A mi padre.*

*... "No hay ventura ni desgracia en el mundo, sino la comparación de un estado con otro, he ahí todo.*

*Sólo el que ha experimentado el colmo del infortunio puede sentir la felicidad suprema.*

*Es preciso haber querido morir, amigo mío, para saber cuán buena y hermosa es la vida.*

*Vivid, pues, y sed dichosos, hijos queridos de mi corazón, y no olvidéis nunca que hasta el día en que Dios se digne descifrar el porvenir del hombre, toda la sabiduría humana estará resumida en dos palabras:*

*¡Confiar y esperar!"...*

*El Conde de Montecristo, 1844. Alejandro Dumas.*





## **AGRADECIMIENTOS**

*Deseo expresar en estas líneas mi agradecimiento a las personas, instituciones y empresas sin cuya colaboración no hubiera sido posible la realización de esta tesis.*

*En primer lugar, mi más profundo agradecimiento al Prof. Dr. Sebastián Rojas Rodríguez por su inestimable labor de dirección de tesis y, sobre todo, por la confianza depositada y por su continua atención, dedicación y apoyo, tanto a nivel profesional como personal.*

*Asimismo, le agradezco al Prof. Dr. Antonio Ruiz Celma, como director de tesis, la idea de partida y sus acertadas sugerencias y observaciones.*

*A mi gran compañera Teresa, por servirme de referencia, sus siempre valiosos consejos y su constante apoyo. Por todo, gracias.*

*A la Dirección General de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de la Junta de Extremadura, por posibilitarme la realización de esta tesis y por confiar en el Proyecto “Diseño y demostración de un prototipo de secadero solar híbrido para alpechín y orujos” (Ref: 2PR03A018) dentro del cual se han desarrollado muchas de las tareas de este trabajo.*

*A Domingo Colodrás, por ayudarme en tantos momentos críticos en el secadero y hacerme afrontar los problemas en él con más optimismo.*

*A las empresas Troil Vegas Altas y Orujos Tierra de Barros, personificado en José Calama, Pedro Vallejo, José María de la Rosa e Isidoro, por colaborar siempre que se les solicitó y suministrar todos los residuos necesarios para los ensayos.*

*Al Dr. Julián Blanco, Dr. João Farinha y Pedro Horta, por posibilitar las estancias en la PSA (Almería) y el INETI (Lisboa), de las cuales obtuve información y experiencias de gran ayuda en esta tesis.*

*A todas las personas que, directa o indirectamente, me han ayudado en distintas etapas de la realización del trabajo, entre ellas, mis compañeros Javier e Isabel y los alumnos Ignacio, Andrés, José y Ricardo.*

*Con todo mi afecto, a mi madre, hermanos, sobrinos y demás familia, por todas las horas que les he robado, en particular, a Nuria y a Lino por su interés constante y, en especial, a mi sobrino Pedro, por todo lo que me transmite y hacerme sonreír hasta en los peores días. A mi familia política, Ángela, Pedro, Feli y Chari, por ser como son. A Concha, desde hace mucho, un gran apoyo. A otros compañeros y amigos, Isabel, Emiliano, Javi, porque han estado y se han preocupado por mi.*

*Y, finalmente, a Francisco, por su apoyo incondicional y su ayuda incalculable, siempre, y más, durante la realización de la tesis.*



# Índice general

<b>1. Introducción.</b>	<b>1</b>
1.1. La problemática de la gestión de los residuos procedentes de la producción de aceite de oliva y las alternativas de aprovechamiento. . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	8
<b>2. Objetivos.</b>	<b>11</b>
<b>3. Teoría del secado. Secado solar.</b>	<b>13</b>
3.1. Introducción. . . . .	13
3.2. Teoría del secado. . . . .	17
3.2.1. Contenido de humedad. . . . .	17
3.2.2. Contenido de humedad de equilibrio. Actividad del agua. Isotermas de sorción. . . . .	18
3.2.3. Calor latente de vaporización. . . . .	20
3.2.4. Ratios de secado. . . . .	20
3.2.5. Propiedades psicrométricas. . . . .	23
3.2.6. Propiedades físicas del aire húmedo. . . . .	30
3.2.7. Consumo energético en la eliminación de humedad. . . . .	31
3.2.8. Eficiencia del secado. . . . .	32
3.2.9. Clasificación de secaderos. . . . .	33
3.3. Secado solar. . . . .	38
3.3.1. Introducción. . . . .	38
3.3.2. Radiación solar. . . . .	39
3.3.3. Tipología de secaderos solares. . . . .	45
3.3.4. Captadores solares de aire para aplicaciones de secado. . . . .	51
3.3.5. Parámetros de evaluación de secaderos solares. . . . .	56
<b>4. Cuantificación y caracterización de subproductos.</b>	<b>63</b>
4.1. Introducción. . . . .	63
4.2. Cuantificación de los residuos. . . . .	65
4.2.1. Cantidades de subproductos generados en Extremadura. . . . .	65
4.2.2. Cuantificación de subproductos para una planta tipo. . . . .	68
4.3. Caracterización de los subproductos. . . . .	70
4.3.1. Características físicas. . . . .	70
4.3.2. Análisis elemental. . . . .	74

4.3.3.	Análisis inmediato. . . . .	75
4.3.4.	Poder calorífico. . . . .	76
4.3.5.	Densidad energética. . . . .	77
4.3.6.	Coeficientes convectivos. . . . .	78
4.3.7.	Difusividad efectiva. . . . .	85
4.3.8.	Energía de activación. . . . .	91
<b>5.</b>	<b>Secado directo al sol.</b>	<b>95</b>
5.1.	Introducción. . . . .	95
5.2.	Metodología experimental. . . . .	96
5.3.	Análisis de resultados. . . . .	99
5.3.1.	Comportamiento global de los subproductos en el SDS. . . . .	99
5.3.2.	Influencia del espesor de producto. . . . .	103
5.3.3.	Influencia de parámetros externos. . . . .	106
<b>6.</b>	<b>Justificación del equipo experimental.</b>	<b>111</b>
6.1.	Introducción. . . . .	111
6.2.	Descripción general del prototipo de secadero solar. . . . .	112
6.2.1.	Sistemas de medida y control. . . . .	114
6.2.2.	Equipamiento adicional externo al prototipo. . . . .	118
6.3.	Colector solar de aire. . . . .	119
6.3.1.	Inclinación del colector. . . . .	121
6.3.2.	Eficiencia del colector solar. . . . .	123
6.4.	Cámara de secado de productos. . . . .	124
6.4.1.	Ventilador y sistema de regulación de caudal. . . . .	125
6.4.2.	Estrategias de funcionamiento para optimización del proceso. . . . .	126
<b>7.</b>	<b>Análisis experimental del prototipo de secadero solar.</b>	<b>129</b>
7.1.	Introducción. . . . .	129
7.2.	Metodología experimental. . . . .	129
7.3.	Caracterización del funcionamiento del calentador solar de aire. . . . .	132
7.3.1.	Temperatura del aire a la salida del colector solar. . . . .	132
7.3.2.	Eficiencia del captador. . . . .	136
7.4.	Cinética de secado en el prototipo. . . . .	140
7.4.1.	Análisis general de resultados. . . . .	140
7.4.2.	Influencia de diferentes parámetros en la cinética de secado. . . . .	151
7.4.3.	Eficiencia de la cámara de secado. . . . .	156
7.4.4.	Comparación secado solar y secado natural. . . . .	159
7.5.	Modelos de ajuste de los resultados experimentales. . . . .	161
<b>8.</b>	<b>Modelado teórico del funcionamiento del secadero solar.</b>	<b>169</b>
8.1.	Introducción. . . . .	169
8.2.	Modelo para el colector. . . . .	171
8.2.1.	Introducción. . . . .	171
8.2.2.	Rendimiento del colector y temperatura del aire a la salida. . . . .	172
8.2.3.	Modelo matemático. . . . .	173

8.2.4. Parámetros de entrada y proceso de cálculo. . . . .	179
8.3. Modelo para la cámara de secado. . . . .	182
8.3.1. Introducción. . . . .	182
8.3.2. Balances de masa y energía en sistema genérico de secado. . . . .	182
8.3.3. Modelo matemático para la cámara de secado. . . . .	186
8.3.4. Parámetros de entrada y proceso de cálculo. . . . .	189
8.4. Validación de los modelos teóricos del secadero. . . . .	191
8.4.1. Colector. . . . .	191
8.4.2. Cámara de secado. . . . .	193
8.5. Modelos de ajuste de variables climatológicas. . . . .	195
8.5.1. Introducción. . . . .	195
8.5.2. Análisis de regresión. . . . .	196
8.5.3. Comparación de resultados medidos y ajustados. . . . .	198
<b>9. Propuesta final de secado solar para subproductos de almazara. . . . .</b>	<b>203</b>
9.1. Introducción. . . . .	203
9.2. Solución adoptada de secado solar. . . . .	204
9.2.1. Valoración de necesidades y parámetros de influencia. . . . .	204
9.2.2. Descripción del sistema propuesto. . . . .	209
<b>10. Conclusiones y líneas futuras. . . . .</b>	<b>223</b>
10.1. Consideraciones relativas a las cantidades y características de los sub- productos. . . . .	224
10.2. Consideraciones relativas al secado natural. . . . .	225
10.3. Consideraciones relativas al diseño del prototipo. . . . .	225
10.4. Consideraciones relativas al funcionamiento del secadero solar y la cinéti- ca de secado de los subproductos. . . . .	226
10.5. Consideraciones relativas al modelo teórico del sistema. . . . .	228
10.6. Consideraciones relativas a la propuesta de secado solar. . . . .	229
10.7. Conclusiones globales y líneas de trabajo futuras. . . . .	230
<b>Nomenclatura. . . . .</b>	<b>233</b>
<b>Bibliografía. . . . .</b>	<b>241</b>

# Índice de figuras

1.1. Distribución de la superficie de olivar en España. . . . .	2
1.2. Superficie y producción por comunidades autónomas (2003-2004). . . . .	2
1.3. Distribución de la superficie de olivar en Extremadura. . . . .	3
3.1. Transferencia de calor y masa en el secado. . . . .	14
3.2. Isotermas de sorción a diferentes temperaturas. . . . .	19
3.3. Curvas de secado. . . . .	21
3.4. Carta psicrométrica. . . . .	23
3.5. Evolución del aire en los procesos de secado (aire ambiente o aire precalentado). . . . .	29
3.6. Variación de la irradiancia extraterrestre a lo largo del año. . . . .	40
3.7. Tipología de sistemas de secado solar. . . . .	46
3.8. Secaderos de tipo integral. . . . .	47
3.9. Secaderos de tipo distribuido. . . . .	47
3.10. Secaderos de tipo mixto. . . . .	47
3.11. Captador solar de aire de placa plana sin cubierta. . . . .	52
3.12. Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso superior. . . . .	53
3.13. Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso inferior. . . . .	53
3.14. Captador solar de aire de placa plana con aletas. . . . .	54
3.15. Captador solar de aire de placa plana corrugada en V. . . . .	54
3.16. Captador solar de aire de placa plana suspendida de simple paso. . . . .	55
3.17. Captador solar de aire de placa plana suspendida de doble paso. . . . .	55
3.18. Captador solar de aire de placa plana perforada. . . . .	55
4.1. Producción comarcal de alperujo en Extremadura. . . . .	66
4.2. Producción comarcal de orujo en Extremadura. . . . .	67
4.3. Producción comarcal de alpechín en Extremadura. . . . .	67
4.4. Porcentaje sobre la producción total de alperujo por comarca. . . . .	68
4.5. Mapas de distribución de los subproductos en Extremadura por comarcas. a) Alperujo; b) Orujo; c) Alpechín. . . . .	68
4.6. Esquema de planta de secado de subproductos. . . . .	69
4.7. Balance de masa en planta tipo. . . . .	70
4.8. Cantidad final de producto y agua evaporada para diferentes niveles de humedad. . . . .	72
4.9. Incremento del poder calorífico con la disminución de humedad. . . . .	77

4.10. Densidad energética de los subproductos antes y después del secado. . .	78
4.11. Esquema de determinación de los coeficientes convectivos. . . . .	79
4.12. Ensayos experimentales para obtener los coeficientes convectivos en los subproductos. . . . .	83
4.13. Variación en el tiempo del coeficiente convectivo para los tres subpro- ductos en modo indirecto. . . . .	84
4.14. Ratio de humedad en modo forzado para orujo con la temperatura. . .	86
4.15. Ratio de humedad en modo natural para orujo con la temperatura. . .	86
4.16. Ratio de humedad en modo forzado para alperujo con la temperatura.	87
4.17. Ratio de humedad en modo natural para alperujo con la temperatura.	87
4.18. Ratio de humedad en modo forzado para alpechín con la temperatura.	87
4.19. Ratio de humedad en modo natural para alpechín con la temperatura.	88
4.20. Representación lnMR frente al tiempo de secado para orujo. . . . .	88
4.21. Representación lnMR frente al tiempo de secado para alperujo. . . . .	89
4.22. Representación lnMR frente al tiempo de secado para alpechín. . . . .	89
4.23. Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura para orujo. . . . .	92
4.24. Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura para alperujo. . . . .	92
4.25. Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura para alpechín. . . . .	92
5.1. Principio de trabajo del SDS. . . . .	96
5.2. Variables climáticas relativas al ensayo 1. . . . .	97
5.3. Variables climáticas relativas al ensayo 2. . . . .	98
5.4. Variables climáticas relativas al ensayo 3. . . . .	98
5.5. Variables climáticas relativas al ensayo 4. . . . .	98
5.6. Contenido de humedad db. frente al tiempo (ensayos 1, 2, 3 y 4). . . .	100
5.7. Tiempos de secado máximos, mínimos y medios para los subproductos.	100
5.8. Ratio de humedad db. frente al tiempo de exposición. . . . .	101
5.9. Ratio de humedad db. frente al contenido de humedad. . . . .	101
5.10. Velocidad de secado db. para orujo. . . . .	102
5.11. Velocidad de secado db. para alperujo. . . . .	102
5.12. Velocidad de secado db. para alpechín. . . . .	102
5.13. Variación temporal de humedad wb. según espesor para orujo. . . . .	103
5.14. Variación temporal de humedad wb. según espesor para alperujo. . . .	104
5.15. Variación temporal de humedad wb. según espesor para alpechín. . . .	104
5.16. Ratio de humedad db. según espesor para orujo. . . . .	104
5.17. Ratio de humedad db. según espesor para alperujo. . . . .	105
5.18. Ratio de humedad db. según espesor para alperchín. . . . .	105
5.19. Ratio de humedad db. del alpechín con espesor 1 cm para los cuatro ensayos. . . . .	106
5.20. Tiempo de secado frente al espesor de producto. . . . .	107
5.21. Influencia de la temperatura ambiente en el SDS para orujo. . . . .	107
5.22. Influencia de la temperatura ambiente en el SDS para alperujo. . . . .	108

5.23. Influencia de la temperatura ambiente en el SDS para alpechín. . . . .	108
5.24. Influencia de la velocidad del aire en el SDS para orujo. . . . .	109
5.25. Influencia de la velocidad del aire en el SDS para alperujo. . . . .	109
5.26. Influencia de la velocidad del aire en el SDS para alpechín. . . . .	109
6.1. Esquema del prototipo de secadero solar. . . . .	112
6.2. Configuración final del prototipo de secadero solar. . . . .	115
6.3. Calibración de los diferentes medidores de caudal. . . . .	117
6.4. Esquema colector solar de aire. . . . .	119
6.5. Medidas de radiación con estructuras de simulación. . . . .	120
6.6. Diagramas de radiación con simulador para estructura A y B. . . . .	120
6.7. Ángulo óptimo del colector en Badajoz para cada día del año. . . . .	122
6.8. Temperatura de salida del colector respecto a su inclinación en convec- ción natural. . . . .	122
6.9. Temperatura de salida del colector respecto a su inclinación en convec- ción forzada. . . . .	123
6.10. Eficiencia del colector en vacío para diferentes inclinaciones en modo pasivo. . . . .	124
6.11. Esquema cámara de secado. . . . .	125
6.12. Comparación de sistemas indirecto y mixto en modo natural. . . . .	127
6.13. Comparación de sistemas indirecto y mixto en modo forzado. . . . .	127
6.14. Variación de temperaturas en la cámara para diferentes velocidades de aire en el colector. . . . .	128
7.1. Condiciones climatológicas en laboratorio de ensayos. . . . .	131
7.2. Condiciones climatológicas al aire libre en el mes de julio. . . . .	131
7.3. Condiciones climatológicas al aire libre en el mes de agosto. . . . .	131
7.4. Radiación en plano horizontal e inclinado. . . . .	133
7.5. Temperatura de salida del colector y radiación en modo pasivo. . . . .	134
7.6. Temperatura de salida del colector y radiación en modo activo. . . . .	134
7.7. Temperatura de salida del colector y flujo másico en modo pasivo. . . . .	135
7.8. Temperatura de salida del colector y flujo másico en modo activo. . . . .	135
7.9. Influencia de la radiación global en la temperatura de salida del colector para varios flujos másicos. . . . .	136
7.10. Influencia del flujo másico de aire en la temperatura de salida del colec- tor para diferentes niveles de radiación. . . . .	137
7.11. Comparación variables entrada colector - ambiente. . . . .	137
7.12. Evolución en el tiempo de la eficiencia instantánea y la temperatura de salida del colector en modo natural. . . . .	138
7.13. Evolución en el tiempo de la eficiencia instantánea y la temperatura de salida del colector en modo forzado. . . . .	138
7.14. Influencia de la radiación solar en la eficiencia del colector. . . . .	139
7.15. Influencia del flujo másico de aire en la eficiencia del colector. . . . .	139
7.16. Curva típica de eficiencia para el colector. . . . .	139
7.17. Velocidad en el colector para los diferentes modos de funcionamiento. . . . .	140



7.18. Velocidad en la cámara de secado para los diferentes modos de funcionamiento. . . . .	141
7.19. Flujo másico de aire para los diferentes modos de funcionamiento. . .	141
7.20. Variaciones de temperatura y humedad relativa en el secadero para el modo pasivo. . . . .	142
7.21. Variaciones de temperatura y humedad relativa en el secadero para el modo activo. . . . .	142
7.22. Variaciones de temperatura y humedad relativa en el secadero para el modo activo e híbrido. . . . .	143
7.23. Variación del contenido de humedad db en convección natural. . . . .	143
7.24. Variación del contenido de humedad db en convección forzada. . . . .	144
7.25. $MR_{db}$ vs $M_{db}$ para orujo, alperujo y alpechín. . . . .	144
7.26. Influencia del flujo másico en la cinética de secado de orujo. . . . .	145
7.27. Influencia del flujo másico en la cinética de secado de alperujo. . . . .	145
7.28. Influencia del flujo másico en la cinética de secado de alpechín. . . . .	146
7.29. Valores máximos, mínimos y medios de los tiempos de secado de los subproductos. . . . .	146
7.30. Comparación del funcionamiento en modo mixto e indirecto en convección forzada para el orujo. . . . .	146
7.31. Comparación del funcionamiento en modo mixto e indirecto en convección forzada para el alperujo. . . . .	147
7.32. Comparación del funcionamiento en modo mixto e indirecto en convección forzada para el alpechín. . . . .	147
7.33. Variaciones de temperatura de producto en orujo para diferentes modos de funcionamiento. . . . .	148
7.34. Variaciones de temperatura de producto en alperujo para diferentes modos de funcionamiento. . . . .	149
7.35. Variaciones de temperatura de producto en alpechín para diferentes modos de funcionamiento. . . . .	149
7.36. Ratio de secado db. en bandeja inferior y superior para orujo. . . . .	150
7.37. Ratio de secado db. en bandeja inferior y superior para alperujo. . . . .	150
7.38. Ratio de secado db. en bandeja inferior y superior para alpechín. . . . .	151
7.39. Comparación de temperaturas de producto en bandeja inferior y superior para alpechín. . . . .	151
7.40. Influencia de la temperatura y humedad relativa en la cinética de secado del orujo. . . . .	152
7.41. Influencia de la temperatura y humedad relativa en la cinética de secado del alperujo. . . . .	153
7.42. Influencia de la temperatura y humedad relativa en la cinética de secado del alpechín. . . . .	153
7.43. Ratio de humedad db. para diferentes temperaturas en modo mixto e indirecto para orujo. . . . .	154
7.44. Ratio de humedad db. para diferentes temperaturas en modo mixto e indirecto para alperujo. . . . .	154

7.45. Ratio de humedad db. para diferentes temperaturas en modo mixto e indirecto para alpechín. . . . .	155
7.46. Influencia del caudal de aire en la cinética de secado. . . . .	155
7.47. Temperaturas de producto para funcionamiento mixto y distribuido. . .	156
7.48. Eficiencia del secado en temperatura en modo natural y forzado. . . .	157
7.49. Eficiencia en temperatura y humedad en modo pasivo y activo (orujo). .	157
7.50. Eficiencia del secado en humedad para los diferentes subproductos. . .	158
7.51. Variación del ratio de humedad con el tiempo de secado para orujo en el secadero solar y en el secado natural. . . . .	159
7.52. Variación del ratio de humedad con el tiempo de secado para alperujo en el secadero solar y en el secado natural. . . . .	160
7.53. Variación del ratio de humedad con el tiempo de secado para alpechín en el secadero solar y en el secado natural. . . . .	160
7.54. Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en orujo y modo mixto. . . . .	163
7.55. Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alperujo y modo mixto. . . . .	163
7.56. Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alpechín y modo mixto. . . . .	163
7.57. Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en orujo y modo indirecto. . . . .	164
7.58. Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alperujo y modo indirecto. . . . .	164
7.59. Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alpechín y modo indirecto. . . . .	164
7.60. Valores del ratio de humedad db. predecidos según el modelo de Page y experimentales a diferentes temperaturas para los tres subproductos en el modo mixto. . . . .	165
7.61. Valores del ratio de humedad db. predecidos según el modelo de Page y experimentales a diferentes temperaturas para los tres subproductos en el modo indirecto. . . . .	165
8.1. Esquema general de las variables necesarias para la simulación. . . . .	170
8.2. Variables que intervienen en el modelo del colector. . . . .	173
8.3. Diagrama de bloques de la simulación del colector. . . . .	181
8.4. Esquema de un proceso genérico de secado. . . . .	182
8.5. Intercambio aire-producto-paredes internas. . . . .	183
8.6. Intercambio aire desecante-producto húmedo. . . . .	183
8.7. Intercambio pared interna-aire-aislamiento. . . . .	184
8.8. Intercambio pared interna-aislamiento. . . . .	185
8.9. Intercambio superficie externa del aislamiento-medio. . . . .	185
8.10. Variables para el modelo de la cámara de secado. . . . .	187
8.11. Valores medidos y simulados de la eficiencia instantánea y el incremento de temperatura en el colector para un ensayo específico. . . . .	191

8.12. Comparación de los valores experimentales y simulados de la temperatura de salida del colector y la eficiencia instantánea para $m=0,06$ kg/s. . . . .	192
8.13. Comparación de los valores experimentales y simulados de la temperatura de salida del colector y la eficiencia instantánea para $m=0,22$ kg/s. . . . .	193
8.14. Valores medidos frente a simulados de los parámetros del colector. . .	193
8.15. Comparación de parámetros experimentales y simulados en la cámara de secado para orujo. . . . .	194
8.16. Comparación de parámetros experimentales y simulados en la cámara de secado para alperujo. . . . .	194
8.17. Comparación de parámetros experimentales y simulados en la cámara de secado para alpechín. . . . .	195
8.18. Comparación valores medidos y simulados de temperatura. . . . .	199
8.19. Comparación valores medidos y simulados de humedad relativa. . . . .	199
8.20. Comparación valores medidos y simulados de irradiación solar. . . . .	200
8.21. Comparación valores medidos y simulados de velocidad del viento. . .	200
8.22. Valores medidos de las variables climáticas frente a los simulados. . . .	201
9.1. Relación masa-superficie y superficie necesaria diaria, en orujo y alpechín, para diferentes espesores de producto. . . . .	205
9.2. Potencia térmica y cantidad final de orujo seco en función del porcentaje de humedad. . . . .	208
9.3. Potencia térmica y cantidad final de alpechín seco en función del porcentaje de humedad. . . . .	208
9.4. Sistema propuesto de secado solar de subproductos de almazara. . . . .	210
9.5. Volteador de producto. . . . .	212
9.6. Raspadores y sistema de desplazamiento del volteador de producto. . .	212
9.7. Distribución en planta de la instalación de tratamiento y secado de alperujos. . . . .	213
9.8. Detalle de horno de combustión de biomasa para secaderos. . . . .	214
9.9. Ventiladores de extracción en salidas de secaderos. . . . .	215
9.10. Ventiladores de impulsión en colectores inflables. . . . .	216
9.11. Ventiladores de interior cenitales. . . . .	216
9.12. Aperturas cenitales del secadero. . . . .	217
9.13. Calentadores de aire inflables. . . . .	218
9.14. Distribución de las zonas de almacenamiento. . . . .	221

# Índice de tablas

3.1. Ventajas e inconvenientes de los secaderos rotativos. . . . .	36
3.2. Ventajas e inconvenientes de los secaderos flash. . . . .	36
3.3. Ventajas e inconvenientes de los secaderos de discos. . . . .	37
3.4. Ventajas e inconvenientes de los secaderos de cascada. . . . .	37
3.5. Ventajas e inconvenientes de los secaderos de vapor sobrecalentado. . .	37
3.6. Variación diaria del ángulo horario en el hemisferio norte. . . . .	42
3.7. Correlaciones entre la radiación difusa y global para datos horarios. . .	44
3.8. Correlaciones entre la radiación difusa y global para datos diarios medios mensuales. . . . .	45
3.9. Comparación entre los secaderos solares pasivos integral y distribuido. .	50
4.1. Ecuaciones para la determinación de las cantidades de residuos generados en cada comarca. . . . .	66
4.2. Humedad wb. de los residuos antes del proceso de secado. . . . .	71
4.3. Humedad wb. de los residuos posterior al proceso de secado. . . . .	72
4.4. Densidad de los residuos antes del proceso de secado. . . . .	73
4.5. Densidad de los residuos posterior al secado. . . . .	73
4.6. Análisis elemental wb. de las muestras estudiadas. . . . .	74
4.7. Análisis inmediato en base seca de los subproductos húmedos. . . . .	75
4.8. Análisis inmediato en base seca de los subproductos secos. . . . .	75
4.9. Poderes caloríficos superior e inferior de los residuos húmedos. . . . .	76
4.10. Poderes caloríficos superior e inferior de los residuos secos. . . . .	76
4.11. Densidad energética de los residuos húmedos. . . . .	77
4.12. Densidad energética de los residuos secos. . . . .	78
4.13. Parámetros constantes para el cálculo de los coeficientes convectivos. .	83
4.14. Variables para $h_c$ en el alpechín en convección natural. . . . .	83
4.15. Coeficientes convectivos de los subproductos modo indirecto. . . . .	84
4.16. Coeficientes convectivos de los subproductos modo mixto. . . . .	85
4.17. Pendientes en convección forzada. . . . .	88
4.18. Pendientes en convección natural. . . . .	90
4.19. Longitud característica de los subproductos. . . . .	90
4.20. Difusividad efectiva para los subproductos en convección forzada. . . .	91
4.21. Difusividad efectiva para los subproductos en convección natural. . . .	91
4.22. Energía de activación de los subproductos en modo forzado y natural. .	93
4.23. Energía de activación para diferentes productos agrícolas. . . . .	93

5.1. Tiempos de secado hasta niveles de humedad wb. 0,2 dec. . . . .	106
6.1. Características técnicas del ventilador y regulador de velocidad. . . . .	125
6.2. Velocidades y caudales de aire en diferentes posiciones del regulador. . .	126
7.1. Irradiancia horizontal y sobre el plano del colector para diferentes ángulos de inclinación del colector. . . . .	132
7.2. Ecuaciones para la temperatura de salida del captador en función de la radiación incidente para diferentes flujos de aire. . . . .	136
7.3. Velocidades y caudales medios de aire para diferentes ensayos. . . . .	140
7.4. Tiempos de secado con la temperatura y modo de funcionamiento. . .	154
7.5. Eficiencia del secadero para diferentes subproductos modos de funcionamiento. . . . .	158
7.6. Tiempos de secado en SDS y secadero solar para los tres subproductos.	161
7.7. Modelos matemáticos de ratios de secado. . . . .	162
7.8. Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo mixto para los diferentes modelos (orujo). . . . .	166
7.9. Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo mixto para los diferentes modelos (alperujo). . . . .	166
7.10. Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo mixto para los diferentes modelos (alpechín). . . . .	167
7.11. Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo indirecto para los diferentes modelos (orujo). . . . .	167
7.12. Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo indirecto para los diferentes modelos (alperujo). . . . .	168
7.13. Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo indirecto para los diferentes modelos (alpechín). . . . .	168
8.1. Parámetros constantes para el modelo del calentador solar. . . . .	181
8.2. Parámetros A y B de simulación del ratio de secado. . . . .	190
8.3. Parámetros constantes para el modelo de la cámara de secado. . . . .	191
8.4. Comparación de valores característicos del colector experimentales y simulados ( $T_a = 30\text{ }^\circ\text{C}$ y $v_c = 1\text{ m/s}$ ). . . . .	192
8.5. Comparación de valores característicos del colector experimentales y simulados ( $T_a = 30\text{ }^\circ\text{C}$ y $v_c = 3\text{ m/s}$ ). . . . .	192
8.6. Errores porcentuales obtenidos en la simulación del proceso en la cámara de secado. . . . .	195
8.7. Coeficientes de regresión relativos a la temperatura horaria media mensual. . . . .	197
8.8. Coeficientes de regresión relativos a la humedad relativa horaria media mensual. . . . .	197
8.9. Coeficientes de regresión relativos a la irradiancia global horaria media mensual. . . . .	198
8.10. Coeficientes de regresión relativos a la velocidad del viento horaria media mensual. . . . .	198

9.1. Superficie y días disponibles de almacenamiento en función del espesor para cada subproducto. . . . .	206
9.2. Número de horas de sol y factor de nubosidad en Badajoz, mensual y total anual. . . . .	209
9.3. Caracterización de los calentadores de aire inflables. . . . .	218
9.4. Necesidades de residuo en función del subproducto a secar. . . . .	219
9.5. Volumen y superficie de producto húmedo anual y mensual. . . . .	220
9.6. Volumen y superficie de producto seco anual y mensual. . . . .	220
9.7. Dimensionado de superficies de almacenamiento de subproductos. . . .	221

# Resumen.

La elevada cantidad de residuos procedentes de la producción de aceite de oliva, junto con su generación temporal y altamente concentrada, provocan un problema de gran magnitud en las zonas donde se originan.

El alperujo, subproducto obtenido en la mayoría de almazaras, aunque eminentemente contaminante, cuenta con diversas tecnologías para su aprovechamiento. Entre las más importantes se encuentra la operación de repaso tres fases, en la que se obtienen los residuos orujo y alpechín.

Por su parte, el orujo dispone de tecnologías muy desarrolladas y conocidas para su aprovechamiento, destacando el secado térmico, extractado y posterior utilización como combustible. No obstante, el secado convencional conlleva costes de inversión y operación muy elevados.

Por último, el alpechín, subproducto que presenta, por sus características físico-químicas, repercusiones medioambientales muy severas, no cuenta en la actualidad con una tecnología adecuada y viable de tratamiento-eliminación.

Por lo anterior, en este trabajo se plantea, como objetivo principal, la aplicación del secado solar a las fases generadas (alperujo, orujo y alpechín), para el estudio de la cinética de secado de las mismas y la valoración de la viabilidad de aplicación de dicho proceso de secado solar, aunque sin duda, por sus características, sea su utilización en la fase alpechín la que mayores expectativas presenta.

El trabajo desarrollado en la tesis, en primer lugar, parte de la cuantificación y caracterización exhaustiva de los subproductos. Así, se han determinado las cantidades generadas en Extremadura de los mismos y se han analizado las propiedades físicas, químicas y energéticas que tienen una relación directa o indirecta con el proceso de secado. A continuación, se ha estudiado el comportamiento de los residuos en el secado natural, a partir del cual se dispone de una medida comparativa para el secado

solar (ratios de secado), además de diversa información relativa a los parámetros de influencia en el proceso.

Con el diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secadero solar híbrido, se han llevado a cabo los ensayos de secado para los diferentes subproductos en las diversas formas de funcionamiento, consiguiendo una información muy detallada sobre la cinética de secado de los residuos de la industria almazarera. Para su generalización, se ha modelado el funcionamiento del sistema mediante técnicas de simulación.

A través de la información obtenida en los ensayos en el prototipo y con vista a la eliminación total de los subproductos de almazara, en el último capítulo se plantea y dimensiona una propuesta de planta de secado solar híbrido, fundamentalmente centrada en el subproducto más problemático, el alpechín.

Los resultados obtenidos permiten establecer, entre otras, algunas conclusiones de interés:

- La aplicación del secado solar no resulta interesante, por sus características, al subproducto alperujo.
- El secado solar para las fases orujo y alpechín, para las condiciones estudiadas, ha proporcionado resultados muy positivos, permitiendo el aprovechamiento-eliminación integral de los mismos.
- La reducción de humedad en el alpechín mediante un secadero solar y su posterior utilización como combustible en la planta donde se procesa, posibilita una nueva solución a la eliminación integral de un efluente altamente perjudicial para el medioambiente.



# Capítulo 1

## Introducción.

### **1.1. La problemática de la gestión de los residuos procedentes de la producción de aceite de oliva y las alternativas de aprovechamiento.**

La industria del aceite de oliva tiene gran importancia en el mundo, siendo mayoritaria su producción en la Unión Europea. Países como España, Grecia, Italia, Portugal, Francia, Turquía, Túnez y Marruecos, acumulan el mayor porcentaje de la producción mundial de aceite de oliva ( $> 90 \%$ ). En la UE, España, Grecia, Italia, Portugal y Francia cuentan en su conjunto con producciones superiores al  $75 \%$  del total.

El cultivo del olivar en España se encuentra repartido por casi todo el territorio nacional, lo que supone que sea uno de los mayores productores de aceituna del mundo. En la figura 1.1 se presenta la distribución de la superficie de olivar por regiones. España es el primer país productor y exportador de aceite de oliva; la producción total durante la campaña 2003/2004, de acuerdo con los informes presentados por la Agencia para el Aceite de Oliva (AAO), superó la cifra del millón de toneladas (1416685 t). En la figura 1.2 se indican tanto las superficies como las producciones por Comunidades Autónomas en valores absolutos y porcentuales para dicha campaña.

Andalucía cuenta con el  $62 \%$  de la superficie de olivar de almazara y produce el  $83 \%$  del aceite de oliva español. Extremadura se sitúa como la tercera región de España productora de aceite de oliva y la quinta en número de almazaras con un total de 117 (72 en la provincia de Badajoz y 45 en la de Cáceres).

Si se representa la distribución por comarcas olivareras en esta última región (figura 1.3) se observa que existe una alta concentración de superficie de olivar ( $> 35,000 \text{ ha}$ ) y, a su vez, de almazaras, en las comarcas de Tierra de Barros, Vegas del Guadiana y Jerez-Llerena.



Figura 1.1: Distribución de la superficie de olivar en España.

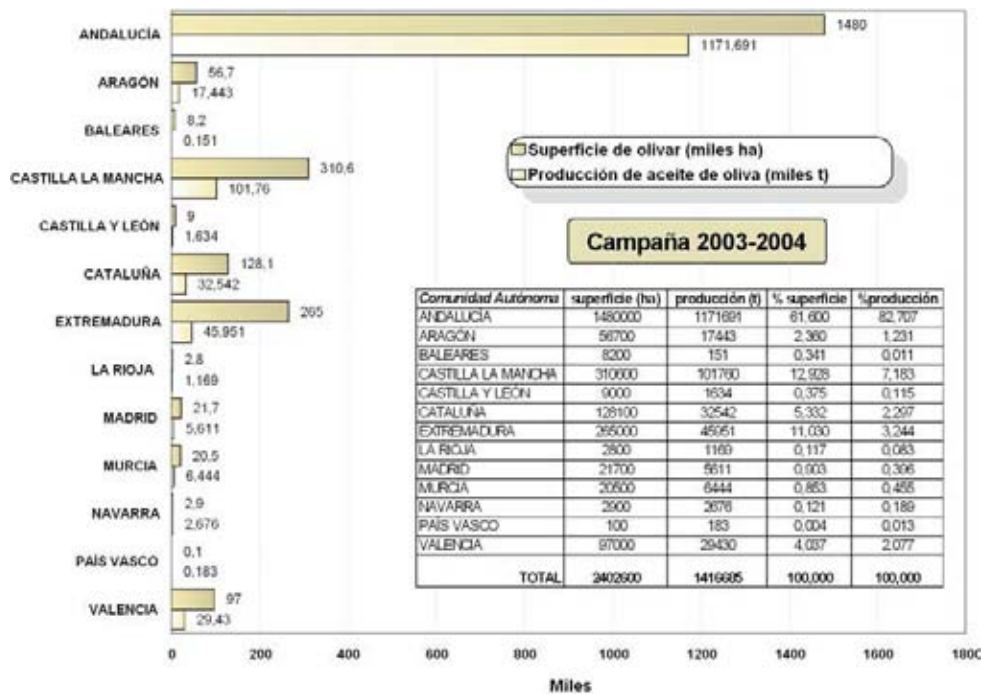


Figura 1.2: Superficie y producción por comunidades autónomas (2003-2004).

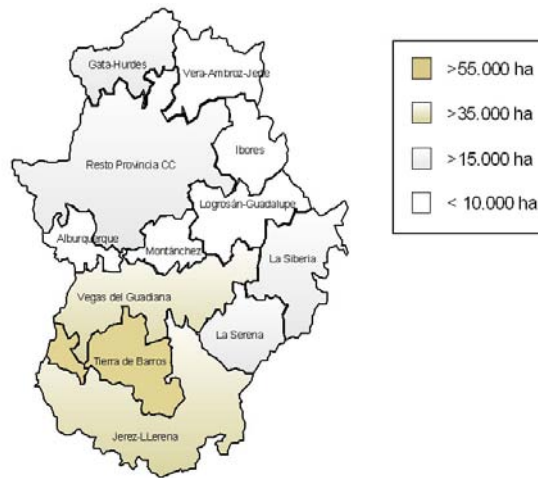


Figura 1.3: Distribución de la superficie de olivar en Extremadura.

Como consecuencia de lo anterior, es evidente que en Extremadura se genera una elevada cantidad de residuos procedentes de la producción de aceite de oliva y de otras operaciones posteriores (repasso, extractado, etc) encontrándose, además, altamente concentrados. Dependiendo de la tecnología usada en el procesado de la aceituna, a presión (en desuso), centrifugación continua a tres o dos fases, los residuos producidos son orujos húmedos y alpechín para las dos primeras y alperujo para la última.

La fase sólida (orujos) está constituida por pulpa, hueso, aceite residual y agua, en cantidades variables de acuerdo con la tecnología de procesado de la aceituna empleada. Tradicionalmente los orujos se procesan en extractoras para obtener el aceite residual, cuya cantidad puede oscilar en el rango 3-8 % en peso. El aceite es recuperado, previo secado térmico en secaderos convencionales rotativos, mediante un disolvente orgánico (hexano) generándose un residuo sólido denominado orujo desgrasado con un bajo contenido en humedad, aproximadamente un 10 % en peso. Este residuo seco se caracteriza por un poder calorífico en el rango de 18-22  $MJ/kg$ , razón por la cual se vende en el mercado como combustible sólido para pequeñas calderas. Además, la concentración de los residuos de varias industrias de aceite de oliva en una única planta extractora puede hacer posible la utilización de estos subproductos como combustible para plantas termoeléctricas de pequeño tamaño.

Por otro lado, la fase líquida (alpechín) procede de las aguas vegetales del producto y del agua utilizada en el proceso productivo, conteniendo también tejidos blandos de la pulpa de aceituna y aceite en emulsión muy estable. Su degradación en la naturaleza, o en plantas depuradoras, es difícil por su elevada composición en compuestos fenólicos caracterizados por un alto poder antibacteriano. Su efecto en el ecosistema puede ser

muy adverso: destruye plantas y peces por su toxicidad y por impedir la aireación y la penetración de los rayos solares, cambia el  $pH$ ,  $DBO$  muy elevada, produce suciedad, malos olores, etc [1,2]. Su dificultad de eliminación y su alto poder contaminante hacen a este residuo el más problemático en una planta de tratamiento.

Por último, el alperujo es un compuesto semisólido mezcla del alpechín y orujos, con un contenido en humedad típico en torno al 65 % en peso, si bien las especiales características de este residuo dificultan en cierta medida las operaciones de transporte, almacenamiento y manipulación. El tratamiento de este producto más habitual en España es el repaso mecánico a tres fases, para la recuperación del aceite residual y tratamientos diferenciados para las fases orujo y alpechín resultantes.

Adaptados a las características del alpechín y alperujo se han investigado y desarrollado multitud de sistemas de *tratamiento-eliminación*; en el caso del alperujo: tratamientos térmicos [3–6], digestión anaerobia [7, 8], compostaje y biorremediación [9,10]; y en el caso del alpechín: tratamientos térmicos [11], tratamientos aerobios [12], centrifugación-ultrafiltración [13,14], digestión anaerobia [2,15], compostaje y biorremediación [16], fertilizante [2], fotocatálisis [17], destilación [18], tratamientos químicos [19,20], floculación [21], ultrafiltración [14], etc.

La gran cantidad y variedad de sistemas desarrollados para el tratamiento de estos residuos indican que aún no se ha conseguido un sistema realmente satisfactorio, presentando la mayoría una serie de limitaciones que dificultan su implantación generalizada [10]: Humedad, dificultades de procesado, elevados costes, emisiones a la atmósfera, etc. La principal opción de tratamiento se encuentra en las aplicaciones térmicas, aunque existen muchas dificultades de tipo tecnológico y económico que provocan que a día de hoy no se haya dado con un sistema rentable de eliminación.

Por la implantación masiva en los últimos años del sistema continuo dos fases, España ha tenido que hacer frente a unas grandes cantidades de alperujo generadas. Debido a la dificultad del secado convencional de este subproducto y a la inadaptación de las extractoras para el procesado del mismo, se han buscado diferentes alternativas para el tratamiento del nuevo residuo (repaso, secado en lecho fluido, combustión en lecho fluido, ...).

Recientemente ha sido aprobado bajo el Sexto Programa Marco de la Unión Europea el proyecto *TDC-OLIVE*, que pretende reducir el impacto medioambiental asociado a la producción y procesamiento del aceite de oliva. En él participan catorce socios de ocho países: España, Italia, Grecia, Reino Unido, Alemania, Países Bajos, Francia y Turquía ([www.tdcolive.net](http://www.tdcolive.net)).

En España existen diversos grupos de investigación en las Universidades de Jaén, Córdoba, Sevilla, etc, que buscan una alternativa de aplicación-eliminación del nue-

vo residuo. Además, en los últimos años se han construido diferentes plantas para tratamiento de alperujo y/o aprovechamiento de otros subproductos de la almazara. La mayoría se encuentran instaladas o en desarrollo en Andalucía, principal Comunidad productora de aceite de oliva.

La primera central de generación eléctrica instalada en Europa que utilizó alperujo como biocombustible es la Central de Vetejar, en el término de La Palenciana (Córdoba), con  $12,6 MW_e$  y un generador de lecho fluido “burbujeante”. El principal problema que se presentó en esta planta fue la elección del material más adecuado para el lecho, formado por áridos en suspensión mediante la inyección ascendente de un flujo de aire precalentado, adoptándose finalmente las ofitas.

Con la experiencia adquirida, Oleícola El Tejar decidió la instalación de otra planta de  $5,7 MW_e$ , en el mismo complejo, pero con ciertas variantes tecnológicas en el generador y aprovechando los calores residuales a baja temperatura para la operación de secado térmico.

Igualmente, y basándose en esta tecnología, se desarrolla un complejo energético de  $25 MW_e$  en el término municipal de Pedro Abad y otro en Baena (Córdoba), con una inversión prevista de 24 millones de euro cada uno, siendo su propietaria Agroenergética, empresa perteneciente a Oleícola El Tejar. Actualmente, además del alperujo, se contempla la posibilidad de utilización como combustible de los residuos procedentes de la poda del olivo.

Otro ejemplo de aprovechamiento de residuos de aceituna para producción de energía eléctrica es la planta de La Loma en Villanueva del Arzobispo (Jaén), en la que se realiza la combustión de orujillo. La inversión fue superior a 21 millones de euros, con una potencia instalada de  $16 MW_e$ . La planta funciona con un ciclo termodinámico clásico de Rankine en el que ha sido necesario la instalación de un aerocondensador de gran capacidad para la refrigeración del condensador debido a la reducida disponibilidad de agua en el emplazamiento de la planta, lo que ha supuesto un incremento considerable de inversión y una disminución del rendimiento eléctrico con respecto a otros sistemas de condensación con líquidos (tradicionalmente agua). El principal problema detectado en la planta fue la inadaptación del residuo (por su granulometría y humedad) a los sistemas utilizados para la trituración del mismo (sistemas tradicionales utilizados para la molienda de carbón).

En el término de Algodonales (Cádiz) se cuenta en la misma planta con una instalación de secado de orujo, extractora y central de generación eléctrica, con potencia instalada que asciende a  $6 MW_e$  e inversión de 7,20 millones de euros. En Villanueva de Algaidas (Málaga) se encuentra Olextra, planta de generación de energía eléctrica con  $12,8+4 MW_e$ , previo secado de orujo por cogeneración con instalación de turbina de

gas y turbina de vapor que absorbe 150000  $t_{alperujo/año}$ . Además, también en Málaga, en Fuente Piedra, se ha puesto en marcha recientemente una planta de cogeneración con secado de alperujo de 16,4  $MW$  y producción de energía eléctrica a partir del orujillo entregado por la extractora con potencia instalada de 8  $MW_e$ .

En Andalucía se pueden citar, además, la central térmica Hermanos Santamaría en Lucena (Córdoba) con 1,7  $MW_e$ , la planta de La Roda de Andalucía (Sevilla) para 50.000  $t_{alperujo/año}$  con potencia eléctrica de 8,1  $MW_e$  a través de motores de gas, las instalaciones de biomasa Puente Genil (Córdoba) y Precoliva en Jabalquinto (Jaén) de 9,5  $MW_e$  cada una con caldera de combustión de orujo seco y turbina de vapor, y la planta de tratamiento Bioner en Beas de Segura (Jaén) con una capacidad de 100.000  $t/año$  y potencia instalada de 9  $MW_e$  en la que se utiliza un proceso previo de producción de biogás a partir de alperujos. Por último, la empresa Sacyr Vallehermoso pretende poner en marcha para el año 2006 tres nuevas plantas de tratamiento de alperujos para producción de energía eléctrica, en Puente Genil de 9,7  $MW_e$  por turbina de vapor y tratamiento de 71000  $t_{alperujo/año}$ , en Villanueva del Arzobispo de 24,9  $MW_e$  con turbina de gas y procesado de 335000  $t_{alperujo/año}$  y Puente del Obispo (Jaén) con 24,9  $MW_e$  con motores de gas y 150000  $t_{alperujo/año}$ .

También existen varias instalaciones en Castilla la Mancha. A destacar Enemansa, situada en Villarta de San Juan (Ciudad Real), de iguales características a la planta anteriormente citada de La Loma en Jaén.

En Extremadura, la planta más significativa de tratamiento de alperujos es Troil Vegas Altas en Guareña (Badajoz), con un complejo de cogeneración a partir de gas natural en motores de combustión interna y potencia instalada de 3  $MW_e$ . Los gases de escape a 550 °C calientan aire hasta 360 °C en un intercambiador, y éste se utiliza para realizar la operación de secado térmico de los orujos, previamente deshuesados y procedentes de la línea de repaso. Una vez seco, se separa del orujo la parte menos densa, pulpa, mediante un sistema neumático, quedando como productos finales tres fases sólidas diferenciadas: hueso, pulpa y resto orujo, que se venden para alimentación animal o producción de energía térmica en pequeñas plantas. Además, dispone de un sistema de torre de concentración de alpechín, a la que se lleva el escape de los motores después de su paso por el intercambiador, consiguiendo eliminar gran parte de su humedad. El producto obtenido actualmente se vierte en pequeñas dosis sobre el terreno.

La rentabilidad de la planta se consigue por la producción de energía eléctrica con los motores de gas natural, subvencionada mediante Régimen Especial, ya que la venta de los productos generados no compensa los costes de la instalación. Por un lado, los costes de distribución y la ineficiencia de las aplicaciones de combustión a pequeña

escala minimizan la rentabilidad de los residuos sólidos y, por otro, las características que presenta el concentrado *limitan su utilización* como fertilizante.

Existen otras plantas en Extremadura de aprovechamiento de subproductos de la industria almazarera caracterizadas por el repaso tres fases de alperujo, los sistemas de secado convencional de los residuos sólidos y el vertido en balsas del alpechín producido. Destacable es la Planta Tecnológica de Aprovechamiento de Alperujos y Subproductos Vegetales Orujos Tierra de Barros en Aceuchal (Badajoz), con una capacidad de procesado de 20.000 t/año de alperujo y 10000 t/año de orujo de uva desalcoholizado (50 % de humedad), procedente este último de las alcoholeras. En la instalación se realizan dos operaciones básicas: repaso de alperujo a tres o dos fases (dependiendo del volumen disponible de las balsas de alpechín) y secado de orujos de uva y aceituna mediante gases procedentes de horno (entrada de gases a  $\sim 740$  °C y salida a 180 °C). De esta forma, en la planta se posibilita el aprovechamiento combinado de más de un residuo biomásico, consiguiendo que éste sea más beneficioso que su valorización por separado.

Muchas de las plantas mencionadas presentan diversos problemas en su funcionamiento, derivados de la variabilidad de las características físicas que presenta el residuo tratado y por el elevado contenido de humedad del mismo, que impiden la aplicación directa de las técnicas tradicionales de combustión, y que encarecen el proceso debido al incremento de los costes por los pretratamientos (indispensables en la mayoría de los casos).

En lo que se refiere a plantas de secado solar de subproductos de la industria de producción de aceite de oliva, no se han encontrado referencias en este sentido. Sin embargo, sí existen instalaciones de secado solar para productos con alto contenido de humedad instaladas en Alemania, Francia, Suiza, Hungría, Austria, Italia, etc [22,23]. La empresa Thermo-System, con representación en Navarra, desarrolla instalaciones de secado solar para lodos de depuradora [23]. En este sentido, para tratar los fangos del conjunto de depuradoras de Emasesa, la ingeniería Befesa se ha adjudicado por importe de más de un millón de euros la tercera fase de la Planta de Secado Solar que la sociedad Emasesa va a incluir en sus instalaciones de compostaje de fangos de depuradora situada en la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Copero (Dos Hermanas, Sevilla).

Por todo lo anterior, la posibilidad del secado solar para los subproductos de almazara presenta altas expectativas en regiones como Andalucía, Castilla La Mancha y Extremadura, puesto que justamente en ellas convergen dos situaciones: altas cantidades de subproductos de aceituna e importantes valores de irradiación solar.

## 1.2. Antecedentes

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, el subproducto generado en la mayoría de las industrias de procesado de la aceituna, alperujo, no cuenta actualmente con un sistema de eliminación adecuado o totalmente eficaz y rentable. Son suficientemente conocidas las tecnologías de aprovechamiento de orujo. Sin embargo, los esfuerzos que hasta la fecha se han realizado para la eliminación del alpechín (sustancia altamente contaminante) no han logrado soluciones adecuadas.

La existencia de numerosas propuestas para el tratamiento de los subproductos de almazara es indicadora de que no existe una convergencia de las mismas hacia un sistema totalmente satisfactorio, rentable y viable. Los procesos térmicos son los que en la actualidad, al menos a gran escala, presentan mejores expectativas.

El grupo de investigación *ENERMYT* del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Extremadura (UEX), desde hace varios años, desarrolla la línea de trabajo relacionada con el aprovechamiento energético de subproductos biomásicos, cuyas actividades han derivado en las tesis doctorales del profesor Dr. Rojas [24], profesor Dr. R. Celma [3] y profesora Dra. Miranda [11].

Se han llevado a cabo en los últimos años varios proyectos de investigación relacionados con la utilización energética de biomasa, centrándose en el empleo de los residuos procedentes de actividades agrícolas y forestales, así como de sus industrias asociadas. En este sentido, se dispone de estudios sobre composición, caracterización energética, distribución geográfica, pretratamientos, aplicaciones térmicas, etc [25,26].

Cabe destacar el Proyecto de Investigación INTERREG 3A (Ref. ENERSUR-ST6.E17) “*Inventario de residuos biomásicos y su uso térmico en el acondicionamiento de edificios públicos en zonas rurales en Extremadura y el Alentejo*” (BIOTERMI), que se encuentra en desarrollo, con una dotación económica de 411000 €, una duración de dos años y como socios participantes la UEX, la Agencia Extremeña de la Energía (AGENEX), la Escuela Superior Agraria de Elvas (ESAE) y el Centro de biomasa para la energía de Portugal (CBE). En dicho proyecto se pretende buscar una solución viable a la eliminación de residuos procedentes de actividades agrarias, forestales y de las industrias transformadoras de estas materias primas, con un doble beneficio medioambiental por eliminación de residuos contaminantes y reducción de emisiones a la atmósfera y beneficio económico asociado a la revalorización del residuo.

Respecto al sector del aceite de oliva, se conoce en gran medida la situación de la industria almazarera en Extremadura y el Alentejo (Portugal), los posibles procesos de transformación, los subproductos generados y la incidencia que éstos tienen en el entorno. Además, se han desarrollado distintas propuestas para la eliminación del alperujo, encaminadas fundamentalmente a la eliminación separada de las fracciones



sólida (orujo) y líquida (alpechín) [3, 4, 6, 11, 27].

Avalados por el conocimiento del sector y motivados por los malos resultados que hasta la fecha se han obtenido en las distintas propuestas de eliminación de alperujo, el grupo *ENERMYT* decidió encaminar su investigación hacia el estudio de los sistemas de eliminación separada de las fracciones sólida (orujo) y líquida (alpechín). Así, una de nuestras líneas de investigación fundamentales se basa en el aprovechamiento-tratamiento integral de los subproductos de la industria del aceite de oliva (sistemas tradicional, dos fases y tres fases), residuos sólidos, semisólidos y efluentes líquidos, mediante su manipulación diferenciada en una única planta.

En este sentido, en los últimos años se ha instalado en la Escuela de Ingenierías Industriales (E.II.II.) de la UEx un sistema de torre de refrigeración-torre de concentración, financiado con cargo al proyecto “*Diseño de una planta termoeléctrica autónoma de alperujos refrigerada por alpechín*” por la Dirección General de Enseñanzas Universitarias e Investigación de la Junta de Extremadura (JEx), y se llevó a cabo la fase experimental con cargo al proyecto “*Desarrollo y demostración experimental de refrigeración con alpechín en planta autónoma de alperujo*” (Dirección General de Enseñanzas Universitarias e Investigación, JEx). Estos últimos trabajos fructificaron en la mencionada Tesis del profesor Dr. Ruiz Celma [3].

Posteriormente, ha sido concedido por la Dirección General de Investigación - Subdirección General de Proyectos de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia, el proyecto I+D (Ref. ENE2004-06818/ALT) “*Combustión Combinada Multifásica Orujo - Concentrado de Alpechín*” con la finalidad de conseguir la completa eliminación del concentrado de alpechín mediante su combustión combinada con orujo de aceituna. Dicho proyecto tiene una duración de tres años y cuenta con una dotación económica de 112125 €. Bajo este proyecto se ha llevado a cabo la reciente Tesis de la profesora Dra. Miranda [11], cuyos resultados sobre la combustión del concentrado en planta piloto se consideran muy alentadores y pueden servir para la elección de la configuración de una planta a escala industrial.

En la búsqueda de una mejora en los actuales sistemas de secado y concentración de los subproductos de la industria almazarera, motivados por la elevada cantidad de éstos en Extremadura y por las excelentes condiciones climáticas en la región para aplicaciones solares (2900 horas de sol teóricas anuales, temperaturas máximas superiores a 40 °C y radiación global máxima superior a 27 MJ/m<sup>2</sup>día), se plantea en el presente trabajo el estudio del secado solar de los residuos de la producción de aceite de oliva, con el objetivo de la reducción de la humedad en los subproductos, fundamentalmente del alpechín, con un consumo mínimo de combustibles convencionales.

Esta Tesis se ha llevado a cabo dentro del proyecto PRI (Ref. 2PR03A018) “*Dise-*

*ño y demostración de un prototipo de secadero solar híbrido para alpechín y orujos”* financiado por la actual Dirección General de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de la JEx, con una dotación de 18000 € y una duración de dos años (2003-2005). Su objetivo central ha sido el diseño e instalación de un prototipo de secadero solar para el estudio de la cinética de secado de los residuos de almazara, mediante el cual se pueda extrapolar una propuesta de aprovechamiento integral de dichos residuos (banco de conocimientos del proceso de gran utilidad para su extrapolación a mayor escala).

## Capítulo 2

# Objetivos.

Considerando la situación actual que presenta el sector de producción de aceite de oliva expuesta en el capítulo 1, resulta necesario, por un lado, rentabilizar al máximo las opciones de tratamiento de los residuos que se generan en estas industrias y, por otro, reducir su negativo impacto ambiental.

Como alternativa más interesante para estos subproductos, se plantea el tratamiento térmico diferenciado de las diferentes fases generadas (alperujo, orujo y alpechín). Por la elevada humedad que presentan éstos es necesario un pretratamiento de secado, para optimizar el proceso de aprovechamiento.

Considerando las tecnologías convencionales de secado, con altos consumos de energía, y la gran disponibilidad de energía solar en la región, se plantea la opción del secado solar de los residuos procedentes de la industria almazarera. Para viabilizar esta opción, será necesario disponer de una fuente energética auxiliar que posibilite el secado en los periodos de baja radiación solar o nocturnos.

El plan de trabajo seguido para la consecución del objetivo planteado consta de las siguientes etapas:

- Caracterización exhaustiva de los subproductos: orujo, alperujo y alpechín, desde el punto de vista físico, químico y energético. Para ello ha sido necesario realizar diferentes ensayos de laboratorio.
- Análisis del secado natural de los subproductos, para su comparación con el secado solar en el prototipo y el análisis de diferentes parámetros de influencia en el proceso.
- Búsqueda bibliográfica de sistemas de secado solar y selección de tecnología a utilizar.

- Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secadero solar híbrido para subproductos biomásicos, utilizado para la reducción de humedad de los residuos de almazara. Mediante el mismo, se pretende conseguir la cinética de secado de estos subproductos, para así disponer de un banco de conocimientos exhaustivo con vistas a la posible utilización a escala de este sistema de secado. El proceso que se ha seguido ha sido el siguiente:
  - Consideración de las condiciones teóricas del proceso.
  - Selección del sistema global de secado, equipamiento, sistema de carga y descarga, etc.
  - Caracterización del funcionamiento:
    - Sistema de secado adaptado a los diferentes residuos.
    - Optimización de la operación individualizada del colector y la cámara de secado.
    - Selección del caudal de aire óptimo para el funcionamiento en convección forzada.
  - Valoración de la influencia de diferentes parámetros: temperatura, humedad, flujo másico de aire, radiación solar, tipo, cantidad y espesor de producto, etc.
  - Comparación de los ratios de secado con los obtenidos en el secado natural.
  - Ajuste de los resultados experimentales del ratio de secado a través de diferentes modelos.
- Modelado teórico del funcionamiento del sistema y validación del mismo con los resultados experimentales.
- Propuesta de secado solar a escala de alpechín para conseguir su eliminación-aprovechamiento integral.

## Capítulo 3

# Teoría del secado. Secado solar.

### 3.1. Introducción.

El secado es una operación básica que consiste en reducir la humedad de un producto cualquiera, de forma que el producto final presenta unas características muy diferentes a las del inicial. La deshidratación es una de las técnicas más antiguas utilizadas para la conservación de alimentos y productos agrícolas [28].

El secado de subproductos para una utilización posterior (combustible, materia prima de proceso, etc), aunque también es una técnica altamente desarrollada, origina consumos de energía considerables [29]. Esta operación puede hacerse [30–32]:

- Por evaporación o/y vaporización con *ayuda de calor* (secado térmico mediante aire caliente, radiación solar, etc).
- Mediante otros procesos *físico-químicos* (liofilización, ósmosis, adsorción, congelación, etc).
- Por extracción de agua a través de *medios mecánicos* (presión, vibración, filtrado, centrifugación, etc).

El secado térmico, sistema más habitual y utilizado de secado de subproductos, es un proceso simultáneo de transferencia de masa y energía en el que se produce básicamente (figura 3.1):

- Transferencia de calor, desde el agente desecante al producto.
- Transferencia de masa, encargada de llevar la humedad del interior del producto hacia la superficie y de la superficie al aire de los alrededores.

Pero además de estos dos procesos simultáneos existe otra complicación: las condiciones físicas del producto se modifican en el transcurso de la extracción de

humedad. Así, cuando la humedad se encuentra en la superficie sólo se necesita para el secado la evaporación superficial. Sin embargo, cuando la humedad se halla en el interior, el secado está influido por el movimiento de la humedad en la materia, que es consecuencia de fenómenos como la capilaridad, la difusión del vapor y el flujo de moléculas.



Figura 3.1: Transferencia de calor y masa en el secado.

En general, los principales objetivos que se suelen perseguir en las operaciones de secado pueden agruparse en los siguientes:

- Facilitar un proceso industrial posterior.
- Conseguir la utilización satisfactoria, final o intermedia, de un determinado producto.
- Posibilitar la conservación, almacenamiento y transporte de un material [33].
- Mejorar el rendimiento de una instalación o equipo.
- Reducir costes (almacenamiento, transporte, conservación, disminución consumo combustible, etc.).
- Permitir el posterior aprovechamiento de subproductos.
- Y obtener mejoras medioambientales directas e indirectas.

En particular, en lo que se refiere a la utilización de biomasa con fines energéticos, el secado es el pretratamiento más importante. Existen diversas razones [34] por las que es necesario realizar un pretratamiento de secado antes de la utilización energética (combustión) de subproductos, destacándose:

- El aumento de la eficiencia del proceso y disminución de tamaño de los equipos (Liang [35] estudió el efecto del contenido de humedad de la biomasa

en el rendimiento y tamaño de las calderas, concluyendo que la utilización de combustibles con humedades entre 35 y 70 % (base húmeda) hacen variar la eficiencia del equipo entre un 75 y un 50 %, respectivamente, y que el tamaño de los equipos necesarios con la utilización de combustible seco puede variar entre 1,2 y 2,2 veces).

- La disminución de requerimiento de energías auxiliares.
- El descenso en consumo de combustible.
- El incremento de la producción de fluido caliente.
- La mejora del funcionamiento del generador de vapor o de agua caliente.
- Y la reducción de las emisiones a la atmósfera.

Uno de los principales motivos para que se den las ventajas mencionadas está relacionado con el *aumento de la temperatura de llama en la combustión*, ya que con el combustible húmedo parte del calor de combustión es utilizado en evaporar el agua del combustible, mientras que con el combustible seco todo el calor de combustión se utiliza para calentar el aire y los productos de combustión. Como resultado, la temperatura de llama con combustible húmedo puede disminuir, dependiendo del grado de humedad, entre un 10 y un 40 % [34].

Este *aumento de la temperatura de llama* produce múltiples efectos positivos:

- Se consigue mejorar el gradiente de temperatura en la caldera para la transferencia de calor. De esta forma, una mayor transferencia de calor para la misma sección de tubos incrementa la producción de fluido caliente. O lo que es lo mismo, para la misma producción de fluido el equipamiento necesario se reduce, ya que se necesita un área de transferencia menor.
- Se produce una combustión más completa del combustible, logrando una reducción de inquemados sólidos y gaseosos (CO, cenizas volantes, ...). Así, esta combustión más completa significa una mayor cantidad de calor obtenida del combustible y, por tanto, se consiguen menores necesidades de combustible para la misma producción de calor, disminución del tamaño del hogar, de los sistemas de recogida cenizas y otros elementos, etc.
- Y por último, con la mejora de la combustión se reduce el exceso de aire necesario para la misma (MacCallum et al. [36] establecieron que con la utilización de combustibles húmedos se requiere aproximadamente el 80 % de exceso de aire para prevenir la formación de inquemados, mientras que con combustibles

secos sólo el 30 % es necesario). De esta forma, se logra una disminución de inquemados, reducción de la cantidad de calor a emplear para calentar el aire, limitación del consumo de combustible, descenso de la potencia necesaria de los ventiladores, menores pérdidas de calor sensible en los gases (disminución de la temperatura de los gases de escape), etc.

En contrapartida, existen algunos inconvenientes:

- Posible fusión y sinterización de cenizas por el aumento de la temperatura de llama.
- Presumible dependencia de sistemas de pretratamiento, para acondicionar el producto a las condiciones óptimas para su secado.
- Y debido al aumento de la temperatura de llama, la reducción del exceso de aire y, en definitiva, la mejora de la combustión, se puede dar una ocasional disminución de la temperatura de los gases de escape por debajo del punto de rocío del gas, con el posible riesgo de condensaciones.

Sin embargo, estas dificultades no contrarrestan las numerosas ventajas que supone la reducción de humedad, por lo que este proceso siempre se realizará para cualquier aprovechamiento energético de la biomasa, vía termoquímica.

Como ya se ha indicado, los consumos de energía en la operación de secado son muy elevados. Existen varias soluciones posibles:

- Modificación de las técnicas y los procesos de deshidratación actuales, en aras de una mejora de la eficiencia de los mismos a través de la búsqueda del máximo rendimiento energético.
- Utilización de energías alternativas. De todos los sistemas posibles, la utilización directa de subproductos agrícolas o forestales como combustibles, así como la energía solar, son las que mayores posibilidades presentan [32].

Este último sistema, que se corresponde con el trabajo de investigación desarrollado (prototipo de secadero solar híbrido diseñado para el secado de subproductos procedentes de la industria almazarera), se considera potencialmente interesante y cuya aplicación a escala puede mejorar los sistemas actuales de secado de los subproductos de la producción de aceite de oliva, así como, abrir las posibilidades para su utilización con otro tipo de residuos o productos agrícolas.



## 3.2. Teoría del secado.

### 3.2.1. Contenido de humedad.

El factor de mayor influencia en la cinética de secado, que afecta en general a todos los ratios de secado, es el contenido de humedad del material.

Existen diferentes métodos para medir el contenido de humedad de un producto. Los métodos indirectos utilizan la dependencia de una propiedad del producto (p.ej. conductividad eléctrica) con el contenido de humedad, consiguiendo una medición rápida pero que requiere de un equipo muy especializado. La determinación directa del contenido de humedad implica medir la masa de producto y la masa seca correspondiente al eliminar el agua evaporable contenida en él, aplicando calor a una temperatura generalmente de  $104\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta llegar a un peso constante de la muestra. Este método, aunque es el más utilizado, presenta como principal inconveniente el que al evaporar el agua se pueden eliminar, al mismo tiempo, otras sustancias del producto (volátiles) lo cual puede suponer errores en la obtención de dicha variable.

La cantidad de humedad presente en un material puede ser expresada en base húmeda o en base seca, e indicada como decimal o porcentaje [37, 38].

El contenido de humedad en base húmeda, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material sin secar, viene dado por la ecuación 3.1. De igual manera, el contenido de humedad en base seca, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material seco, se indica en la expresión 3.2.

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_o} = \frac{W_o - W_d}{W_o} \quad (3.1)$$

$$M_{db} = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (3.2)$$

donde  $M_{wb}$  es la humedad en base húmeda ( $kg$  agua/ $kg$  prod. húmedo),  $M_{db}$  es la humedad en base seca ( $kg$  agua/ $kg$  prod. seco),  $W_o$  es el peso inicial de material sin secar ( $kg$ ),  $W_w$  es la cantidad de agua en el producto húmedo ( $kg$ ) y  $W_d$  es el peso de la materia seca en el producto ( $kg$ ).

La relación entre  $M_{wb}$  y  $M_{db}$  se expresa en las ecuaciones 3.3 y 3.4, respectivamente.

$$M_{wb} = 1 - \left[ \frac{1}{(M_{db} + 1)} \right] \quad (3.3)$$

$$M_{db} = \left[ \frac{1}{(1 - M_{wb})} \right] - 1 \quad (3.4)$$

Habitualmente en ingeniería y, más concretamente, en ensayos de secado, donde el producto se va pesando de forma regular disponiendo de un registro de pérdida de peso, el contenido en humedad instantáneo para cualquier tiempo  $t$ , en base húmeda o seca, se obtiene respectivamente mediante las expresiones 3.5 y 3.6.

$$M_{t\_wb} = 1 - \left[ \frac{(1 - M_{owb}) \cdot W_o}{W_t} \right] \quad (3.5)$$

$$M_{t\_db} = \left[ \frac{(M_{odb} + 1) \cdot W_o}{W_t} \right] - 1 \quad (3.6)$$

siendo  $M_o$  el contenido en humedad inicial en base húmeda o seca (*dec.*) y representando  $W_t$  el peso del material en el tiempo  $t$  (*kg*).

### 3.2.2. Contenido de humedad de equilibrio. Actividad del agua. Isotermas de sorción.

El agua que contienen los productos no se encuentra incorporada de la misma forma. En unos casos está relativamente libre, en otros está muy ligada a la estructura del producto, etc. Según la naturaleza de la unión entre el agua y la materia seca se distinguen [30]:

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

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

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

El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico es el valor de la humedad que tiene después de haber sido expuesto, durante un largo periodo de

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

Para un valor determinado de la temperatura se puede encontrar para cada producto, experimentalmente, una correspondencia entre la actividad de agua y el contenido de humedad de equilibrio de éste. A estas relaciones se las denomina isotermas de sorción del material. Las curvas pueden representarse a partir del estado inicial húmedo del producto (proceso de desorción) o del producto seco (proceso de adsorción). Los puntos de una curva de sorción indican para cada material, a una determinada temperatura, el contenido de humedad en el producto que se encuentra en equilibrio con aire a una humedad relativa.

Las isotermas de sorción son importantes en el análisis del comportamiento en el secado de los materiales. Aportan información sobre los contenidos de humedad que deben alcanzarse a fin de conseguir una actividad adecuada para la conservación, almacenamiento, etc, de los productos, y además, permiten conocer cuál es el contenido de humedad mínimo que puede lograrse en un proceso donde el material se expone a una corriente de aire con una temperatura y humedad relativa determinada.

Como ejemplo, en la figura 3.2 se muestra el efecto que usualmente tiene la temperatura en las isotermas de sorción, de manera que conforme aumenta la temperatura a una determinada humedad relativa, disminuye el contenido de humedad de equilibrio. Varios autores han presentado para diferentes productos estas relaciones con la temperatura [28, 37–52].

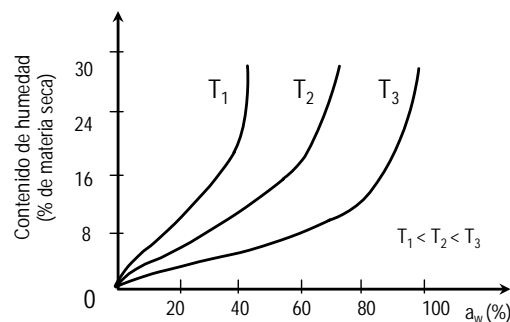


Figura 3.2: Isotermas de sorción a diferentes temperaturas.

### 3.2.3. Calor latente de vaporización.

El requerimiento térmico para secar un producto se denomina calor latente de vaporización,  $L_v$ , y representa la cantidad de energía que tiene que absorber el producto para vaporizar su humedad, esto es, la energía necesaria para evaporar 1 *kg* de agua.

En el agua libre, este valor depende exclusivamente de la temperatura y es del orden de los 2450 *kJ/kg* a 20 °C. Su valor en función de la temperatura se puede determinar mediante la expresión 3.7 [53].

$$L_w = \frac{R}{M_w} \cdot (p_{s1} - p_{s2} \cdot (T + 273,16)) \quad (3.7)$$

siendo  $L_w$  el calor latente de vaporización del agua pura (*J/kg*),  $R$  la constante de los gases (8314 *J/kmolK*),  $M_w$  el peso molecular del agua (18,01 *kg/kmol*),  $p_{s1}$  y  $p_{s2}$  constantes de la ecuación con valores de 6547,1 y 4,23, respectivamente [53], y  $T$  la temperatura (°C).

Si el agua no está libre, como ocurre habitualmente en la biomasa, el calor latente de vaporización es mayor y los factores de los que depende son el tipo de producto, su humedad y la temperatura. De esta manera, conforme aumenta el contenido de humedad y la temperatura, menor es el calor latente de vaporización necesario. La variación de este parámetro con la temperatura y el contenido de humedad ha sido estudiada por diversos autores para diferentes materiales [37, 38, 53–55].

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

### 3.2.4. Ratios de secado.

#### Curvas de secado de un producto.

En general, el proceso de secado se caracteriza por tres fases (figura 3.3) [30]:

- 1ª Fase: Periodo de velocidad de secado creciente.- Corto periodo transitorio (habitualmente despreciable) en el que se produce un calentamiento inicial del producto y la velocidad de secado aumenta.
- 2ª Fase: Periodo de velocidad de secado constante.- El secado tiene lugar sólo en la superficie, produciéndose exclusivamente la evaporación de la humedad superficial. La extracción de humedad en este periodo depende principalmente

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

- 3ª Fase: Periodo de velocidad de secado decreciente.- Comienza al finalizar el periodo constante (contenido de humedad crítico del producto). La resistencia interna del material se hace más importante, dificultando el paso de humedad; ya no existen condiciones de saturación en la superficie y se produce la eliminación de la humedad interna. Este periodo depende fundamentalmente de la difusión de humedad del interior del producto hacia la superficie, así como de la evaporación superficial. A su vez, está dividido en dos estados [37], un primer periodo decreciente, en el que tiene lugar el secado de la superficie no saturada, y un segundo periodo decreciente en el que la difusión de humedad a la superficie se hace más lenta y es el factor determinante. En general, la duración de estos regímenes depende del contenido de humedad inicial del material.

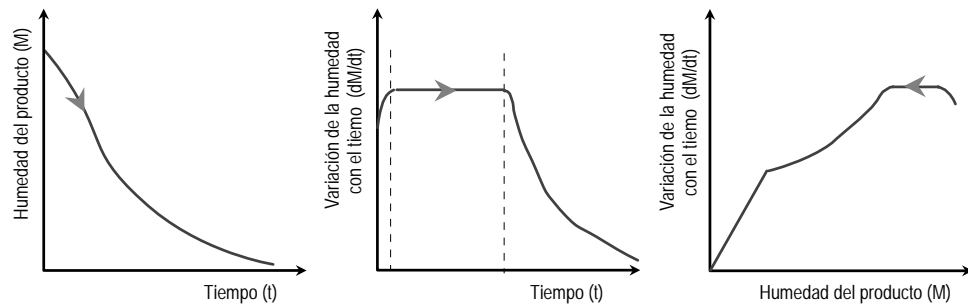


Figura 3.3: Curvas de secado.

Los productos agrícolas difieren de otros materiales frecuentemente secados (textil, piedra, papel, etc), conocidos estos últimos como no higroscópicos.

Los materiales no higroscópicos se caracterizan por tener la humedad ligeramente retenida en su interior, de forma que se considera “desligada” del producto y por tanto, es posible secalos hasta valores de contenido de humedad iguales a cero.

Sin embargo, en los materiales agrícolas (higroscópicos) la humedad contenida está usualmente “atrapada” en pequeños capilares cerrados, siendo imposible llegar hasta

valores de humedad iguales a cero y por tanto, siempre existe un contenido de humedad residual.

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

De esta forma, se puede hablar para los productos agrícolas, en general, de dos regímenes de secado: el periodo de velocidad de secado constante y el periodo de velocidad de secado decreciente [56]. Sin embargo, dependiendo del tipo de producto y del proceso de secado, en ocasiones no existe periodo de velocidad de secado constante [57–61]. Por tanto, resulta fundamental realizar ensayos experimentales de secado para cada tipo de producto, mediante el registro de peso a diferentes intervalos, para poder establecer de manera correcta sus curvas de secado.

### Ratio de humedad.

El ratio de humedad,  $MR$ , se expresa generalmente según la ecuación 3.8.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (3.8)$$

donde  $MR$  es el ratio de humedad (*dec.* o %),  $M_t$  el contenido de humedad en cada instante (*kg*),  $M_o$  el contenido de humedad inicial (*kg*) y  $M_e$  el contenido de humedad de equilibrio (*kg*).

Sin embargo, es habitual en las aplicaciones de secado despreciar el contenido de humedad de equilibrio, ya que la humedad relativa del aire fluctúa continuamente durante el proceso [62] siendo  $M_e$  un parámetro difícil de determinar. De esta manera, el ratio de humedad que se utiliza comúnmente es el dado en la expresión 3.9.

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (3.9)$$

### Ratio de secado.

Como ya se ha indicado, cuando el material que debe secarse se pesa a intervalos predefinidos, puede trazarse la curva del contenido en humedad frente al tiempo de secado. Al diferenciar la curva anterior, se obtiene una información muy importante de la cinética de secado: La velocidad de secado en función del tiempo de operación o ratio de secado,  $DR$ . El ratio o velocidad de secado puede expresarse como se indica en la ecuación 3.10.

$$DR = \frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3.10)$$

siendo:  $dt$  la variación de tiempo ( $h$ ) y  $DR$  el ratio de secado ( $kg_{agua}/kg_{seco}/h$ ).

### 3.2.5. Propiedades psicrométricas.

Los procesos de secado dependen en gran medida de los cambios que se producen en las propiedades del agente desecante, generalmente aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua), cuya información se encuentra organizada en las conocidas cartas psicrométricas (figura 3.4).

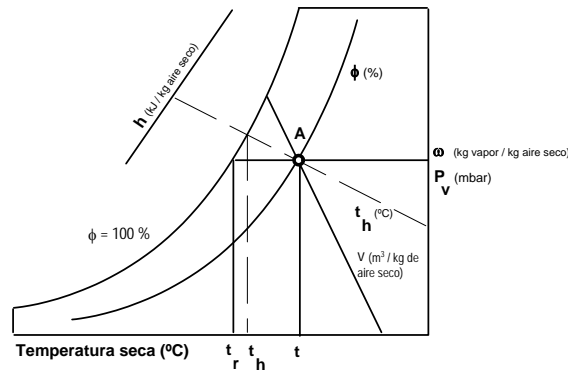


Figura 3.4: Carta psicrométrica.

Para entender las variaciones de las características del aire en el proceso de secado es necesario conocer la forma de determinar las variables psicrométricas. Aunque dichas propiedades son ampliamente conocidas, la determinación matemática de alguna de ellas (temperatura de rocío y temperatura de bulbo húmedo) no es trivial. A continuación se presentan las ecuaciones que permiten determinar las principales variables psicrométricas en un rango amplio de temperaturas (de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$ ), a partir de tres variables independientes de la mezcla aire-vapor de agua (aire húmedo) [63–69].

El aire húmedo es un sistema homogéneo de una fase y dos componentes en el que se puede considerar que sigue las leyes del gas ideal para las mezclas. Por tanto, las ecuaciones que se utilizan para la determinación de las diferentes propiedades psicrométricas se basan, en general, en la aproximación de considerar al aire húmedo como gas ideal.

### Presión total, del aire seco y del vapor de agua.

Por ser el aire una mezcla de gases (aire seco y vapor de agua), la presión total es la suma de las presiones parciales de sus componentes, tal y como se expresa en la ec. 3.11, donde la presión absoluta total,  $p_T$ , se considera con el valor de 101325 Pa en condiciones normales.

$$p_T = p_{as} + p_v \quad (3.11)$$

La presión parcial del aire seco,  $p_{as}$ , por considerarse éste gas ideal, se muestra en la ec. 3.12. Igualmente y asimilando el vapor de agua a un gas perfecto, se tiene la ec. 3.13 para la presión parcial del vapor de agua,  $p_v$ .

$$p_{as}V = \frac{m_{as}}{M_{as}}R(T_s + 273,16) \quad (3.12)$$

$$p_vV = \frac{m_v}{M_v}R(T_s + 273,16) \quad (3.13)$$

donde  $V$  es el volumen del gas ( $m^3$ ),  $R$  la constante de los gases ideales,  $T_s$  la temperatura seca ( $^{\circ}C$ ),  $m_{as}$  y  $m_v$  son la masa de aire seco y de vapor de agua ( $kg$ ) y  $M_{as}$  y  $M_v$  son el peso molecular del aire seco y el vapor de agua ( $kg/mol$ ), respectivamente.

### Presión de saturación.

La presión de saturación del vapor de agua es una variable básica en los cálculos psicrométricos. Existen varias expresiones con diferentes rangos de temperatura que buscan las más adecuadas y exactas relaciones. No obstante, se utilizarán las expresiones dadas por Singh [67] para los rangos de temperatura especificados a continuación en las ecuaciones 3.14, 3.15 y 3.16.

$$p_{vs} = 610,78 \cdot e^{\left[\frac{21,874T_s}{265+0,9615T_s}\right]} \quad (3.14)$$

para ( $-40^{\circ}C < T_s < 0^{\circ}C$ ) y ( $610,78 Pa > p_{vs}$  o  $p_v > 12,838 Pa$ ).

$$p_{vs} = 610,78 \cdot e^{\left[\frac{17,269T_s}{237,3+T_s}\right]} \quad (3.15)$$

para ( $0^{\circ}C < T_s < 63,0^{\circ}C$ ) y ( $610,78 Pa < p_{vs}$  o  $p_v < 22870,52 Pa$ ).

$$p_{vs} = 610,78 \cdot e^{\left[\frac{17,269T_s}{236,3+1,01585T_s}\right]} \quad (3.16)$$

para ( $63^{\circ}C < T_s < 110,0^{\circ}C$ ) y ( $22870,52 Pa < p_{vs}$  o  $p_v < 143292,97 Pa$ ).



**Humedad absoluta.**

La humedad absoluta, denominada también humedad específica o relación de humedad, es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco y se puede expresar según la expresión 3.17, o en función de las presiones, según la ecuación 3.18.

$$\omega = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (3.17)$$

$$\omega = 0,62198 \frac{p_v}{p_T - p_v} \quad (3.18)$$

**Humedad relativa.**

La humedad relativa (ecuación 3.19) se define como el cociente entre la presión parcial del vapor de agua en la mezcla a una temperatura dada,  $p_v$ , y la presión de saturación a la misma temperatura,  $p_{vs}$ .

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vs}} \text{ (dec.)} = \frac{p_v}{p_{vs}} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (3.19)$$

**Temperatura de rocío.**

Para cada composición del aire húmedo, si se mantiene constante la presión parcial de vapor, se llega a una temperatura en la que se produce la saturación del vapor de agua, denominándose a este valor temperatura de rocío,  $T_{pr}$ . Se puede determinar utilizando ábacos psicrométricos a la actual presión de vapor ( $p_v$ ). Sin embargo, para un cálculo matemático más sistemático, necesario para la implementación de programas por ordenador, se puede utilizar el método sugerido por Mittal y Zhang [66], [63, 64]. Definido el parámetro B según la expresión 3.20 es posible obtener la temperatura de rocío mediante las ecuaciones 3.21 ó 3.22.

$$B = \ln \left( \frac{p_v}{1000} \right) \quad (3.20)$$

$$T_{pr} = 6,09 + 12,608 \cdot B + 0,4569 \cdot B^2 \quad (3.21)$$

para  $T_{pr} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$$T_{pr} = 6,54 + 14,526 \cdot B + 0,7389 \cdot B^2 + 0,09486 \cdot B^3 + 0,4569 \cdot p_v^{0,1984} \quad (3.22)$$

para  $0 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{pr} < 93 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### Temperatura de bulbo húmedo.

Esta temperatura se mide a partir de un termómetro de bulbo húmedo. Para determinarla analíticamente es necesario aplicar un proceso iterativo como el propuesto por Singh [67]. En éste, se determinan una serie de parámetros con los que se obtienen las variables  $T_{bh1}$  y  $T_{bh2}$ , y mediante comparación con un error predefinido, se conseguirá el valor final de la temperatura de bulbo húmedo,  $T_{bh}$ . A continuación, de la ecuación 3.23 a 3.25 se indican los parámetros a calcular para obtener  $T_{bh1}$ . Y de la ecuación 3.26 a 3.32, los necesarios para determinar  $T_{bh2}$ .

$$\omega_{bh} = \frac{0,4355 \cdot T_s + 5,1}{0,9} (1 - \phi) \quad (3.23)$$

$$T_{bh1} = T_s - \omega_{bh} \quad (3.24)$$

O bien si:

$$T_{bh1} < T_{pr} \implies T_{bh1} = T_{pr} + 0,5 \quad (3.25)$$

Considerando  $p_{Sbh1}$  la presión de saturación a la temperatura  $T_{bh1}$ :

\* Si  $-40 \text{ }^\circ\text{C} < T_{bh} < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$p_{Sbh1} = 610,78 \cdot e^{\left[ \frac{21,874T_{bh1}}{265+0,9615T_{bh1}} \right]} \quad (3.26)$$

\* Si  $0 \text{ }^\circ\text{C} < T_{bh} < 63 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$p_{Sbh1} = 610,78 \cdot e^{\left[ \frac{17,269T_{bh1}}{237,3+T_{bh1}} \right]} \quad (3.27)$$

\* Si  $63 \text{ }^\circ\text{C} < T_{bh} < 110 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$p_{Sbh1} = 610,78 \cdot e^{\left[ \frac{17,269T_{bh1}}{236,3+1,01585T_{bh1}} \right]} \quad (3.28)$$

Para:

$$h_{fg} = 1000 \cdot [3161,36 - 2,406 \cdot (T_{bh1} + 273,16)] \quad (3.29)$$

$$B1 = \frac{1006,925 \cdot (p_T - p_{Sbh1}) \cdot \left( 1 + \frac{0,15557}{p_T} \cdot p_v \right)}{0,62194 \cdot h_{fg}} \quad (3.30)$$

$$\Delta = \frac{p_{Sbh1} - p_v}{T_{bh1} - T_{pr}} \quad (3.31)$$

$$T_{bh2} = \frac{B1 \cdot T_s + \Delta \cdot T_{pr}}{B1 + \Delta} \quad (3.32)$$

Si la diferencia entre  $T_{bh1}$  y  $T_{bh2}$  es mayor que una tolerancia especificada, se vuelve a la ecuación 3.26, 3.27 ó 3.28 con el valor de  $T_{bh2}$ , recalculando los nuevos valores de los parámetros  $h_{fg}$ ,  $B1$ ,  $\Delta$  y  $T_{bh2}$ . En el instante en que se cumpla la tolerancia deseada, el último valor de  $T_{bh2}$  se considerará igual a la temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh} = T_{bh2}$ ).

### Entalpía.

La entalpía del aire seco,  $h_{as}$ , teniendo en cuenta que la presión se puede considerar constante y el origen de referencia en  $0^\circ C$ , viene dada por la ecuación 3.33. La expresión de la entalpía para el vapor de agua,  $h_v$ , para la misma temperatura de referencia, tiene la forma dada en 3.34.

$$h_{as} = c_{pas} \cdot T_s \equiv 1,006 \cdot T_s \quad (3.33)$$

$$h_v = c_f + c_{pv} \cdot T_s \equiv 2501 + 1,77 \cdot T_s \quad (3.34)$$

De esta forma, la entalpía del aire húmedo se puede obtener a partir de las dos expresiones anteriores y llegar al resultado de la ec. 3.35. Las unidades de entalpía vienen dadas en  $kJ/kg_{as}$  si la temperatura es expresada en  $^\circ C$ .

$$h = 1,006 \cdot T_s + \omega \cdot (2501 + 1,77 \cdot T_s) \quad (3.35)$$

### Volumen específico.

Se define el volumen específico del aire húmedo como el volumen ocupado por el aire húmedo por kilogramo de aire seco (ecuación 3.36). En esta ecuación, para que  $v$  esté dado en  $m^3/kg_{as}$ ,  $T_s$  y  $p_{as}$  deben estar en  $^\circ C$  y  $Pa$ , respectivamente.

$$v = \frac{V}{m_{as}} = \frac{R \cdot (T_s + 273,16)}{M_{as} \cdot p_{as}} = 287,05 \cdot \frac{T_s + 273,16}{p_T - p_v} \quad (3.36)$$

De la ecuación 3.18 se obtiene otra relación para la presión del vapor de agua, ec. 3.37. Sustituyendo ésta en la ec. 3.36 se dispone de una nueva expresión para determinar el volumen específico (ec. 3.38).

$$p_v = \frac{p_T \cdot w}{0,62198 + w} \quad (3.37)$$

$$v = 287,05 \cdot \frac{T_s + 273,16}{p_{as}} \left( 1 + \frac{w}{0,62198} \right) \quad (3.38)$$

### Evoluciones típicas del aire en un proceso de secado.

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

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

La utilización de aire precalentado supone una optimización en un proceso de secado [37], mejorando el aumento de la temperatura la capacidad de arrastre de humedad. En la figura 3.5 se muestra, de forma esquemática, la ventaja de aumentar la temperatura seca del aire. Así, se considera un aire ambiente no saturado a temperatura  $T_1$ , humedad relativa  $\phi_1$ , temperatura de bulbo húmedo  $T_{bh1}$  y humedad absoluta  $\omega_1$  (sección A en la figura 3.5). Si el aire no es precalentado, éste seguirá la línea de enfriamiento adiabática  $T_{h1}$  (AB en la figura 3.5) y si idealmente el proceso continuara hasta la saturación, le correspondería una humedad absoluta  $\omega_2$ , lo que implicaría una extracción máxima de humedad dada por  $(\omega_2 - \omega_1)$ . Sin embargo, si el aire ambiente es precalentado (antes de usarse para el secado) a humedad absoluta constante  $\omega_1$ , hasta una temperatura seca  $T_2$ , con una humedad relativa  $\phi_2$ , (línea AC en la figura 3.5), el proceso de secado se correspondería con la nueva línea de enfriamiento adiabática  $T_{h2}$  (línea CD en la figura 3.5) que en condiciones de saturación le correspondería una humedad absoluta  $\omega_3$ . En este caso, el máximo valor de extracción de humedad se correspondería con  $(\omega_3 - \omega_1)$ .

Se aprecia, por tanto, que un aumento relativamente pequeño de la temperatura del aire incrementa considerablemente la capacidad de arrastre de humedad de éste. De manera aproximada, para el rango de temperaturas en el que tienen lugar los procesos de secado de productos agrícolas, cada  $^{\circ}C$  de incremento de la temperatura seca del aire provoca un aumento de su capacidad de arrastre de  $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire húmedo no saturado}}$ . Para condiciones ambiente habituales, por ejemplo,  $20^{\circ}C$  y  $59\%$  de humedad relativa el cambio a aire precalentado a  $35^{\circ}C$  con  $25\%$

de humedad relativa, incrementa en más de tres veces la capacidad de arrastre del aire [37]. De esta forma, mediante el uso de captadores solares de aire en los sistema de secado solar, se consigue aumentar la capacidad desecante del aire, mejorando la eficiencia del proceso.

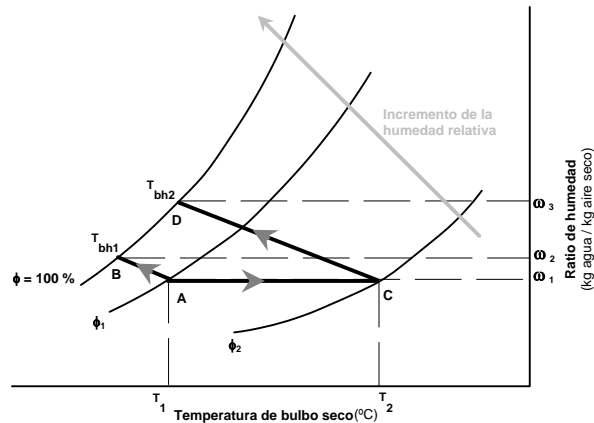


Figura 3.5: Evolución del aire en los procesos de secado (aire ambiente o aire precalentado).

Por tanto, como se acaba de exponer, la capacidad deshidratante del aire depende principalmente de su humedad relativa, la cual es a su vez función de su temperatura. De esta forma, se pueden considerar tres posibles evoluciones del aire en el proceso de secado [38]:

- Evolución adiabática: El sistema evoluciona sin intercambio de energía calorífica con el medio exterior. El producto a secar cede agua al aire, con lo que, desciende la temperatura de ambos hasta que se alcanza el equilibrio correspondiente a la saturación adiabática y la humedad relativa alcanza el valor del 100 %. Conseguido este límite es imposible extraer más agua del producto.
- Evolución del aire en un proceso de secado sin aporte calorífico exterior: Consiste en hacer pasar una corriente de aire, a temperatura ambiente y no saturado a través de un producto, sin recibir aporte de energía calorífica exterior. De esta forma el aire en contacto con el producto, extrae de éste parte de su humedad, con lo que la temperatura inicial de ambos desciende. A lo largo de su recorrido, el aire aumenta su humedad relativa hasta alcanzar la saturación y además, si el recorrido es suficientemente largo y el caudal lo permite, la temperatura final será próxima a la de bulbo húmedo.

En un proceso eficiente y dado que la circulación forzada conlleva un coste, es necesario determinar el caudal de aire necesario para secar el producto en el

menor tiempo posible. Aunque no existen fórmulas matemáticas exactas para obtener a priori este caudal, va a depender fundamentalmente de la naturaleza del producto y del tipo de secadero.

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

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

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

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

### 3.2.6. Propiedades físicas del aire húmedo.

El comportamiento del aire húmedo no es constante con la temperatura. A continuación se presenta la dependencia de sus principales propiedades físicas con la temperatura [70].

Calor específico (ec. 3.39),  $C$  ( $J/kg \cdot K$ ):

$$C = 999,2 + 0,1434 \cdot T_m + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_m^3 \quad (3.39)$$

siendo  $T_m$  la temperatura media del fluido considerado ( $^{\circ}C$ ).

Densidad (ec. 3.40),  $\rho$  ( $kg/m^3$ ):

$$\rho = \frac{353,44}{T_m + 273,15} \quad (3.40)$$

Viscosidad dinámica (ec. 3.41),  $\mu$  ( $N \cdot s/m^2$ ):

$$\mu = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,62 \cdot 10^{-8} \cdot T_m \quad (3.41)$$

Viscosidad cinemática (ec. 3.42),  $\nu$  ( $m^2/s$ ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.42)$$

Conductividad térmica (ec. 3.43),  $K_v$  ( $W/m \cdot K$ ):

$$K_v = 0,0244 + 0,7673 \cdot 10^{-4} \cdot T_m \quad (3.43)$$

Coefficiente de expansión térmica (ec. 3.44),  $\beta$  ( $K^{-1}$ ):

$$\beta = \frac{1}{T_m + 273,15} \quad (3.44)$$

### 3.2.7. Consumo energético en la eliminación de humedad.

La cantidad de agua a eliminar de una sustancia en un tiempo  $t$  ( $h$ ) en un proceso de secado, para pasar de una humedad  $M_1$  a otra  $M_2$  (en base húmeda  $wb.$  o seca  $db.$ ) se puede obtener a partir de las expresiones dadas en la ecuación 3.45.

$$W_a = W_o \cdot \left( \frac{M_{wb1} - M_{wb2}}{1 - M_{wb2}} \right) / t = W_d \cdot (M_{db1} - M_{db2}) / t \quad (3.45)$$

donde  $W_a$  es la cantidad de agua retirada en el intervalo de tiempo ( $kg_{agua}/h$ ) y como se ha indicado anteriormente,  $W_o$  es el peso inicial de material sin secar ( $kg$ ),  $M_{wb1}$  es la humedad en base húmeda ( $kg_{agua}/kg_{prod.húmedo}$ ) en el estado inicial,  $M_{wb2}$  es la humedad en base húmeda ( $kg_{agua}/kg_{prod.húmedo}$ ) en el estado final,  $W_d$  es el peso de la materia seca en el producto ( $kg$ ),  $M_{db1}$  es la humedad en base seca ( $kg_{agua}/kg_{prod.seco}$ ) en el estado inicial y  $M_{db2}$  es la humedad en base seca ( $kg_{agua}/kg_{prod.seco}$ ) en el estado final.

En este caso, el consumo de aire para pasar de dicho estado 1 al 2, en ese intervalo de tiempo, viene dado por la ecuación 3.46.

$$m_a = \frac{W_a}{\omega_2 - \omega_1} \quad (3.46)$$

siendo  $m_a$  el consumo de aire seco ( $kg/h$ ),  $W_a$  la cantidad de agua eliminada ( $kg_{agua}/h$ ) y  $\omega_1$  y  $\omega_2$  las humedades absolutas del aire para pasar del estado 1 al 2 respectivamente ( $kg_{agua}/kg_{aire\_seco}$ ).

De esta forma, es posible obtener la energía teórica necesaria para eliminar los  $W_a$  ( $kg_{agua}/h$ ) en el proceso de secado para pasar de un estado 1 a otro 2 (ecuación 3.47).

$$Q_a = m_a \cdot (h_2 - h_1) \quad (3.47)$$

siendo  $Q_a$  la energía consumida ( $kJ/h$ ),  $m_a$  el consumo de aire ( $kg_{aire\_seco}/h$ ) y  $h_1$  y  $h_2$  las entalpías del aire al pasar del estado 1 al 2 respectivamente ( $kJ/kg_{aire\_seco}$ ).

### 3.2.8. Eficiencia del secado.

Existen diferentes ratios para evaluar las prestaciones energéticas de un proceso de secado. Uno de los más importantes puede ser el *consumo energético unitario*,  $CEU$ , definido como la cantidad de energía suministrada por cantidad de agua evaporada (ecuación 3.48).

$$CEU = \frac{\text{energía suministrada}}{\text{agua evaporada}} \quad (3.48)$$

Por otro lado, la eficiencia de un secadero se puede definir mediante la expresión 3.49.

$$\varepsilon = \frac{\text{energía utilizada}}{\text{energía utilizada} + \text{energía perdida en el aire a la salida}} \quad (3.49)$$

Así, en el caso de disponer de un secadero sin recirculación, la ecuación anterior puede expresarse según 3.50.

$$\varepsilon_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_a} \cdot 100 \quad (3.50)$$

donde  $\varepsilon_t$  es la eficiencia del secado en términos de temperatura (%),  $T_1$  es la temperatura del aire a la entrada del secadero ( $^{\circ}C$ ),  $T_2$  es la temperatura del aire a la salida del secadero ( $^{\circ}C$ ),  $T_a$  es la temperatura del aire ambiente ( $^{\circ}C$ ).

También es útil significar la eficiencia en términos de humedad eliminada por el aire de secado,  $\eta_p$ , (ec. 3.51) [71].

$$\eta_p = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_{2a} - \omega_1} \cdot 100 \quad (3.51)$$



representando  $\eta_p$  la eficiencia del secado en términos de humedad (%),  $\omega_1$  la humedad absoluta del aire a la entrada del secadero ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ),  $\omega_2$  la humedad absoluta del aire a la salida del secadero ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ) y  $\omega_{2a}$  la humedad absoluta del aire a la salida del secadero en condiciones de saturación adiabática ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ).

### 3.2.9. Clasificación de secaderos.

La clasificación de los secaderos se puede hacer atendiendo a diferentes parámetros. Todos los sistemas de secado, en primer lugar, se pueden tipificar de acuerdo al rango de temperatura de operación en secaderos de alta y baja temperatura.

Convencionalmente en la industria y de forma general, los secaderos de alta temperatura utilizan combustibles convencionales, mientras que los de baja temperatura utilizan combustibles biomásicos o energía solar [72]. Además, los secaderos de alta temperatura se utilizan cuando se requiere un secado muy rápido, de forma que el material a secar permanece un corto periodo de tiempo en contacto con el agente desecante. A su vez, éstos pueden ser de flujo continuo o discontinuo.

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

Otras clasificaciones menos habituales son [30, 73]:

- Según el tipo de propagación de calor: convección, conducción o/y radiación.
- Según la presión utilizada en el proceso: vacío o normal (atmosférica).
- Según el agente desecante: aire, vapor sobrecalentado o gases procedentes de un proceso anterior.
- Según la disposición de corrientes: paralela, contracorriente y transversal.
- Según la forma de aportación de calor: continua o discontinua.
- Según disposiciones especiales: bandejas, cilindros, tambores, túneles, cintas, etc.
- Según el tiempo de residencia: corto ( $< 1 \text{ min}$ ), medio ( $1-60 \text{ min}$ ) o alto ( $> 60 \text{ min}$ ).

Existen nuevas tecnologías de secado (secaderos de lecho fluido, combinación de lecho fluido-spray, de lecho fluidizado con vapor sobrecalentado, de eyección, solares, etc) que intentan paliar alguno de los inconvenientes del uso de los sistemas de secado

convencionales: disminución del consumo de energía, disminución del impacto ambiental, mejora de la calidad de los productos, aumento de la seguridad de la operación, etc [28, 74, 75].

Los sistemas más habituales para el secado de biomasa son los secaderos rotativos, secaderos flash, secaderos de discos, secaderos de cascada y secaderos de vapor sobrecalentado [34]. A continuación se describen las principales características de cada uno de ellos.

- Secaderos rotativos: son los sistemas más utilizados para el secado de biomasa, siendo los más comunes los de simple paso y de contacto directo. El principio de funcionamiento consiste en la rotación de un tambor dotado con palas mezcladoras, mejorando éstas la transferencia de calor entre el agente desecante y el producto. Estos sistemas pueden ser de contacto directo o indirecto, siendo los primeros utilizados en el caso de que el contacto de los gases calientes con el producto no suponga un problema de contaminación para este último (por ejemplo, para su utilización como combustible). Por otro lado, pueden ser equicorrientes o contracorrientes. En los sistemas equicorrientes la biomasa y el aire caliente fluyen en el mismo sentido, entrando en contacto los gases calientes a mayor temperatura con los productos más húmedos, disminuyendo la pérdida de volátiles y el riesgo de incendio. El sistema contracorriente tiene la ventaja de conseguir mayores reducciones de humedad en el producto, ya que los sólidos más secos entran en contacto con los gases más calientes; sin embargo, su inconveniente fundamental es el aumento de riesgo de incendio. Existen otras variantes como el doble o triple paso, con las que se consiguen disminuir la longitud del secadero entre dos y tres veces. La temperatura de entrada de los gases oscila entre 200 y 1000 °C, con temperaturas de salida habitualmente superiores a los 110 °C. Los tiempos de permanencia necesarios se encuentran entre unos pocos minutos para partículas pequeñas y 10-30 *min* para partículas de tamaño mayor.
- Secaderos flash: en éstos, el material a secar es mezclado con una corriente de gases calientes a alta velocidad, produciéndose un secado muy rápido. Debido a los cortos tiempos de secado de los secaderos flash, el equipo es más compacto que el de los secaderos rotativos y con temperaturas de los gases ligeramente más bajas; sin embargo, su consumo eléctrico es mayor. El tiempo de retención de sólidos es habitualmente inferior a 30 *s*, minimizando, por tanto, el riesgo de incendio.
- Secaderos de discos: son sistemas de contacto indirecto que se utilizan para pequeños flujos de material. En ellos, el material se seca mediante el contacto con

un conducto con aletas por cuyo interior fluye vapor procedente de una caldera. Los tiempos de residencia son muy variables dependiendo de las características del vapor y del producto a secar (2-30 *min*).

- Secaderos de cascada: son empleados habitualmente para el secado de grano, pero también se pueden utilizar para otros tipos de biomasa. Es una concepción similar al secadero flash. El producto se introduce en una cámara cerrada hacia una corriente de aire caliente que fluye de abajo a arriba en la misma. Los materiales secos se extraen por un lateral de la cámara, controlando en todo momento el tiempo de residencia y la cantidad de secado. Los tiempos de secado típicos en estos dispositivos son, aproximadamente, de 2 *min*.
- Secaderos de vapor sobrecalentado (SSD): en estos sistemas, a diferencia de los secaderos flash, el agente desecante es vapor sobrecalentado, siendo así las propiedades de transferencia de calor mediante el vapor sobrecalentado superiores a las obtenidas para el aire a la misma temperatura [74]. La corriente de gases atraviesa una placa perforada (perforaciones 1,5-5 % del área de la placa) creando torbellinos en la materia a secar (fluidificación) que se desplaza en sentido horizontal. Es un proceso indicado para materiales de pequeño tamaño o lodos. Los dispositivos pueden ser estáticos o vibrantes. Generalmente, se utiliza este procedimiento con el vibrado del secadero mediante agitadores mecánicos, de manera que se consiguen una serie de ventajas: evitar que se produzcan acumulaciones fijas del material, proporcionar la dirección de transporte del producto, conseguir la fluidificación incluso con velocidades bajas del vapor y el tiempo de residencia del material se controla más fácilmente.

En las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5, se muestran las principales ventajas e inconvenientes de los últimos sistemas de secado descritos [34, 74].

Secaderos rotativos	
Ventajas	<p>Menos sensibles al tamaño de partículas.            Soportan los flujos de gases más calientes de todos los tipos de secaderos.            Bajos costes de mantenimiento.            Capacidad máxima de producto.</p>
Inconvenientes	<p>Humedad del producto difícil de controlar.            Mayor riesgo de incendio.            Mayores necesidades de espacio.</p>
Sistema doble paso frente al sistema simple paso	
Doble paso ventajas:	<p>Productos más secos.            Menores necesidades de espacio.</p>
Doble paso inconvenientes:	<p>Mayores costes de capital y mantenimiento.            Mayores necesidades de potencia en ventiladores.            Mayor riesgo de incendio.</p>

Tabla 3.1: Ventajas e inconvenientes de los secaderos rotativos.

Secaderos flash	
Ventajas	<p>Más compactos que los secaderos rotativos.            Menores tiempos de retención.            Menor riesgo de incendio.</p>
Inconvenientes	<p>Mayores costes de instalación.            Necesidades de tamaño de partículas reducido.</p>

Tabla 3.2: Ventajas e inconvenientes de los secaderos flash.

Secaderos de discos	
Ventajas	Recuperación del calor latente de vaporización del vapor.
Inconvenientes	Capacidad muy limitada de producto. Necesidades de vapor.

Tabla 3.3: Ventajas e inconvenientes de los secaderos de discos.

Secaderos de cascada	
Ventajas	Mayores tamaños de partículas que en los secaderos flash.
Inconvenientes	Necesidades de partículas de tamaño uniforme.

Tabla 3.4: Ventajas e inconvenientes de los secaderos de cascada.

Secaderos de vapor sobrecalentado	
Ventajas	Controlable el tiempo de retención del producto. Ratios de secado mayores, según temperatura del vapor. Aplicable a muy diversos tipos de biomasa.
Inconvenientes	El SSD es un sistema más complejo. Mayores costes de instalación (sistemas de impulsión y vibración). Relativamente baja experiencia de aplicación.

Tabla 3.5: Ventajas e inconvenientes de los secaderos de vapor sobrecalentado.

En este trabajo se propone la sustitución o combinación de los sistemas convencionales de secado por el secado solar, como propuesta innovadora frente a los tradicionales sistemas de secado y altamente ventajosa desde el punto de vista energético y medioambiental.

### 3.3. Secado solar.

#### 3.3.1. Introducción.

El secado natural ha sido utilizado desde tiempos inmemorables para secar una gran variedad de productos. Sin embargo, para la producción a escala industrial este sistema presenta ciertas limitaciones (necesidades de grandes superficies, elevado coste de mano de obra, dificultades en el control del proceso de secado, etc). Con objeto de aprovechar los beneficios de la fuente solar se han realizado numerosos intentos en los últimos años para el desarrollo de secaderos solares en productos agrícolas y forestales [38, 76-80].

Entre las ventajas que presenta el secado solar, la más destacada se basa en la energía que utiliza, es decir, una fuente no contaminante, renovable y que puede utilizarse a escala local.

No obstante, el secado solar entraña un gran inconveniente: el carácter periódico de la radiación solar y la variación de la intensidad de la radiación incidente en función del tiempo, siendo ésta una circunstancia que requerirá una estrategia de diseño y control adecuada para posibilitar el secado efectivo. Aún así, esta dificultad puede solucionarse por ejemplo con la utilización de alguna fuente auxiliar.

Otro problema destacable del secado solar está en la baja densidad energética de la radiación solar, que dará lugar a la necesidad de superficies colectoras de gran tamaño.

Por otro lado, además de las ventajas conseguidas medioambientalmente, será necesario tener en cuenta el coste y la rentabilidad de la instalación, condicionadas, en gran medida, por las circunstancias geográficas que determinan la intensidad de la radiación incidente y el número de horas de Sol.

Por tanto y como se ha puesto de manifiesto, la aplicación de un sistema de secado solar implica un proceso de estudio e investigación adecuado a las características del producto y a la zona geográfica en cuestión. Para mejorar el proceso, es habitual la utilización de colectores de aire, considerándose actualmente ésta una aplicación potencialmente interesante para reducir el consumo de combustibles fósiles en el secado de productos [81].

En este apartado, en primer lugar se describen las características básicas de la radiación solar. A continuación se establecen los principales sistemas de secado solar, así como se apunta la tipología elemental de captadores solares de aire. Por último, se establecen los parámetros fundamentales, desde el punto de vista energético, para la optimización del funcionamiento de los diferentes dispositivos de secado solar.

### 3.3.2. Radiación solar.

En lo que respecta al secado solar, la caracterización de la radiación disponible en el lugar resulta fundamental para el diseño y control óptimo del funcionamiento de los dispositivos de secado. Pese a ser el de la radiación solar un tema ampliamente difundido, en este apartado se pretende dar una visión general de algunos conceptos específicos sobre la misma, que serán aplicados posteriormente en el análisis de los ensayos realizados en el prototipo de secadero solar.

En adelante se utilizará indistintamente el término radiación solar, como es común en la práctica, para referirse a la potencia o a la energía entregada por el Sol. Las definiciones precisas de ambos términos son las siguientes:

- *Irradiancia* (potencia de la radiación): es la energía incidente sobre una superficie por unidad de tiempo y de área. Se representa habitualmente por  $I$  y sus unidades en el S.I. son  $W/m^2$ .
- *Irradiación* (energía de la radiación): es la energía incidente sobre una superficie por unidad de área, durante un determinado periodo de tiempo. Se identifica generalmente por  $H$  y sus unidades en el S.I. son  $J/m^2$ .

#### Características de la fuente.

El Sol, desde el punto de vista físico constituido por un 70% de  $H_2$ , es un enorme reactor nuclear que irradia continuamente una potencia de  $3,8 \cdot 10^{23} kW$ . De esta cantidad, la Tierra intercepta  $1,7 \cdot 10^{14} kW$ , siendo el 30% de la radiación recibida reflejada al espacio, el 47% absorbida para mantener la temperatura ambiente y el 23% restante utilizado para mantener la convección atmosférica y el ciclo hidrológico [82].

#### *La radiación solar extraterrestre y la constante solar.*

Antes de llegar a la superficie terrestre, la radiación solar sufre una serie de transformaciones al atravesar la atmósfera. A la radiación solar existente antes de entrar en la atmósfera se le denomina *radiación solar extraterrestre*.

La irradiancia solar total que incide sobre una superficie normal a los rayos solares situada en el exterior de la atmósfera,  $I_S$ , varía (figura 3.6) entre 1322 y 1412  $W/m^2$  como consecuencia de la diferente distancia del Sol a la Tierra en los distintos días del año. De esta forma, se define la *constante solar*,  $I_{CS}$ , como el valor medio de la radiación solar extraterrestre, siendo su valor más aceptado de 1367  $W/m^2$ , obtenido por el World Radiation Center [83,84].

En función de la constante solar, la irradiancia solar extraterrestre normal a la radiación, a lo largo del año, viene dada por la ecuación 3.52 (figura 3.6).

$$I_S = I_{CS} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (3.52)$$

siendo  $n$  el número de día del año (1 para el 1 de Enero y 365 para el 31 de Diciembre).

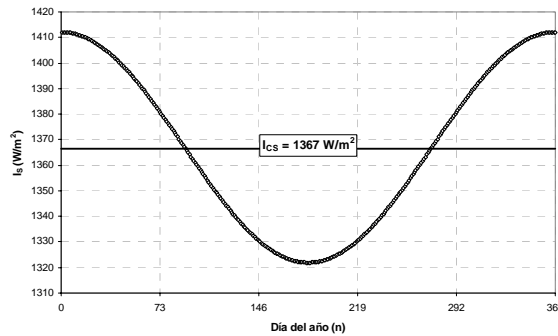


Figura 3.6: Variación de la irradiancia extraterrestre a lo largo del año.

### Irradiación solar en la superficie terrestre.

Como consecuencia de las diferentes regiones y composición de la atmósfera, como ya se ha indicado, no toda la energía extraterrestre llega a la superficie de la Tierra, modificándose su naturaleza, y sobre todo, su componente direccional [70,83–88]. Así, la radiación global,  $H_G$ , que incide sobre una superficie inclinada en la Tierra consta de tres componentes (ec. 3.53):

- *Radiación directa* ( $H_B$ ): es la que proviene “directamente” del disco solar sin sufrir alteraciones, suponiendo ésta el 90 % de la radiación global en días muy soleados y prácticamente nula en días cubiertos.
- *Radiación difusa* ( $H_D$ ): es la energía dispersada por los componentes atmosféricos.
- *Radiación reflejada* ( $H_R$ ): también denominada albedo, es la que llega a una superficie inclinada procedente de la reflexión de la radiación solar en el suelo.

$$H_G = H_B + H_D + H_R \quad (3.53)$$



### Medida de la radiación solar.

Para la medida de la radiación solar existen básicamente dos tipos de elementos [70, 84, 86]: Piranómetros y pirheliómetros, ambos basados en la generación de un voltaje proporcional a la radiación solar incidente.

El pirheliómetro es un instrumento utilizado para medir la radiación solar directa, por lo que debe disponer de un sistema de seguimiento del Sol para que su superficie receptora sea normal a los rayos solares.

El piranómetro se emplea para la medida de la irradiancia global (directa más difusa) sobre una superficie plana, generalmente horizontal. Si el piranómetro ubicado de forma horizontal posee un dispositivo de bloqueo de la radiación directa del Sol, permite medir exclusivamente la radiación difusa.

El piranómetro es el equipo más habitual utilizado para la medida de la radiación solar total. Su principio de funcionamiento se basa en la fuerza electromotriz generada por una termopila rodeada por dos semiesferas de vidrio, y cuyo valor será proporcional al flujo de radiación energético recibido.

### Variables básicas en la caracterización de la radiación solar.

Dos ángulos, que nos marcan los movimientos de traslación y rotación de la Tierra, son fundamentales para la obtención de la radiación solar incidente: la declinación solar, debida al movimiento de traslación, y el ángulo horario, provocado por el movimiento de rotación. Además de éstos, ángulos como la latitud ( $l$ ), la altura solar ( $h$ ), el ángulo de incidencia ( $\theta$ ), etc, son necesarios para la determinación de esta radiación incidente. A continuación se presentan las ecuaciones básicas de algunos de ellos.

**Declinación solar.** El eje de rotación de la Tierra forma con el eje normal al plano de la elíptica un ángulo constante igual a  $23,5^\circ$ . Debido a esto, el ángulo de los rayos solares con el plano del ecuador, denominado declinación solar,  $\delta$ , varía entre  $23,45^\circ$  (solsticio de verano) y  $-23,45^\circ$  (solsticio de invierno), expresado mediante la ecuación 3.54 para un día cualquiera del año,  $n$ .

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left( 360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3.54)$$

**Ángulo horario.** Denotado por  $\omega_h$ , el ángulo horario es el formado en el ecuador, comprendido entre el plano meridiano de la Tierra que contiene al Sol y el que contiene al observador del lugar. Para su aplicación práctica se utiliza la expresión 3.55, considerando que a cada hora le corresponde una distancia de  $15^\circ$ , siendo igual a cero

al mediodía solar, negativo antes del mediodía solar y positivo después del mediodía solar [70, 84]. En la tabla 3.6 se muestra el valor de dicho ángulo horario para cada hora en el hemisferio norte.

$$\omega_h = n_h \cdot 15^\circ \quad (3.55)$$

siendo  $n_h$  el número de horas antes o después del mediodía solar.

Hora del día (h)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ángulo horario ( $^\circ$ )	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	+15	+30	+45	+60	+75	+90

Tabla 3.6: Variación diaria del ángulo horario en el hemisferio norte.

**Altura solar.** La altura solar,  $h$ , es el ángulo existente desde el plano del horizonte hasta la posición del sol (ec. 3.56).

$$\text{sen}h = \text{sen}l \cdot \text{sen}\delta + \cos l \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_h \quad (3.56)$$

**Altura de culminación.** Se define la altura de culminación (ec. 3.57),  $h_c$ , como la máxima altura diaria, esto es, la que alcanza el Sol en el mediodía.

$$h_c = 90 - (l - \delta) \quad (3.57)$$

**Orto y ocaso solar. Duración del día.** El número de horas de sol (ec. 3.59), para cada día del año, se puede determinar a partir de la hora de salida y puesta de Sol, siendo éstas de igual valor y de signo contrario ( $+\omega_s$  y  $-\omega_s$ ) y dadas por la ec. 3.58.

$$\omega_s = \arccos(-\text{tg}\delta \cdot \text{tg}l) \quad (3.58)$$

$$T_d = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\text{tg}\delta \cdot \text{tg}l) \quad (3.59)$$

**Ángulo de incidencia.** Se denomina ángulo de incidencia,  $\theta$ , sobre una superficie en un punto, al que forma la dirección de la radiación solar directa y la normal en ese punto a la superficie considerada. Para determinarlo (ec. 3.60), es necesario conocer otros ángulos como son la latitud ( $l$ ), la declinación solar ( $\delta$ ) y el ángulo horario ( $\omega_h$ ).

$$\cos \theta = \text{sen}l \cdot \text{sen}\delta + \cos l \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_h \equiv \text{sen}h \quad (3.60)$$

### Radiación sobre un plano inclinado.

La mayoría de los datos disponibles sobre radiación solar se dan para superficie horizontal ( $H$  o  $I$ ) siendo, además, raramente conocidos estos valores en sus dos componentes (directa y difusa), por lo que será necesario determinar estos últimos a partir de valores globales.

Y al mismo tiempo, puesto que en la mayoría de las aplicaciones solares es necesario conocer la radiación incidente sobre la superficie receptora, habitualmente inclinada un ángulo  $\beta$ , será necesario transformar los valores de las componentes sobre superficie horizontal a valores sobre superficie inclinada.

Conocida la radiación global sobre una superficie horizontal en sus dos componentes, directa y difusa, existen diversos métodos y modelos matemáticos para determinar la radiación global sobre una superficie inclinada. Uno de los primeros y más riguroso fue propuesto por Liu y Jordan en 1963; no obstante, existen métodos abreviados, de mayor sencillez de aplicación y que proporcionan la suficiente exactitud. Uno de éstos es el dado por Aláiz [88], describiéndose a continuación los aspectos fundamentales del mismo. Antes de ello, es necesario puntualizar que, dependiendo de los datos disponibles de radiación (datos horarios o diarios medios mensuales) el proceso variará en ciertos aspectos.

En primer lugar, es necesario determinar la exposición solar extraterrestre sobre una superficie horizontal. En el caso de disponer de valores diarios, la irradiancia extraterrestre horaria en superficie horizontal,  $I_0$ , se determina mediante la ecuación 3.61, siendo  $\theta$  el ángulo de incidencia (ec. 3.60) e  $I_{SN}$  la irradiancia extraterrestre normal a la radiación (ec. 3.52). Como se observa (ec. 3.62), en una latitud dada y para cada día del año, a cada hora solar le corresponde un valor diferente de  $I_0$ .

$$I_0 = I_{SN} \cdot \cos \theta \equiv I_{SN} \cdot \text{sen} h \quad (3.61)$$

$$I_0 = I_{CS} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cdot [\text{sen} l \cdot \text{sen} \delta + \cos l \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_h] \quad (3.62)$$

Si, como ocurre frecuentemente, los datos disponibles corresponden a la irradiación *global* diaria media mensual sobre superficie horizontal, es necesario obtener la irradiación o exposición *extraterrestre* diaria media mensual,  $\overline{H}_0$ . A partir de la expresión 3.61, integrando entre el orto y el ocaso solar (ec. 3.58), se puede determinar la irradiación solar extraterrestre o energía radiante exterior a la atmósfera que incidiría sobre una superficie horizontal a lo largo de un día,  $H_0$ , en un determinado punto de la Tierra de latitud  $l$ . Dicho valor viene dado por la expresión 3.63. Calculados los

valores diarios, realizando el promedio de los mismos para un mes ( $n$  días del mes), se obtiene el valor mensual medio de la radiación extraterrestre horizontal (ec. 3.64).

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot I_{SN} \cdot [\omega_s \cdot \text{sen} l \cdot \text{sen} \delta + \cos l \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} \omega_s] \quad (3.63)$$

$$\bar{H}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} H_{0_i}}{n} \quad (3.64)$$

Para calcular las componentes directa,  $H_B$ , y difusa,  $H_D$ , de la radiación incidente sobre superficie horizontal,  $H$ , es necesario utilizar una serie de correlaciones.

Se define el coeficiente de transmisión total atmosférico,  $K_T$ , como la relación entre la exposición horizontal global y extraterrestre, y está dado por la ecuación 3.65, para valores medios mensuales, diarios u horarios.

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{H_0}; K_T = \frac{H}{H_0}; k_T = \frac{I}{I_0} \quad (3.65)$$

Por otro lado, los coeficientes de transmisión fraccionales,  $K_B$  y  $K_D$ , se definen como el cociente entre las exposiciones directa y difusa, respectivamente, y la radiación global horizontal (ecuaciones 3.66 y 3.67).

$$K_B = \frac{\bar{H}_B}{\bar{H}_0} \quad \circ \quad \frac{H_B}{H_0} \quad \circ \quad \frac{I_B}{I_0} \quad (3.66)$$

$$K_D = \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}_0} \quad \circ \quad \frac{H_D}{H_0} \quad \circ \quad \frac{I_D}{I_0} \quad (3.67)$$

Las correlaciones más utilizadas entre la radiación difusa y global son las dadas por Orgill y Hollands, Erbs y otros, para radiación horaria, y las dadas por Collares-Pereira, Liu y Jordan, Page y otros, para valores diarios o mensuales [70, 83, 84, 88]. En la tabla 3.7 se muestra la correlación de Erb para radiación horaria y en la tabla 3.8 la correlación de Collares-Pereira para radiación diaria media mensual.

$\frac{I_D}{I_T} = 1 - 0,09k_T$	para $k_T \leq 0,22$
$\frac{I_D}{I_T} = 0,951 - 0,160k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4$	para $0,22 < k_T \leq 0,8$
$\frac{I_D}{I_T} = 0,165$	para $k_T > 0,8$

Tabla 3.7: Correlaciones entre la radiación difusa y global para datos horarios.

$$\frac{\overline{H}_D}{\overline{H}} = 0,775 + 0,347 \left( \omega_s - \frac{\pi}{2} \right) - [0,505 + 0,261 \left( \omega_s - \frac{\pi}{2} \right)] \cos [2(\overline{K}_T - 0,9)]$$

con  $\omega_s = \frac{\pi}{2} - 0,2$  para invierno

con  $\omega_s = \frac{\pi}{2} + 0,2$  para verano

con  $\omega_s = \frac{\pi}{2}$  para media estación

Tabla 3.8: Correlaciones entre la radiación difusa y global para datos diarios medios mensuales.

Obtenido  $K_T$  (3.65), se determina  $K_D$  (3.7 o 3.8), con éste se obtiene la radiación difusa  $H_D$  (3.67) y mediante la ecuación 3.68 se consigue la radiación directa horizontal,  $H_B$ .

$$H_B = H - H_D \quad (3.68)$$

Calculadas las componentes horizontales directa y difusa de la radiación, para determinar la radiación global sobre plano inclinado y orientado,  $\overline{H}(s, g)$ ,  $H(s, g)$  o  $I(s, g)$ , se aplica la expresión 3.69 con los datos correspondientes, mensuales, diarios u horarios, respectivamente.

$$H(s, g) \equiv H_G = H_B \cdot R_m(s, g) + H_D \cdot \frac{1 + \cos s}{2} + r \cdot H \cdot \frac{1 - \cos s}{2} \quad (3.69)$$

donde:

$R_m(s, g)$  es un factor de conversión definido como el cociente entre radiación directa sobre un plano inclinado ( $s$ ) y orientado ( $g$ ), y la radiación directa sobre plano horizontal. Los valores de este coeficiente se encuentran recogidos para cada inclinación y orientación y para diferentes latitudes y meses del año [88].

$s$  es la inclinación de la superficie plana de estudio ( $^\circ$ ).

$g$  es la orientación de la superficie ( $^\circ$ ).

$r$  es el coeficiente medio de reflexión (*dec.*). Valores entre 0,2 y 0,4 son habituales para este coeficiente.

### 3.3.3. Tipología de secaderos solares.

Existen una gran variedad de sistemas de secado solar, utilizados para los más diversos productos, englobándose dentro de los secaderos de baja temperatura. En la

figura 3.7 se muestra un diagrama con las categorías fundamentales [71, 72, 89].

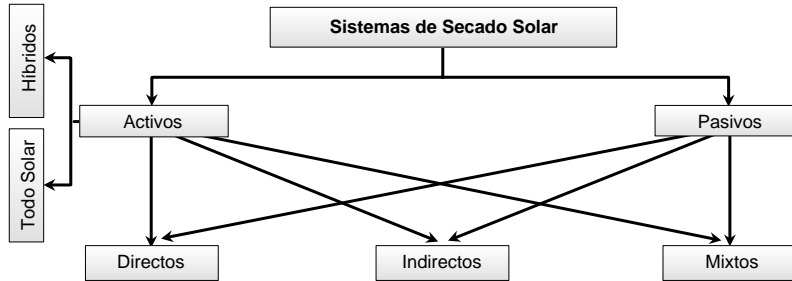


Figura 3.7: Tipología de sistemas de secado solar.

Así, los sistemas solares de secado se pueden clasificar, según la forma de circulación del aire desecante, en dos grandes grupos:

- Sistemas solares activos o de convección forzada: incorporan elementos externos, como ventiladores, para mover el aire caliente utilizado en la extracción de humedad del producto (figuras 3.8a, 3.9b y 3.10c). Pueden ser, a su vez, sistemas “todo solar”, en los que el aporte energético se obtiene en su totalidad de la radiación solar, o sistemas “híbridos”, para los que además de la radiación solar se utiliza una fuente energética auxiliar.
- Sistemas solares pasivos o de convección natural: no incorporan elementos para forzar la circulación del agente desecante, produciéndose este movimiento por la variación de densidad del mismo provocada por la diferencia de temperaturas (figuras 3.8d, 3.9e y 3.10f).

Además de esta clasificación, se puede hablar de tres subclases de sistemas solares atendiendo a la disposición de los componentes del conjunto y al modo de utilización de la energía solar:

- Secaderos solares de tipo integral o directo: en ellos, la radiación solar se recoge únicamente en la cabina o cámara de secado (figura 3.8).
- Secaderos solares de tipo distribuido o indirecto: disponen de un colector solar que capta la energía de la radiación y la transmite al aire, provocando su calentamiento (figura 3.9).
- Secaderos solares de tipo mixto: la radiación solar se transmite conjuntamente a un calentador solar y a la cámara de secado (figura 3.10).

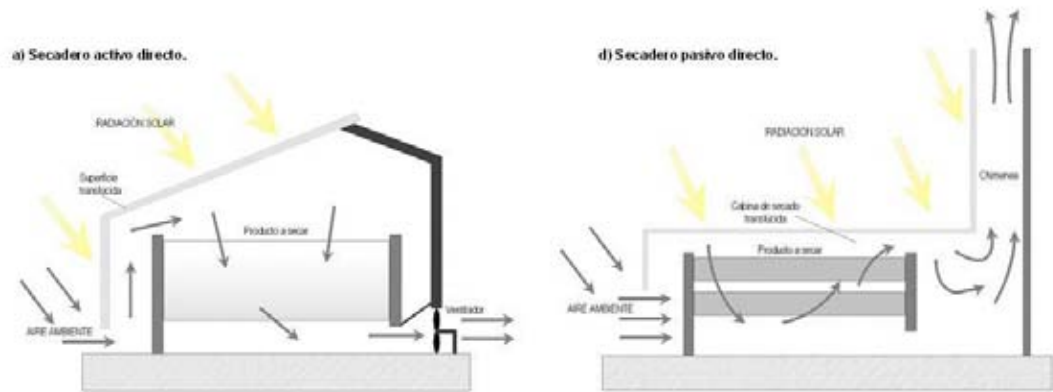


Figura 3.8: Secaderos de tipo integral.

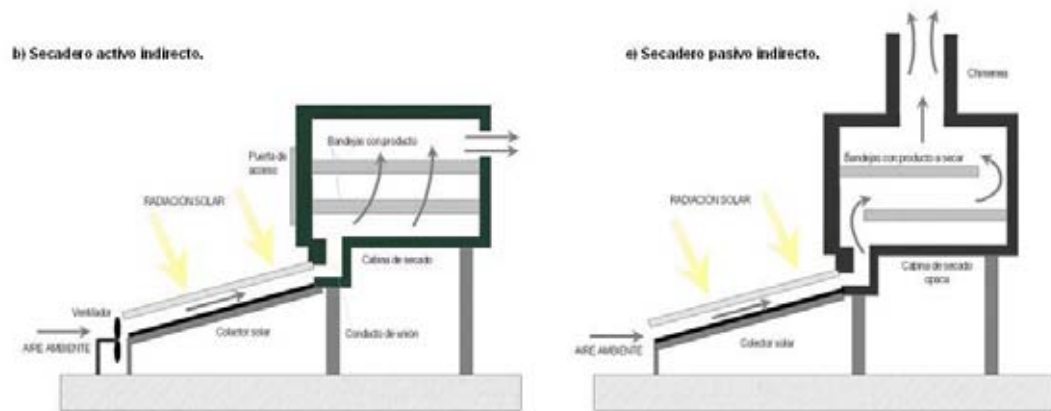


Figura 3.9: Secaderos de tipo distribuido.

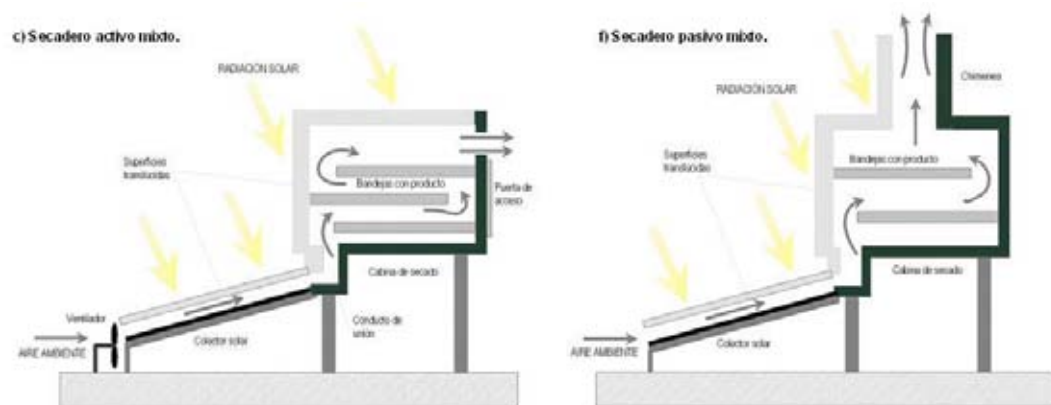


Figura 3.10: Secaderos de tipo mixto.

### Secaderos solares activos.

Los sistemas solares activos dependen sólo parcialmente de la energía solar, ya que, o bien emplean energía solar como aporte de calor y energía eléctrica para los ventiladores, o bien utilizan como fuente de calor energía solar conjuntamente con combustibles y electricidad para los sistemas de impulsión de aire [72].

En todos los casos se provoca la convección forzada del agente desecante. Como se ha indicado, pueden ser sistemas “todo solar” o “híbridos”, recibiendo esta última designación los secaderos solares activos que incorporan un aporte térmico suplementario, que se utilizará, por ejemplo, durante las operaciones de secado nocturnas o en periodos con bajos niveles de insolación. En todas las situaciones posibles, con los sistemas de secado solar activos se consigue, en diferentes proporciones, una reducción del consumo de energía convencional.

Estos dispositivos son más efectivos y más fáciles de controlar que los secaderos pasivos; sin embargo, el requerimiento de electricidad para los ventiladores o de combustibles fósiles como fuentes auxiliares de calor, puede aumentar considerablemente los costes de operación y mantenimiento.

**a) *Secaderos solares activos de tipo integral.*** Son sistemas en los que la unidad de recepción de la radiación solar es la propia cámara de secado. A su vez, pueden ser secaderos de absorción directa sobre el producto, secaderos con pared o cubierta colectora y secaderos tipo invernadero con cámara de absorción interna [72].

**b) *Secaderos solares activos de tipo distribuido.*** Son diseños en los que el calentador solar de aire y la cámara de secado constituyen unidades separadas. Los cuatro componentes básicos del sistema distribuido son: la cámara de secado, el calentador de aire, el ventilador y el conducto de unión entre el calentador y la cámara [72]. Sobre este diseño típico se han ensayado diferentes modificaciones relativas a los materiales del calentador solar, a la recirculación del aire de salida o a la ubicación de los ventiladores.

Un aspecto importante a considerar es el siguiente: en los sistemas de secado convencional, la eficiencia de secado aumenta con la temperatura, siendo la temperatura de trabajo tan alta como el producto pueda soportar. Por el contrario, en los secaderos solares de tipo distribuido, la máxima temperatura posible puede no proporcionar el diseño más óptimo, ya que la eficiencia del colector solar disminuye con el aumento de la temperatura de salida.

Por tanto, la decisión en el diseño de estos sistemas conduce a dos alternativas: temperaturas de aire altas con bajos niveles de flujo de aire y altos requerimientos de



aislamientos, o bien, temperaturas de secado más bajas disminuyendo el aislamiento necesario y por tanto su coste. Sin embargo, puesto que para altas temperaturas la eficiencia de estos dispositivos aumenta con el flujo de aire, en el diseño será necesario realizar un balance entre el tamaño de los ventiladores usados y el nivel de aislamiento requerido.

c) *Secaderos solares activos de tipo mixto.* Estos tipos de secaderos combinan las características de los secaderos integrales y los distribuidos. Los componentes típicos son los indicados para los secaderos indirectos con la salvedad de que la cámara de secado es de algún material translúcido que permite que el producto absorba directamente la radiación, al igual que en los sistemas directos.

#### **Secaderos solares pasivos.**

Los sistemas solares de circulación natural, llamados pasivos para distinguirlos de los sistemas que utilizan ventiladores para forzar el flujo de aire, dependen totalmente de la energía solar [72]. En ellos, el aire precalentado por la radiación solar circula a través del producto mediante fuerzas de flotabilidad (diferencias de densidad) o/y como resultado de la presión del viento.

Aunque presentan grandes ventajas frente al secado natural, son menos eficientes que los sistemas activos; sin embargo, pueden ser la opción más atractiva para emplazamientos remotos en zonas rurales o para áreas geográficas donde la electricidad es escasa.

a) *Secaderos solares pasivos de tipo integral.* También llamados sistemas solares pasivos directos. Al igual que en los sistemas activos directos, su principal característica está en que la cámara de secado cumple la función de colector recibiendo la radiación solar. Los secaderos de este tipo son más baratos y más sencillos de construir que los distribuidos, para la misma capacidad de carga, y el mantenimiento que requieren es escaso. Sin embargo, su eficiencia es baja debido a la simplicidad del diseño y al escaso control que se posee sobre el proceso de secado, siendo éste uno de sus principales inconvenientes. Otra desventaja importante de estos dispositivos es la baja velocidad de secado provocada por el reducido flujo de aire. Para evitar este hecho, es habitual la instalación de una chimenea que favorezca la circulación y renovación del aire desecante. Básicamente existen dos tipos de secaderos dentro de los sistemas integrales: secadero solar en caja y secadero tipo invernadero.

b) *Secaderos solares pasivos de tipo distribuido.* También denominados secaderos solares pasivos indirectos. En ellos, el producto a secar se encuentra en bandejas

dentro de una cámara de secado opaca y es calentado por el aire circulante, que proviene de un colector solar. Un secadero de este tipo se compone de las siguientes unidades básicas: colector solar de precalentamiento de aire, cámara de secado, conductos de unión convenientemente aislados y chimenea para favorecer el flujo de aire.

Su principal inconveniente se encuentra en las fluctuaciones de la temperatura del aire precalentado, que provoca dificultades para mantener las condiciones constantes en la cámara. Además, requieren mayores inversiones de capital que los secaderos pasivos integrales, siendo también más compleja la manipulación del producto.

Sin embargo, se consiguen temperaturas de operación más elevadas que en los secaderos solares directos y obtienen productos de mayor calidad. Destaca su mayor eficiencia ya que se pueden diseñar los elementos por separado optimizando al máximo cada uno de ellos.

**c) Secaderos solares pasivos de tipo mixto.** Al igual que en los secaderos activos mixtos, este tipo de sistemas combina las características de los secaderos integrales y distribuidos. Así, poseen, básicamente, las mismas características estructurales que los secaderos pasivos del tipo distribuido, pero con la diferencia de que las paredes de la cámara de secado son de material transparente, de manera que la radiación solar incide directamente sobre el producto (tipo integral).

En la tabla 3.9 se muestra una comparación entre los secaderos solares de circulación natural integral y distribuido.

	Tipo integral	Tipo distribuido
Modo de transferencia de calor al producto	Radiación y convección	Convección
Componentes	Cámara de secado translúcida y Chimenea	Calentador solar Cámara de secado Conducto de unión y Chimenea
Costes iniciales	Menores	Mayores
Construcción, operación y mantenimiento	Sencillez de construcción y reducido mantenimiento	Estructuras algo más complejas y mayor dificultad en la carga y descarga del material
Eficiencia	Menor que en sistemas distribuidos por el escaso control posible	Mayor por el diseño eficiente de sus componentes

Tabla 3.9: Comparación entre los secaderos solares pasivos integral y distribuido.

Para un óptimo funcionamiento de los sistemas mixtos y distribuidos, tanto activos como pasivos, es fundamental el diseño eficiente de los colectores de aire instalados. A continuación se describe la tipología general existente de sistemas de calentamiento de aire.

### **3.3.4. Captadores solares de aire para aplicaciones de secado.**

Por su sencillez de construcción y utilización y su reducido coste, dichos dispositivos son considerados esenciales para cualquier sistema de calentamiento solar. Los captadores solares de aire abarcan aplicaciones muy variadas, siendo la más destacada la relativa a su utilización en el secado de productos agrícolas y subproductos biomásicos, con el objetivo de disminuir el consumo de combustible para la obtención de la energía térmica necesaria para el secado [90].

Un captador solar consta básicamente de una superficie absorbadora (usualmente pintada de negro) que absorbe la radiación solar incidente y la transmite en forma de calor al fluido de trabajo, siendo éste, para aplicaciones de secado, habitualmente aire.

El diseño eficiente de un captador solar, como unidad de precalentamiento del aire desecante, es imprescindible para el correcto funcionamiento de los sistemas de secado indirectos y mixtos, activos o pasivos.

En general, se pueden clasificar en calentadores de concentración o calentadores de placa plana. En los colectores de concentración se consiguen temperaturas de trabajo mayores que en los de placa plana. Sin embargo, para la elevación de temperatura requerida en las aplicaciones de secado (entre 10 y 35 °C por encima de la temperatura ambiente) y por sus mejores condiciones tecno-económicas, los captadores solares de placa plana son más utilizados que los de concentración. Según Ekechukwu [91], los colectores solares de placa plana se clasifican en dos grupos: con superficie absorbadora descubierta y con superficie absorbadora cubierta. Las diferentes configuraciones existentes pretenden obtener una mayor eficiencia y durabilidad, así como una disminución del coste de construcción y mantenimiento. A continuación se describen las tipologías más habituales.

#### **Captadores solares de aire de placa plana sin cubierta.**

Los colectores solares de placa plana y sin cubierta representan los sistemas de calentamiento de aire más simples y de menor coste de construcción. Consisten básicamente en una superficie absorbadora, un conducto de aire y un espesor de aislamiento (figura 3.11), produciéndose la transferencia de calor al aire por la parte posterior de la placa absorbadora.

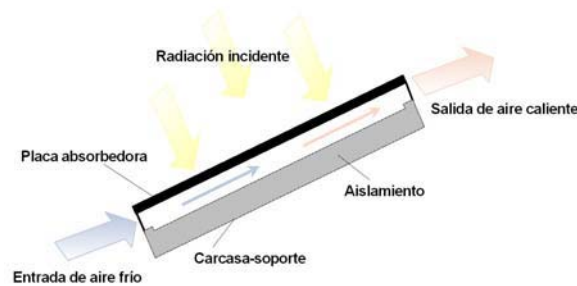


Figura 3.11: Captador solar de aire de placa plana sin cubierta.

Aunque tienen pérdidas ópticas mínimas por no disponer de cubierta transparente, presentan unas elevadas pérdidas térmicas por convección, al estar la superficie absorbedora expuesta al aire directamente, siendo éstas mayores conforme aumenta la temperatura de trabajo. No obstante, pueden resultar bastante apropiados para aplicaciones en las que se requieren elevaciones de temperatura muy bajas respecto a la temperatura ambiente ( $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). De esta forma, su simplicidad y bajo coste pueden compensar su utilización, aún teniendo menor rendimiento que otros dispositivos.

### Captadores solares de aire de placa plana con cubierta.

Para reducir las pérdidas térmicas descritas anteriormente, estos dispositivos incorporan una o dos cubiertas sobre y paralelamente a la superficie absorbedora, consiguiendo así reducir las pérdidas por convección, las pérdidas por emisión de radiación de onda larga de la placa absorbedora y proporcionar una protección a los elementos ubicados por debajo de la cubierta. En este sentido, la cubierta debe ser de un material (vidrio, plástico, metacrilato, policarbonato, etc) que permita el paso de la radiación de onda corta del sol e impida la salida de la radiación de onda larga emitida por la superficie absorbedora.

En general, se puede decir que los colectores solares planos con superficie absorbedora cubierta presentan un mayor rendimiento que los sistemas sin cubierta en procesos con moderadas elevaciones de temperatura. En contrapartida, presentan costes de construcción mayor y, en algunos casos, pueden también conllevar costes de mantenimiento superiores (rotura de cubiertas, limpieza, etc).

Estos colectores habitualmente se usan para conseguir temperaturas entre 10 y 35  $^{\circ}\text{C}$  sobre el ambiente. Los tipos más habituales son: de paso superior, de paso inferior, de cubierta suspendida y de cubierta perforada.

a) *Captadores de placa plana con cubierta y paso de aire superior.* Es la tipología más sencilla dentro de los captadores con cubierta. En ellos, el aire a calentar pasa a través del espacio limitado entre la cubierta y la superficie absorbedora (figura 3.12). De esta forma, la transferencia de energía hacia el aire se produce en la superficie superior de la placa absorbedora.

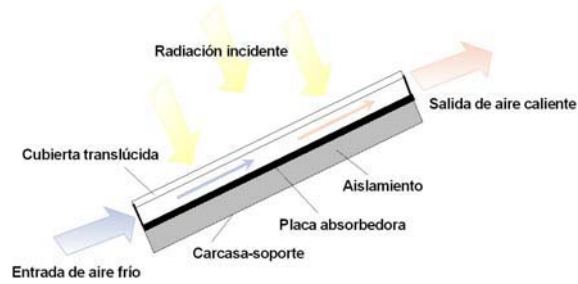


Figura 3.12: Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso superior.

b) *Captadores de placa plana con cubierta y paso de aire inferior.* En esta disposición, la superficie absorbedora se sitúa directamente bajo la cubierta transparente (figura 3.13), con una capa de aire estático separándola de la cubierta. El aire a calentar fluye entre la superficie inferior de la placa absorbedora y el aislamiento. Diferentes estudios realizados aseguran que los captadores de paso inferior son más eficientes que los de paso superior anteriormente descritos [91].

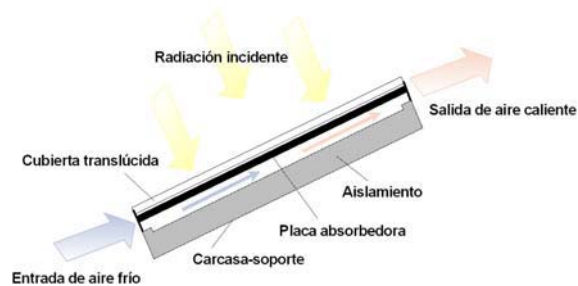


Figura 3.13: Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso inferior.

Dentro de esta tipología existen algunas configuraciones especiales, tales como absorbedor con aletas (figura 3.14) y placa absorbedora corrugada en V invertida (figura 3.15) [70, 84, 85, 92], las cuales pretenden aumentar la temperatura de salida del aire y, por consiguiente, el rendimiento del colector, en aras de una reducción de los tiempos de secado [93].



Figura 3.14: Captador solar de aire de placa plana con aletas.

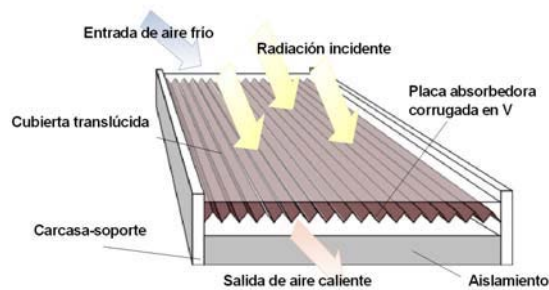


Figura 3.15: Captador solar de aire de placa plana corrugada en V.

c) **Captadores de placa suspendida.** En los captadores de placa suspendida, la superficie absorbedora se encuentra fijada entre la cubierta y el aislamiento. De esta forma, el flujo de aire circula por ambas caras del absorbedor, aumentando la superficie de transferencia de calor. Además, por la propia disposición de la superficie absorbedora, ésta se encontrará a menor temperatura y, por tanto, se reducirán las pérdidas por radiación, consiguiéndose eficiencias mayores que en los captadores de placa plana de paso superior e inferior [91]. Las configuraciones más frecuentes son las de simple paso con flujo paralelo (figura 3.16) y las de doble paso (figura 3.17).

d) **Captadores de placa perforada.** Son una modificación de los colectores de placa suspendida de simple paso. Consisten en una placa plana perforada con la que se consigue aumentar la transferencia de calor entre el aire y la placa absorbedora, disminuyendo las pérdidas térmicas al exterior y con ello, mejorará la eficiencia del sistema (figura 3.18). Se alcanza del orden de un 20 % de mejora en la eficiencia respecto al colector convencional [94], sin embargo, los costes para su fabricación aumentan considerablemente.



Figura 3.16: Captador solar de aire de placa plana suspendida de simple paso.

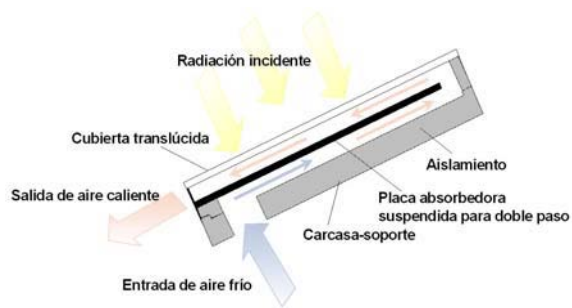


Figura 3.17: Captador solar de aire de placa plana suspendida de doble paso.



Figura 3.18: Captador solar de aire de placa plana perforada.

### 3.3.5. Parámetros de evaluación de secaderos solares.

Los parámetros más significativos que influyen en el funcionamiento de un secadero solar son [71]:

- Las características del aire de secado: temperatura, humedad relativa y caudal másico.
- Las propiedades del producto a secar: cantidad total a manejar, contenido de humedad inicial y final, su tamaño y distribución, etc.
- Y las variables dimensionales del dispositivo de secado: dimensiones físicas, configuración, etc.

En lo que se refiere al secado de subproductos para una utilización energética posterior, los parámetros que tienen mayor importancia en la evaluación de los secaderos solares se pueden resumir en los siguientes:

- Características físicas del secadero:
  - Tipo, forma, tamaño, dimensiones, etc.
  - Capacidad de secado y densidad de carga.
  - Área de transferencia de bandeja y número de bandejas, en el caso de que disponga de ellas.
  - Sistema de carga y descarga de producto.
- Variables sobre el funcionamiento térmico:
  - Tiempo y ratio de secado.
  - Temperatura y humedad relativa del aire desecante.
  - Flujo másico de aire.
  - Eficiencia del secadero.
- Parámetros económicos:
  - Coste de inversión y operación.
  - Período de retorno (payback).



### Parámetros físicos del secadero.

El tipo de secadero, sus posibilidades de operación, los materiales de cada componente, etc, son aspectos importantes a considerar en el diseño de los dispositivos de secado. Los calentadores de aire utilizan, en general, los siguientes materiales: para la superficie absorbadora, aluminio, cobre o acero galvanizado, liso o corrugado, pintado con algún material no reflectante de color negro, pinturas selectivas, etc. Para la cubierta translúcida se utiliza vidrio o, más habitualmente, algún material plástico comercial (metacrilato, policarbonato, polietileno, etc). Y como aislamientos, se emplean lana de vidrio, lana de roca o similares. En lo que se refiere a la cabina de secado, los materiales son muy diversos, típicos de construcción (acero, hormigón, madera, etc). Para las bandejas de producto se suele utilizar acero inoxidable o galvanizado.

El tamaño físico de un secadero es habitualmente un índice directo de su capacidad de secado y se refiere a la cantidad de producto que es posible secar en cada operación de carga, para unos requerimientos específicos de reducción de humedad, expresado habitualmente como  $kg_{producto\_húmedo}/día$ . Para un dispositivo concreto, la capacidad de secado varía con el tipo de producto y la cantidad de humedad a extraer, así como con el área de colector y el tamaño de la cámara de secado. También el área de bandeja y el número de bandejas disponibles da una medida indirecta de la capacidad de carga y, por tanto, serán variables necesarias a indicar en los secaderos tipo cabina.

Por otro lado, la densidad de carga determina la capacidad de un secadero para un producto específico. Es importante no sobrecargar un secadero, ya que disminuirá la eficiencia del secado. Así, la densidad de carga depende del tipo de producto, de su contenido de humedad y de las características del flujo de aire desecante utilizado. Existen algunas reglas generales [71] para estas variables (carga del secadero:  $4 kg_{producto\_húmedo}/m^2_{área\_de\_bandeja}$ , superficie de captación necesaria: 0,75 veces el área total de bandeja, flujo de aire óptimo:  $0,75 m^3/min \cdot m^2_{área\_de\_bandeja}$ , etc). Sin embargo, la experimentación para cada tipo de producto y secadero se considera necesaria para obtener conclusiones óptimas sobre estos aspectos.

El sistema de carga y descarga de los materiales es otra consideración básica para los secaderos comerciales, debido fundamentalmente al coste que supone. Este problema podría ser solucionado mediante la utilización de un sistema continuo en el que el producto húmedo es cargado por un extremo y descargado por otro.

### Tiempo y ratio de secado.

La duración del proceso de secado es el parámetro más importante en la evaluación de un secadero, interesando, evidentemente, el menor valor posible. Se estima como el tiempo que transcurre desde que el secadero es cargado con el producto húmedo

hasta que el producto alcanza el contenido de humedad deseado, frecuentemente dado en horas o días, incluyéndose en este tiempo los períodos en los que no se dispone de radiación solar.

Las variaciones del contenido en humedad del producto frente al tiempo marcan el ratio de secado. La comparación de los ratios de secado de diferentes subproductos o modos de funcionamiento ha sido ampliamente estudiada [38,95–99], correspondiendo para un mismo instante los valores más bajos del ratio de secado al proceso más óptimo. Para secaderos de gran capacidad, es interesante chequear el ratio de secado en diferentes localizaciones para controlar la uniformidad alcanzada.

### **Temperatura y humedad relativa del aire desecante.**

Como ya se ha indicado anteriormente, ambos parámetros son cruciales en el proceso de secado. Incrementos de la temperatura del aire dan lugar a aumentos del ratio de secado en dos sentidos. Por un lado, el aire presenta más capacidad para extraer humedad del producto y, por otro lado, el mayor calentamiento del producto incrementará su presión del vapor. Sin embargo, existe una limitación en el aumento de la temperatura correspondiente a la elevación de las pérdidas de calor en el sistema.

En lo que respecta a la humedad relativa, la capacidad desecante del aire puede aumentarse bien mediante la deshumidificación o bien mediante el calentamiento (disminución de la humedad relativa), siendo este último el sistema más utilizado.

Por otro lado, si el aire de salida presenta aún capacidad de secado, la recirculación del mismo posibilita la utilización de su energía térmica y da lugar a aumentos en la eficiencia energética de la operación de secado. Algunos trabajos realizados arrojan fracciones posibles de recirculación superiores al 80 % con disminuciones de consumo de energía del orden del 50 % [71].

### **Caudal másico de aire.**

Es otro de los parámetros importantes de control en el proceso de secado. Con el aumento del flujo de aire disminuye la temperatura de proceso y se reducen las pérdidas. Sin embargo, la eficiencia del secado puede verse afectada negativamente debido a la posibilidad de que al aire no esté el tiempo suficiente en contacto con el producto para provocar su desecación.

Por otro lado, un flujo de aire insuficiente generalmente produce un aumento de la temperatura del mismo, pero da lugar a una extracción de humedad más lenta.

Se ha comprobado en productos agrícolas que aumentos del flujo de aire por encima de un nivel no producen un efecto significativo en el ratio de secado. En general, puede

resultar positivo la utilización de flujos más altos al comienzo del proceso de secado y más bajos en el período de velocidad de secado decreciente [71].

### Parámetros de eficiencia en el secadero solar.

La eficiencia de un sistema de secado habitualmente se expresa a través de diferentes parámetros tales como: eficiencia del secadero, eficiencia del captador solar, ratio de extracción de humedad específico, capacidad evaporativa, etc [71]. A continuación se presentan algunos de estos parámetros.

**a) Eficiencia del colector solar de aire.** Es una variable habitual a controlar en los dispositivos de secado dotados de calentadores solares de aire [91, 100–107]. Valores comunes para calentadores de placa plana en convección natural se encuentran en el rango del 40-60 % [71], siendo mayores para convección forzada con el caudal másico de aire adecuado.

La eficiencia del calentador de aire se define según se muestra en la ecuación 3.70.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_c} \quad (3.70)$$

siendo:  $A_c$  la superficie de captación ( $m^2$ ),  $I_T$  la radiación total incidente sobre la superficie inclinada del colector ( $W/m^2$ ) y  $Q_u$  el calor útil que desplaza el aire a su paso por el colector ( $W$ ), dado por la expresión 3.71.

$$Q_u = m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{fo} - T_{fi}) \quad (3.71)$$

donde  $m_a$  es el caudal másico de aire ( $kg/s$ ),  $c_{pa}$  el calor específico del aire ( $J/kg^\circ C$ ),  $T_{fo}$  la temperatura de salida del aire en el colector ( $^\circ C$ ) y  $T_{fi}$  la temperatura de entrada del aire en el colector ( $^\circ C$ ).

Por tanto, la expresión final para la determinación del rendimiento del colector resulta:

$$\eta = \frac{m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{fo} - T_{fi})}{I_T \cdot A_c} \quad (3.72)$$

**b) Eficiencia del secado.** Como se indicó anteriormente (ec. 3.50), es posible indicar la eficiencia del secado en términos de temperatura. Así mismo, otra variable a destacar es la eficiencia en términos de humedad eliminada por el aire desecante (“pick-up efficiency”),  $\eta_p$ , cuya expresión se presentó en la ec. 3.51. Ésta también se puede determinar mediante la ecuación 3.73 [71, 105]:

$$\eta_p = \frac{W_o - W_t}{\rho \cdot V_a \cdot t \cdot (\omega_{2a} - \omega_1)} \quad (3.73)$$

siendo  $W_o$  el peso del material inicial ( $kg$ ),  $W_t$  el peso del material en el tiempo  $t$  ( $kg$ ),  $\rho$  la densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  $V_a$  el flujo volumétrico de aire ( $m^3/s$ ),  $t$  el tiempo ( $s$ ),  $\omega_{2a}$  la humedad absoluta del aire a la salida del secadero en condiciones de saturación adiabática ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ) y  $\omega_1$  la humedad absoluta del aire a la entrada del secadero ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ).

El valor de la “pick-up efficiency” disminuye generalmente con el descenso del contenido de humedad en el producto [71].

**c) Eficiencia del secadero solar.** La eficiencia del secadero evalúa conjuntamente el funcionamiento térmico del sistema de secado, incluyendo la eficiencia del captador y de la cámara de secado. Es una medida de la efectividad de la energía incidente, esto es, cómo la radiación solar se utiliza en el secado de los productos [71, 108]. Valores habituales de este parámetro se encuentran en el rango 10-50 %, dependiendo del modo de funcionamiento y del tipo de secadero.

Para secaderos solares de convección natural, la eficiencia del sistema de secado se expresa mediante la ecuación 3.74.

$$\eta_s = \frac{(W_o - W_t) \cdot L_v}{H_T \cdot A_c} \quad (3.74)$$

con  $H_T$  la radiación horaria incidente sobre la superficie inclinada del colector ( $kJ/m^2$ ) y  $L_v$  el calor latente de vaporización del agua para la temperatura del aire de salida ( $kJ/kg$ ).

Para los secaderos solares de convección forzada es necesario introducir el consumo de energía producido por los ventiladores,  $P_v$  ( $kJ$ ), resultado la expresión 3.75.

$$\eta_s = \frac{(W_o - W_t) \cdot L_v}{H_T \cdot A_c + P_v} \quad (3.75)$$

Para los secaderos solares híbridos, en los que se utiliza una segunda fuente de energía adicional, p.ej. biomasa, la eficiencia del sistema se puede representar mediante la ecuación 3.76.

$$\eta_s = \frac{(W_o - W_t) \cdot L_v}{(H_T \cdot A_c + P_v) + (m_c \cdot PCI)} \quad (3.76)$$

siendo  $m_c$  la masa del combustible utilizado ( $kg$ ) y  $PCI$  su poder calorífico inferior ( $kJ/kg$ ).

La eficiencia del secadero expresada como se ha indicado en las ecuaciones 3.74, 3.75 ó 3.76, es el parámetro habitualmente utilizado para caracterizar su funcionamiento puesto que incluye, directa o indirectamente, variables relacionadas con las pérdidas térmicas del sistema.

Para obtener el rendimiento diario bastaría con introducir en las expresiones anteriores los valores diarios de las variables, esto es, cantidad de agua extraída del producto al día, radiación diaria incidente sobre el colector, energía consumida por los ventiladores al cabo del día y masa de combustible diaria utilizada como fuente auxiliar [108].

Sin embargo, algunos autores establecen otros parámetros como ratios de eficiencia del secadero.

Así, la capacidad evaporativa,  $E$ , es un índice sugerido por Jannot [109] que considera el efecto de la temperatura del aire ambiente y su humedad en el funcionamiento del secadero solar (ecuación 3.77).

$$E = m_a \cdot (\omega_a - \omega_{2e}) \quad (3.77)$$

siendo  $E$  la capacidad evaporativa ( $kg/s$ ),  $m_a$  el caudal másico de aire ( $kg/s$ ),  $\omega_a$  la humedad absoluta del aire ambiente ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ) y  $\omega_{2e}$  la humedad absoluta del aire a la salida del secadero en equilibrio con el producto ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ).

Su determinación práctica [109], para unas condiciones atmosféricas conocidas, puede hacerse mediante la ecuación 3.78.

$$E = \frac{m_a}{1 + \omega_a} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \quad (3.78)$$

donde  $\omega_2$  es la humedad absoluta del aire a la salida del secadero ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ) y  $\omega_1$  la humedad absoluta del aire a la entrada del mismo ( $kg_{agua}/kg_{aire}$ ).

El ratio de extracción de humedad específico,  $SMER$ , es otro índice de funcionamiento del secadero, siendo el inverso del consumo de energía unitario,  $CEU$  (definido en la ec. 3.48). Para su determinación se utiliza la expresión 3.79 [71]. Las unidades de  $SMER$  son ( $kg/J$ ).

$$SMER = \frac{\text{agua evaporada durante el proceso de secado}}{\text{energía suministrada al secadero}} \quad (3.79)$$

Otro parámetro propuesto por Arinze [97] es la efectividad del aire de secado, calculado (ec. 3.80) como la diferencia entre la humedad del aire ambiente ( $\omega_a$ ) y la humedad del aire a la salida del secadero ( $\omega_2$ ).

$$\omega_e = (\omega_2 - \omega_a) \quad (3.80)$$

**Parámetros económicos.**

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

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

## Capítulo 4

# Cuantificación y caracterización de subproductos.

### 4.1. Introducción.

La producción térmica o/y eléctrica mediante combustión a partir de subproductos agroindustriales, en localizaciones cercanas a donde se generan, presenta ventajas frente a otros tipos de biomasa y frente a otros sistemas de generación de energía:

- La producción de grandes cantidades de residuos y su concentración en una localización determinada disminuye tanto los costes de recogida como los de transporte.
- Algunas propiedades físicas y energéticas adecuadas (alto contenido en volátiles, carbono y oxígeno, elevado poder calorífico, balance de  $CO_2$  nulo, reducidas emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, etc).
- Reducción del impacto ambiental de los subproductos que se consideran nocivos para el medio (por ejemplo, los residuos procedentes de las industrias transformadoras de aceituna).

Sin embargo, esta utilización energética de los subproductos tiene sus limitaciones [110,111]. Para hacerla viable técnica y económicamente será necesario considerar una serie de aspectos:

- Necesidad de pretratamiento para acondicionar el residuo a unas condiciones apropiadas de uso. Puesto que, en general, los subproductos agroindustriales presentan elevados niveles de humedad, el pretratamiento más importante que se considera en la utilización de la biomasa con fines energéticos, como ya se ha comentado, es el secado, cuyo proceso conlleva altos

consumos energéticos, pero que, sin embargo, produce importantes mejoras en las características físicas y energéticas del subproducto (densificación o aumento de la densidad aparente, provocando reducción de costes de transporte, adecuación para otros pretratamientos, p.ej. trituración, y mejora global del comportamiento térmico).

- Selección de la tecnología de aprovechamiento más adecuada. Para ello, debe realizarse un exhaustivo análisis de las propiedades concretas del residuo que se pretende aprovechar, considerando que los combustibles biomásicos presentan propiedades muy diferentes en función de su tipo, tecnología de transformación, pretratamientos recibidos, procedencia, condiciones climatológicas a las que ha estado expuesto, sistema de recogida y transporte, etc [29, 112].
- Logística de subproductos. Será necesario establecer una localización estratégica que permita disponer de grandes cantidades de residuo y que reduzca los costes de transporte, ya que éste, junto con el coste de pretratamiento, son las mayores partidas en una valoración económica de la utilización energética.

Con las premisas anteriores, para plantear una alternativa viable de la utilización de los residuos procedentes de la industria de transformación de la aceituna, como punto de partida se plantea necesario la cuantificación y caracterización de los diferentes subproductos.

En este capítulo, por un lado, se detallan las cantidades de subproductos generados en Extremadura, poniéndose de manifiesto la elevada producción de los mismos en la región. Este factor, sumado a las necesidades de secado para un óptimo aprovechamiento térmico y a la gran disponibilidad de energía solar (capítulo 1), hacen que su aplicación conjunta se considere potencialmente interesante.

Y por otro lado, se describen las propiedades físicas, químicas y energéticas fundamentales de los subproductos (orujo húmedo tres fases, alperujo y alpechín) principalmente relacionadas con el proceso de secado y con su utilización energética posterior vía termoquímica. En concreto, se han estudiado las siguientes características: humedad, densidad aparente, análisis inmediato, análisis elemental, poder calorífico, densidad energética, coeficientes convectivos, difusividad efectiva y energía de activación.



## 4.2. Cuantificación de los residuos.

### 4.2.1. Cantidades de subproductos generados en Extremadura.

Aunque, como se ha indicado, el residuo obtenido en la mayoría de almazaras es alperujo, se va a realizar una estimación completa de los subproductos generados en la producción de aceite de oliva en Extremadura, determinando las cantidades de orujo y alpechín resultantes del sistema tres fases y las de alperujo generadas en el sistema dos fases. La humedad que presenta cada uno de estos residuos oscila entre un 65-70 % en el alperujo, un 50-55 % en el orujo y un 90-95 % en el alpechín.

Conociendo la proporción de aceituna molturada en cada sistema de elaboración y el porcentaje de subproducto que se genera sobre el total de materia prima, es posible determinar las cantidades totales producidas de cada uno de los residuos.

Como datos de partida se han tomado los valores oficiales relativos a la producción anual de aceite en la región, proporcionados por la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Extremadura, correspondientes a los últimos seis años (1997-2003).

Puesto que se parte de la producción de aceite, es necesario considerar en cada comarca el rendimiento graso fijado para la aceituna cultivada, esto es, 0,2 y 0,16 t de aceite por t de aceituna para las comarcas de las provincias de Badajoz y Cáceres, respectivamente.

En lo que se refiere al porcentaje de aceituna molturada en cada sistema de elaboración, se ha estimado que el 80 % del aceite se obtiene mediante el sistema dos fases y el 20 % restante por el sistema tres fases.

Y por último, la proporción considerada de subproducto producido sobre el total de materia prima es de 0,8  $t_{alperujo}/t_{aceituna}$ , 0,48  $t_{orujo}/t_{aceituna}$  y 1,12  $t_{alpechín}/t_{aceituna}$  [3, 27].

Por tanto, las cantidades medias de alperujo, orujo y alpechín generadas en un año se determinarán a partir de las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3. Como resumen, en la tabla 4.1 se muestran las expresiones utilizadas en la estimación, para cada subproducto y para cada comarca, en función de la producción de aceite,  $P_{aceite}$ .

$$\text{Alperujo (t/año)} = \frac{\text{Producción de aceite (t/año)} \times 0,8 \times 0,8}{\text{Rendimiento graso comarcal (t aceite/t aceituna)}} \quad (4.1)$$

$$\text{Orujo húmedo (t/año)} = \frac{\text{Producción de aceite (t/año)} \times 0,2 \times 0,48}{\text{Rendimiento graso comarcal (t aceite/t aceituna)}} \quad (4.2)$$

$$\text{Alpechín (t/año)} = \frac{\text{Producción de aceite (t/año)} \times 0,2 \times 1,12}{\text{Rendimiento graso comarcal (t aceite/t aceituna)}} \quad (4.3)$$

	Alperujo	Orujo	Alpechín
Comarcas Badajoz	$3,2 \cdot P_{aceite}$	$0,48 \cdot P_{aceite}$	$1,12 \cdot P_{aceite}$
Comarcas Cáceres	$4 \cdot P_{aceite}$	$0,6 \cdot P_{aceite}$	$1,4 \cdot P_{aceite}$

Tabla 4.1: Ecuaciones para la determinación de las cantidades de residuos generados en cada comarca.

La producción media de cada subproducto, obtenida a partir de la metodología descrita, es de aproximadamente 120000 toneladas de alperujo, 18500 toneladas de orujo y 43000 toneladas de alpechín, de las cuales el 73 % se generan en la provincia de Badajoz y el 27 % en la de Cáceres.

La distribución por comarcas para alperujo, orujo y alpechín se refleja en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, respectivamente, con unos porcentajes de producción para alperujo (similares en los otros subproductos) representados en la figura 4.4. Como se aprecia, destacan las comarcas de Almendralejo (15 % de la producción), Castuera (13 % de la producción), Puebla de Alcocer y D. Benito (11 % y 10 % de la producción cada una) en las que se concentra gran parte de la producción de residuo en Extremadura.

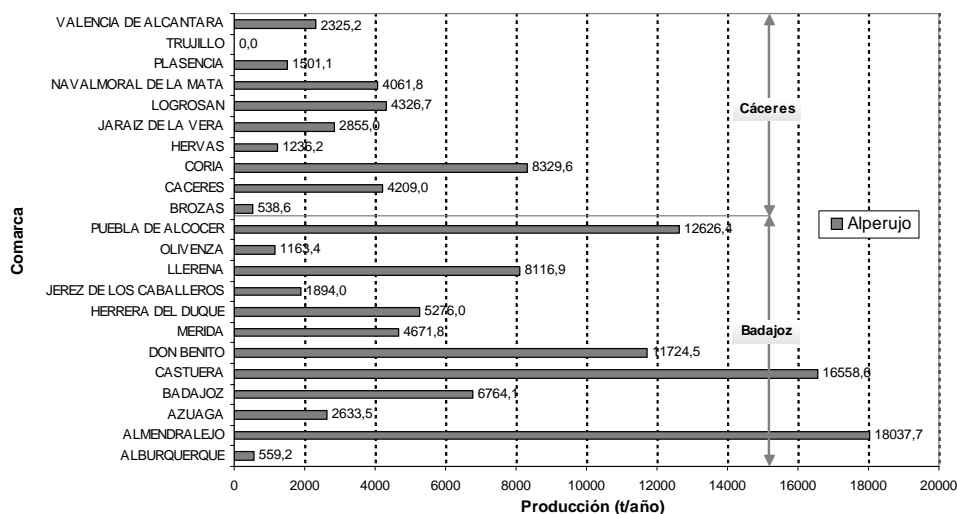


Figura 4.1: Producción comarcal de alperujo en Extremadura.

En la figura 4.5 se presentan los mapas de distribución por comarcas de los diferentes residuos. Mediante la escala de color asociada a la producción de cada uno de los subproductos, se puede tener una idea aproximada de los puntos más interesantes para la ubicación de una planta de aprovechamiento de los mismos. Así, las dos zonas de mayor concentración son Almendralejo, que puede absorber además las producciones de otras comarcas próximas de elevada generación de subproductos (Llerena y

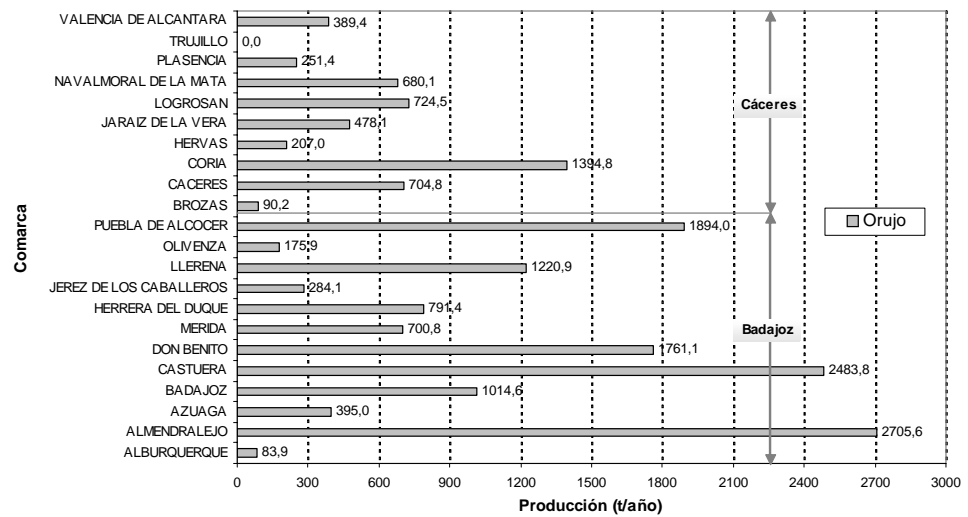


Figura 4.2: Producción comarcal de orujo en Extremadura.

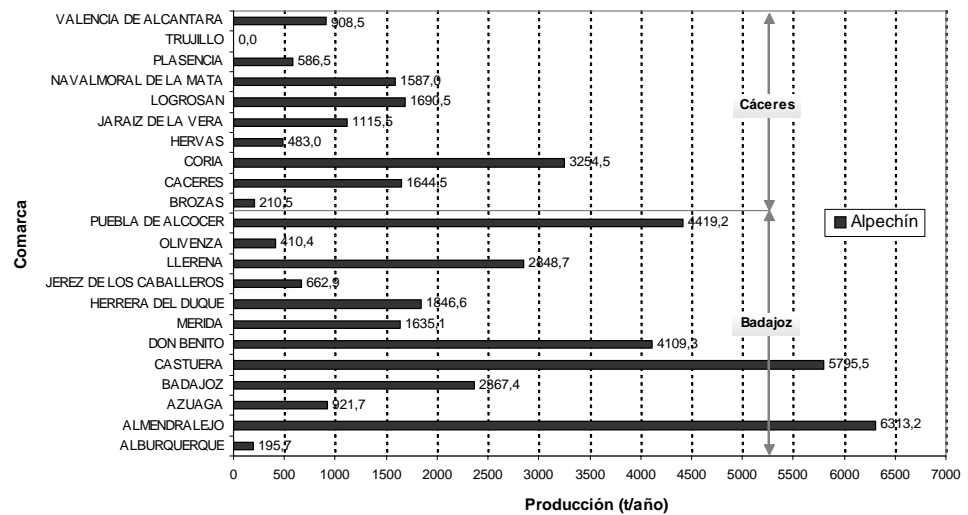


Figura 4.3: Producción comarcal de alpechín en Extremadura.

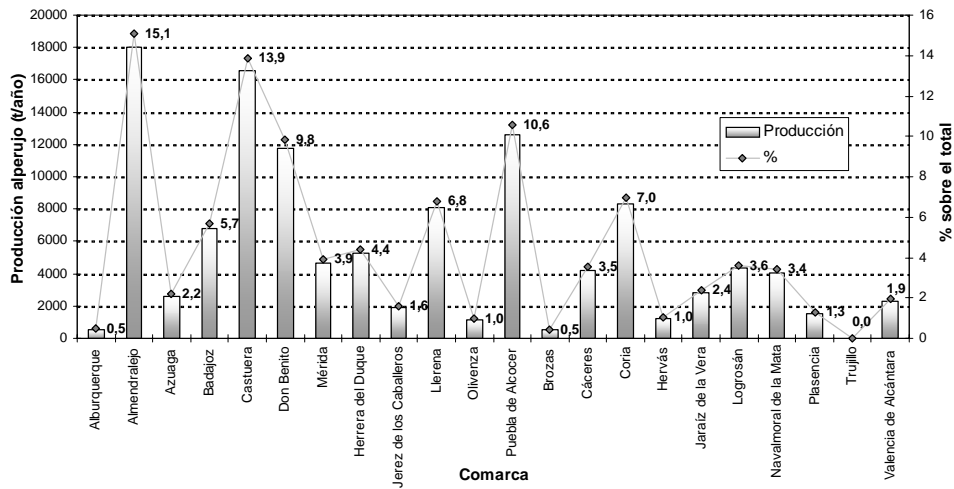


Figura 4.4: Porcentaje sobre la producción total de alperujo por comarca.

Badajoz), y Castuera, cercana también a otras zonas de alta producción (D. Benito y Puebla de Alcocer).

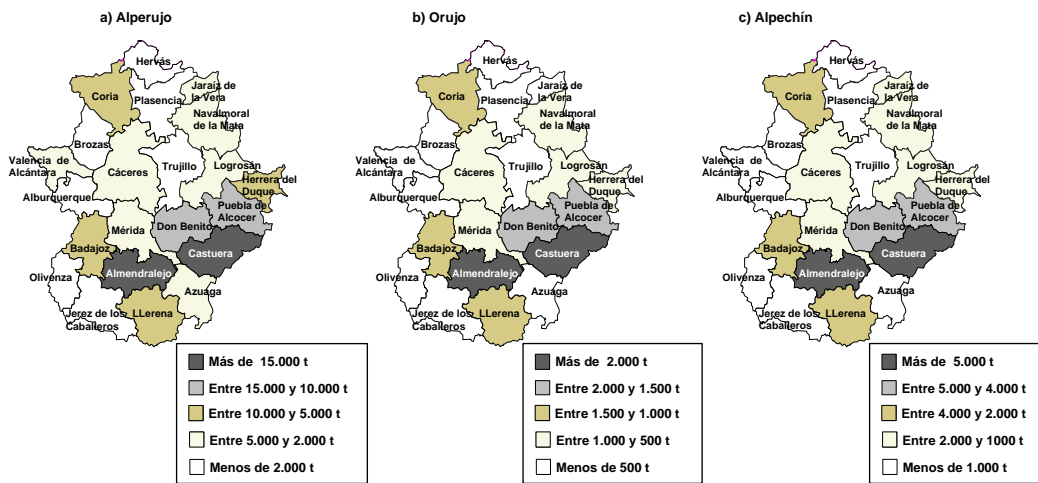


Figura 4.5: Mapas de distribución de los subproductos en Extremadura por comarcas. a) Alperujo; b) Orujo; c) Alpechín.

#### 4.2.2. Cuantificación de subproductos para una planta tipo.

El secado solar de residuos procedentes de la industria almazarera, tal y como se propone en este trabajo, sugiere como necesario seleccionar una ubicación de la planta de tratamiento y las cantidades a manejar en dicha planta.

Para ello, se van a cuantificar, a modo de ejemplo, los subproductos generados por cada mil toneladas de producto entrante (aceituna) en una instalación con línea de secado solar de subproductos y repaso previo en tres fases del alperujo.

El esquema del proceso sería el presentado en la figura 4.6. Como se indica, la almazara dos fases genera aceite de oliva y alperujo, siendo este último conducido a la línea de repaso en tres fases, donde se obtiene aceite, orujo 3f y alpechín [11, 27, 113].

Ambos subproductos, para su posible utilización en una instalación térmica, necesitan como pretratamiento previo su secado. Así, mediante el almacenamiento adecuado y considerando las disponibilidades de capacidad del secadero y las condiciones ambientales, tanto el orujo como el alpechín son tratados en el secadero solar híbrido reduciendo los contenidos de humedad hasta niveles aproximados del 10 y 20 %, respectivamente.

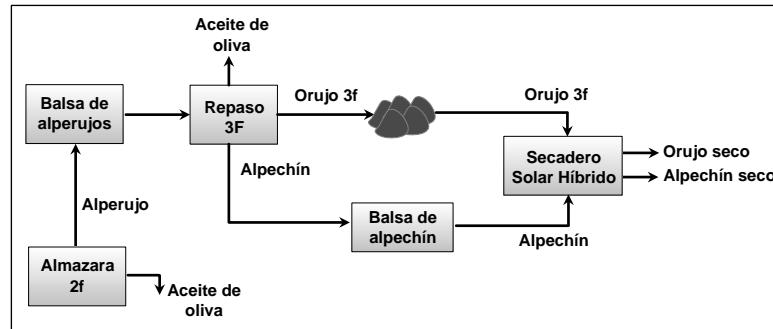


Figura 4.6: Esquema de planta de secado de subproductos.

A partir del esquema anterior, considerando las características de los diferentes dispositivos y de los productos generados, se obtiene el balance de masa de la planta (figura 4.7). Como se refleja, para 1000 t de aceituna entrante se obtienen 200 t de aceite y 800 t de alperujo con un 70 % de humedad. Este alperujo se separa en fracciones mediante un repaso en tres fases, generándose 8 t de aceite, 452,57 t de orujo (55 % de humedad) y 339,43 t de alpechín (90 % de humedad). Mediante la línea de secado solar híbrido posterior se reducen los contenidos de humedad del orujo y del alpechín, resultando una cantidad de 226,29 t (10 % humedad) y 42,43 t (20 % humedad), respectivamente.

Las proporciones estimadas permitirán, mediante un análisis similar y a partir de los resultados experimentales obtenidos en el prototipo, plantear una propuesta (réplica del prototipo) de sistema de aprovechamiento de los subproductos (capítulo 9) caracterizado por los metros cuadrados de superficie necesaria y la adecuación del sistema de carga y descarga.

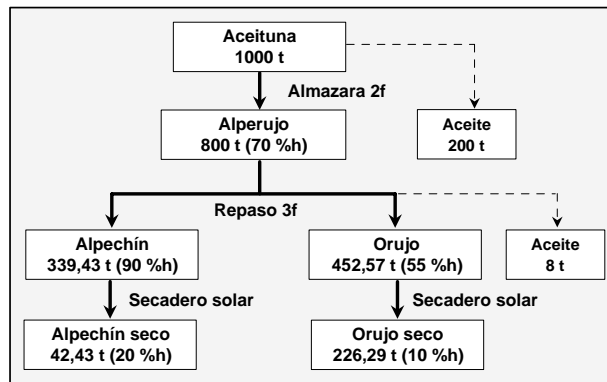


Figura 4.7: Balance de masa en planta tipo.

### 4.3. Caracterización de los subproductos.

Como se ha indicado en epígrafes anteriores, para obtener conclusiones sobre el comportamiento en el proceso de secado solar de los residuos de estudio (orujo, alperujo y alpechín), para modelar de la forma más aproximada el funcionamiento del prototipo de secadero solar, y para, finalmente, realizar un diseño adecuado de las instalaciones de tratamiento y secado de estos subproductos, es necesario realizar una caracterización exhaustiva de los mismos.

En este sentido, se han estudiado de forma experimental las propiedades físicas, químicas y energéticas que guardan una estrecha relación con el proceso solar de eliminación de humedad y también con el aprovechamiento térmico de un material: humedad, densidad aparente, análisis inmediato, análisis elemental, poder calorífico, densidad energética, coeficientes convectivos, difusividad efectiva y energía de activación. Además, en algunos casos, para la determinación de los parámetros (p.ej. determinación de los coeficientes convectivos o la difusividad efectiva) ha sido necesario utilizar un análisis teórico similar al propuesto por diversos autores. En la mayoría de los casos, los resultados obtenidos se han comparado con los existentes para otros productos biomásicos.

#### 4.3.1. Características físicas.

Las propiedades físicas más interesantes de un producto, para el estudio de los procesos de secado, son la humedad y la densidad aparente. Ambas van a influir en gran medida tanto en el tiempo de secado como en el diseño y dimensionamiento de las instalaciones.

### Humedad.

La humedad es uno de los parámetros más condicionantes en el aprovechamiento de un subproducto biomásico, además de ser la propiedad clave en el análisis de la cinética de secado. Como ya se indicó, cuanto mayor sea el contenido de humedad del producto, las características del mismo serán menos adecuadas para el aprovechamiento energético y, por tanto, requerirá un mayor tratamiento de secado.

Esta propiedad va a influir, de forma directa o indirectamente, en el tiempo y velocidad de secado, en la temperatura de producto, en el sistema de carga y descarga del dispositivo, en la densidad y capacidad de carga del secadero, en la eficiencia del proceso de secado y en la optimización de otros procesos (pretratamientos, almacenamiento, aprovechamiento posterior), etc [34, 37, 71].

La determinación del contenido de humedad en los subproductos se ha realizado según la norma ASTM D 2016-65, utilizando balanza de precisión de 0,1 g y estufa a temperatura de 104 °C. Se han llevado a cabo seis ensayos para cada tipo de producto. En la tabla 4.2 se muestra el intervalo de valores de humedad para los diferentes residuos.

	Orujo 3f	Alperujo	Alpechín
Humedad (%)	50-58	68-72	88-92

Tabla 4.2: Humedad wb. de los residuos antes del proceso de secado.

El alperujo procedente de la almazara presenta una humedad muy elevada, del orden del 70 %, lo que exige su pretratamiento para permitir un aprovechamiento vía termoquímica. De forma generalizada, el tratamiento que se realiza es el repaso en tres fases, recuperando parte del aceite de oliva residual que aún contiene.

Por otro lado, el orujo y el alpechín generados fundamentalmente, y como se acaba de indicar, a partir de la valorización del anterior en la operación de repaso tres fases, o bien, en mucha menor proporción en las almazaras tres fases, presentan también una humedad alta, del orden del 55 y 90 %, respectivamente. De ambos, por las elevadas cantidades generadas, por su dificultad de tratamiento y por su, hasta ahora, reducida aplicación, resulta ser el alpechín el subproducto más problemático.

Desde esta óptica, para su posible combustión combinada [3,11] u otras aplicaciones similares, se considera fundamental la mejora de los sistemas de secado y concentración de alpechín, reduciendo al máximo los consumos energéticos de la operación y permitiendo dar solución a un residuo altamente contaminante y de escaso valor.

Mediante la utilización del prototipo de secadero solar, se ha reducido la humedad de los subproductos hasta los niveles mostrados en la tabla 4.3. Como se indica, valores medios habituales registrados han sido: 12 % de humedad en el orujo seco, 15 % de

humedad en el alperujo seco y 20 % de humedad en el alpechín seco, considerándose éstos adecuados para la mayoría de las aplicaciones térmicas, y similares a los de otros residuos y combustibles biomásicos [114,115]. Sin embargo, para hacer posible la comparación de los ratios de secado en los diferentes subproductos, se ha establecido una humedad límite, en todos los casos, del 20 %.

	Orujo seco	Alperujo seco	Alpechín seco
Humedad (%)	10-15	13-20	15-25

Tabla 4.3: Humedad wb. de los residuos posterior al proceso de secado.

Dependiendo del porcentaje de humedad final en el producto, esto es, de la cantidad de agua evaporada, los ratios de secado variarán considerablemente. A modo de ejemplo, en la figura 4.8 se muestra, para una cantidad inicial de producto de 1 t y humedades de orujo, alperujo y alpechín de 55, 70 y 90 %, respectivamente, las relaciones entre la humedad final en base húmeda en el producto (%) con la cantidad de producto obtenida (*kg*) y con la cantidad de agua evaporada (*kg*).

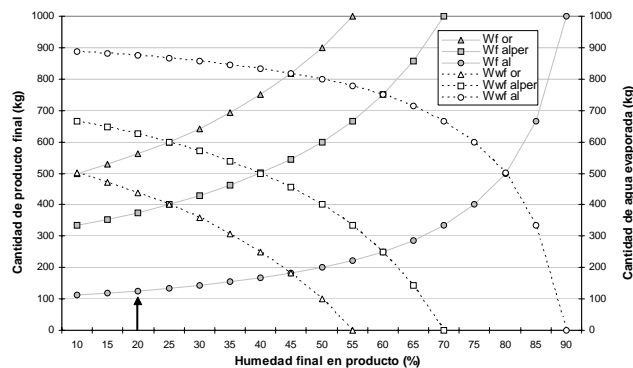


Figura 4.8: Cantidad final de producto y agua evaporada para diferentes niveles de humedad.

### Densidad aparente.

Este parámetro está relacionado con múltiples factores: humedad del producto, sistema de procesado, granulometría, etc. Se define como el peso por unidad de volumen de material simplemente apilado. Su determinación es imprescindible para valorar las necesidades de superficie de almacenamiento y transporte, así como para el diseño de los sistemas de secado (capacidad de carga).

La mayoría de los residuos agrícolas presentan bajas densidades aparentes, siendo éste uno de los principales inconvenientes para su utilización energética rentable, puesto



que condiciona su procesado, transporte, almacenamiento y combustión.

La determinación de la densidad aparente (que se basa en el volumen total, incluyendo el volumen de sólido, el volumen de poros y el volumen intersticial entre las partículas) se ha realizado según la Norma ASTM E 873-82.

En la tabla 4.4 se indican los valores obtenidos de esta propiedad en base húmeda para cada uno de los residuos. Se observa (para las humedades de la tabla 4.2) que los subproductos que presentan una mayor densidad son el alperujo y el alpechín con valores respectivos en torno a los 1065 y 1025  $kg/m^3$ , próximos a los del agua; el orujo es el residuo con menor valor ( $\sim 700 kg/m^3$ ).

	Orujo	Alperujo	Alpechín
Densidad aparente ( $kg/m^3$ )	703,2	1065,4	1022,4

Tabla 4.4: Densidad de los residuos antes del proceso de secado.

Por otro lado, se han calculado las densidades aparentes de los subproductos secos, esto es, la que presentaban después del proceso de secado hasta el rango de humedad dado en la tabla 4.3. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.5. Como se aprecia, es el alpechín el residuo de mayor densidad ( $\sim 1035 kg/m^3$ ), con valores muy próximos, y en algunos casos, superiores a los registrados para el alpechín húmedo (tabla 4.4). Por otro lado, el alperujo reduce considerablemente su valor ( $\sim 600 kg/m^3$ ) respecto al obtenido en húmedo y siendo del orden del alcanzado en el orujo ( $\sim 560 kg/m^3$ ).

	Orujo seco	Alperujo seco	Alpechín seco
Densidad aparente ( $kg/m^3$ )	559,3	601,3	1035,2

Tabla 4.5: Densidad de los residuos posterior al secado.

Si se comparan estos valores con los de otros potenciales combustibles biomásicos, los residuos del procesado de la aceituna presentan densidades muy superiores a las de la paja de cereal (50-120  $kg/m^3$  [110]), la cáscara de arroz (122  $kg/m^3$  [110]), residuo de tomate industrial (140  $kg/m^3$  [26]), polvo de corcho (285  $kg/m^3$  [26]) o las astillas de madera (160-235  $kg/m^3$  [115]). En relación con combustibles convencionales, el orujo y alperujo presentan valores inferiores a las de los carbones bituminosos (800-900  $kg/m^3$ ) y del mismo orden que los lignitos (560-600  $kg/m^3$ ) [110], mientras que el alpechín presenta valores muy superiores.

Así, de los tres subproductos de estudio en este trabajo, el que presenta mejor comportamiento en el proceso de secado, en lo relativo a su densidad aparente, es el alpechín, con valores en seco incluso superiores a los de combustibles convencionales.

### 4.3.2. Análisis elemental.

El análisis elemental de los subproductos es un aspecto muy importante en lo que se refiere a la combustión de biomasa [11, 114, 115], condicionando la eficiencia de la combustión la emisión de contaminantes y la formación de escorias. Sin embargo, en primera aproximación, no se considera significativa su influencia en el proceso de secado, y además, este análisis elemental en condiciones normales no debe variar con la operación de secado.

Por estas consideraciones, en este trabajo se ha realizado un estudio simple sobre dicho parámetro. El equipo utilizado ha sido un analizador elemental Eurovector EA 3000, con posibilidad de analizar de forma simultánea los elementos *C*, *H*, *N* y *S*, existente en la Unidad de Espectroscopía NIR/MIR del Servicio Central de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Córdoba. Para la obtención del cloro se utilizó el método Eschka según ASTM D2361-66, realizándose su determinación en el Laboratorio de Química de la Escola Superior Agraria de Elvas. Y por último, el oxígeno se determinó por diferencia a 100. En la tabla 4.6 se recogen los resultados referentes al análisis elemental de los tres subproductos estudiados.

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Cl (%)	S (%)
Orujo	52,885	8,026	35,800	2,898	0,391	<0,1
Alperujo	55,290	8,462	33,456	2,073	0,719	<0,1
Alpechín	50,344	7,387	38,551	2,298	1,420	<0,1

Tabla 4.6: Análisis elemental wb. de las muestras estudiadas.

A partir de los resultados expuestos en la tabla 4.6, se puede indicar que los porcentajes de carbono, hidrógeno y oxígeno en los tres subproductos son muy próximos, siendo éstos del orden del 50 % de C, 8 % de H y 35 % de O.

El mayor porcentaje en carbono lo presenta el alperujo, 55,3 %, seguido del orujo, 52,8 %, y del alpechín, 50,3 %. Los valores obtenidos para este elemento son superiores a los que presentan las pajas de cereal (38,2 % en la paja de arroz y 44,9 % para la paja de trigo [111]) y del mismo orden al de otros residuos biomásicos concentrados o combustibles convencionales (contenido en carbono del orujo de uva un 47,6 % [25] y de algunos carbones 47-58 % [11, 115]). Los porcentajes de hidrógeno son también superiores a los de otros residuos y combustibles fósiles [11, 115].

En cuando a los componentes que pueden dar problemas de emisiones de gases contaminantes y en la combustión, esto es, el N, Cl y S, hay que destacar, como positivo, el reducido nivel de azufre que presentan estos residuos (en todos los casos inferiores al 0,1 %) y, como negativo, los altos porcentajes de nitrógeno y cloro que registraron las muestras analizadas, superiores en todos los casos al 1 y 0,1 %, respectivamente,

siendo éstos los valores comunmente considerados como límites para una combustión adecuada [11, 115].

### 4.3.3. Análisis inmediato.

Se ha realizado la determinación del análisis inmediato del producto en las condiciones previas y posteriores al proceso de secado. En la tabla 4.7 se recogen los resultados medios obtenidos para las muestras húmedas, en base seca, referentes al análisis de los contenidos en materia volátil, carbono fijo y cenizas. Para la determinación del contenido de materia volátil y cenizas se utilizaron las normas ASTM E 872-82 y ASTM D 1102-84, respectivamente. Por otro lado, el porcentaje de carbono fijo se calculó por diferencia a 100 de los porcentajes de ceniza y materia volátil.

	Materia Volátil (%)	Carbono fijo (%)	Cenizas (550°C) (%)
Orujo	83,50 db.	12,17 db.	4,33 db.
Alperujo	80,18 db.	15,58 db.	4,24 db.
Alpechín	78,27 db.	11,41 db.	10,32 db.

Tabla 4.7: Análisis inmediato en base seca de los subproductos húmedos.

En la tabla 4.8 se muestran los valores medios obtenidos para las muestras secas, en base seca. Se observa que el proceso de secado no afecta prácticamente a los parámetros de estudio, siendo éstos del mismo orden a los mostrados en la tabla 4.7.

	Materia Volátil (%)	Carbono fijo (%)	Cenizas (550°C) (%)
Orujo seco	82,51 db.	13,54 db.	3,95 db.
Alperujo seco	79,02 db.	16,67 db.	4,31 db.
Alpechín seco	76,48 db.	11,06 db.	12,46 db.

Tabla 4.8: Análisis inmediato en base seca de los subproductos secos.

La principal conclusión sobre la determinación del análisis elemental, relativa al secado solar de los subproductos y para el rango de temperaturas estudiadas, es que se puede suponer, con bastante aproximación, que la variación de volátiles en el proceso va a ser muy reducida y que, por tanto, es factible considerar que la disminución de peso registrada durante los ensayos de secado en el prototipo se debe, exclusivamente, a la pérdida de humedad. Sin duda, un análisis exhaustivo de esto requeriría una valoración más detallada, mediante un muestreo de producto en continuo durante el ensayo de secado y la determinación, para cada muestra, del contenido de humedad y materia volátil en base seca [116–118].

#### 4.3.4. Poder calorífico.

El poder calorífico superior ( $PCS$ ) de un producto se puede obtener mediante fórmulas aproximadas a partir del análisis elemental [119–122], o bien experimentalmente mediante, por ejemplo, bomba calorimétrica. El poder calorífico inferior,  $PCI$  ( $MJ/kg$ ), se determina a partir del valor del  $PCS$  ( $MJ/kg$ ), según la expresión 4.4.

$$PCI = PCS - 2,447 \cdot \frac{\% H}{100} \cdot 9,011 \quad [MJ/kg \text{ wb.}] \quad (4.4)$$

En este trabajo, la obtención del  $PCS$  en los residuos analizados se realizó siguiendo la norma ASTM D 5865-04 (actualización de la ASTM D 2015-96). Se ha utilizado un calorímetro Parr 1351 ubicado en el Laboratorio de Termodinámica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura. El  $PCI$  se calcula a partir de la expresión 4.4.

Los valores obtenidos para la materia húmeda se recogen en la tabla 4.9 y los determinados para la materia seca se muestran en la tabla 4.10. Los poderes caloríficos de estos residuos experimentan un importante aumento con la operación de secado, alcanzándose del orden de 19 a 21  $MJ/kg$ . El valor del  $PCS_{db}$  de los combustibles biomásicos varía normalmente entre 18 y 21  $MJ/kg$ , presentando los residuos de estudio valores iguales o mayores a este límite.

	Orujo	Alperujo	Alpechín
P.C.S. (MJ/kg) wb.	9,53	8,44	2,51
P.C.S. (MJ/kg) db.	21,18	28,14	25,14
P.C.I. (MJ/kg) wb.	7,77	6,68	0,75
P.C.I. (MJ/kg) db.	17,26	22,26	7,50

Tabla 4.9: Poderes caloríficos superior e inferior de los residuos húmedos.

	Orujo seco	Alperujo seco	Alpechín seco
P.C.S. (MJ/kg) wb.	20,68	19,07	21,59
P.C.S. (MJ/kg) db.	22,98	22,43	26,98
P.C.I. (MJ/kg) wb.	18,91	17,30	19,82
P.C.I. (MJ/kg) db.	21,02	20,36	24,78

Tabla 4.10: Poderes caloríficos superior e inferior de los residuos secos.

En la figura 4.9 se indican los incrementos en las magnitudes de los poderes de combustión para cada tipo de residuo como consecuencia de la disminución de la humedad en el secado. Como se observa, el alpechín es el producto que con menor reducción porcentual de su humedad inicial (de 90 a 20 %) ocasiona un mayor aumento

de su *PCS* (de 2,51 a 21,59  $MJ/kg_{wb}$ ). En el otro extremo se encuentra el alperujo, que con una mayor reducción porcentual de su humedad de partida (de 70 a 15 %) ocasiona un menor aumento de su *PCS* (de 8,44 a 19,07  $MJ/kg_{wb}$ ).

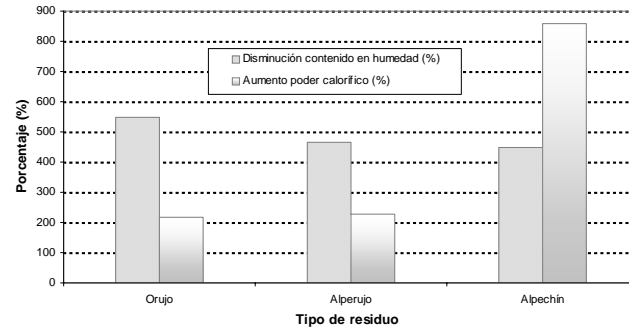


Figura 4.9: Incremento del poder calorífico con la disminución de humedad.

Como ya se ha indicado, un proceso de secado de un combustible es aconsejable cuando los niveles de humedad de éste son elevados y con él se consiga un incremento considerable del poder calorífico [123,124], sin que ello suponga un coste energético superior al beneficio experimentado con el aumento de dicho poder calorífico. Este aspecto puede conseguirse con la aplicación adecuada del secado solar.

#### 4.3.5. Densidad energética.

Otro parámetro importante a considerar en la valoración de un subproducto para su posible aprovechamiento termoquímico es la densidad energética, fundamentalmente relacionada con el dimensionamiento de las superficies de almacenamiento, las necesidades de transporte, el diseño óptimo de los sistemas de combustión, etc.

Considerando el poder calorífico determinado para los diferentes residuos (tablas 4.9 y 4.10) y su densidad aparente (tablas 4.4 y 4.5), se obtienen los valores para la materia húmeda y seca indicados en la tabla 4.11 y 4.12, respectivamente. Como se observa, con la reducción de humedad se consigue en todos los casos un aumento de la densidad energética.

	Orujo	Alperujo	Alpechín
Densidad energética wb. ( $MJ/m^3$ )	6703	8995	2570

Tabla 4.11: Densidad energética de los residuos húmedos.

	Orujo seco	Alperujo seco	Alpechín seco
Densidad energética wb. ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ )	11565	11466	22347

Tabla 4.12: Densidad energética de los residuos secos.

En la figura 4.10 se muestra la densidad energética antes y después de la reducción de humedad de los subproductos. De todos ellos, el que peor comportamiento tiene es el alperujo, motivado por su disminución de densidad aparente con el proceso de secado. El orujo, aunque su densidad aparente antes y después del secado es prácticamente la misma, duplica su densidad energética al aumentar en más del doble su poder calorífico. Por último, el alpechín seco es el residuo que mayor densidad energética presenta, puesto que es el más denso y con prácticamente igual poder calorífico que el orujo y alperujo.

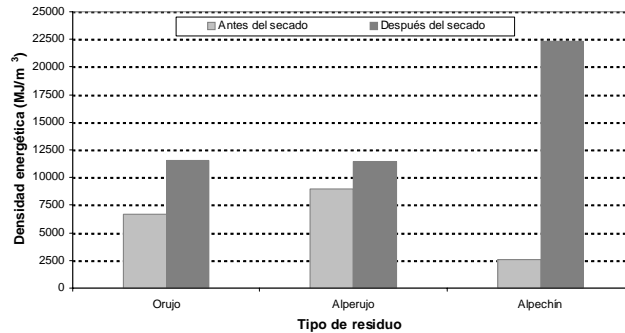


Figura 4.10: Densidad energética de los subproductos antes y después del secado.

#### 4.3.6. Coeficientes convectivos.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor es un parámetro muy importante en la simulación de los ratios de secado, variando la diferencia de temperatura entre el aire y el material a secar con dicho coeficiente. La transferencia de calor por convección está asociada al cambio de energía entre una superficie y un fluido, cuya ecuación general es de la forma  $q/A = h_c \cdot \Delta T$ , siendo  $q/A$  el flujo de calor,  $h_c$  el coeficiente de transmisión de calor convectivo, y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie. Aunque la ecuación es sencilla, la determinación de  $h_c$  no lo es, puesto que depende simultáneamente de las características del fluido y de la geometría del sistema.

Usualmente existen dos métodos [125, 126] para la determinación del coeficiente convectivo en productos agrícolas: el análisis dimensional o la medida directa de los coeficientes de transferencia de calor en el producto y comparación de las curvas

de temperatura con las curvas de Shumann's [127, 128]. El análisis dimensional es matemáticamente simple y de aplicación en un rango amplio de temperaturas; sin embargo, resultaría incompleto sin los suficientes datos experimentales [125, 128]. Por tanto, en este trabajo se utilizará un análisis dimensional apoyado con ensayos experimentales.

Aunque existen en la literatura gran cantidad de estudios para determinar los coeficientes de transferencia de humedad, coeficientes de difusión, etc, de productos susceptibles de ser secados [28, 129–151], pocos estudios han conducido a la determinación de los coeficientes convectivos de transferencia de calor [125–128, 152–154]. Tiwari, Anwar y Jain, determinaron  $h_c$  para diferentes productos secados tanto en condiciones de circulación natural como en convección forzada. Otros autores como Kavak, Boyce y O'Callaghan, han realizado estudios similares en otros materiales. Sin embargo, no se han encontrado en la bibliografía estudios de determinación de estos parámetros para los subproductos de la industria almazarera.

Para el cálculo de los coeficientes convectivos de los tres subproductos analizados, se han realizado diversos ensayos en el prototipo de secadero solar (descripción en el capítulo 6), en diferentes condiciones de funcionamiento (natural, forzado, indirecto y mixto), puesto que el modo de secado afectará al valor de este coeficiente. Los parámetros a medir necesarios para dicha determinación, correspondientes al producto y al aire que se encuentra sobre su superficie, se muestran en la figura 4.11, siendo,  $m_{ev}$  la cantidad de agua evaporada,  $T_p$  la temperatura del producto,  $T_{sp}$  la temperatura del aire en la superficie del producto (en adelante temperatura superficial),  $\phi$  la humedad relativa del aire y  $v_0$  la velocidad del aire sobre la superficie del producto.

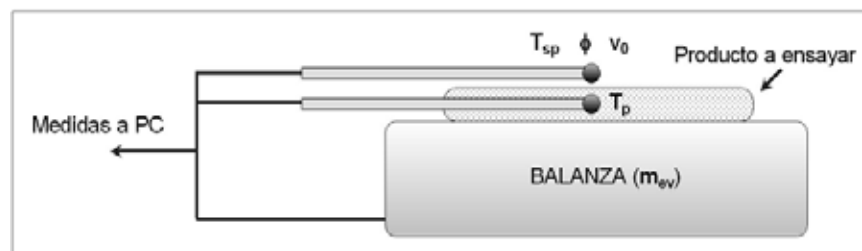


Figura 4.11: Esquema de determinación de los coeficientes convectivos.

Algunos de los parámetros que intervienen en la determinación de  $h_c$  se exponen a continuación [70]. Dependiendo del modo de funcionamiento, natural o forzado, será necesario utilizar unas propiedades u otras.

Es necesario primeramente definir los parámetros adimensionales  $Nu$ , número de Nusselt (ecuación 4.5),  $Pr$ , número de Prandtl (ecuación 4.6),  $Gr$ , número de Grashof

(ecuación 4.7) y  $Re$ , número de Reynolds (ecuación 4.8).

$$Nu = \frac{h_c \cdot X}{K_v} \quad (4.5)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C}{K_v} \quad (4.6)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta' \cdot \rho^2 \cdot X^3 \cdot \Delta T}{\mu^2} = \frac{g \cdot \beta' \cdot X^3 \cdot \Delta T}{v^2} \quad (4.7)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v_0 \cdot X}{\mu} = \frac{v_0 \cdot X}{v} \quad (4.8)$$

siendo  $X$  la dimensión característica de la superficie de exposición ( $m$ ) definida como el cociente del área entre el perímetro de ésta;  $K_v$  la conductividad térmica del aire húmedo (ec. 3.43),  $\beta'$  su coeficiente de expansión térmica (ec. 3.44),  $\mu$  su viscosidad dinámica (ec. 3.41),  $\rho$  su densidad (3.40),  $v$  su viscosidad cinemática (3.42) y  $C$  su calor específico (ec. 3.39);  $\Delta T$  el incremento entre la temperatura de producto y la temperatura superficial ( $^{\circ}C$ ),  $g$  la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ), y  $v_0$  la velocidad del aire superficial ( $m/s$ ).

Además, se deben calcular las presiones parciales del vapor de agua a la temperatura del producto y del aire,  $P(T)$  en ( $N/m^2$ ). La ecuación que define este parámetro se expresa en 4.9 para una temperatura  $T$  ( $^{\circ}C$ ) cualquiera [128, 152].

$$P(T) = \exp \left[ 25,317 - \frac{5144}{T + 273,15} \right] \quad (4.9)$$

#### Determinación de coeficientes convectivos en circulación natural.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $h_c$ , para convección natural, también aplicable para el secado directo al sol, puede ser determinado, según Tiwari [70, 152], usando el procedimiento basado en la obtención de los números de Grashof y de Prandtl. El número de Nusselt para convección natural en función de ambos números adimensionales se muestra en la ecuación 4.10.

$$Nu = \frac{h_c \cdot X}{K_v} = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (4.10)$$

donde  $Nu$ ,  $Gr$  y  $Pr$  son los números de Nusselt, Grashof y Prandtl, respectivamente;  $C$  y  $n$  son las constantes a determinar mediante análisis de regresión lineal;  $K_v$  es la conductividad térmica del aire húmedo; y  $X$  es la dimensión característica de la superficie de exposición (en nuestro caso de la bandeja que contiene al producto).



De la expresión anterior, el coeficiente convectivo en circulación natural vendrá dado por la ecuación 4.11.

$$h_c = \frac{K_v \cdot C}{X} \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (4.11)$$

La potencia térmica, por unidad de área, empleada en evaporar la humedad del producto,  $Q_e$  ( $J/sm^2$ ), se obtiene de la ecuación 4.12, siendo  $P(T_p)$  la presión parcial del vapor de agua a la temperatura del producto,  $P(T_{sp})$  la presión parcial del vapor de agua a la temperatura superficial (ec. 4.9) y  $\phi$  la humedad relativa superficial (*dec.*). Utilizando la ecuación 4.11 se obtiene la expresión 4.13 para  $Q_e$ .

Mediante la ecuación 4.14 se expresa la humedad evaporada del producto,  $m_{ev}$ , en función del área de la bandeja,  $A_t$ , el tiempo,  $t$ , y el calor latente de vaporización,  $L_v$  (según ec. 3.7). Definiendo el parámetro auxiliar  $Z$  (ec. 4.15) se alcanza la expresión 4.16, en la que tomando logaritmos se tiene la condición 4.17, en forma de ecuación lineal, con la que es posible calcular las constantes de regresión,  $C$  y  $n$ .

$$Q_e = 0,016 \cdot h_c \cdot [P(T_p) - \phi \cdot P(T_{sp})] \quad (4.12)$$

$$Q_e = 0,016 \cdot \frac{K_v \cdot C}{X} \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot [P(T_p) - \phi \cdot P(T_{sp})] \quad (4.13)$$

$$m_{ev} = Q_e \cdot \frac{A_t \cdot t}{L_v} = 0,016 \cdot \frac{K_v \cdot C}{X \cdot L_v} \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot [P(T_p) - \phi \cdot P(T_{sp})] \cdot A_t \cdot t \quad (4.14)$$

$$Z = 0,016 \cdot \frac{K_v}{X \cdot L_v} \cdot [P(T_p) - \phi \cdot P(T_{sp})] \cdot A_t \cdot t \quad (4.15)$$

$$\frac{m_{ev}}{Z} = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (4.16)$$

$$\ln \left( \frac{m_{ev}}{Z} \right) \equiv Y = \ln C + n \cdot \ln (Gr \cdot Pr) \equiv C_o + nX_o \quad (4.17)$$

En concreto, es posible determinar  $C$  y  $n$  mediante las expresiones 4.18 y 4.19, conociendo el área de exposición,  $A_t$ , la dimensión característica de la superficie de exposición de producto,  $X$ ; mediante el registro en el tiempo de las variables temperatura de producto,  $T_p$ , temperatura superficial,  $T_{sp}$ , humedad relativa,  $\phi$ , y pérdida de peso (el valor del agua evaporada,  $m_{ev}$  ( $kg$ ), será la diferencia entre dos valores consecutivos de pérdida de peso); y siguiendo el procedimiento descrito, esto es, calculando  $Z$ ,  $Y$ ,  $X_o$  y  $C_o$ .

$$n = \frac{N \cdot \sum X_o \cdot Y - \sum X_o \cdot \sum Y}{N \cdot \sum X_o^2 - (\sum X_o)^2} \quad (4.18)$$

$$C_o = \frac{\sum X_o^2 \cdot \sum Y - \sum X_o \cdot \sum X_o \cdot Y}{N \cdot \sum X_o^2 - (\sum X_o)^2} \Rightarrow C = \exp(C_o) \quad (4.19)$$

siendo:  $N$  el número de observaciones más el número de variables independientes (en este caso, el número de variables independientes es 1);  $X_o = \ln(Gr \cdot Pr)$ ;  $Y = \ln\left(\frac{m_{ev}}{Z}\right)$ ;  $C_o = \ln C$ .

Sustituyendo  $C$  y  $n$  en la ecuación 4.11 definida anteriormente, se obtiene el coeficiente de transferencia de calor convectivo para circulación natural, en cada intervalo de tiempo.

#### Determinación de coeficientes convectivos en circulación forzada.

El proceso para la obtención del coeficiente convectivo de transferencia de calor para convección forzada es similar al descrito para convección natural, salvo que en este caso el número de Nusselt es función de los números de Reynolds y de Prandtl según la expresión 4.20. Así, se puede obtener de nuevo la ecuación 4.21 análoga a la anteriormente indicada 4.17.

$$Nu = \frac{h_c \cdot X}{K_v} = C \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr})^n \quad (4.20)$$

$$\ln\left(\frac{m_{ev}}{Z}\right) \equiv Y = \ln C + n \cdot \ln(\text{Re} \cdot Pr) \equiv C_o + nX_o \quad (4.21)$$

Con los mismos parámetros de entrada anteriores, e incluyendo la velocidad del aire superficial,  $v_0$ , se determinan las constantes  $C$  y  $n$  (expresiones 4.18 y 4.19).

#### Resultados experimentales.

Para la determinación de los parámetros de entrada  $T_p$ ,  $T_{sp}$ ,  $\phi$ ,  $m_{ev}$  y  $v_0$  (este último sólo en convección forzada), se realizaron una serie de ensayos experimentales en el prototipo de secadero solar. En concreto, se efectuaron ensayos para los tres subproductos, para los dos modos de funcionamiento (natural y forzado) y para las dos tipologías (indirecto y mixto).

La obtención de  $T_p$  y  $T_{sp}$  se llevó a cabo mediante la colocación de una sonda tipo Pt-100 para la medida de la temperatura en el producto y otra sonda de iguales características para la medida de la temperatura del aire superficial (figura 4.12). Asimismo, se dispone de la medida de humedad relativa en la cámara, de la pérdida de peso del

producto y de la velocidad del aire sobre el producto. Todas estas variables se registraron en intervalos de cinco minutos, sin embargo, para el cálculo de los coeficientes convectivos se utilizaron periodos de treinta minutos.



Figura 4.12: Ensayos experimentales para obtener los coeficientes convectivos en los subproductos.

Las bandejas utilizadas tienen unas dimensiones de 890 x 280 x 20 mm. La velocidad del aire en el modo forzado se fijó para un valor medio de caudal de 0,22 kg/s (justificado en capítulo 7). La cantidad inicial de producto en todos los casos fue de 2000 g. Los parámetros constantes utilizados en el método de cálculo se muestran en la tabla 4.13.

$A_t$ (m <sup>2</sup> )	$X$ (m)	$t$ (s)	n° de var. indep.
0,2492	0,1065	1800	1

Tabla 4.13: Parámetros constantes para el cálculo de los coeficientes convectivos.

Como ejemplo, en la tabla 4.14 se presentan las variables más relevantes registradas durante dos horas y obtenidas en el proceso de cálculo, para el alpechín, para el modo indirecto y en convección natural.

$t$ (min)	$m_{ev}$ (kg)	$T_p$ (°C)	$T_{sp}$ (°C)	$\phi$ (dec.)	$Gr \cdot 10^5$	$Pr$	$Z$
30	0,102	30,1	32,5	0,171	3,63	0,7050	0,0027
60	0,016	34,4	34,7	0,142	0,43	0,7052	0,0037
90	0,016	35,7	35,8	0,134	0,14	0,7052	0,0039
120	0,024	36,3	36,4	0,129	0,14	0,7052	0,0042
150	0,036	36,3	36,5	0,125	0,28	0,7053	0,0042
180	0,037	36,4	36,8	0,119	0,56	0,7053	0,0042
210	0,035	36,4	36,9	0,119	0,69	0,7053	0,0042
240	0,031	36,6	37,1	0,118	0,69	0,7053	0,0043

Tabla 4.14: Variables para  $h_c$  en el alpechín en convección natural.

En la figura 4.13 se ha representado la evolución del coeficiente convectivo en el tiempo de los diferentes subproductos para el modo indirecto, en convección natural y forzada.

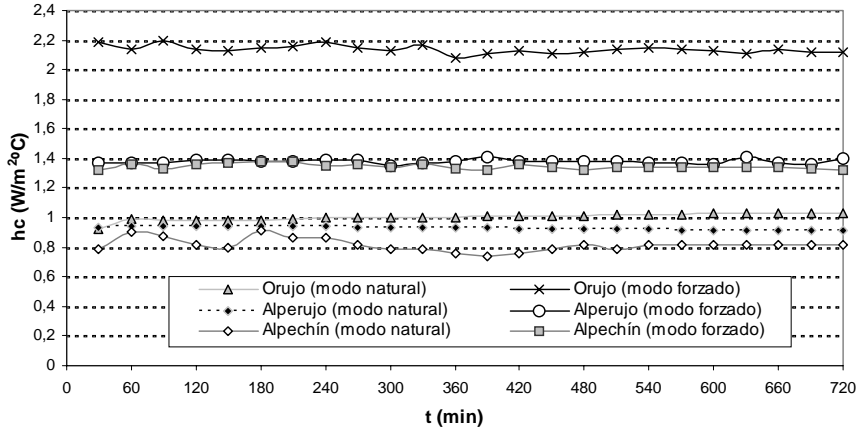


Figura 4.13: Variación en el tiempo del coeficiente convectivo para los tres subproductos en modo indirecto.

Los valores medios de los coeficientes convectivos obtenidos se muestran en la tabla 4.15 y 4.16 para modo indirecto y mixto, respectivamente. Como se observa, en todos los subproductos, el secado en convección forzada hace aumentar dicho coeficiente convectivo frente al obtenido en circulación natural, con un incremento de aproximadamente el doble para los caudales de aire establecidos [152]. Los valores medios oscilan entre 0,7 y 2,2  $W/m^2°C$ , siendo éstos del mismo orden a los obtenidos para otros materiales agrícolas por diferentes autores [126, 128, 153]. En lo referente a la comparación entre el modo indirecto y el modo mixto, se observa un aumento del coeficiente en el modo mixto en los subproductos orujo y alpechín, mientras que en el alperujo, se detecta un ligero descenso. Aunque no se dispone de una clara justificación de este hecho, se considera que es debido a las condiciones físicas particulares de este residuo.

$h_c$ ( $W/m^2°C$ )	Orujo	Alperujo	Alpechín
Natural	1,012	0,921	0,769
Forzado	2,131	1,377	1,342

Tabla 4.15: Coeficientes convectivos de los subproductos modo indirecto.

$h_c$ (W/m <sup>2</sup> °C)	Orujo	Alperujo	Alpechín
Natural	1,242	0,874	1,292
Forzado	2,194	0,936	2,011

Tabla 4.16: Coeficientes convectivos de los subproductos modo mixto.

Los coeficientes de transferencia de calor convectivos determinados en este epígrafe (tablas 4.15 y 4.16) se aplicarán en la simulación del proceso de secado solar del prototipo (capítulo 8) para los subproductos de estudio.

#### 4.3.7. Difusividad efectiva.

La difusividad efectiva es un parámetro fundamental en los procesos de secado. Recientemente se han realizado muchos estudios para su determinación. En ellos, a partir de ensayos de pérdida de peso a diferentes temperaturas, se calcula de forma analítica este coeficiente. Sin embargo, aunque existen numerosas referencias sobre la obtención de este parámetro para productos muy diversos [28,129–151], referentes a los subproductos de la obtención de aceite de oliva se han encontrado escasos análisis [155–158]. Por ello, la determinación de esta propiedad aporta una información importante para estudiar de forma correcta la cinética de secado de dichos subproductos.

Mediante ensayos experimentales es posible obtener el ratio de humedad,  $MR$ , a partir de la obtención directa o a partir de modelos de secado (Newton, Page, Modificado de Page o Henderson y Pabis), determinado según la ec. 3.9 (capítulo 3). La variación de este ratio está estrechamente relacionada con la ecuación de difusión de Fick. La solución analítica de la segunda ley de Fick para geometría plana se puede expresar según la ec. 4.22, siendo  $D_{eff}$  la difusividad efectiva ( $m^2/s$ );  $L$  la dimensión característica del producto “capa fina” ( $m$ );  $t$  el tiempo de secado ( $h$ ); y  $n = 0, 1, 2, ..\infty$ , el número de términos a considerar.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (4.22)$$

Durante el secado en periodos largos y valores de  $MR < 0,6$  [142,159] esta ecuación puede simplificarse al primer término de la serie, obteniendo la ecuación 4.23 en forma exponencial biparamétrica.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (4.23)$$

Una forma general de la ecuación 4.23 anterior puede ser escrita en forma logarítmica (ec. 4.24) mediante una ecuación del tipo  $\ln MR = A + Bt$ , donde la constante

$B$  es la pendiente de la recta en la ecuación 4.24.

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \quad (4.24)$$

Para la determinación de la difusividad efectiva en los subproductos de estudio, se han realizado ensayos experimentales de pérdida de peso, a diferentes temperaturas, en el prototipo de secadero solar y utilizando el simulador de radiación (capítulo 6). Las muestras se distribuyeron uniformemente en capa fina sobre las bandejas, manteniendo constantes en cada uno de los ensayos, aproximadamente, la temperatura y velocidad del aire desecante.

De esta forma, se ha obtenido el ratio de humedad en base seca para los tres subproductos, en funcionamiento forzado (para un valor medio de caudal de aire de  $0,22 \text{ kg/s}$ ) y natural, y a temperaturas de 20, 30, 40 y  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estos valores se muestran en las figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19.

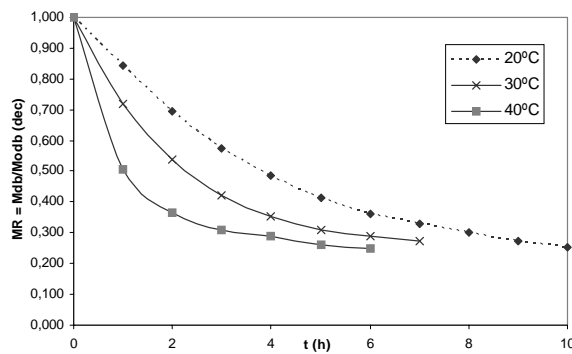


Figura 4.14: Ratio de humedad en modo forzado para orujo con la temperatura.

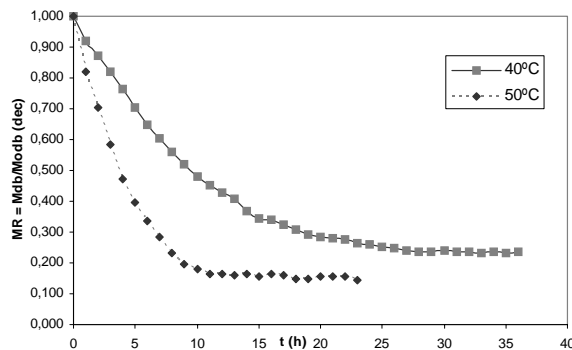


Figura 4.15: Ratio de humedad en modo natural para orujo con la temperatura.

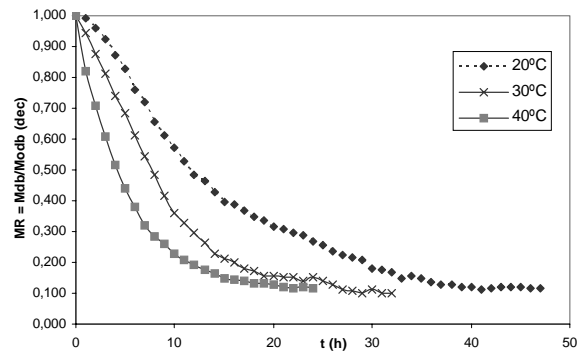


Figura 4.16: Ratio de humedad en modo forzado para alperujo con la temperatura.

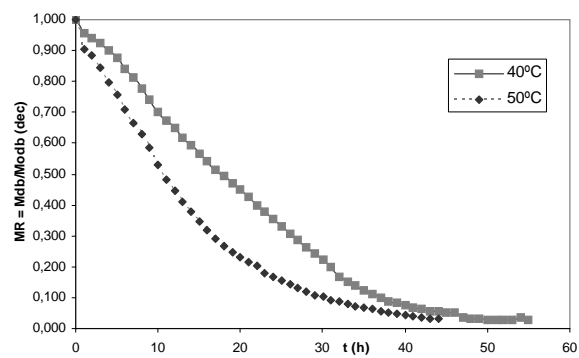


Figura 4.17: Ratio de humedad en modo natural para alperujo con la temperatura.

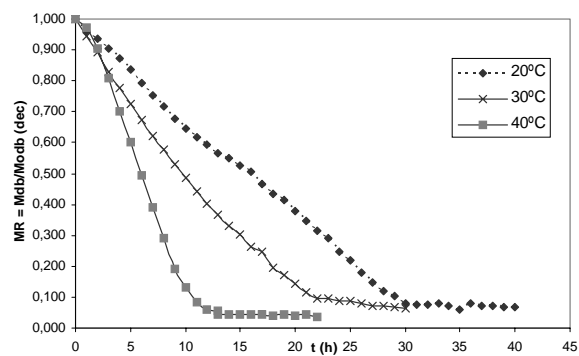


Figura 4.18: Ratio de humedad en modo forzado para alpechín con la temperatura.

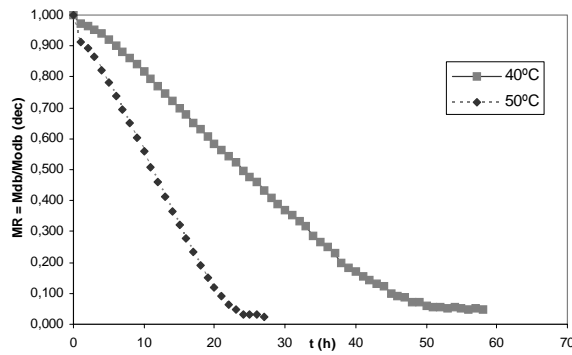


Figura 4.19: Ratio de humedad en modo natural para alpechín con la temperatura.

Así, mediante la expresión 4.24 y su representación frente al tiempo (figuras 4.20, 4.21 y 4.22) se obtiene, como se indicó anteriormente, la ecuación de una recta cuya pendiente proporcionará el valor de  $D_{eff}$  a partir de la ecuación 4.25. Los valores resultantes de estas pendientes se muestran en las tablas 4.17 y 4.18 para modo forzado y natural, respectivamente.

$$B = Pendiente = \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} \tag{4.25}$$

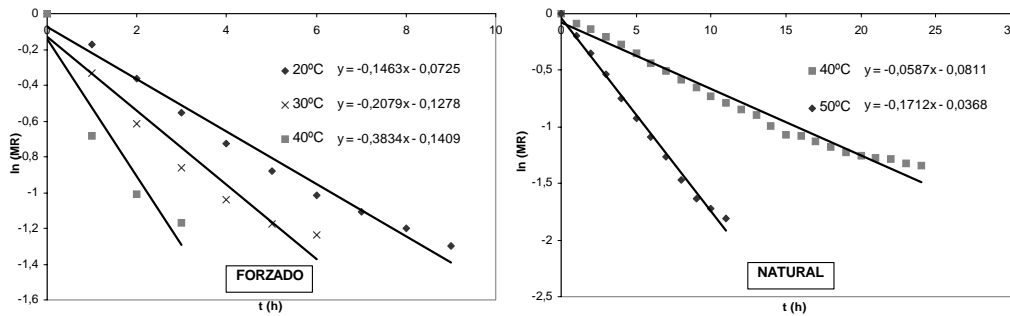


Figura 4.20: Representación lnMR frente al tiempo de secado para orujo.

	Orujo	Alperujo	Alpechín
20 °C	0,1463	0,0572	0,0734
30 °C	0,2079	0,1029	0,101
40 °C	0,3834	0,1265	0,238

Tabla 4.17: Pendientes en convección forzada.



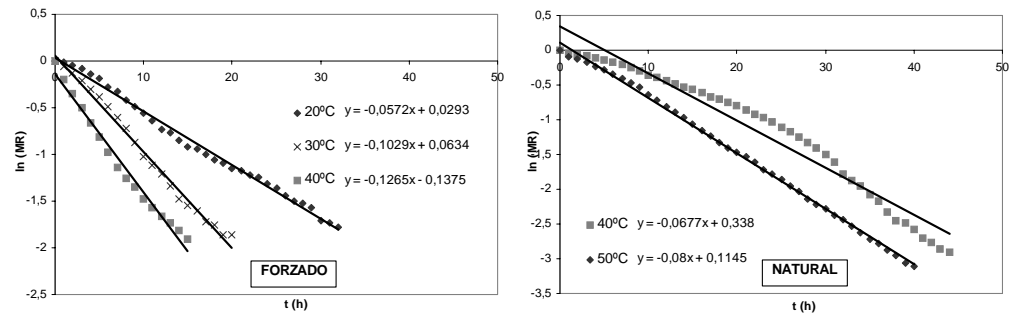


Figura 4.21: Representación lnMR frente al tiempo de secado para alperujo.

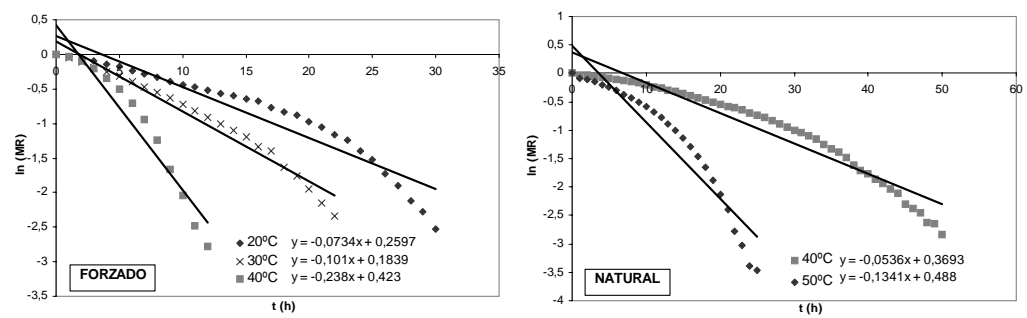


Figura 4.22: Representación lnMR frente al tiempo de secado para alpechín.

	Orujo	Alperujo	Alpechín
40 °C	0,0587	0,0677	0,0536
50 °C	0,1712	0,08	0,1341

Tabla 4.18: Pendientes en convección natural.

Para determinar la dimensión característica del producto,  $L$ , se utiliza la expresión 4.26, considerando: la masa de producto,  $m$ , para la que se han realizado los ensayos, esto es, 2000 g; la densidad,  $\rho$ , dada en la tabla 4.4; y un área de bandeja,  $A_t$ , de 0,2492 m<sup>2</sup>. Los resultados de esta constante para cada residuo se muestran en la tabla 4.19.

$$L = \frac{m}{\rho \cdot A_t} \quad (4.26)$$

	Orujo	Alperujo	Alpechín
L (m)	0,0114	0,00753	0,00785

Tabla 4.19: Longitud característica de los subproductos.

A partir de la ecuación 4.25 y calculadas la pendientes de  $\ln(MR)$  y la longitud característica  $L$ , se obtienen, para las diferentes temperaturas, subproductos y modos de funcionamiento, los valores de  $D_{eff}$  mostrados en la tabla 4.20 para convección forzada y en la tabla 4.21 para convección natural.

El valor de la difusividad efectiva aumenta con la temperatura [130–132,158]. Como se aprecia, los valores de  $D_{eff}$  para los subproductos de almazara se encuentran en el rango de  $9,136 \cdot 10^{-11}$  a  $1,406 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s en convección forzada y de  $9,296 \cdot 10^{-11}$  a  $6,277 \cdot 10^{-10}$  en convección natural.

Los valores obtenidos por Akgun y Doymaz [156] para el orujo de aceituna para el mismo intervalo de temperaturas son similares a los alcanzados en este trabajo. Comparando los valores de  $D_{eff}$  de estos productos con los propuestos por otros autores para otros materiales agrícolas y alimenticios [28, 129–151], se puede decir que se encuentran dentro del intervalo habitual de  $10^{-9}$  a  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. Por otro lado, se comprueba que los valores de  $D_{eff}$  calculados para el alperujo en el modo forzado son menores que los obtenidos para el alpechín, para todo el rango de temperaturas. Esto se constatará en los ensayos de secado realizados en el prototipo, registrando, generalmente, mayores tiempos de secado en el alperujo que en el alpechín para convección forzada.

$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	Orujo	Alperujo	Alpechín
20 °C	$5,364 \cdot 10^{-10}$	$9,136 \cdot 10^{-11}$	$1,273 \cdot 10^{-10}$
30 °C	$7,622 \cdot 10^{-10}$	$1,643 \cdot 10^{-10}$	$1,752 \cdot 10^{-10}$
40 °C	$1,406 \cdot 10^{-9}$	$2,020 \cdot 10^{-10}$	$4,128 \cdot 10^{-10}$

Tabla 4.20: Difusividad efectiva para los subproductos en convección forzada.

$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	Orujo	Alperujo	Alpechín
40 °C	$2,119 \cdot 10^{-10}$	$1,081 \cdot 10^{-10}$	$9,296 \cdot 10^{-11}$
50 °C	$6,277 \cdot 10^{-10}$	$1,278 \cdot 10^{-10}$	$2,326 \cdot 10^{-10}$

Tabla 4.21: Difusividad efectiva para los subproductos en convección natural.

#### 4.3.8. Energía de activación.

La energía de activación,  $E_a$ , es la energía mínima necesaria para que comience un determinado proceso químico, siendo en este caso la necesaria para iniciarse el proceso de secado. Su valor está íntimamente relacionada con la  $D_{eff}$ . La influencia de la temperatura en la difusividad efectiva puede ser representada por una ecuación de Arrhenius [141, 156] como la mostrada en 4.27.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.27)$$

donde  $D_0$  es el factor de frecuencia o pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius (m<sup>2</sup>/s),  $E_a$  es la energía de activación de la difusión de humedad (kJ/kmol),  $T$  es la temperatura absoluta del aire (K) y  $R$  es la constante universal de los gases (8,314 kJ/kmolK). Es habitual considerar constantes tanto la energía de activación como el factor pre-exponencial.

La representación de los valores de  $\ln(D_{eff})$  frente a  $1/T$  (K<sup>-1</sup>) se muestran en las figuras 4.23, 4.24 y 4.25, identificados por una relación lineal en el rango de temperaturas seleccionadas.

El valor de la pendiente de la recta anteriormente representada coincide con el valor de  $E_a/R$ . Así, se obtienen los valores de energía de activación para cada subproducto y modo de funcionamiento mostrados en la tabla 4.22. El mayor valor de energía de activación en el modo forzado corresponde al alpechín, con 47,64 kJ/mol, seguido de orujo y alperujo, y en modo natural corresponden al orujo, con 91,35 kJ/mol, seguido de los valores para el alpechín y el alperujo.

En la tabla 4.23 se indican algunos valores de  $E_a$  obtenidos por otros autores para diversos materiales. Como se puede observar, los valores de  $E_a$  determinados en este

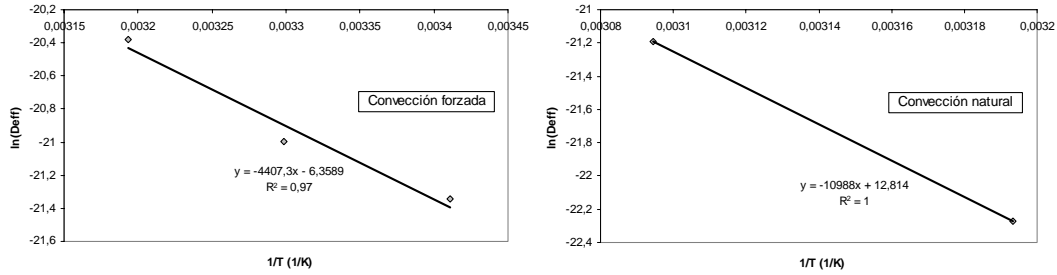


Figura 4.23: Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura para orujo.

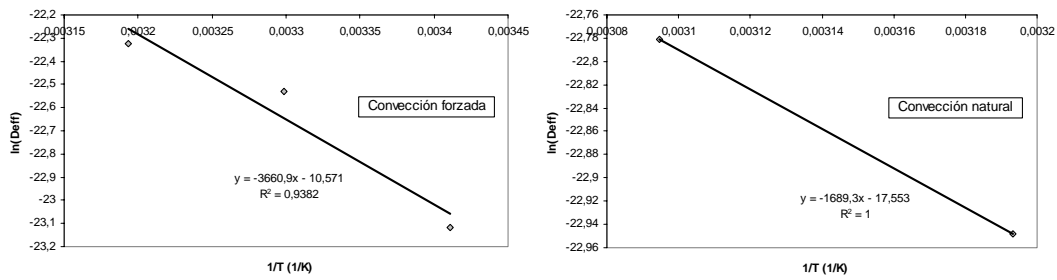


Figura 4.24: Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura para alperujo.

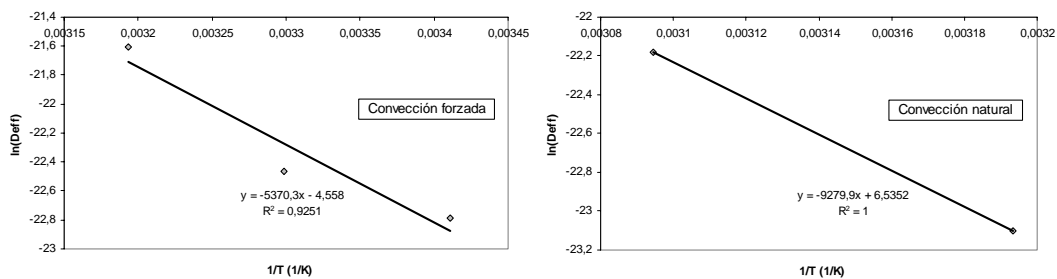


Figura 4.25: Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura para alpechín.

trabajo para los subproductos de la industria almazarera son del mismo orden de magnitud a los obtenidos para otros productos agrícolas.

	Orujo	Alperujo	Alpechín
Energía de activación (kJ/mol) en modo forzado	38,64	30,44	47,64
Energía de activación (kJ/mol) en modo natural	91,35	14,04	77,15

Tabla 4.22: Energía de activación de los subproductos en modo forzado y natural.

Material	$E_a$ (kJ/mol)	Referencias
Orujo de aceituna	17,97-29,2	[156-158]
Residuos vegetales	19,82	[159]
Otros materiales agrícolas:		
Menta	82,93	[137, 139]
Zanahoria	28,36	[131, 139]
Guisantes	28,4	[137, 146]
Judías	35,43	[141]

Tabla 4.23: Energía de activación para diferentes productos agrícolas.

Por último, hay que resaltar que la energía de activación aumenta con el espesor de producto a secar. Por tanto, la elección de los espesores adecuados o de los sistemas que optimicen, para un espesor dado, la transferencia de calor en el producto, será un aspecto importante a considerar en el diseño de los sistemas de secado y en el cálculo de los requerimientos de energía para disminuir la humedad de un producto.



## Capítulo 5

# Secado directo al sol.

### 5.1. Introducción.

El objetivo del secado es la reducción del contenido de humedad de un material; bajo condiciones ambientales este proceso es muy lento. El propósito de un secadero es, precisamente, acelerar el mismo mediante la aportación de una mayor cantidad de calor, disminuyendo significativamente la humedad relativa del aire desecante e incrementando su capacidad de arrastre de humedad.

El secado natural o secado directo al sol (SDS), donde los productos se exponen directamente a la radiación solar colocándolos sobre el suelo o en dispositivos específicos, es uno de los usos más antiguos de la energía solar, siendo aún el proceso más utilizado en países en vías de desarrollo para el secado de productos agrícolas [38, 70, 127]. Es un procedimiento con muy bajo coste pero con diversas limitaciones, a saber: deterioro de los productos por las variaciones climatológicas (lluvia, viento, rocío,...), dificultad para el control del proceso, necesidades de terreno elevadas, largos tiempos de secado, degradación importante para el caso de productos alimenticios debido al contacto con polvo, animales, insectos u otros contaminantes [103, 160], etc.

En los últimos años, la escasez de recursos, los mayores precios de los combustibles y la creciente preocupación por el medio ambiente ha suscitado un nuevo interés en el secado basado en la energía solar, tratando de desarrollar técnicas y dispositivos que permitan solucionar los diversos problemas mencionados en relación con el SDS [57, 72, 80, 161–164].

En el SDS, como se ha indicado, el producto está expuesto a la radiación solar, al viento y a otras condiciones ambientales, siendo los requerimientos energéticos de la operación suministrados por la energía solar, como fuente única de energía. El principio de trabajo del SDS se muestra en la figura 5.1. Como se aprecia, parte de la radiación de onda corta incidente del sol es absorbida por el producto y parte es reflejada.

Una fracción de la radiación absorbida y el aire caliente que circula sobre el producto provoca el calentamiento superficial del mismo, dando lugar a la propagación de calor al interior (consiguiéndose elevación en la temperatura del producto y producción de vapor de agua) y a la evaporación de la humedad superficial, lográndose de esta forma la desecación del producto.

Sin embargo, la otra fracción se pierde por la transmisión de la radiación de onda larga al ambiente y por la conducción a través de los elementos en contacto con el terreno.

Para disponer de una referencia en el diseño y verificación del funcionamiento de secaderos solares térmicos, que mejoren las características de la operación de secado, se ha realizado un estudio experimental del proceso de secado solar directo de residuos industriales de la producción de aceite de oliva, esto es, alperujo, orujo y alpechín. Aunque existen en la bibliografía diversos trabajos sobre el SDS [58, 62, 104, 127, 133, 165–168], no se dispone de estudios en este sentido para los subproductos tratados, aunque sí se han encontrado referencias sobre investigaciones de secado de los mismos [155–158, 169, 170]. Debido a esta carencia, el análisis que se ha desarrollado parece fundamental como medida comparativa de la eficiencia del prototipo de secadero solar diseñado.

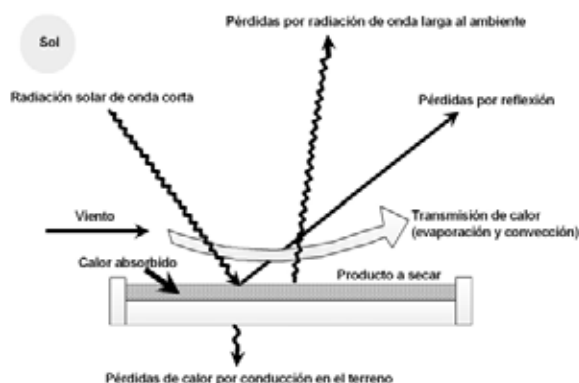


Figura 5.1: Principio de trabajo del SDS.

## 5.2. Metodología experimental.

Se ha evaluado la cinética de secado de diferentes residuos industriales de la aceituna en el proceso de secado solar directo. Los subproductos analizados, orujos húmedos tres fases (or), alperujo (alper) y alpechín (al), tienen las características físicas y ener-



géticas descritas en el capítulo 4 [124], siendo el contenido en humedad inicial en base húmeda de cada muestra,  $M_{0wb}$ , del orden de 55-60 %, 65-70 % y 90-95 %, para orujo, alperujo y alpechín respectivamente.

Para disponer los productos se utilizaron bandejas de dimensiones 365 x 210 x 70 mm y peso 463 g, colocadas de forma horizontal sobre el terreno. El control de la pérdida de peso se realizó en intervalos de una hora con balanza digital de peso máximo 5 kg y precisión 1 g. El número de ensayos por tipo de residuo se repitió cuatro veces durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2004 en Badajoz, eligiéndose para el emplazamiento un espacio abierto con buena incidencia de la radiación solar directa.

Los ratios de secado en el SDS dependen [171] de parámetros externos (radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento) y de parámetros internos (contenido inicial de humedad, tipo de producto, granulometría, absorptividad del material y masa del producto por unidad de área expuesta).

Para estudiar la influencia de estos parámetros, que se detallará posteriormente, se realizaron, por un lado, ensayos con una cantidad constante de material (2000 g) para los tres subproductos, y por otro lado, se dispusieron diferentes espesores de producto, esto es, 2 cm, 1,5 cm y 1 cm para cada uno de los residuos.

A la vez, se registraron las variables climáticas: temperatura seca ( $^{\circ}C$ ) y humedad relativa del aire ambiente (%), radiación global sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ ) y velocidad del viento ( $m/s$ ). El equipamiento utilizado para el control de estos parámetros externos se describirá en el capítulo 6, siendo, en resumen, una estación meteorológica y un anemómetro de precisión con sensor de rueda alada. En las figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran las variaciones de las cuatro variables para los días correspondientes a los diferentes ensayos, esto es, ensayo 1 del 18/8 al 23/8, ensayo 2 del 24/8 al 27/8, ensayo 3 del 30/8 al 3/9 y ensayo 4 del 30/9 al 6/10.

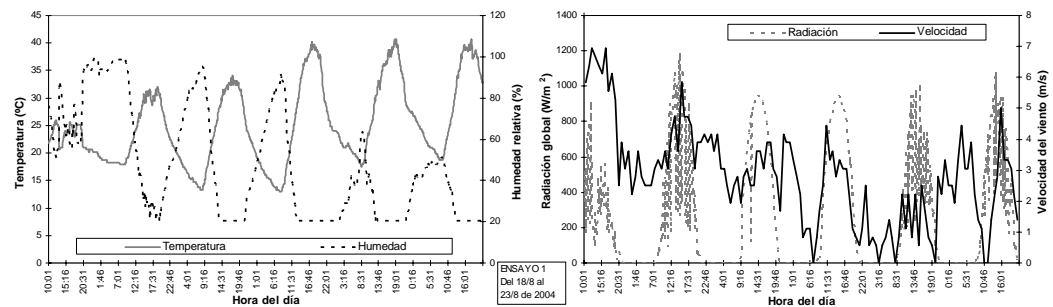


Figura 5.2: Variables climáticas relativas al ensayo 1.

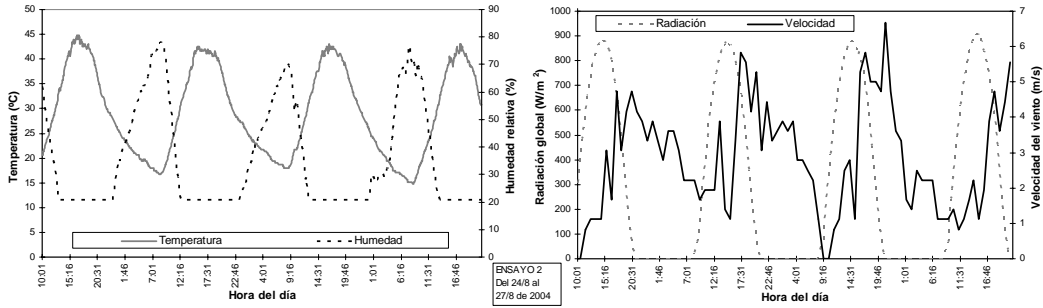


Figura 5.3: Variables climáticas relativas al ensayo 2.

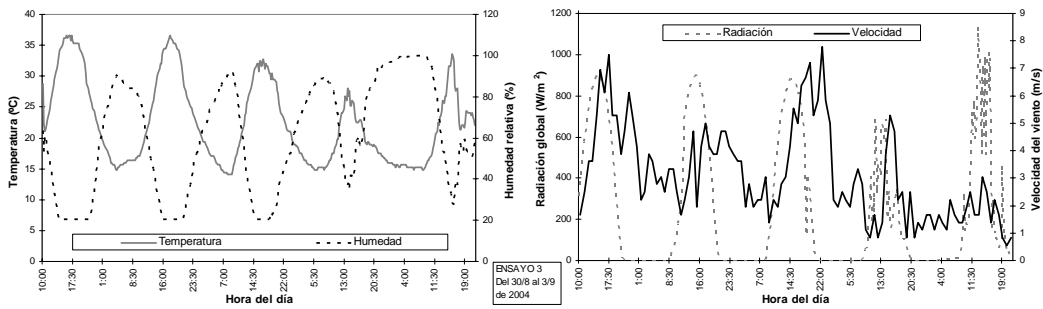


Figura 5.4: Variables climáticas relativas al ensayo 3.

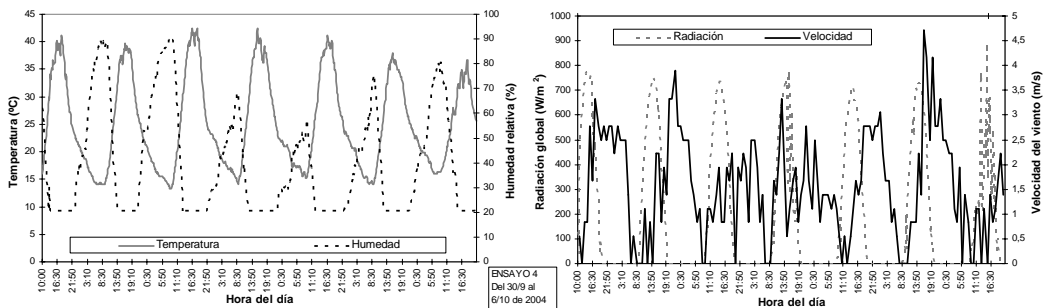


Figura 5.5: Variables climáticas relativas al ensayo 4.

### 5.3. Análisis de resultados.

A partir de los ensayos de secado solar directo de los distintos residuos industriales de la aceituna, se presentan los resultados de las siguientes magnitudes: evoluciones del contenido de humedad, ratios de humedad y velocidades de secado respecto al tiempo de operación, así como los tiempos de secado medios obtenidos para cada residuo. Estas variables serán fundamentales para valorar la eficiencia del prototipo de secadero solar.

Para el análisis de los resultados se han utilizado las expresiones desarrolladas en el capítulo 3. Como ya se indicó, en este tipo de aplicaciones, el ratio de humedad  $MR = (M_t - M_e)/(M_0 - M_e)$  se simplifica a:  $MR = M_t/M_0$ , puesto que la humedad relativa del aire fluctúa continuamente durante el proceso [62].

En primer lugar, se presenta un estudio global de los resultados para los tres subproductos. Posteriormente, se analiza la influencia en los diferentes ratios de secado de diversos parámetros, tales como espesor de producto, temperatura del aire desecante o velocidad del viento.

#### 5.3.1. Comportamiento global de los subproductos en el SDS.

Se pretende valorar la cinética en el secado natural de los tres subproductos de estudio, para una cantidad estándar de residuo, esto es, 2000 g de producto húmedo, y para las mismas condiciones ambientales. En todos los casos se muestran los ratios de secado hasta un contenido de humedad final del 20 % en base húmeda.

En la figura 5.6 se presenta la evolución del contenido en humedad en base seca,  $M_{db}$ , frente al tiempo de exposición, para las diferentes muestras estudiadas y los cuatro ensayos. Como se aprecia, existen unos intervalos con mayores separaciones entre medidas que se corresponden con los períodos de baja insolación y nocturnos; durante dichos intervalos, el contenido en humedad de las muestras se mantiene prácticamente invariable o en algunos casos aumenta.

Partiendo del contenido en humedad inicial propio de cada residuo, los tiempos de secado alcanzados en las baterías de ensayos, hasta que se llega a una humedad final del 20 % en peso *wb.*, oscilan entre las 72 h para el orujo como cifra mínima, y las 168 h y 174 h para el alperujo y alpechín, respectivamente, como cifra máxima. En la figura 5.7 se muestran los resultados de los tiempos de secado máximos, mínimos y medios obtenidos, teniendo en cuenta que éstos se consiguen para una superficie de exposición de 766,5 cm<sup>2</sup> y profundidad de bandeja de 2-3 cm (2000 g de producto).

En todos los ensayos, el residuo con menores tiempos de secado resultó ser el orujo. También, en la mayoría de los ensayos (excepto ensayo 4) el tiempo de secado del alpechín fue inferior al del alperujo, aun teniendo este último menor contenido

inicial de humedad. La justificación de este hecho puede estar en dos aspectos: por un lado, en el diferente método de obtención de los alperujos y alpechines, dando lugar en el proceso “dos fases” a un residuo (alperujo) de mayor contenido en sólidos y con mayor densidad, que dificulta el arrastre de humedad desde el interior a la superficie del producto donde se produce la evaporación; y por otro lado, su mayor contenido en aceite, que provoca una resistencia superior al paso del agua [158]. Estos dos aspectos dan lugar a tiempos de secado mayores. Este hecho también se observará en los ensayos realizados en el prototipo de secadero solar.

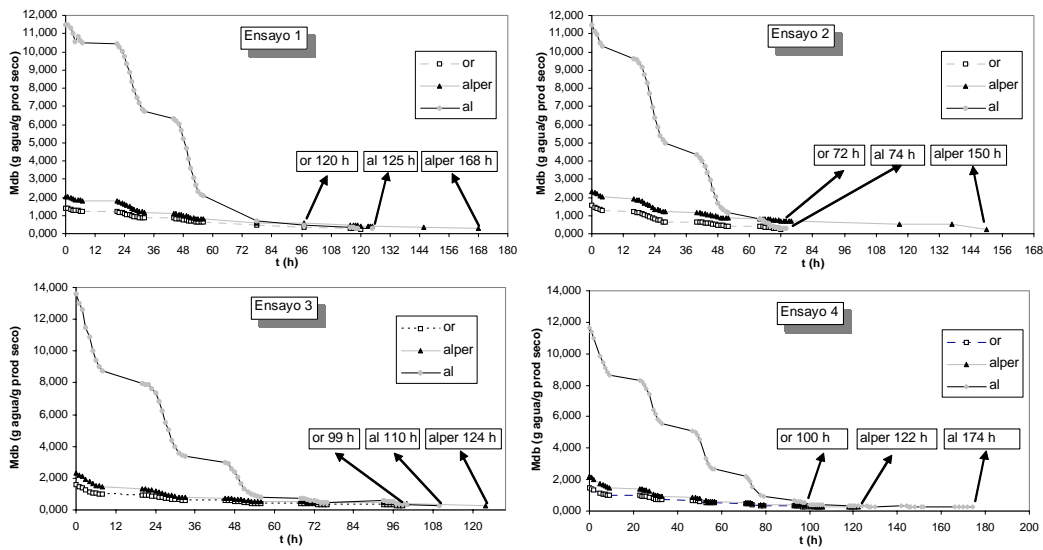


Figura 5.6: Contenido de humedad db. frente al tiempo (ensayos 1, 2, 3 y 4).

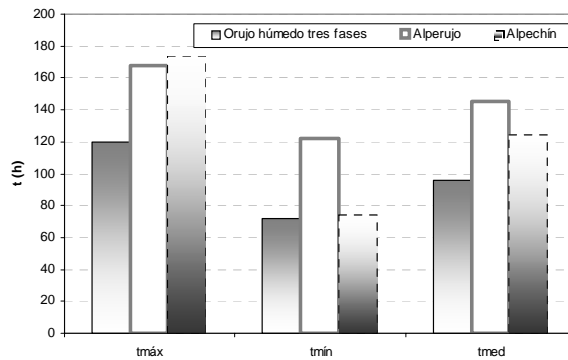


Figura 5.7: Tiempos de secado máximos, mínimos y medios para los subproductos.

El ratio de humedad,  $MR$ , frente al tiempo de operación para el ensayo 3 carac-

terístico, se indica en la figura 5.8. Como se aprecia, para un contenido de humedad final del 20 %, el ratio de humedad en base seca y en tanto por uno es de 0,156, 0,109 y 0,017 para orujo, alperujo y alpechín respectivamente, quedando patente que el contenido de humedad inicial de cada muestra es un parámetro esencial en la evaluación de la cinética de secado. Comparando  $MR$  con el contenido de humedad instantánea en base seca (figura 5.9) se comprueba que el orujo y el alperujo, por su próximo contenido de humedad inicial, tienen pendientes similares, siendo muy diferente a la obtenida para el alpechín.

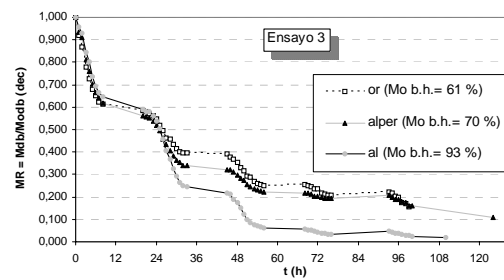


Figura 5.8: Ratio de humedad db. frente al tiempo de exposición.

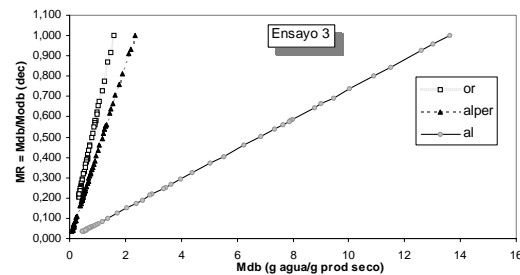


Figura 5.9: Ratio de humedad db. frente al contenido de humedad.

Derivando respecto al tiempo las curvas de la figura 5.6 para el ensayo 3 seleccionado, se obtienen los ratios de velocidad de secado en base seca,  $DR = dM_{db}/dt$ , para cada tipo de residuo (figuras 5.10, 5.11 y 5.12). Puede destacarse la ausencia de período de velocidad de secado creciente (fase 0) y constante (fase 1). Únicamente tiene lugar el periodo de velocidad de secado decreciente (fase 2), aspecto que han observado varios autores para diferentes materiales [57, 58]. El proceso durante la fase 2 se encuentra gobernado por la difusión del agua en el sólido, siendo éste un mecanismo caracterizado por la difusividad efectiva del material (determinada en el capítulo 4).

Como se puede apreciar, en todos los casos, el  $DR$  inicialmente es alto y disminuye

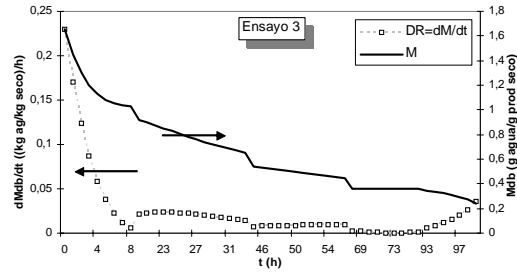


Figura 5.10: Velocidad de secado db. para orujo.

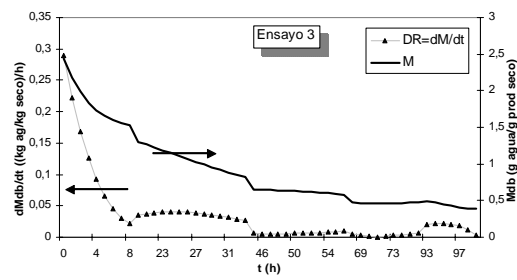


Figura 5.11: Velocidad de secado db. para alperujo.

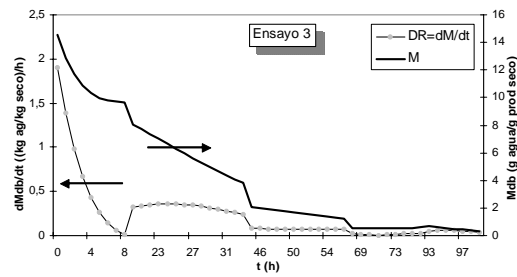


Figura 5.12: Velocidad de secado db. para alpechín.

considerablemente durante las primeras horas del proceso (aproximadamente las ocho primeras horas). A partir de ahí, el arrastre de humedad se dificulta, por lo que, la velocidad de secado es prácticamente constante y con variaciones muy pequeñas hasta la finalización del proceso de secado [58,62], provocando, por tanto, un aumento en el tiempo de secado.

### 5.3.2. Influencia del espesor de producto.

El espesor de producto es uno de los parámetros internos más importante en el estudio de los procesos de secado. Son muchos los autores que han analizado, en la cinética de secado en capa fina, la influencia del espesor con el tiempo de secado [129, 158, 167, 172].

En este caso se ha valorado la influencia del espesor de producto en el SDS partiendo de una cantidad inicial de producto correspondiente a 1, 1,5 y 2 cm. Se realiza este análisis con las mismas condiciones ambientales para cada batería de ensayos.

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se representa para el orujo, alperujo y alpechín respectivamente, la evolución de la humedad en base húmeda,  $M_{wb}$ , hasta niveles del 20 %, para los tres espesores en el ensayo 1. De nuevo, el orujo es el residuo, que para los tres espesores, alcanza en primer lugar el nivel de referencia establecido de humedad (20 %  $wb.$ ). También se vuelve a comprobar (tabla 5.1) que para el alperujo los tiempos de secado, en la mayoría de los ensayos, son mayores que para el alpechín.

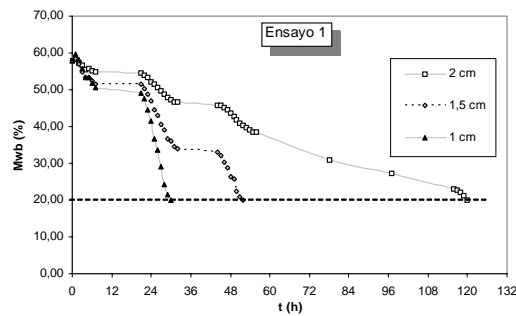


Figura 5.13: Variación temporal de humedad  $wb.$  según espesor para orujo.

Análogamente, en las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 se muestran los resultados del ratio de humedad,  $MR$ , para los diferentes residuos, obteniéndose los valores menores en el alpechín, como cabía esperar al ser el que mayor contenido de humedad inicial presenta.

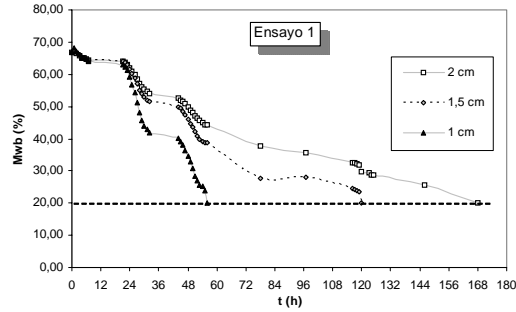


Figura 5.14: Variación temporal de humedad wb. según espesor para alperujo.

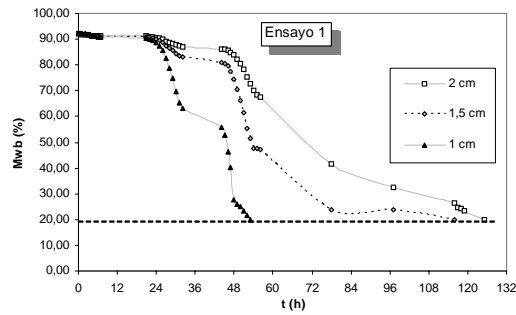


Figura 5.15: Variación temporal de humedad wb. según espesor para alpechín.

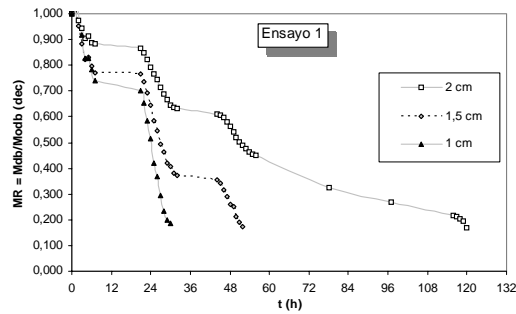


Figura 5.16: Ratio de humedad db. según espesor para orujo.



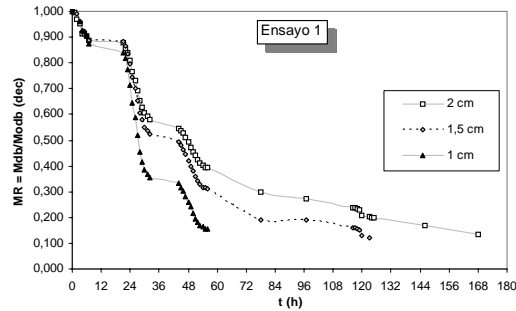


Figura 5.17: Ratio de humedad db. según espesor para alperujo.

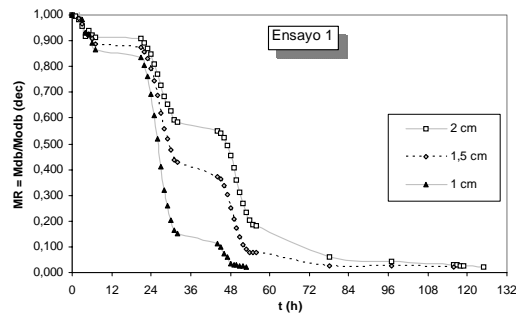


Figura 5.18: Ratio de humedad db. según espesor para alperchín.

Si se representa este parámetro para el alperchín con espesor 1 cm, a modo de ejemplo, para los cuatro ensayos realizados (figura 5.19), se observa en todos los casos la misma tendencia de disminución de humedad, marcada por los intervalos decrecientes y por los tramos constantes del periodo nocturno. Existe una variación para el ensayo 2 que se justifica por la hora de comienzo de este conjunto de ensayos. Además, es posible apreciar cómo en el ensayo 1 aumenta inicialmente dicho parámetro motivado por unas variaciones climáticas adversas en ese periodo, aspecto que se apuntó como limitativo del SDS.

Como resumen de resultados, en la tabla 5.1 se muestran los tiempos de secado de los diferentes subproductos para los distintos espesores en los cuatro ensayos realizados.

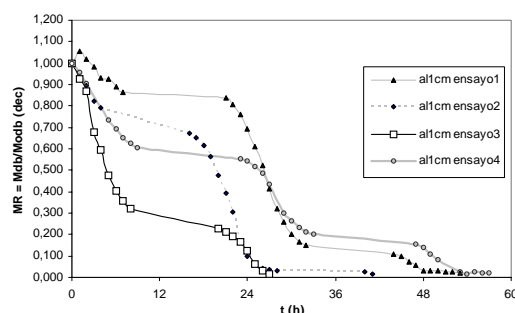


Figura 5.19: Ratio de humedad db. del alpechín con espesor 1 cm para los cuatro ensayos.

	Orujo			Alperujo			Alpechín		
	2cm	1,5cm	1cm	2cm	1,5cm	1cm	2cm	1,5cm	1cm
Ensayo 1	120	52	30	168	123	56	125	116	53
Ensayo 2	72	41	23	168	71	43	74	49	41
Ensayo 3	99	30	22	124	99	50	110	53	27
Ensayo 4	100	49	25	122	94	72	174	94	57

Tabla 5.1: Tiempos de secado hasta niveles de humedad wb. 0,2 dec.

Como muestra la gráfica realizada espesor-tiempo de secado para los tres subproductos (figura 5.20), conforme aumenta el espesor aumenta el tiempo de secado. Este comportamiento está asociado [158] al mecanismo de secado, siendo en los espesores mayores gobernado por la difusividad del material y en los espesores más finos por la capilaridad del producto.

Sin embargo, esta variación espesor-tiempo para los subproductos de estudio no varía linealmente, sino que lo hace de forma exponencial.

De esta forma, queda patente la importancia de la influencia del espesor de producto en la cinética de secado en “capa fina”. Los resultados obtenidos en este trabajo se podrían extrapolar hasta espesores máximos de 50-100 *cm* con un adecuado sistema de volteo del producto. Para espesores mayores, sería necesario un estudio particular del proceso de secado.

### 5.3.3. Influencia de parámetros externos.

Los dos parámetros externos que condicionan de mayor manera el SDS son la temperatura y la velocidad del aire ambiente. Diferentes autores han modelado la influencia en el secado natural y artificial de estos parámetros [129, 158, 169, 173, 174].

Respecto a la influencia de la temperatura, conforme aumenta ésta disminuye el

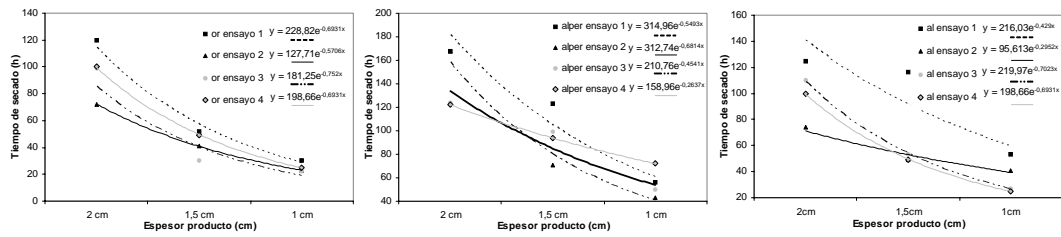


Figura 5.20: Tiempo de secado frente al espesor de producto.

tiempo de secado, o lo que es lo mismo, para el mismo tiempo de secado disminuye el ratio de humedad con la temperatura de secado para iguales condiciones de trabajo (espesor, viento, etc) [59, 129, 158]. En las figuras 5.21, 5.22 y 5.23 se muestra este efecto para el orujo, alperujo y alpechín, respectivamente, a temperaturas de 25 °C y 35 °C, medidas en los ensayos de SDS. Como se aprecia, para un aumento de la temperatura de 10 °C, se consiguen, en las primeras horas del proceso, disminuciones del *MR* superiores al 25 %, obteniendo la mayor disminución en el orujo, seguida del alperujo y alpechín.

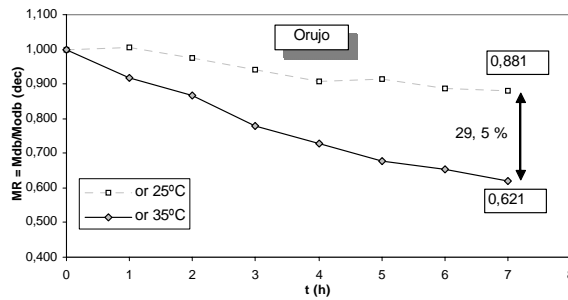


Figura 5.21: Influencia de la temperatura ambiente en el SDS para orujo.

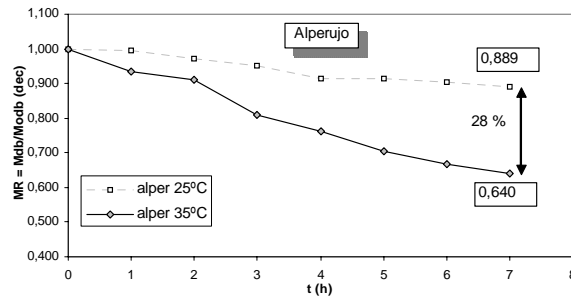


Figura 5.22: Influencia de la temperatura ambiente en el SDS para alperujo.

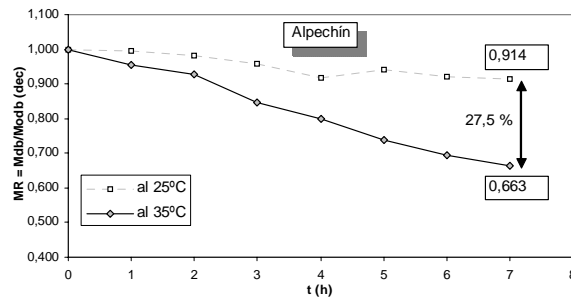


Figura 5.23: Influencia de la temperatura ambiente en el SDS para alpechín.

En lo que se refiere a la influencia de la velocidad del aire desecante, cuando aumenta la velocidad, disminuye el tiempo de secado, para iguales condiciones de trabajo (espesor, temperatura, etc) [173], [59]. En las figuras 5.24, 5.25 y 5.26 se presentan los resultados obtenidos para orujo, alperujo y alpechín, respectivamente, para velocidades de 2 y 4  $m/s$ . Según las gráficas, para un aumento de un 50 % en la velocidad de aire, se consiguen, en las primeras horas del proceso, disminuciones del  $MR$  del orden del 10 %.

En este caso, las mejoras conseguidas con el aumento de la velocidad son inferiores a las obtenidas con el aumento de la temperatura. Además, al contrario que en el estudio del efecto de la temperatura, los mejores resultados se obtienen para alpechín, seguido del alperujo y orujo. Esto es debido a que el aumento de la temperatura del aire ambiente tiene mayor influencia en el incremento de la temperatura de producto y, por tanto, en la mejora de la difusividad efectiva del material. Sin embargo, el aumento de la velocidad del viento no provoca una mayor temperatura en el producto, sino mejora de la evaporación superficial, siendo por tanto el alpechín el más beneficiado de este hecho.

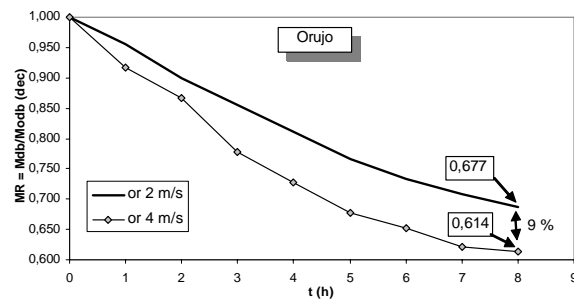


Figura 5.24: Influencia de la velocidad del aire en el SDS para orujo.

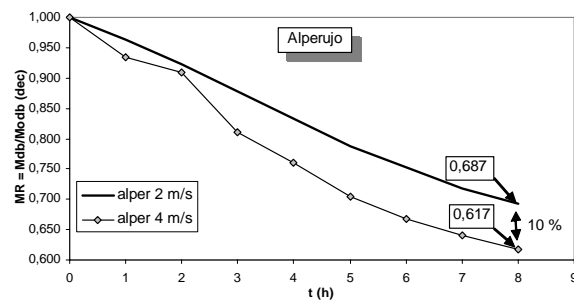


Figura 5.25: Influencia de la velocidad del aire en el SDS para alperujo.

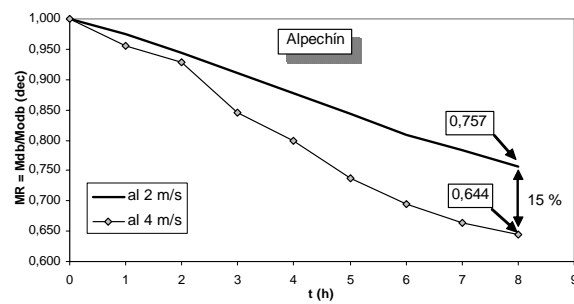


Figura 5.26: Influencia de la velocidad del aire en el SDS para alpechín.



## Capítulo 6

# Justificación del equipo experimental.

### 6.1. Introducción.

En el capítulo 3 se desarrollaron los aspectos teóricos relacionados con el secado solar, describiéndose, de forma global, los principales sistemas existentes para su aplicación, así como los parámetros más relevantes que influyen en el proceso y que deben valorarse para la optimización del mismo.

Para la aplicación del secado solar a los residuos de almazara, con vistas a una utilización energética posterior, es necesario realizar un análisis de las propiedades físicas, químicas y térmicas de estos subproductos. Esta caracterización se realizó en el capítulo 4.

En el capítulo 5 se valoró la cinética de dichos residuos en el secado natural. Por un lado, se expusieron los inconvenientes fundamentales de este sistema y, por otro, se obtuvieron conclusiones sobre la influencia de diferentes parámetros externos e internos en el proceso de secado solar.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, en el presente capítulo se describen de forma pormenorizada las características y dimensiones del prototipo de secadero solar híbrido, diseñado y construido para la realización de los ensayos de secado en los subproductos de la producción de aceite de oliva, indicándose además las características de otro equipamiento externo al prototipo utilizado para el control exhaustivo del proceso.

Mediante dicho prototipo se pretende establecer la cinética de secado de los subproductos procedentes de la industria almazarera (capítulo 7). Los resultados obtenidos serán fundamentales para cuantificar las necesidades de una posible planta industrial de secado solar de residuos (capítulo 9).

## 6.2. Descripción general del prototipo de secadero solar.

La instalación de estudio (figura 6.1) consiste en un prototipo de secadero solar híbrido cuyos elementos principales son el colector solar de aire de placa plana, la cámara de secado con las bandejas para el producto a secar, la chimenea de salida del aire y el sistema de aporte energético suplementario. Además, dispone de una serie de equipos auxiliares para su operación, control y medida, que se describirán de forma detallada en este capítulo.

El funcionamiento básico del sistema es el siguiente: el colector solar, a través de la energía captada de la radiación solar y el efecto invernadero provocado, consigue calentar a la vez que inducir un movimiento natural de convección en el aire, y fundamentalmente reducir su humedad relativa. Este aire, con mejores propiedades desecantes, circulará desde dicho calentador solar hasta la cámara de secado donde entrará en contacto con los productos, provocando su disminución de humedad, saliendo finalmente por la chimenea con menor temperatura y mayor humedad relativa.

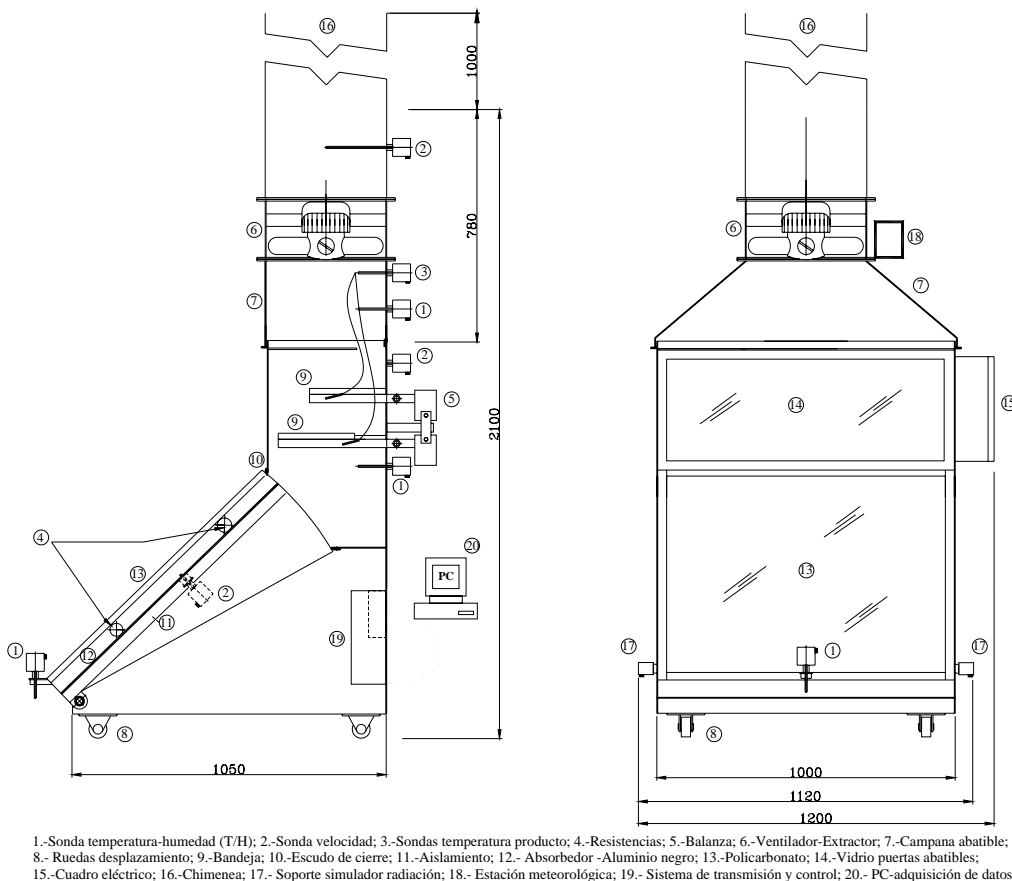


Figura 6.1: Esquema del prototipo de secadero solar.



En lo relativo al diseño del sistema, se describen a continuación los principales aspectos. La estructura que soporta el conjunto del secadero se diseñó de manera que pudiera acoplarse fácilmente el colector solar de aire a la cámara de secado y que permitiera una fácil integración de los diferentes elementos de medida y control. Además, dicha estructura se dotó de ruedas de desplazamiento para dar al equipo mayor versatilidad de operación y permitir el cambio de ubicación de forma sencilla.

La elección de la configuración se llevó a cabo teniendo en cuenta los subproductos a tratar y, principalmente, las diferentes formas de funcionamiento que se pretenden valorar: convección forzada, convección natural, secado indirecto, secado mixto y sistema híbrido. Así, se tienen los siguientes modos de funcionamiento:

- Modo activo: funcionamiento en convección forzada mediante la utilización del ventilador. Además, en este caso es posible variar el flujo másico existente mediante el correspondiente regulador de velocidad, permitiendo evaluar en el proceso de secado los efectos relativos de la variación del caudal de aire.
- Modo pasivo: el aire se desplaza por la variación de su densidad, provocada por las diferentes temperaturas en las distintas partes del equipo.
- Modo mixto: precalentamiento del aire en el colector y radiación solar directa sobre el producto.
- Modo indirecto: exclusivamente precalentamiento del aire en el captador solar, esto es, sin radiación solar directa sobre el producto.
- Modo híbrido: utilización de resistencias para aumentar el calentamiento del aire. Este sistema simula el comportamiento que tendría el secadero con un aporte energético suplementario al calentamiento solar, por ejemplo, el procedente de la combustión de algún residuo biomásico. El funcionamiento en modo híbrido se realizará junto con alguna de las formas anteriormente descritas.

Además de estos modos de funcionamiento, se realizaron en el prototipo, durante el periodo invernal, diferentes análisis de cinética de secado y de caracterización de los subproductos (capítulo 4) mediante simulación de la radiación.

Para posibilitar los ensayos en las diferentes formas preestablecidas, se han previsto los siguientes dispositivos:

- Ventilador-extractor para forzar la circulación del aire. Dicho ventilador se monta sobre una “campana” abatible que permite el funcionamiento del sistema en convección natural.

- Chimenea acoplada a la cámara de secado para optimizar el funcionamiento en el modo pasivo.
- Soporte para la estructura de simulación de radiación solar. Dicha estructura está formada por una serie de lámparas infrarrojas; posteriormente se detallará de forma más exhaustiva su utilización.
- Dispositivo de regulación de la inclinación del colector solar en un rango comprendido entre 20° y 40°, manteniendo constante el paso de aire.
- Sistema de aporte energético suplementario formado por dos resistencias eléctricas de 1500 *W* cada una y ubicadas en el interior del colector. Tras diferentes pruebas, fueron sustituidas por resistencias de 1000 *W* cada una para evitar problemas de sobrecalentamiento que surgieron en la instalación.

Por otro lado, con el fin de controlar en los ensayos las variables principales, se ha dotado al equipo de las siguientes sondas de medida (figura 6.1):

1. Temperatura y humedad relativa del aire: ubicadas a la entrada del colector, al inicio de la cámara de secado (salida colector) y a la salida de la misma.
2. Velocidad del aire: instaladas en la sección media del calentador solar, en la zona media de la cámara de secado y en la chimenea.
3. Temperatura de producto: dotadas de un sistema flexible que permite colocarlas en cada ensayo en el interior del subproducto.
4. Peso del producto: sistema de control de peso mediante células de carga sobre cada una de las bandejas.

A partir del diseño establecido, se realizó la puesta en marcha del prototipo instalado en la azotea de la Escuela de Ingenierías Industriales durante el periodo de junio a septiembre de 2004. Sin embargo, debido a diferentes incidencias que tuvieron lugar durante los ensayos, fue necesario realizar ajustes posteriores en diversos componentes que constituyen el sistema (estas incidencias se describirán a lo largo del presente capítulo). La configuración final del prototipo se muestra en la figura 6.2.

### **6.2.1. Sistemas de medida y control.**

Se describen a continuación los diferentes dispositivos instalados en el secadero para el control de las principales variables que intervienen en el proceso.



Figura 6.2: Configuración final del prototipo de secadero solar.

### Sondas de temperatura seca y humedad relativa del aire.

**Entrada del colector.** Para medir las condiciones del aire ambiente en la entrada del colector, se ha ubicado un transmisor de humedad relativa y temperatura que permite la transferencia a distancia en forma de doble señal 4-20  $mA$  y conexión a 2 hilos de cada una de las medidas. El modelo es THR-340/CM de Desin Instruments para aplicaciones generales en ambiente, esto es, a presión atmosférica y no muy alta temperatura.

El margen de trabajo es de 0 a 50  $^{\circ}C$  para la temperatura y de 0 a 100 % para la humedad relativa. La exactitud del equipo es de  $\pm 0,8$  % para la temperatura, de  $\pm 2$  % para la humedad relativa en el margen del 10-90 % y de  $\pm 4$  % en el resto de escala. El conexionado se realiza mediante una fuente de 24  $V_{dc}$  común, modelo FAC-24/1000 y un módulo del sistema de adquisición DAS-8000 con comunicación a PC.

Dispone de un circuito independiente para la medida de la temperatura, basado en un sensor tipo Pt-100, y otro para la medida de humedad relativa basado en un sensor tipo semiconductor, que entrega una señal variable en función del porcentaje de humedad relativa al que está expuesto. Ambas señales eléctricas son convertidas en

señales normalizadas de 4 a 20 *mA*.

**Entrada y salida de la cámara de secado.** Para la medida de las condiciones del aire al inicio y al final del proceso de secado, se dispone en la entrada y salida de la cámara, respectivamente, de transmisores de humedad relativa y temperatura, con señal de doble salida 4-20 *mA* y conexión de 2 hilos. En este caso, el modelo utilizado es THR-370/PR de Desin Instruments para uso en aplicaciones a alta presión y alta temperatura. La escala de medida del equipo es de 0 a 100 °C para la temperatura y de 0 al 100 % para la humedad relativa. La exactitud que proporciona es de ±0,4 % para la temperatura, de ±2 % para la humedad relativa en el margen de 10-90 % y de ±4 % en el resto. Las demás características son similares a las de la sonda anteriormente descrita.

#### **Sondas de temperatura de producto.**

Para la medida de la temperatura de producto se han instalado dos termopares (uno para cada bandeja) de las siguientes características: marca TC, modelo 13-T-1-3P12, de cromo-níquel con vaina metálica y aislamiento mineral. Disponen de cabezal de hierro fundido resistente al agua. El rango de medidas es de -185 °C a 300 °C.

#### **Sondas de velocidad del aire.**

La medida de velocidad de aire en las secciones principales del secadero (colector, cabina y chimenea) se realiza mediante medidores de velocidad TURCK, siendo estos sensores de control de flujo con procesador incorporado modelo FCS-HA2-LIX-H1141/AL115. El rango de operación es de 0,5 a 30 *m/s*, con señal de salida de 4 a 20 *mA*. El tiempo de respuesta es de 4 a 30 *s*.

Estos sensores funcionan mediante un principio calorimétrico a través de dos resistencias internas. Una de las resistencias se ve afectada por la temperatura del fluido circulante mientras que la otra dispone de un elemento calentador. La diferencia de temperatura entre las dos resistencias produce un cambio en el voltaje detectado por la conexión puente entre ambas. Comparando las diferencias de dicho voltaje el sensor detecta las condiciones reales del flujo.

Los tres dispositivos han sido calibrados adecuadamente en los laboratorios de calibración de Tecnatom, S.A. Las curvas de ajuste de los tres medidores se presentan en la figura 6.3.

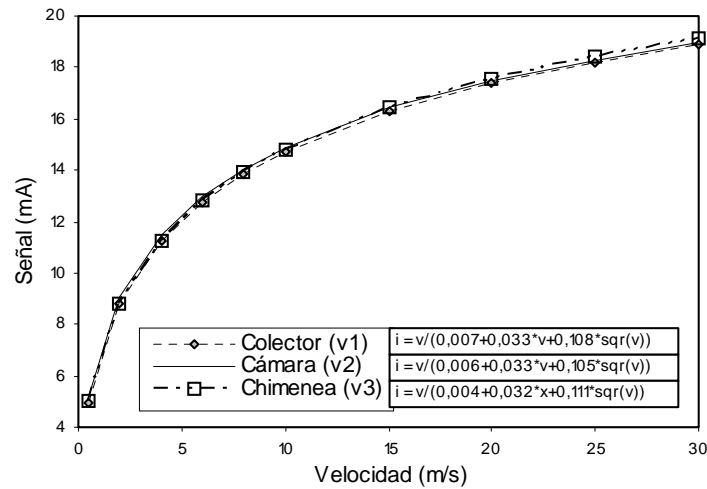


Figura 6.3: Calibración de los diferentes medidores de caudal.

### Sistema de control de peso del producto.

Para controlar la pérdida de humedad del producto se ha dispuesto, en cada una de las dos bandejas existentes, una célula de carga que registra de forma continua el peso del subproducto. El modelo es MP 50 C3 de GWT con transmisor digital MP25 y tiempo de respuesta de 600 *ms*. El sistema tiene una capacidad máxima de 3 *kg* y error de medida de 0,02 % de dicha capacidad máxima.

### Sistema de adquisición de datos.

La adquisición de datos se realiza de forma automática, llevando las señales medidas en el prototipo a un registrador, que a su vez enlaza con un PC que dispone de software específico TCS-01, desarrollado por Step Logistica y Control. La aplicación trabaja bajo Windows y permite variar la frecuencia de muestreo y registro de datos entre 10 segundos y varios minutos. Toda la información se guarda en ficheros mensuales en formato .CSV, lo que permite la realización de historiales y consultas.

### Cuadro eléctrico de mando y control.

El conjunto dispone de un cuadro general de protecciones, emplazado en el laboratorio donde se encuentra instalado el sistema de adquisición de datos, y de un cuadro individual ubicado en un lateral del secadero que permite la desconexión instantánea del sistema y el control de las resistencias de calentamiento, el ventilador de aire y el regulador de velocidad.

### 6.2.2. Equipamiento adicional externo al prototipo.

#### Estación meteorológica.

Para modelar y estudiar el proceso de secado es necesario conocer las variables ambientales temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

Las tres primeras propiedades se han obtenido mediante la utilización del registrador o mini estación meteorológica, WatchDog Data Logger 450, instalado en las inmediaciones del secadero. El equipo dispone de un blindaje que lo protege de la lluvia, de la radiación solar u otras fuentes de calor que podrían distorsionar las mediciones. La construcción laminar del protector asegura una buena ventilación y dispone de una tapa extraíble que facilita el acceso rápido y sencillo al elemento de medida.

El registrador incluye reloj y memoria interna para grabar la hora y el día de las lecturas. Realiza medidas de cada variable cada 5 s y es posible configurar el tiempo de grabado desde 1 min hasta varias horas. Dependiendo de la elección de ese tiempo, la duración de la memoria será mayor o menor.

Como sensores internos, el registrador cuenta con toma de temperatura y humedad relativa en un rango de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  y de 20 % a 100 %, respectivamente, con exactitudes de  $\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 3\text{ }%$ . Sin embargo, para la obtención de la radiación solar global es necesario la utilización de un dispositivo adicional o sensor externo, el piranómetro. Éste captura radiación solar entre 300 y 1100 nm, con un rango de medidas entre 0 y  $1250\text{ W/m}^2$  y un margen de exactitud del  $\pm 5\text{ }%$ . Proporciona la medida de radiación global sobre superficie horizontal, por lo que dispone de un nivel de burbuja que permite controlar en todo momento la horizontalidad del mismo.

Para contrastar la bondad de las medidas de temperatura y humedad relativa se utilizó otra estación meteorológica WatchDog Data Logger 250.

#### Anemómetro con sensor de rueda alada.

Para conocer la velocidad media del viento durante los ensayos se ha utilizado un anemómetro de precisión de rueda alada AVM-07 del grupo PCE con memoria. El equipo permite medir la velocidad del viento, la temperatura del aire y el caudal volumétrico, siendo necesario, en este último caso, introducir el área de la sección ajustada en el punto de medida. Las especificaciones del dispositivo son: rango de velocidad del viento de 0 a  $45\text{ m/s}$  y precisión  $\pm 3\text{ }%$ , rango de temperatura de 0 a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  y precisión  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y rango del flujo de aire de 0 a  $278\text{ m}^3/\text{s}$ .

### Anemómetro de hilo caliente.

Para caracterizar el regulador de velocidad del ventilador y comprobar la bondad de las medidas obtenidas con los sensores instalados en el prototipo se utilizó un anemómetro de hilo caliente AM 4204-HA del grupo PCE con memoria. El rango de medición para la velocidad y la temperatura del aire es de 0,2 a 20  $m/s$  con precisión de  $\pm 1\%$  y de 0 a 50  $^{\circ}C$  con precisión de  $\pm 0,8\text{ }^{\circ}C$ , respectivamente. El tiempo de respuesta del aparato se estima en 0,8 s.

### 6.3. Colector solar de aire.

El calentador solar, de dimensiones exteriores 1000 x 1000 x 100  $mm$ , es del tipo sencillo con paso de aire superior (figura 6.4) y dimensiones útiles 994 x 934 x 95  $mm$ . Está formado por una placa absorbedora de aluminio negro de 1  $mm$  de espesor, cubierta de policarbonato transparente de 4  $mm$  de espesor y aislamiento de lana de roca compactada de 40  $mm$ . La cámara de aire existente entre la cubierta y el absorbedor tiene un espesor de 50  $mm$ . De esta forma, el área útil del colector es 0,9284  $m^2$  y la superficie de paso de fluido de 0,0467  $m^2$ .

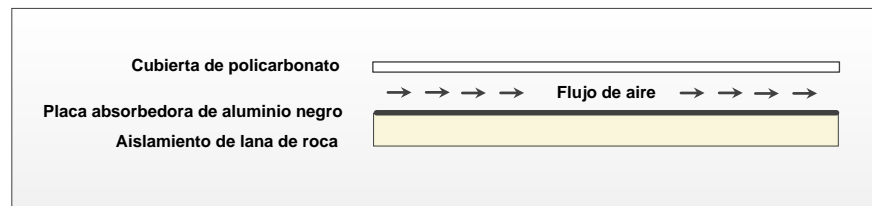


Figura 6.4: Esquema colector solar de aire.

Para el estudio de los procesos de secado en los periodos de baja insolación y la caracterización de los subproductos (capítulo 4) se dotó al sistema de un acoplamiento para el soporte de la estructura de simulación de radiación solar.

Inicialmente esta estructura estaba formada por seis lámparas infrarrojas de 175  $W$  cada una (estructura A). Para conseguir una mejor distribución del aire caliente y proporcionar un mayor incremento de la temperatura a la salida del colector (y disminución consecuente de la humedad relativa), se realizó otra estructura de 12 lámparas infrarrojas de 150  $W$  cada una (estructura B).

La distribución de radiación en cada una de las estructuras se muestra en la figura 6.5. Como se pone de manifiesto, mediante la estructura B se consigue una mayor y mejor distribución de la radiación, obteniéndose incrementos de temperatura y reducciones de humedad entre la entrada y la salida del colector de mejores características.

Así, éstos oscilan en la estructura A, dependiendo del modo de funcionamiento, entre 3 y 7 °C y entre 3 y 15 % respectivamente, mientras que en la estructura B cubren un rango de aumento de temperatura entre 6 y 20 °C y de disminución de humedad relativa entre 10 y 40 %. En la figura 6.6 se puede observar dicha distribución para ambas estructuras.

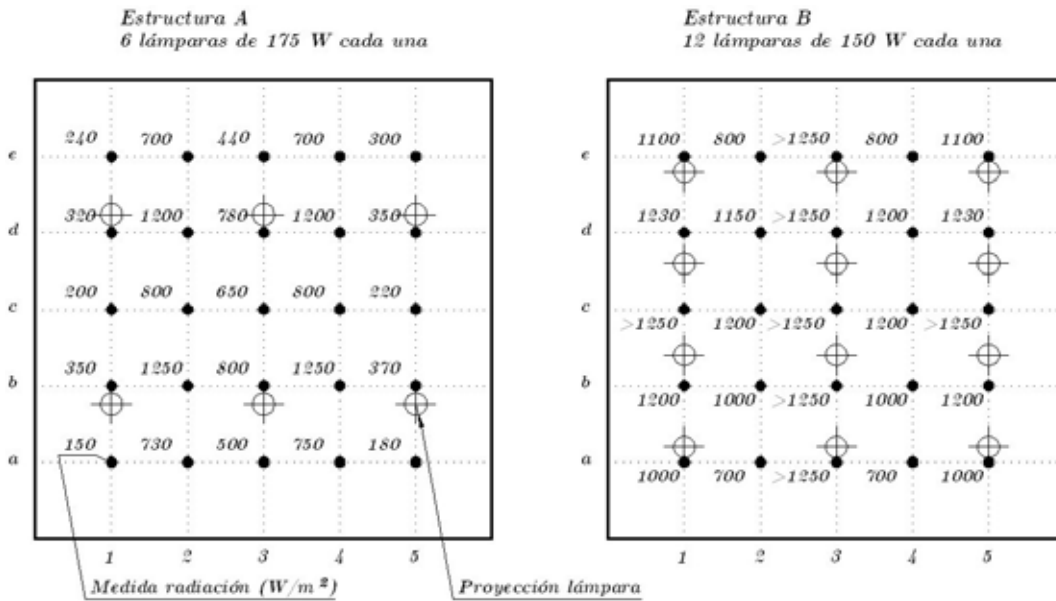


Figura 6.5: Medidas de radiación con estructuras de simulación.

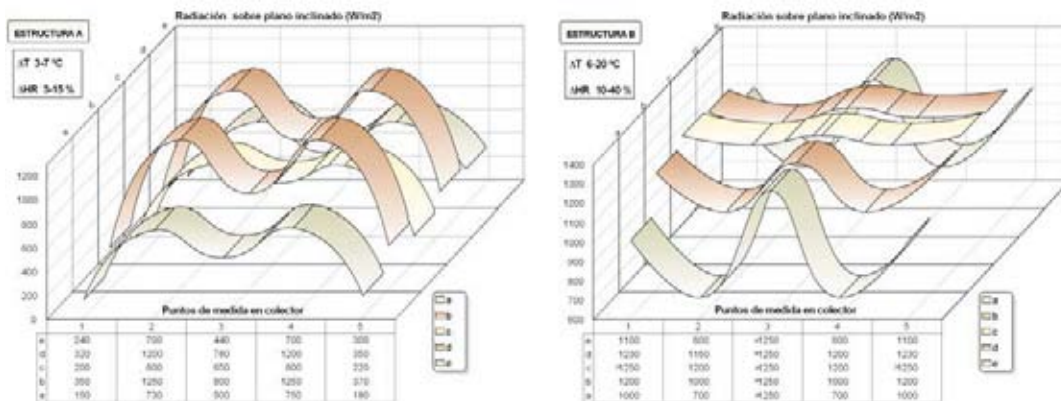


Figura 6.6: Diagramas de radiación con simulador para estructura A y B.

Por otro lado y como se describió anteriormente, en el colector se han ubicado dos resistencias eléctricas, inicialmente de 1500 W cada una y longitud 950 mm, y posteriormente, de 1000 W cada una y longitud 750 mm. Dichas resistencias servirán



para simular diferentes modos de funcionamiento, bien para utilizarlas como energía complementaria para los períodos nocturnos o de baja insolación o bien para emplearlas como base del aporte calorífico simulando el funcionamiento del secadero en modo híbrido.

### 6.3.1. Inclinación del colector.

La inclinación de un colector es un aspecto importante a considerar. El ángulo óptimo del colector ( $\beta$ ) respecto a la horizontal para una latitud ( $l$ ) dada, para cada día del año, sería igual al indicado en la ecuación 6.1 [91], donde  $\delta$  es la declinación y cuya variación diaria se dio en el capítulo 3 (ec. 3.54).

$$\beta = l - \delta \quad (6.1)$$

Por razones obvias, no resulta rentable la utilización de sistemas de seguimiento solar en aplicaciones solares térmicas de baja temperatura, ya que el incremento de rendimiento se considera poco significativo respecto al aumento de coste que supone su instalación. Sin embargo, sí resulta conveniente proporcionar la inclinación y orientación adecuada al sistema de captación de forma que se maximice durante el mayor tiempo posible la ganancia solar.

Así, para optimizar la captación de radiación se recomienda una orientación del sistema hacia el sur geográfico del lugar y una inclinación, de forma aproximada, igual a la latitud del lugar más diez grados en invierno e igual a la latitud menos diez grados en verano [85].

En la figura 6.7 se muestra la variación del ángulo óptimo para la latitud de Badajoz ( $38,88^\circ$ ) en los diferentes días del año. Para el periodo de utilización previsible de un secadero solar, marzo-octubre, este ángulo presenta valores óptimos para dicha latitud entre  $45^\circ$  y  $15^\circ$ .

Para estudiar el efecto de la variación de inclinación, el prototipo dispone, como se indicó anteriormente, de un sistema de regulación de la inclinación del colector que permite orientar el panel de la forma más adecuada en cada periodo del año. Consta de cuatro posiciones posibles, correspondientes a  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $35^\circ$  y  $40^\circ$ .

Se realizaron medidas en vacío durante el mes de septiembre de 2004 (ángulo óptimo  $33^\circ$ ) para evaluar la influencia de la inclinación en la temperatura de salida del captador. Para ello, se varió la inclinación del calentador en las cuatro posiciones indicadas, a intervalos de 15 min y con registro de medidas cada minuto.

En la figura 6.8 se muestra la variación de la temperatura de salida del colector respecto a su ángulo de inclinación, para funcionamiento en convección natural. Se

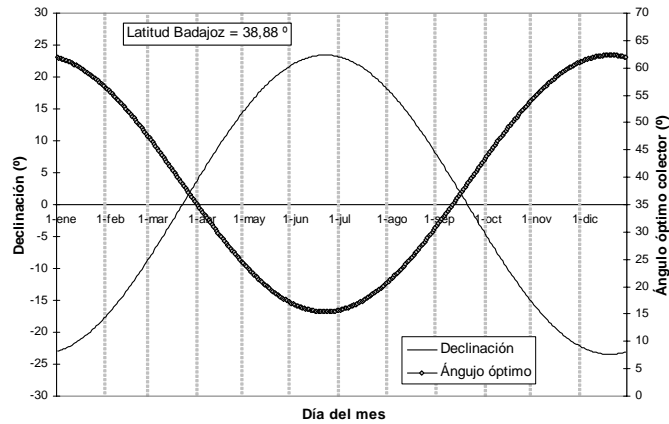


Figura 6.7: Ángulo óptimo del colector en Badajoz para cada día del año.

observan incrementos de temperatura superiores a  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  respecto a la temperatura de entrada, correspondiendo los mayores valores de temperatura de salida al ángulo de  $35^{\circ}$  (para el mismo nivel de radiación). En la figura 6.9 se presenta esta variación para convección forzada, registrándose incrementos de temperatura superiores a  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  identificando, de nuevo, los mayores valores para el ángulo de  $35^{\circ}$  (para el mismo nivel de radiación) y reducciones significativas de la temperatura para el ángulo de  $40^{\circ}$ .

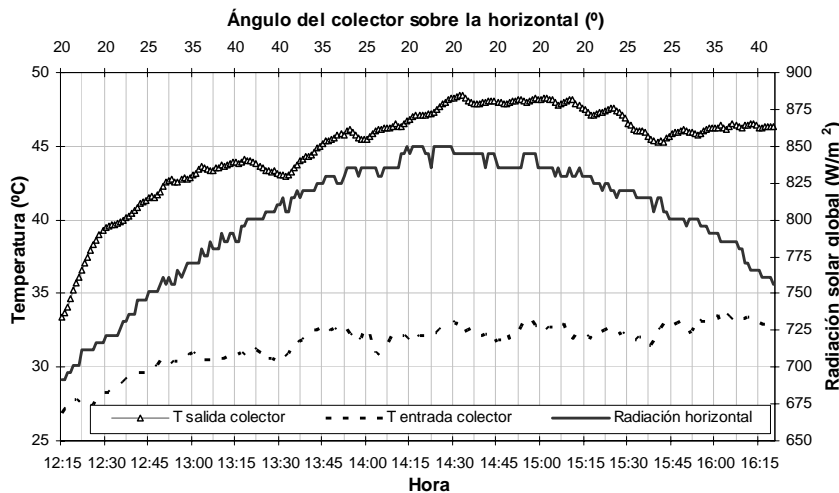


Figura 6.8: Temperatura de salida del colector respecto a su inclinación en convección natural.

Por estar ubicado el secadero en Badajoz y para el periodo de realización de los ensayos (periodo estival) se seleccionó como inclinación constante la correspondiente

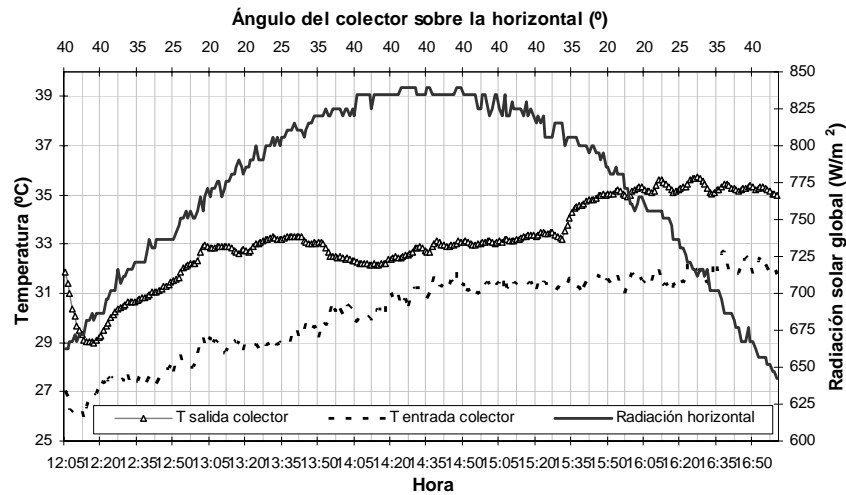


Figura 6.9: Temperatura de salida del colector respecto a su inclinación en convección forzada.

a 20° (óptima para 1 de agosto).

### 6.3.2. Eficiencia del colector solar.

La eficiencia de un captador solar en un cierto instante es función de los parámetros operativos del sistema, a saber: la radiación incidente, la temperatura ambiente y la temperatura de entrada del colector. En el capítulo 3 se indicó la expresión 3.72 para determinar su valor en función del flujo másico de aire, el calor específico, la radiación solar, la temperatura de salida y la temperatura de entrada.

Para conocer el valor aproximado de esta variable, previamente a los ensayos de secado, se realizaron diferentes pruebas sobre la influencia en el rendimiento de las inclinaciones posibles. Para calcular dicho parámetro es necesario, primeramente, transformar los datos de radiación horaria sobre plano horizontal (dato obtenido mediante piranómetro) a radiación sobre la superficie inclinada del colector, para cada ángulo. Para ello, se utilizaron las ecuaciones descritas en el capítulo 3 (ec. 3.52 - ec. 3.69).

A modo de ejemplo, se muestran en la figura 6.10 los resultados obtenidos para el funcionamiento en modo pasivo. Como se observa, se obtuvieron eficiencias en el rango 65-90 %, correspondiendo los mayores valores para la inclinación de 35°, indicada como óptima para la fecha de realización de dicho ensayo.

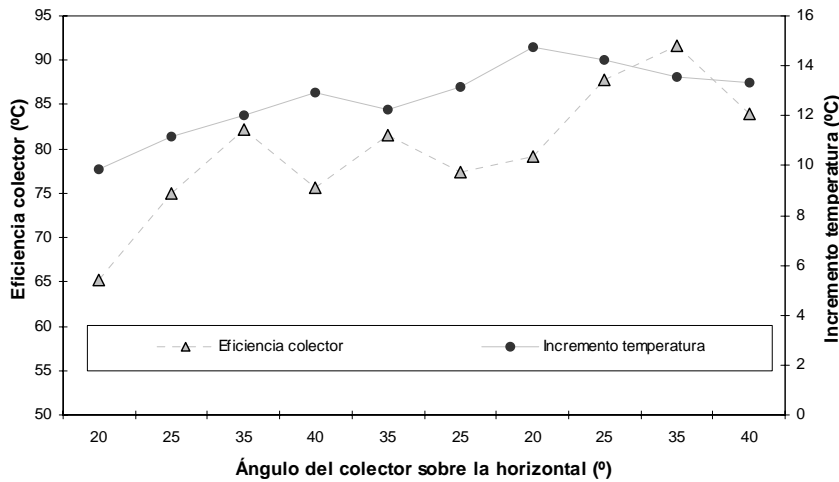


Figura 6.10: Eficiencia del colector en vacío para diferentes inclinaciones en modo pasivo.

#### 6.4. Cámara de secado de productos.

De las diferentes formas posibles de cámaras de secado [38] (según el tipo de producto a secar, la capacidad de producción específica, la forma de calentamiento solar, el sistema de carga y descarga, etc), para el propósito de este trabajo se seleccionó la configuración tipo cabina. Con ella se posibilita transformar el modo de funcionamiento, controlar de forma sencilla el proceso, determinar la cinética de los subproductos con bajos niveles de carga, variar el tipo de subproducto a ensayar sin dificultad (sustitución del tipo de bandeja) y realizar la carga y descarga con facilidad.

La cámara de secado (figura 6.11) tiene unas dimensiones de 1000 x 400 x 493 mm. En ella se ha dispuesto una estructura para soportar dos bandejas en las que se colocarán los productos a secar. Las dimensiones de dichas bandejas son 890 x 280 x 20 mm. Para realizar ensayos con diferentes espesores de producto se cuenta con bandejas de mayor espesor (30 y 40 mm). Se seleccionaron bandejas perforadas (tamiz de 4 mm) para los materiales sólidos (orujo), mejorando de esta manera la transferencia de energía, y bandejas opacas para los materiales líquidos (alpechín) o semisólidos (alperujo). El peso de las bandejas de 20 mm es 396 g para las no perforadas y 561 g para las perforadas (aluminio de mayor espesor).

Por otro lado, en el diseño se previeron puertas de vidrio translúcido de dimensiones 930 x 430 mm que permiten el paso de la radiación solar, con el propósito de comprobar la cinética de secado de los subproductos en el modo de funcionamiento mixto. Dichas puertas fueron cubiertas con un espesor de material aislante para los ensayos en modo

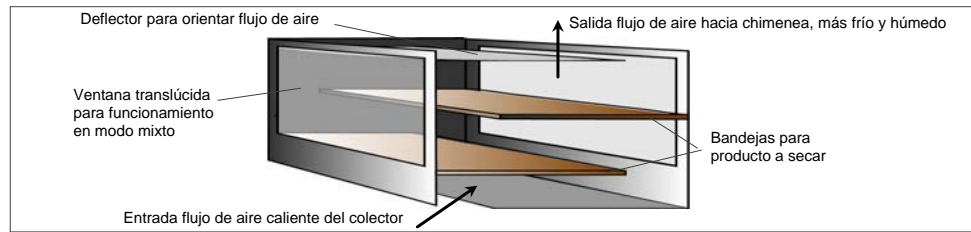


Figura 6.11: Esquema cámara de secado.

indirecto. Este sistema permite realizar de forma sencilla tanto la carga y descarga de las bandejas como el mantenimiento y limpieza de la cabina de secado.

Acoplada a la cámara, a través de una campana reductora, se ha instalado una chimenea de acero galvanizado de  $350\text{ mm}$  de sección y  $1000\text{ mm}$  de longitud que mejora el funcionamiento del sistema en modo pasivo, aumentando la velocidad de paso del aire de secado.

#### 6.4.1. Ventilador y sistema de regulación de caudal.

El elemento central en un sistema de secado por convección forzada es el ventilador. Para hacer funcionar al secadero en modo activo se instaló en la parte superior de la campana reductora, mediante las correspondientes conexiones, un ventilador de aire axial-helicoidal CASAL HM 35 M4 1/6, con un caudal máximo de aire de  $2900\text{ m}^3/\text{h}$  y motor de  $0,11\text{ kW}$  de potencia nominal. Para el control manual de la velocidad se utiliza un regulador de velocidad CASAL REG 3 A. Las características técnicas principales del ventilador y del regulador se muestran en la tabla 6.1.

Ventilador		Regulador	
$P_{nominal}$ (kW)	0,11	$I_{máx}$ (A)	3
$Q_{máx}$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	2900	$I_{mín}$ (A)	0,5
Tensión (V)	230	Tensión (V)	230
Peso(kg)	11	Protección	IP-54

Tabla 6.1: Características técnicas del ventilador y regulador de velocidad.

Mediante ensayos en vacío se ha determinado la velocidad de aire en la sección media de la chimenea para las diferentes posiciones del regulador, alcanzando el perfil de velocidades mostrado en la tabla 6.2. Considerando dichos valores de velocidad, se obtienen los caudales de aire para las distintas posiciones del regulador (tabla 6.2). En el epígrafe siguiente se presentará la justificación del caudal más adecuado seleccionado para los ensayos en circulación forzada.

	Posición regulador de velocidad					
	1	2	3	4	5	Máx
$v$ (m/s)	0,5	1,2	1,9	2,1	3	6
$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	0,048	0,115	0,182	0,201	0,289	0,577

Tabla 6.2: Velocidades y caudales de aire en diferentes posiciones del regulador.

#### 6.4.2. Estrategias de funcionamiento para optimización del proceso.

Como se ha comentado anteriormente, el prototipo ha sido diseñado para funcionar principalmente en modo mixto. Sin embargo, es posible trabajar en modo indirecto mediante el aislamiento correspondiente de las puertas translúcidas. Por las características de los materiales a secar (subproductos para una utilización energética), las ventajas del modo indirecto [72] no se consideran de interés en este trabajo.

Para avalar esta afirmación es necesario llevar a cabo una caracterización de la cámara de secado, identificando la estrategia de funcionamiento que mejor se adapta al prototipo diseñado. Conocidos los parámetros críticos del proceso de secado (temperatura, humedad relativa y velocidad de aire en la cabina), es posible establecer el sistema más adecuado.

Para comprobar la mejora del modo mixto frente al modo indirecto se realizaron diferentes ensayos en vacío, tanto en el sistema pasivo como activo, registrándose las variables temperatura y humedad relativa en la cámara de secado. En las figuras 6.12 y 6.13 se muestran dichos ensayos para convección natural y forzada, respectivamente.

Como se aprecia, en circulación natural se consiguen para el modo mixto incrementos superiores a 15 °C en la temperatura y reducciones mayores a 27 % en la humedad relativa respecto a las condiciones ambiente. En este caso, la comparación entre el modo mixto e indirecto arroja mejoras con la utilización del primero de más de 6 °C de temperatura y 8 % de humedad (con las dimensiones del prototipo).

Por su parte, en convección forzada se consiguen, respecto a las condiciones de entrada, incrementos de temperatura superiores a 5 °C y disminuciones de humedad mayores al 10 %. En lo relativo al modo indirecto, el funcionamiento mixto consigue mejoras inferiores a las obtenidas en convección natural, con aumentos en la temperatura superiores a 2 °C y reducciones de humedad del orden de 1,5 %.

La selección del caudal adecuado a las características del secadero es un aspecto crítico para la optimización de un sistema de secado. De los diferentes caudales proporcionados por el regulador de velocidad instalado en el prototipo, es necesario seleccionar el que mejor se adapta al diseño de éste. Para ello, se realizaron, de nuevo, diferentes pruebas en vacío en las que se registraron las temperaturas de la cámara para diferentes caudales de aire.

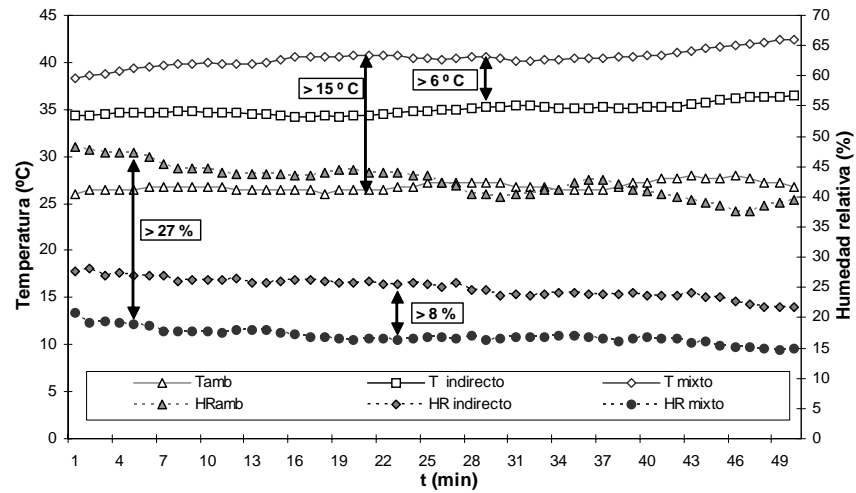


Figura 6.12: Comparación de sistemas indirecto y mixto en modo natural.

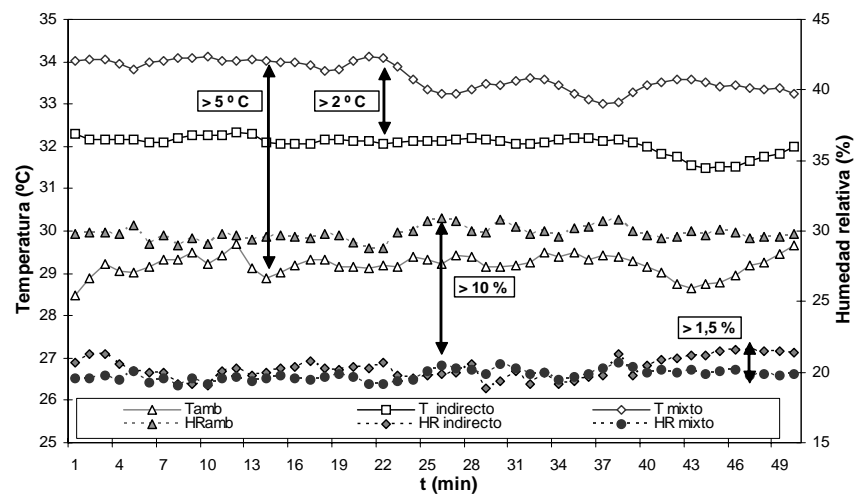


Figura 6.13: Comparación de sistemas indirecto y mixto en modo forzado.

En la figura 6.14 se muestran los resultados obtenidos para convección natural y forzada con caudales medios de  $0,042 \text{ kg/s}$  (natural),  $0,22 \text{ kg/s}$  (forzado 1),  $0,24 \text{ kg/s}$  (forzado 2) y  $0,26 \text{ kg/s}$  (forzado máx). Como se observa, para todos los caudales en modo forzado se consiguen similares temperaturas en la cámara de secado. Por ello, se seleccionó inicialmente el flujo másico de aire de  $0,22 \text{ kg/s}$  como el más adecuado para el funcionamiento activo del prototipo. Este resultado será contrastado en los ensayos de secado de los residuos.

En lo que se refiere a la comparación del funcionamiento en convección natural y en convección forzada, se puede apreciar un incremento superior de temperatura con el primero. Sin embargo, serán necesarias diferentes pruebas en carga valorando los tiempos y ratios de secado para los diferentes subproductos, para seleccionar el sistema óptimo de operación. Cabe esperar, por sus ventajas [38], que el sistema activo proporcione mejores ratios de secado que el funcionamiento pasivo.

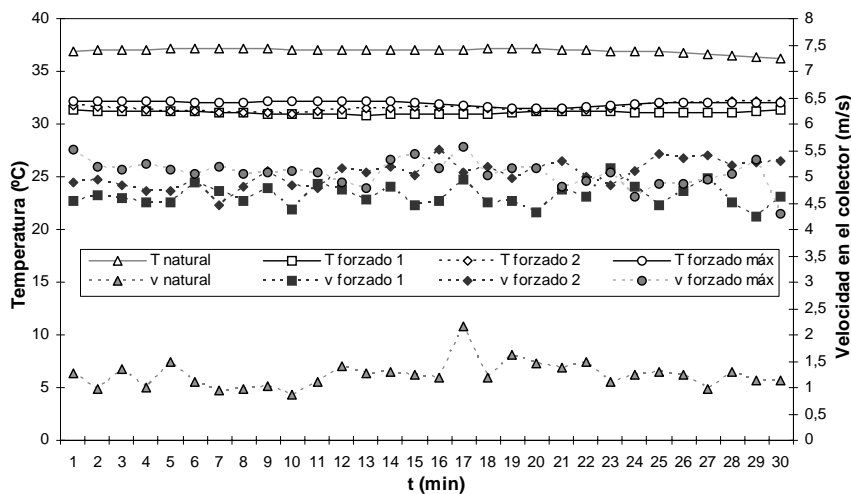


Figura 6.14: Variación de temperaturas en la cámara para diferentes velocidades de aire en el colector.



## Capítulo 7

# Análisis experimental del prototipo de secadero solar.

### 7.1. Introducción.

El objetivo de esta parte de la investigación fue evaluar el funcionamiento del prototipo diseñado de secadero solar, para los diferentes subproductos y modos de funcionamiento [175–177].

A partir del registro de la variación de determinadas propiedades del producto y del aire (temperatura, humedad, peso, tiempo, etc) detalladas en el capítulo 6, se obtendrán las evoluciones de los principales parámetros necesarios para valorar la eficiencia del secado [178].

Dichos parámetros se compararán con los obtenidos para el SDS de los subproductos, permitiendo establecer un orden de magnitud de la mejora del proceso mediante la utilización del prototipo.

Por otro lado, a partir de las gráficas obtenidas como resultado de los ensayos, se ha realizado un análisis de regresión del ratio de humedad  $MR$  que proporciona un modelo de ajuste para cada subproducto y modo de funcionamiento, de forma similar a los mostrados en la bibliografía para este tipo de secaderos [179–184].

Por último, este estudio experimental permitirá validar el modelo teórico desarrollado del prototipo (capítulo 8) así como extrapolar resultados para una planta de tratamiento de estos subproductos (capítulo 9).

### 7.2. Metodología experimental.

De igual manera a la explicada en el capítulo 5, se ha evaluado la cinética de secado de los diferentes residuos industriales de la producción de aceite de oliva en

el prototipo de secadero solar híbrido diseñado. Para ello, en primer lugar, ha sido necesario caracterizar el funcionamiento del calentador solar de aire.

Los ensayos realizados en la instalación se dividen en dos grupos fundamentales: ensayos mediante simulador de radiación (equiparable al funcionamiento en modo indirecto) llevados a cabo en los laboratorios del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la UEx, y ensayos al aire libre con radiación “real” efectuados en la terraza de la Escuela de Ingenierías Industriales de Badajoz. Además, en el caso de los ensayos al aire también se han realizado pruebas en modo indirecto que han permitido validar los ensayos correspondientes al simulador de radiación.

La tipología de ensayos ha sido muy diversa, a saber:

- Ensayos para diferentes subproductos: orujo húmedos tres fases (*or*), alperujo (*alper*) y alpechín (*al*), con las características físicas y energéticas presentadas en el capítulo 4. Para este último, los ensayos realizados pretenden proporcionar una mejora en los sistemas de concentración de alpechín, disminuyendo el contenido final de humedad del producto hasta niveles que no se consideran viables de obtener (inmanejable) en las actuales torres de concentración [3,11].
- Ensayos para diferentes modos de funcionamiento: modo mixto, indirecto, activo, pasivo e híbrido (descritos en el capítulo 6).

Se han realizado más de cien ensayos, necesarios por las diferentes combinaciones de productos y modos de funcionamiento. Los referentes al simulador de radiación se llevaron a cabo durante el periodo febrero - junio de 2005, mientras que los ensayos al aire libre fueron efectuados durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre de 2005.

Los productos se disponen en bandejas de dimensiones 890 x 280 x 20 *mm*, siendo éstas perforadas para los materiales sólidos (orujo) y no perforadas para los materiales líquidos o semisólidos (alpechín y alperujo). En todos los ensayos se comienza con una cantidad de producto de 2000 *g* en cada una de las bandejas. Tanto el registro de la pérdida de peso como del resto de variables se realizó en intervalos de cinco minutos.

Además del control del proceso en el secadero, se registraron los parámetros externos temperatura seca ( $^{\circ}C$ ) y humedad relativa del aire ambiente (%), radiación global sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ ) y velocidad del viento ( $m/s$ ), fundamentales para contrastar la variación de las principales propiedades relacionadas con el funcionamiento del prototipo (eficiencia del captador, eficiencia del secado, tiempo de secado, ratio de humedad, temperatura y humedad del agente desecante, temperatura de producto, etc). A modo de ejemplo, en las figuras 7.1, 7.2 y 7.3 se muestran las variaciones de

dichos parámetros externos para algunos de los días relativos a diferentes ensayos, tanto para las condiciones del laboratorio (en este caso la radiación solar y la velocidad del viento no se registran) como para las condiciones al aire libre. Posteriormente se analizará la influencia de los mismos en la eficiencia del secadero (colector y cámara de secado) y en la cinética de secado de los subproductos [185].

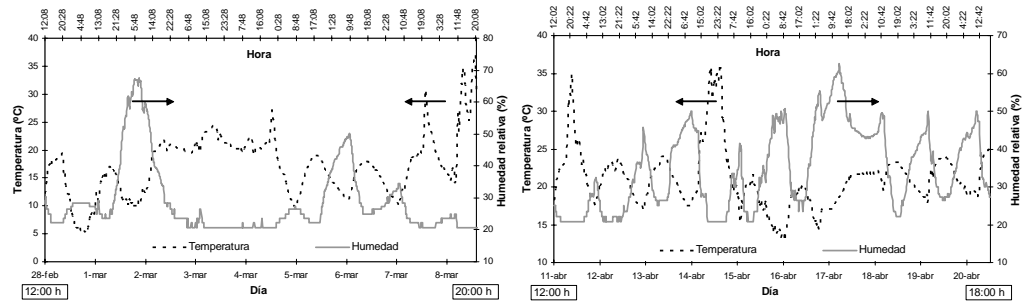


Figura 7.1: Condiciones climatológicas en laboratorio de ensayos.

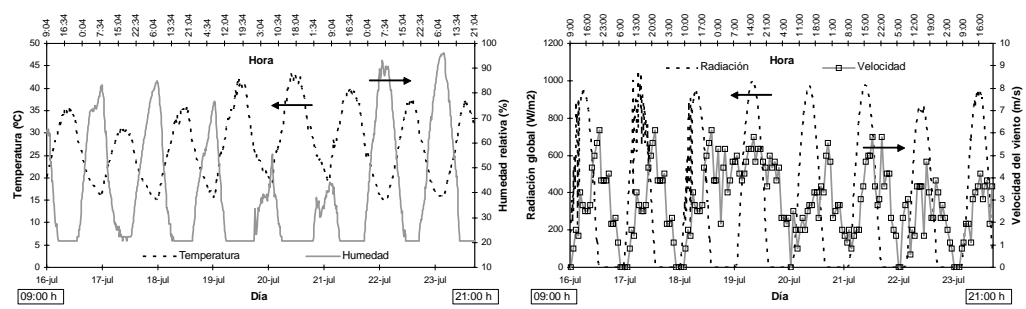


Figura 7.2: Condiciones climatológicas al aire libre en el mes de julio.

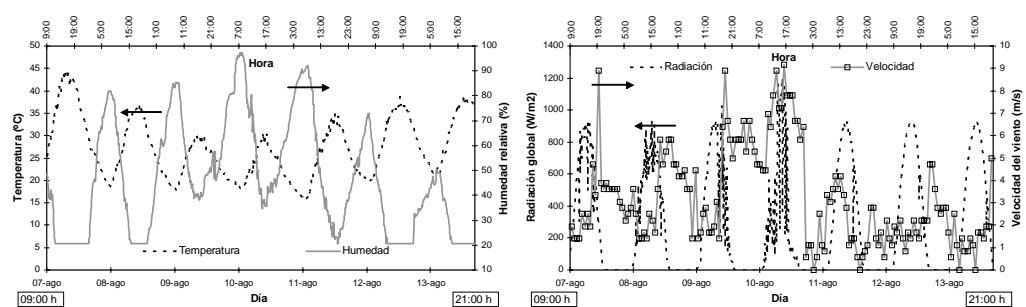


Figura 7.3: Condiciones climatológicas al aire libre en el mes de agosto.

### 7.3. Caracterización del funcionamiento del calentador solar de aire.

En un captador solar de aire los parámetros de mayor importancia son, sin duda, la temperatura de salida del fluido y la eficiencia, ambos estrechamente relacionados. Éstos dependen de diversas variables, siendo algunas de las principales la radiación solar global incidente sobre el colector y el flujo másico de aire a través del mismo [106, 107, 186–188].

Para estudiar la influencia de la radiación solar incidente es necesario conocer dichos valores sobre el plano inclinado del colector. Mediante las relaciones descritas en el capítulo 3 (ec. 3.52 - ec. 3.69) y los valores de radiación global sobre el plano horizontal medidos por el piranómetro, es posible determinar dicho parámetro.

En la tabla 7.1, a modo de ejemplo, se muestran las correspondencias entre la radiación global sobre el plano horizontal ( $I$ ) y la radiación global sobre el plano del colector ( $I_T$ ) para el mediodía solar, con una inclinación del mismo de  $15^\circ$  (a),  $30^\circ$  (b) y  $45^\circ$  (c) y orientación sur, para el 13 de julio en Badajoz. Se puede apreciar cómo al aumentar el nivel de radiación la diferencia entre los valores de radiación horizontal y radiación sobre el plano inclinado se hace mayor.

$I (W/m^2)$	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$I_T(W/m^2)^{*a)}$	396	494	592	689	785	882	979	1077	1175
$I_T(W/m^2)^{*b)}$	383	476	567	655	741	827	915	1007	1099
$I_T(W/m^2)^{*c)}$	362	447	528	602	672	742	817	899	981
* $I_{cs}=1367 W/m^2$ ; $g=0^\circ$ ; $r=0,4$ ; a) $s =15^\circ$ ; b) $s =30^\circ$ ; c) $s =45^\circ$									

Tabla 7.1: Irradiancia horizontal y sobre el plano del colector para diferentes ángulos de inclinación del colector.

Como se indicó en el capítulo 6, el ángulo seleccionado para la realización de los ensayos de secado fue  $20^\circ$ . En la figura 7.4 se muestra la variación de la radiación, horizontal y sobre dicho plano inclinado, para el ensayo correspondiente al 13 de julio. Se observan, para este caso específico, disminuciones de radiación sobre el plano inclinado comprendidas entre un 1 % y un 3 %. Dependiendo del mes considerado, los valores de radiación para la inclinación de  $20^\circ$  serán superiores o inferiores a los correspondientes para superficie horizontal.

#### 7.3.1. Temperatura del aire a la salida del colector solar.

La temperatura del aire a la salida del captador es un parámetro fundamental en el estudio de los sistemas de secado solar del tipo colector-cámara, de forma que la eficiencia del captador y la cinética de secado de los productos serán función de ella.

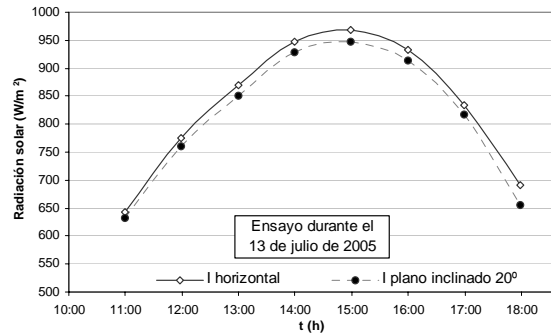


Figura 7.4: Radiación en plano horizontal e inclinado.

Este parámetro está directamente relacionado, como se ha indicado, con la radiación incidente sobre el calentador y con el flujo másico de aire a través del mismo. Por tanto, dependiendo del modo de funcionamiento [188] y de las condiciones climáticas existentes [189] se tendrá, para cada ensayo, un incremento de temperatura diferente.

En la figura 7.5 se presenta, para el funcionamiento en convección natural de un ensayo específico, la temperatura de salida del colector junto con la temperatura de entrada, la temperatura ambiente y la radiación solar incidente en el mismo (horizontal y sobre el plano inclinado), siendo en este caso la velocidad media del aire en su interior de  $1 \text{ m/s}$  y el flujo másico medio de  $0,055 \text{ kg/s}$ . Como se observa, se consigue un incremento de temperatura máximo respecto a la temperatura ambiente de aproximadamente  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

De igual forma, en la figura 7.6 se muestran los parámetros anteriormente indicados para el funcionamiento en convección forzada, siendo en este caso la velocidad media del aire en su interior de  $4 \text{ m/s}$  y el flujo másico medio de  $0,224 \text{ kg/s}$ . Como se aprecia, se produce un incremento de temperatura máximo respecto a la temperatura de entrada de aproximadamente  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ , inferior al conseguido en el modo pasivo. Sin embargo, será necesario estudiar otros parámetros para establecer el modo de funcionamiento más eficiente desde el punto de vista del secado.

El flujo másico de aire en el colector,  $m_a \text{ (kg/s)}$ , se determina mediante la expresión 7.1, siendo:  $A_f \text{ (m}^2\text{)}$  la sección de paso del colector,  $\rho_a \text{ (kg/m}^3\text{)}$  la densidad del aire a la temperatura de trabajo y  $v_c \text{ (m/s)}$  la velocidad del fluido en el captador. En esta expresión hay que tener en cuenta la variación de la densidad del aire húmedo con la temperatura (ec. 3.40) tomando esta última como la media entre la temperatura de entrada y salida del colector.

$$m_a = A_f \cdot \rho_a \cdot v_c \quad (7.1)$$

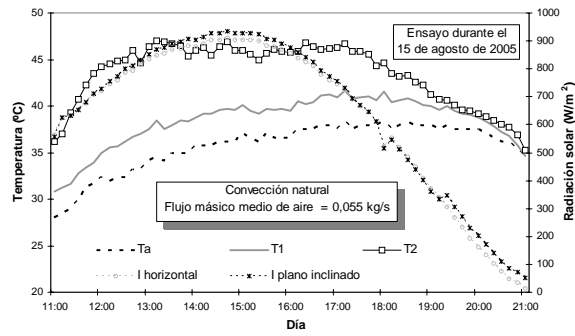


Figura 7.5: Temperatura de salida del colector y radiación en modo pasivo.

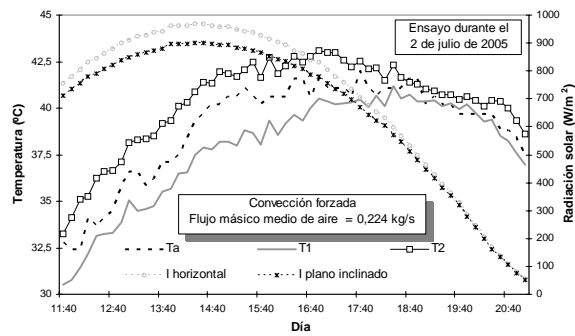


Figura 7.6: Temperatura de salida del colector y radiación en modo activo.

Calculado el flujo másico, es posible representar la evolución de la temperatura de salida del captador respecto a éste, para los diferentes ensayos considerados. Como se observa, en el modo natural (figura 7.7) la dispersión de valores en el flujo másico es mucho mayor que en el modo forzado (figura 7.8) y, por tanto, el sistema pasivo dará lugar a un secado menos uniforme y de difícil control.

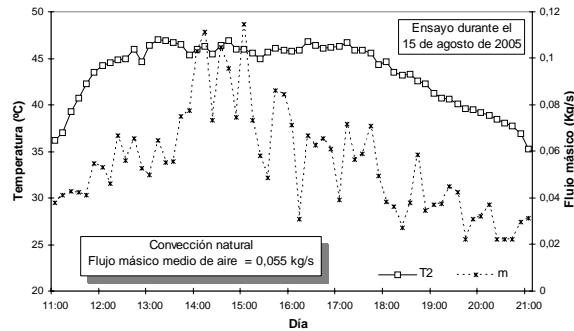


Figura 7.7: Temperatura de salida del colector y flujo másico en modo pasivo.

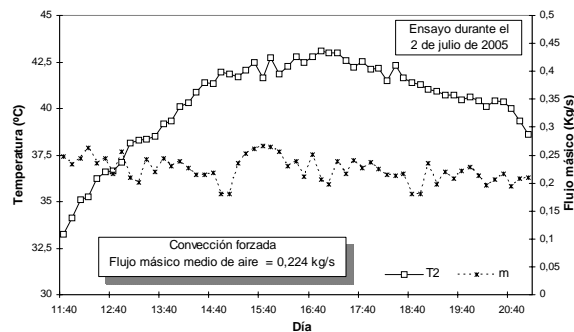


Figura 7.8: Temperatura de salida del colector y flujo másico en modo activo.

Para establecer la influencia de la radiación solar y el flujo másico, de forma independiente, es necesario fijar una de estas variables para las mismas condiciones de partida (temperatura de entrada). Así, en la figura 7.9 se muestra la influencia de la radiación solar global en la temperatura de salida del captador, para diferentes flujos másicos, con una temperatura de entrada media constante de  $25^{\circ}\text{C}$ . Como se observa, la temperatura del colector es proporcional a la radiación solar incidente [107, 190] y, además, para un mismo nivel de radiación, aumentos del flujo másico disminuyen la temperatura de salida del captador, aspecto que influirá en la eficiencia instantánea del mismo.

La ecuación que define la dependencia de la temperatura con la radiación, para

un flujo másico dado, podría ayudar a estimar dicha temperatura de fluido a la salida del colector para los diferentes días del año a partir de datos meteorológicos conocidos [107]. Como ejemplos en la tabla 7.2 se muestran estas ecuaciones para los caudales másicos de aire dados en la figura 7.9.

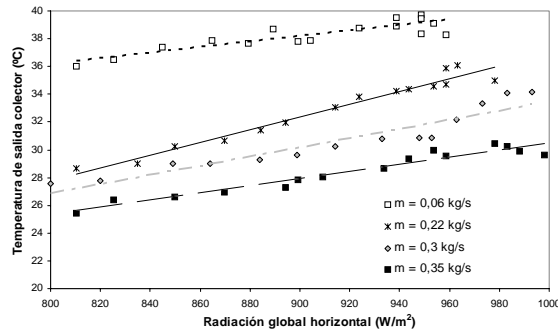


Figura 7.9: Influencia de la radiación global en la temperatura de salida del colector para varios flujos másicos.

$m=0,06 \text{ kg/s}$	$T_2= 0,0201 \cdot I + 20,124$
$m=0,22 \text{ kg/s}$	$T_2= 0,0457 \cdot I - 8,7454$
$m=0,3 \text{ kg/s}$	$T_2= 0,033 \cdot I + 0,527$
$m=0,35 \text{ kg/s}$	$T_2= 0,0257 \cdot I + 4,7798$

Tabla 7.2: Ecuaciones para la temperatura de salida del captador en función de la radiación incidente para diferentes flujos de aire.

De forma similar, en la figura 7.10 se presenta la dependencia de la temperatura de salida del colector con el flujo másico de aire para diferentes valores de radiación solar, y tal y como se indicó en la gráfica anterior, a medida que aumenta el flujo de aire, para un nivel de radiación, disminuye la temperatura de salida.

### 7.3.2. Eficiencia del captador.

Para valorar la eficiencia instantánea del captador a través de la ecuación 3.72, es necesario conocer para cada instante las temperaturas del aire de entrada y salida del captador, el flujo másico de aire y la radiación solar incidente sobre el plano inclinado del colector.

En lo que se refiere a la temperatura de entrada del fluido, se considera, en primera aproximación, que las condiciones a la entrada del calentador (temperatura y humedad relativa) son iguales a las del aire ambiente circundante. Dicha aproximación se ha verificado para los diferentes ensayos. En la figura 7.11 se muestra la variación de dichos



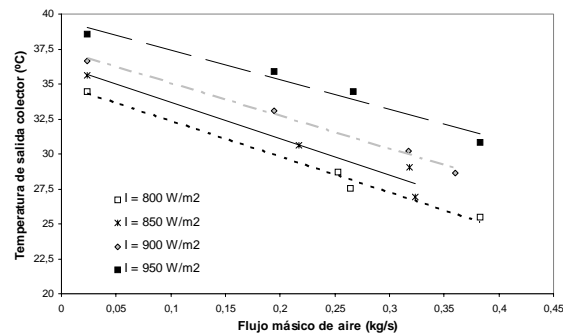


Figura 7.10: Influencia del flujo másico de aire en la temperatura de salida del colector para diferentes niveles de radiación.

parámetros para dos ensayos específicos, comprobándose que la simplificación propuesta es aceptable y, por tanto, será una de las suposiciones utilizada en el modelado del colector (capítulo 8).

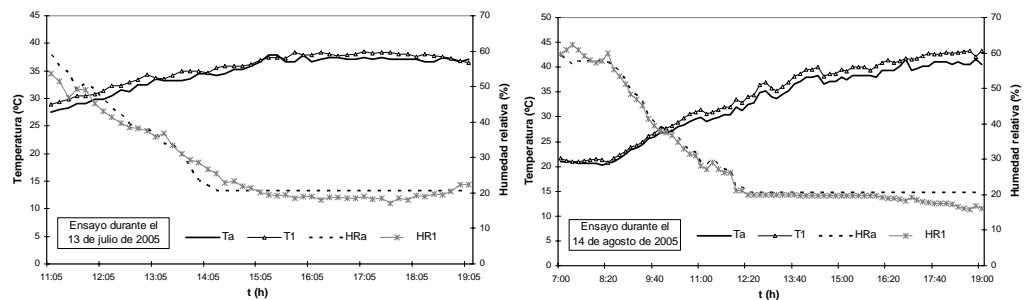


Figura 7.11: Comparación variables entrada colector - ambiente.

Para los incrementos de temperaturas de los ensayos característicos anteriores (figuras 7.5 y 7.8), se muestran en las figuras 7.12 y 7.13, para los modos pasivo y activo, respectivamente, los valores de la eficiencia del colector a lo largo del proceso. Como se observa, los rendimientos oscilan aproximadamente entre 30 y 70 %, para convección natural, y entre 40 y 80 %, para convección forzada.

Al igual que para la temperatura de salida del captador, también es importante valorar la influencia de la radiación solar (figura 7.14) y el flujo másico de aire (figura 7.15) en la eficiencia del captador. Como se aprecia, la eficiencia del colector de aire es extremadamente dependiente de ambos factores [107], aumentando en general el mismo con el incremento de alguno de ellos.

No obstante, se puede observar cómo un aumento considerable del flujo másico de  $0,2 \text{ kg/s}$  a  $0,35 \text{ kg/s}$  no incrementa sustancialmente el rendimiento, tendiendo éste a un

valor constante. Por tanto, de nuevo se vuelve a justificar la importancia de seleccionar un valor adecuado de flujo másico de aire, que proporcione niveles de eficiencia en el colector apropiados, a la vez que no incremente excesivamente el consumo energético del sistema.

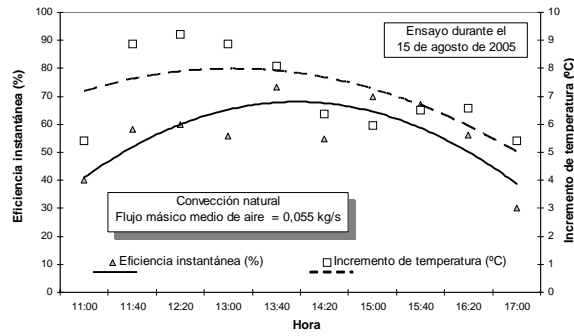


Figura 7.12: Evolución en el tiempo de la eficiencia instantánea y la temperatura de salida del colector en modo natural.

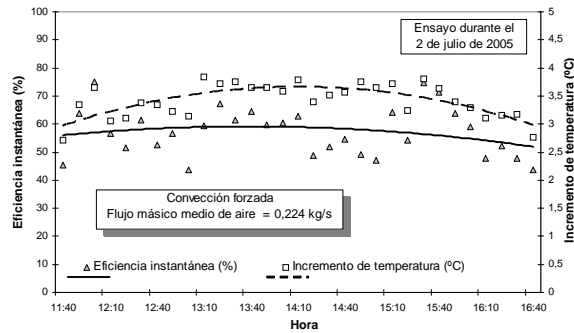


Figura 7.13: Evolución en el tiempo de la eficiencia instantánea y la temperatura de salida del colector en modo forzado.

Por último, se representa en la figura 7.16 la curva típica de eficiencia del colector para el flujo másico de 0,22 kg/s, esto es, eficiencia frente al parámetro  $(T_i - T_a)/I$ , siendo  $T_i$  la temperatura de entrada del fluido en el colector,  $T_a$  la temperatura ambiente e  $I$  la radiación solar incidente en el plano del colector. A partir de estas curvas es posible obtener los factores de eficiencia  $F_R(\tau\alpha)_e$  y de pérdida  $F_R U_L$ , siendo en este caso, respectivamente,  $F_R(\tau\alpha)_e = 0,6124$  y  $F_R U_L = 72,705$ .

Para el diseño del colector, con los valores típicos de incremento de temperatura conseguidos para flujo másico de 0,22 kg/s, con radiación solar media de  $600 \text{ W/m}^2$  y según la expresión 3.71, se consigue un aporte calorífico en el mismo de 300-450 W.

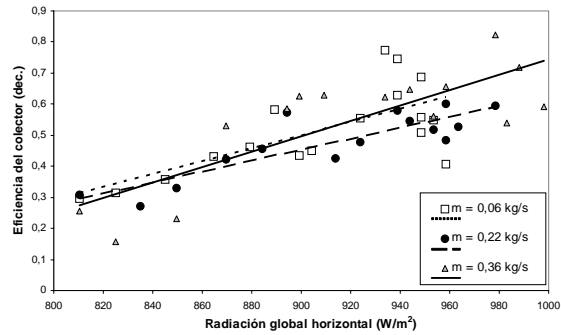


Figura 7.14: Influencia de la radiación solar en la eficiencia del colector.

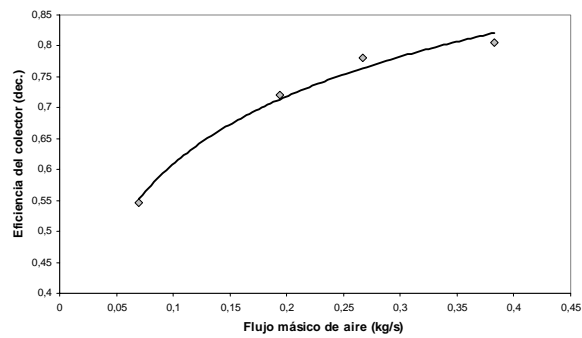


Figura 7.15: Influencia del flujo másico de aire en la eficiencia del colector.

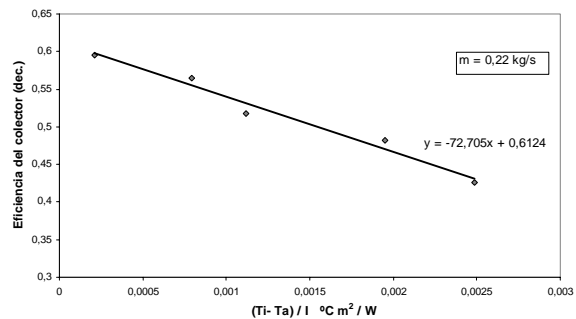


Figura 7.16: Curva típica de eficiencia para el colector.

## 7.4. Cinética de secado en el prototipo.

### 7.4.1. Análisis general de resultados.

Para estudiar la cinética de secado de los diferentes subproductos es necesario conocer las evoluciones de algunas de las variables del secadero para los distintos modos de funcionamiento, siendo las fundamentales: temperatura, humedad relativa y caudal másico de aire.

Es necesario inicialmente identificar las velocidades de aire en las principales zonas del prototipo, así como el flujo másico en el mismo, para convección natural y forzada. En esta última forma de funcionamiento se han realizado diferentes ensayos de cinética de secado mediante la variación del caudal de aspiración.

En las figuras 7.17 y 7.18 se presentan las velocidades en el colector y en la cámara de secado, respectivamente, correspondientes en las gráficas a los modos natural, forzado 1, forzado 2 y forzado máx, siendo los valores medios de ambas variables los mostrados en la tabla 7.3.

Funcionamiento	$v_{colector}$ (m/s)	$v_{cámara}$ (m/s)	$m_a$ (kg/s)
Natural	0,93	0,11	0,05
Forzado 1	4,10	0,48	0,22
Forzado 2	5,03	0,59	0,27
Forzado máx	6,14	0,72	0,33

Tabla 7.3: Velocidades y caudales medios de aire para diferentes ensayos.

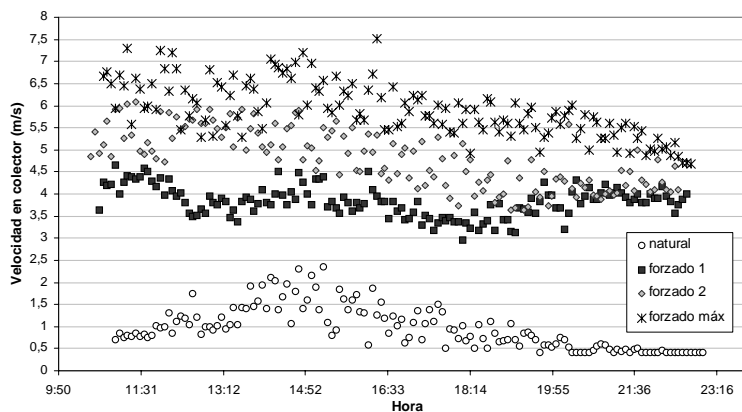


Figura 7.17: Velocidad en el colector para los diferentes modos de funcionamiento.

Asimismo, el flujo másico registrado en los ensayos, correspondiente a las velocidades anteriores, se muestra en la figura 7.19. Como se observa, los valores medios de

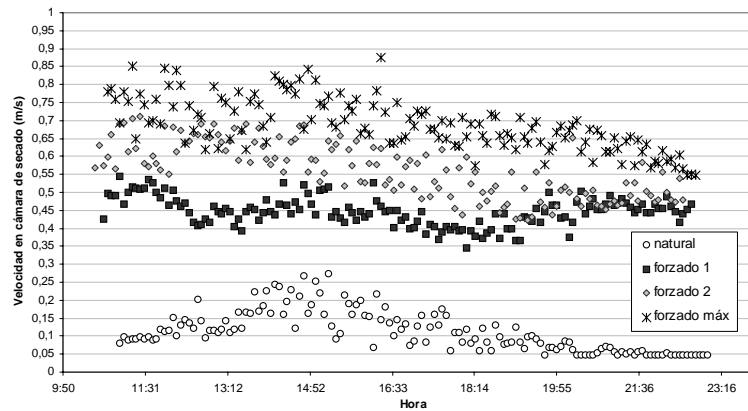


Figura 7.18: Velocidad en la cámara de secado para los diferentes modos de funcionamiento.

caudal de aire son  $0,05 \text{ kg/s}$ ,  $0,22 \text{ kg/s}$ ,  $0,27 \text{ kg/s}$  y  $0,33 \text{ kg/s}$ , para el modo natural, forzado 1, forzado 2 y forzado máx, respectivamente (tabla 7.3).

Como se puso de manifiesto en el capítulo 6 y en el epígrafe anterior, la regulación óptima de velocidad del ventilador de aire se corresponde con la mostrada en el modo forzado 1 ( $m_a \sim 0,22 \text{ kg/s}$ ). Esta afirmación volverá a quedar patente en el análisis de la cinética de secado de los subproductos para los diferentes ensayos realizados.

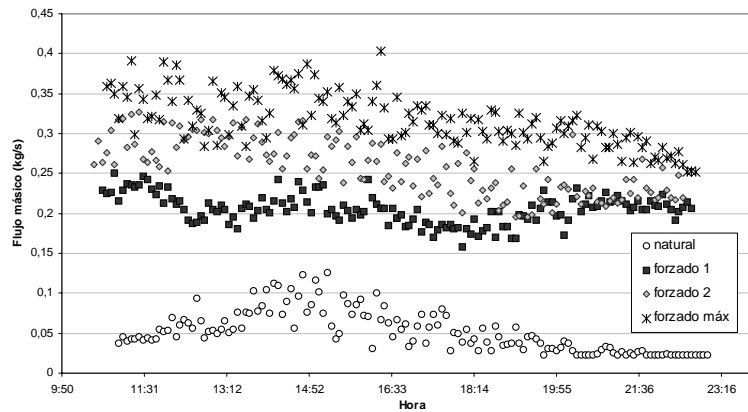


Figura 7.19: Flujo másico de aire para los diferentes modos de funcionamiento.

Las variaciones de temperatura y humedad relativa en el interior del secadero para el funcionamiento en convección natural, forzado y forzado-híbrido se muestran, respectivamente, en las figuras 7.20, 7.21 y 7.22. Como se aprecia, se consiguen incrementos máximos de temperatura en el colector de aproximadamente  $11,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $27,5$

$^{\circ}\text{C}$ , así como, disminuciones de humedad relativa de 19 %, 17 % y 65 %, para cada uno de los tres casos mostrados. Asimismo, las diferencias máximas de temperatura y humedad relativa entre la entrada y la salida de la cámara para cada uno de los modos de funcionamiento son de  $5^{\circ}\text{C}$  y 7 %,  $2^{\circ}\text{C}$  y 3 % y  $17^{\circ}\text{C}$  y 27 %, respectivamente.

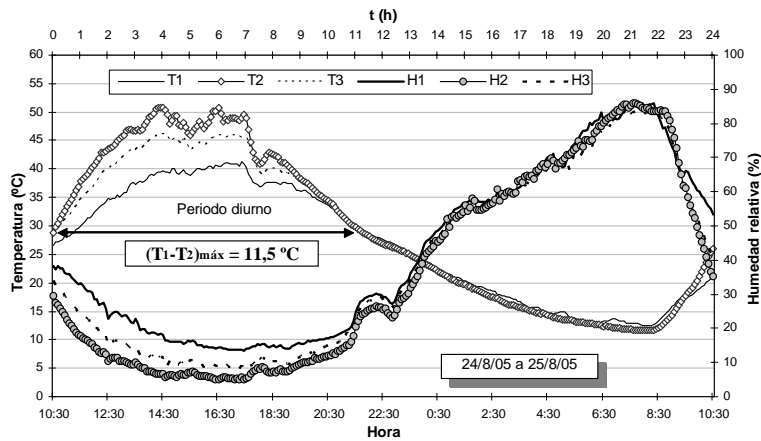


Figura 7.20: Variaciones de temperatura y humedad relativa en el secadero para el modo pasivo.

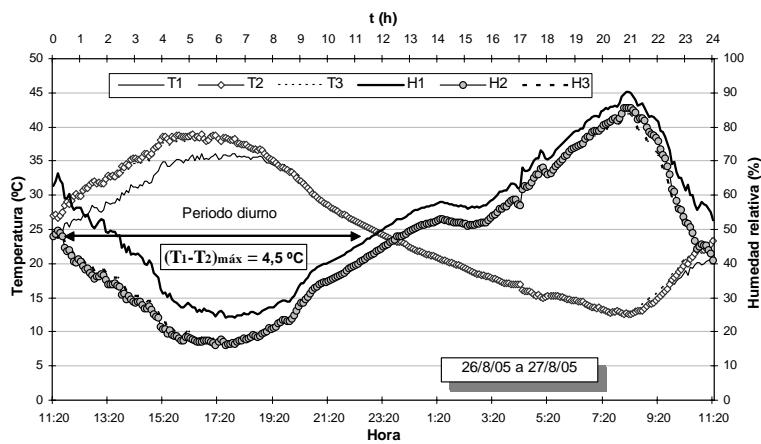


Figura 7.21: Variaciones de temperatura y humedad relativa en el secadero para el modo activo.

Para valorar la cinética de secado en los diferentes subproductos y modos de funcionamiento se han utilizado las expresiones dadas en el capítulo 3. Se presentan los ratios de secado para una cantidad inicial de producto de  $2000\text{ g}$  y hasta un contenido de humedad final del 20 % en base húmeda.

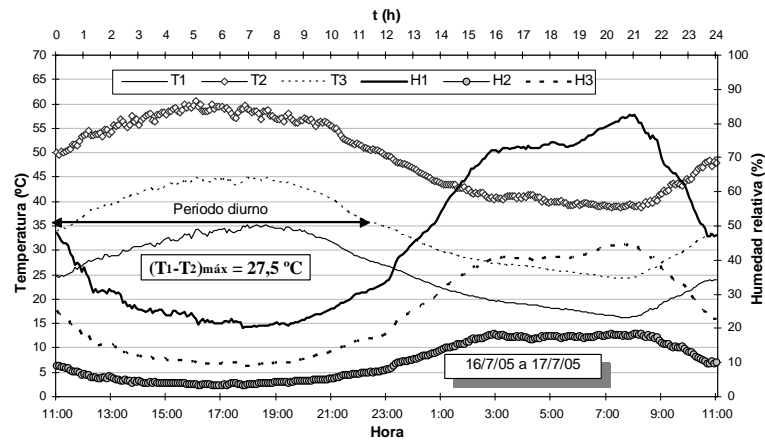


Figura 7.22: Variaciones de temperatura y humedad relativa en el secadero para el modo activo e híbrido.

De esta forma, en las figuras 7.23 y 7.24 se muestra la evolución del contenido de humedad en base seca,  $M_{db}$ , frente al tiempo de exposición, para los tres subproductos estudiados en convección natural y forzada, respectivamente. Se observan mejoras en los tiempos de secado en el modo activo respecto al pasivo entre un 30 y un 60 %. De nuevo, como ya se puso de manifiesto en el SDS, el subproducto para el que se dan los menores tiempos de secado es el orujo. Además, en el modo natural, el alpechín presenta tiempos de secado mayores que el alperujo, mientras que en modo forzado ocurre lo contrario. Como se comentó en el capítulo 5, esta mejora en los tiempos de secado en convección forzada, aun teniendo mayor contenido de humedad, se asoció a la particular estructura física del alperujo [158].

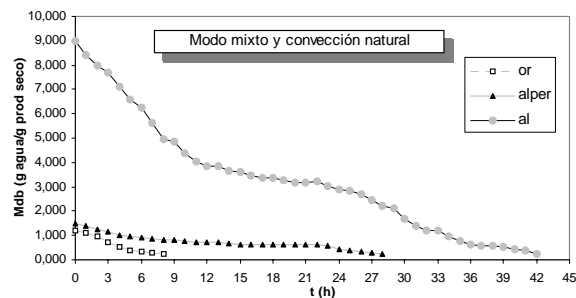


Figura 7.23: Variación del contenido de humedad db en convección natural.

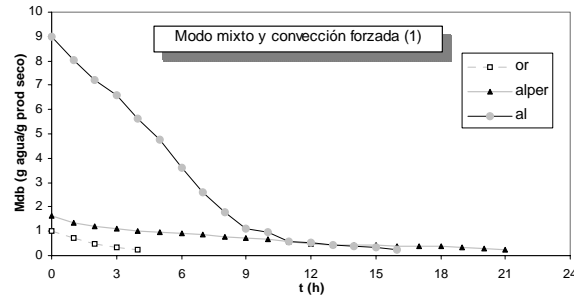


Figura 7.24: Variación del contenido de humedad db en convección forzada.

En la figura 7.25 se muestra el ratio de secado frente al contenido de humedad en base seca para orujo, alperujo y alpechín. Se observa un comportamiento similar al mostrado en el SDS para cada residuo.

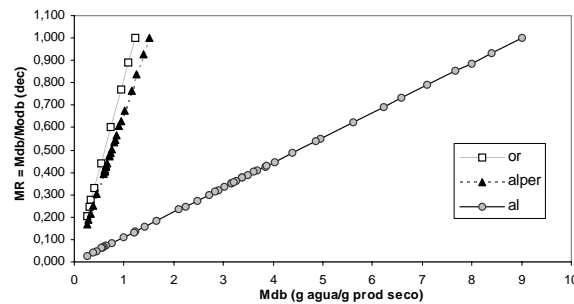


Figura 7.25:  $MR_{db}$  vs  $M_{db}$  para orujo, alperujo y alpechín.

Para considerar la influencia del flujo másico [191] y contrastar los resultados obtenidos en vacío en el prototipo, se realizaron ensayos de secado para diferentes caudales de aire. Como ya se apuntó y se pone de manifiesto en las figuras 7.26, 7.27 y 7.28, el aumento del flujo másico a partir de un valor no supone de forma general una mejora en los tiempos de secado [138, 140, 143]. Esto se debe, fundamentalmente, a que dicho aumento de caudal de aire disminuye la temperatura de entrada del mismo en la cámara de secado. De esta forma, el valor óptimo para el flujo de aire se estimó en  $0,22 \text{ kg/s}$  (forzado 1).

Como se observa, los mayores tiempos de secado se dan en el sistema pasivo para todos los subproductos. Dependiendo del modo de funcionamiento, se registraron tiempos de secado entre 2-8 h para orujo, entre 10-28 h para alperujo y entre 11-42 h para alpechín. La distribución de los tiempos máximos, mínimos y medios se muestra en la figura 7.29, correspondiendo el peor comportamiento al secado de alpechín en convec-



ción natural. Por tanto, la selección de un sistema de secado solar óptimo para estos subproductos pasa por un ajuste adecuado de los caudales de aire [38].

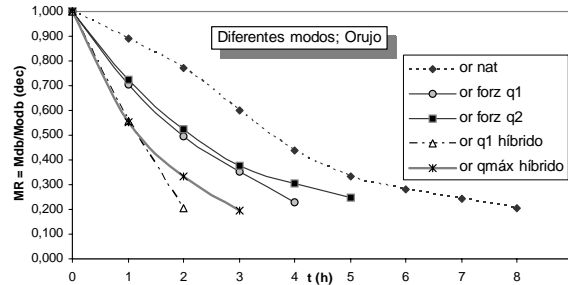


Figura 7.26: Influencia del flujo másico en la cinética de secado de orujo.

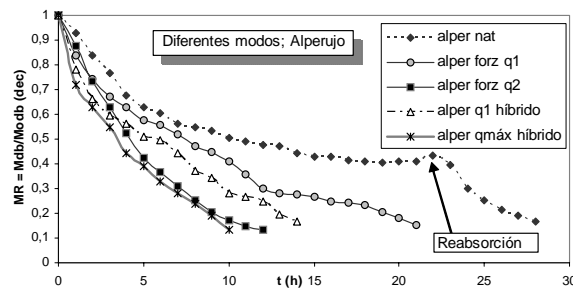


Figura 7.27: Influencia del flujo másico en la cinética de secado de alperujo.

Para los ensayos en el secadero no se ha observado, en la mayoría de los casos, reabsorción de humedad de los subproductos en los periodos nocturnos y de baja insolación, aspecto éste que sí tuvo lugar durante los ensayos en secado natural. En la figura 7.27 se muestra un incremento de humedad detectado en el alperujo para convección natural.

En lo que se refiere a la conveniencia del modo mixto o indirecto [192], en los ensayos realizados se puso de manifiesto la ventaja de la utilización del primero sobre el segundo para materiales en los que no tengan importancia parámetros relativos a la calidad del producto (a diferencia de los productos alimenticios [108, 193, 194]).

Así, en las figuras 7.30, 7.31 y 7.32, para convección forzada, se constata la mejora en los tiempos de secado mediante el modo mixto para los tres subproductos analizados.

Un parámetro importante en la cinética de secado es la temperatura de producto, ya que si se conoce la evolución del ratio de humedad para diferentes temperaturas,

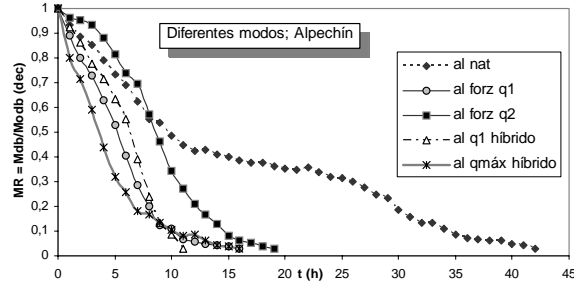


Figura 7.28: Influencia del flujo másico en la cinética de secado de alpechín.

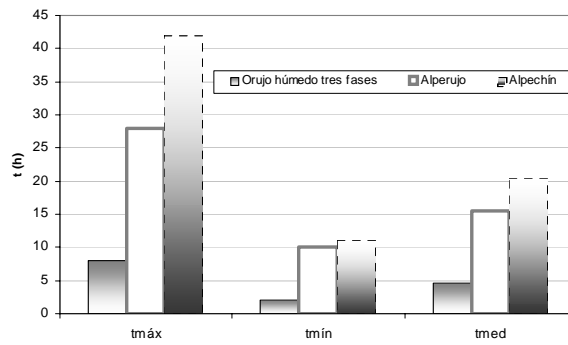


Figura 7.29: Valores máximos, mínimos y medios de los tiempos de secado de los subproductos.

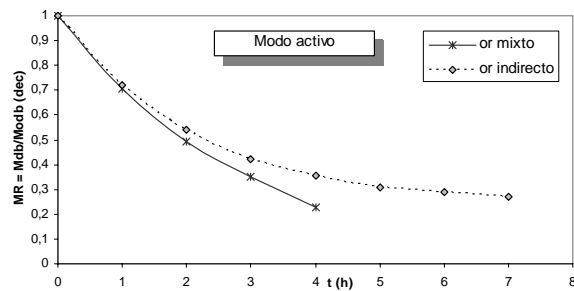


Figura 7.30: Comparación del funcionamiento en modo mixto e indirecto en convección forzada para el orujo.

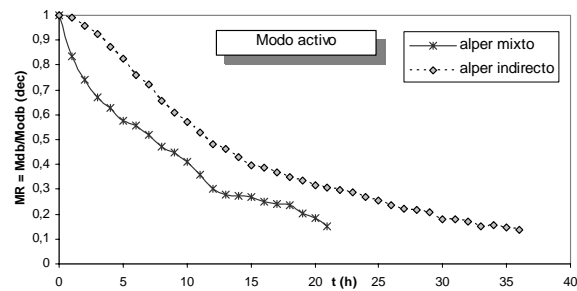


Figura 7.31: Comparación del funcionamiento en modo mixto e indirecto en convección forzada para el alperujo.

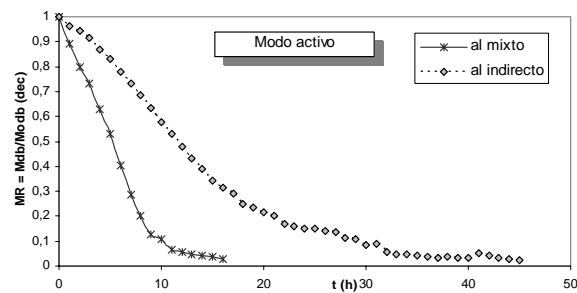


Figura 7.32: Comparación del funcionamiento en modo mixto e indirecto en convección forzada para el alpechín.

los modelos de simulación permitirán estimar la temperatura de producto a partir de la cinética de secado o viceversa. Además, mediante dicha temperatura es posible obtener parámetros fundamentales en la evolución del secado de los materiales (p.ej. coeficientes convectivos).

En las figuras 7.33, 7.34 y 7.35 se muestran las variaciones de la temperatura de producto registradas durante los ensayos para los diferentes residuos y modos de funcionamiento. En estos casos, los valores medios de la temperatura del aire a la entrada de la cámara fueron de  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$  para convección natural,  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  para convección forzada y  $57\text{ }^{\circ}\text{C}$  para sistema híbrido.

Las mayores temperaturas de producto se dan en el orujo, observándose valores del orden de  $35\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tanto para convección natural como forzada (debido a la utilización de bandejas perforadas en este residuo). Sin embargo, para el alperujo y el alpechín se registraron temperaturas superiores en el modo pasivo que en el activo, siendo éstas próximas, respectivamente, a  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  para alperujo y a  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  para alpechín.

Como era de esperar, los mayores valores en la temperatura de producto se producen en el modo híbrido con valores cercanos a  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  para orujo, a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  para alperujo y a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  para alpechín. Por tanto, como se ha indicado en capítulos anteriores, en estos dispositivos presenta gran interés la utilización de una fuente de energía auxiliar [96,195], con vistas a la disminución de los inconvenientes apuntados para el secado solar, consiguiendo [96], en muchos casos, reducciones de los tiempos de secado superiores al 50 % (figuras 7.26, 7.27 y 7.28).

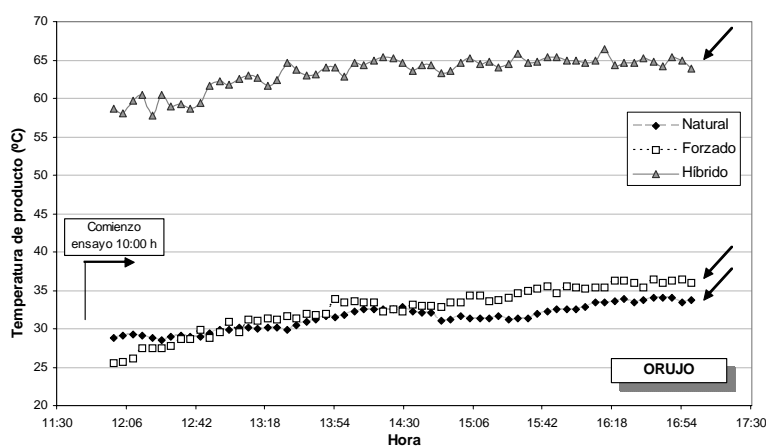


Figura 7.33: Variaciones de temperatura de producto en orujo para diferentes modos de funcionamiento.

Hasta ahora se han mostrado las evoluciones de pérdida de humedad y temperatura

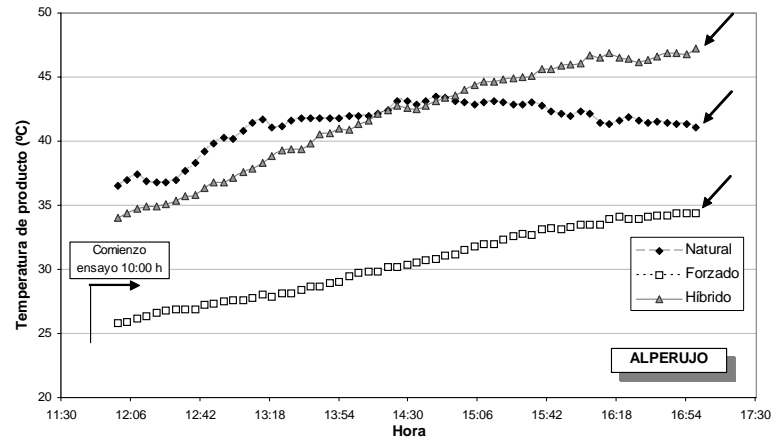


Figura 7.34: Variaciones de temperatura de producto en alperujo para diferentes modos de funcionamiento.

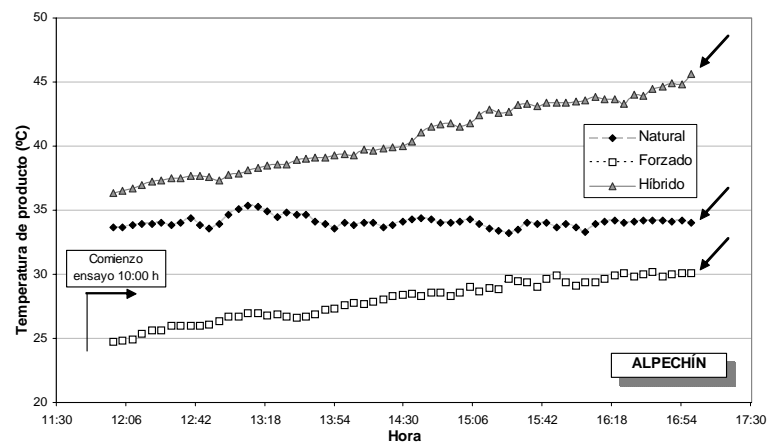


Figura 7.35: Variaciones de temperatura de producto en alpechín para diferentes modos de funcionamiento.

de producto correspondientes al subproducto depositado en la bandeja inferior del prototipo. Para caracterizar completamente el sistema es necesario comparar dichos parámetros para las dos bandejas de producto existentes, puesto que el aumento de la humedad relativa del aire desecante al pasar sobre el subproducto de la bandeja inferior disminuye su capacidad de arrastre de humedad.

Así, en las figuras 7.36, 7.37 y 7.38 se compara el ratio de secado en base seca para los subproductos orujo, alperujo y alpechín, respectivamente, relativo a la bandeja inferior y superior. Como se observa, para el contenido de humedad límite fijado en el residuo de la bandeja inferior, esto es, 20 %<sub>wb</sub>, el  $MR_{db}$  del producto de la bandeja superior es mayor al de la inferior, en todos los subproductos y modos de funcionamiento, en un rango comprendido entre un 15 % y un 50 %, aumentando de forma aproximada en la bandeja superior los tiempos de secado entre 2 y 3 veces. Resultados similares a éstos han sido obtenidos por diversos autores [196,197].

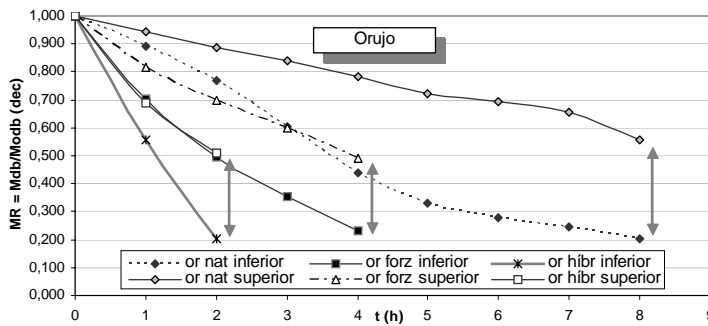


Figura 7.36: Ratio de secado db. en bandeja inferior y superior para orujo.

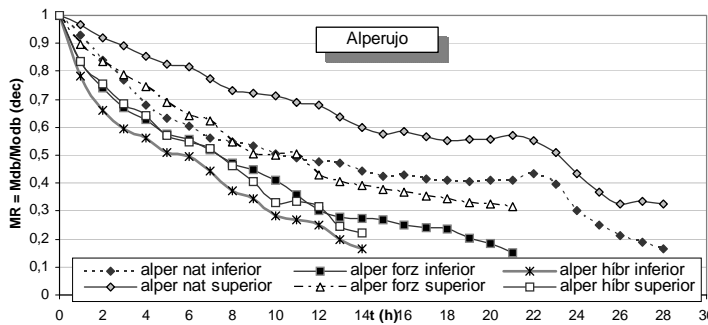


Figura 7.37: Ratio de secado db. en bandeja inferior y superior para alperujo.

En lo relativo a las temperaturas de producto, los valores registrados en todos los casos para la bandeja inferior son mayores a los obtenidos en la bandeja superior, en

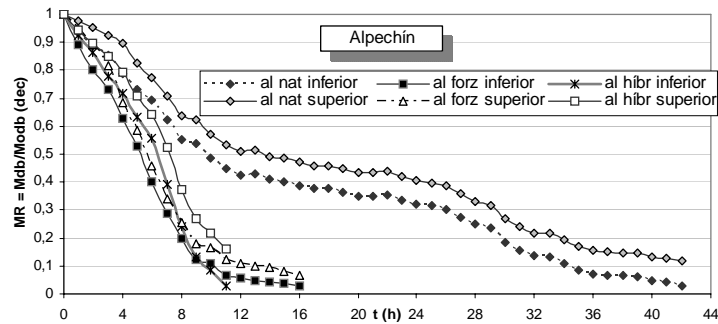


Figura 7.38: Ratio de secado db. en bandeja inferior y superior para alpechín.

un rango de 2-10 %. A modo de ejemplo, en la figura 7.39 se muestran los valores de temperatura de producto alcanzados para el alpechín, en los diferentes modos de funcionamiento, relativos a la bandeja inferior y superior.

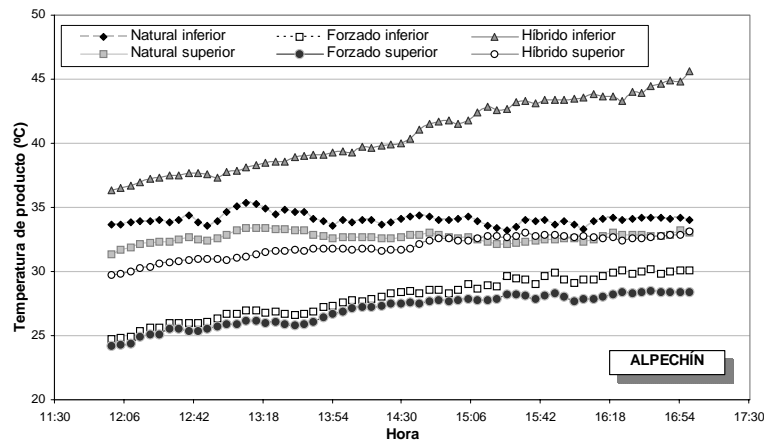


Figura 7.39: Comparación de temperaturas de producto en bandeja inferior y superior para alpechín.

#### 7.4.2. Influencia de diferentes parámetros en la cinética de secado.

Como se indicó en el secado natural, existen diferentes propiedades del aire y el producto que van a condicionar, tanto directa como indirectamente, el proceso de secado solar (aunque en menor proporción que en el SDS).

En este apartado se valora, para el prototipo de secadero solar, la influencia de diversos parámetros externos e internos en la cinética de secado de los subproductos, siendo los principales la temperatura y humedad relativa ambiental, la radiación solar,

la temperatura y humedad relativa alcanzada en el interior de la cámara de secado (relacionada con los anteriores), la velocidad del aire y el flujo másico en su interior, etc.

Los resultados demuestran que el incremento de la temperatura del aire desecante, así como la disminución de su humedad relativa, origina reducciones considerables en los tiempos de secado [141]. A su vez, para los secaderos solares, aumentos de la radiación solar provocan mayores temperaturas en la cámara de secado y, por tanto, menores tiempos de operación [198]. Y además, el incremento de la velocidad de paso de aire sobre el producto reduce el ratio de secado; sin embargo y como se ha puesto de manifiesto en el epígrafe anterior, existe un valor máximo de dicha velocidad para el que se obtienen los menores tiempos de secado [138].

La temperatura y humedad relativa en el interior de la cámara de secado dependen de las variables ambientales temperatura, humedad relativa y radiación solar. En las figuras 7.40, 7.41 y 7.42 se muestra, para orujo, alperujo y alpechín, respectivamente, la evolución del ratio de secado para dos situaciones diferentes (a y b) de temperatura y humedad relativa, tanto del aire ambiente (sección 1) como del aire en el interior de la cámara de secado (sección 2). Como se observa, para la condiciones indicadas de aumentos de temperatura y disminuciones de humedad relativa entre las situaciones a y b, se consiguen reducciones de los tiempos de secado entre un 20 y un 50 %, siendo éstas mayores para el alpechín, seguido del alperujo y orujo.

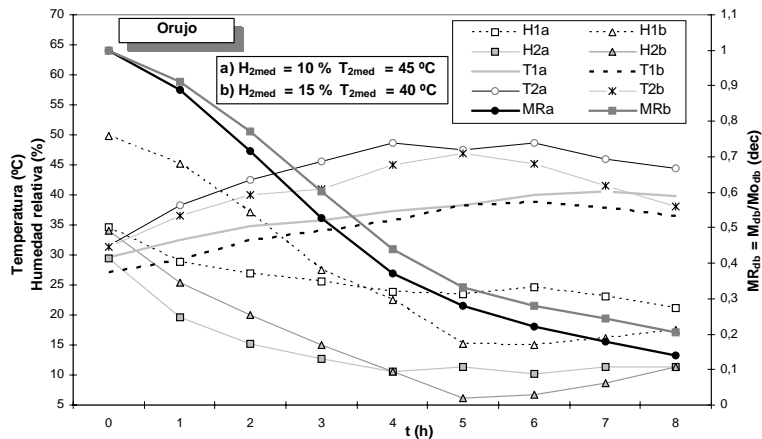


Figura 7.40: Influencia de la temperatura y humedad relativa en la cinética de secado del orujo.

De los ensayos realizados se ha obtenido la dependencia del ratio de secado con la temperatura para los diferentes subproductos y modos de funcionamiento. Estos gráficos se presentan en las figuras 7.43, 7.44 y 7.45. Se puede apreciar cómo, según



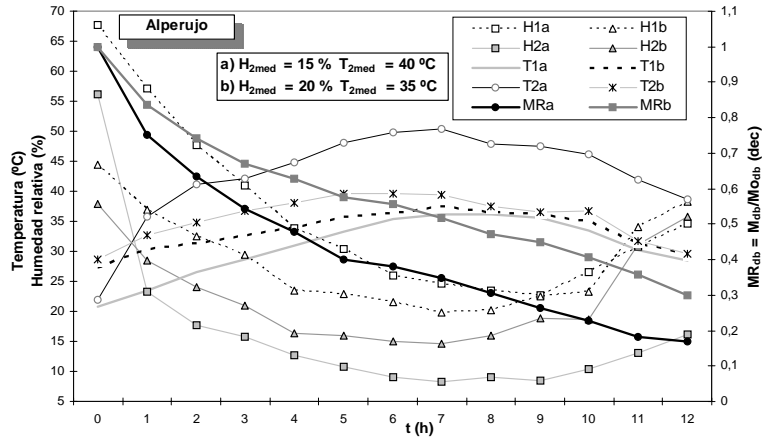


Figura 7.41: Influencia de la temperatura y humedad relativa en la cinética de secado del alperujo.

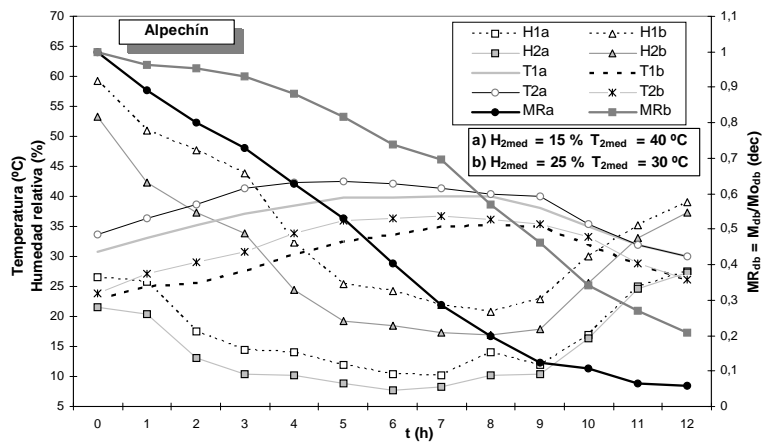


Figura 7.42: Influencia de la temperatura y humedad relativa en la cinética de secado del alpechín.

aumenta la temperatura de secado, disminuye el tiempo de operación. Además, dichos tiempos de secado en el funcionamiento mixto son inferiores entre 2 y 3 veces a los del modo indirecto, a igualdad de temperatura. Los tiempos medios obtenidos en cada caso se muestran en la tabla 7.4. Se observan en el modo mixto, para una temperatura de 40 °C (temperatura habitual en el secado solar), tiempos de secado de 4, 12 y 13 h para orujo, alperujo y alpechín, respectivamente. Los resultados obtenidos para este último, en el sistema mixto, arrojan muy buenas perspectivas para la aplicación del secado solar a este residuo.

Modo mixto $t$ (h)				Modo indirecto $t$ (h)			
	Orujo	Alperujo	Alpechín		Orujo	Alperujo	Alpechín
30 °C	5	21	19	20 °C	13	34	31
40 °C	4	12	13	30 °C	8	24	24
50 °C	2	10	8	40 °C	7	16	15

Tabla 7.4: Tiempos de secado con la temperatura y modo de funcionamiento.

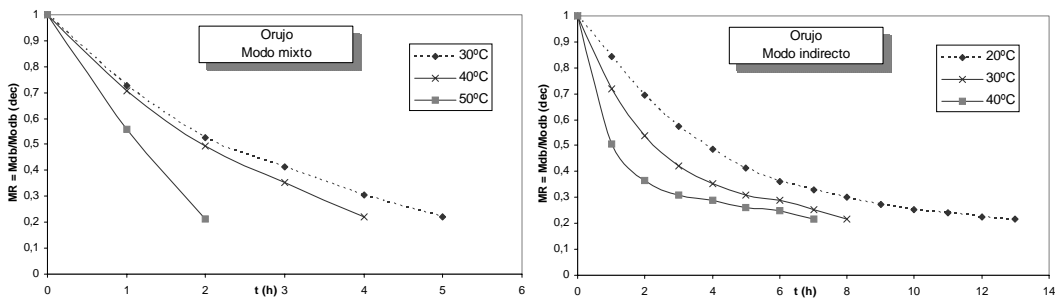


Figura 7.43: Ratio de humedad db. para diferentes temperaturas en modo mixto e indirecto para orujo.

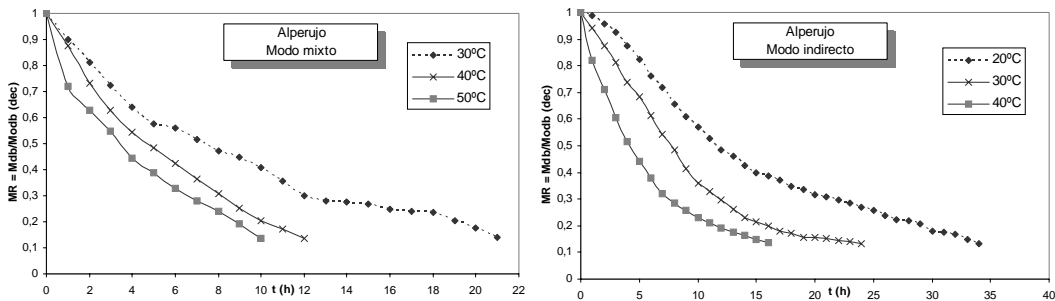


Figura 7.44: Ratio de humedad db. para diferentes temperaturas en modo mixto e indirecto para alperujo.

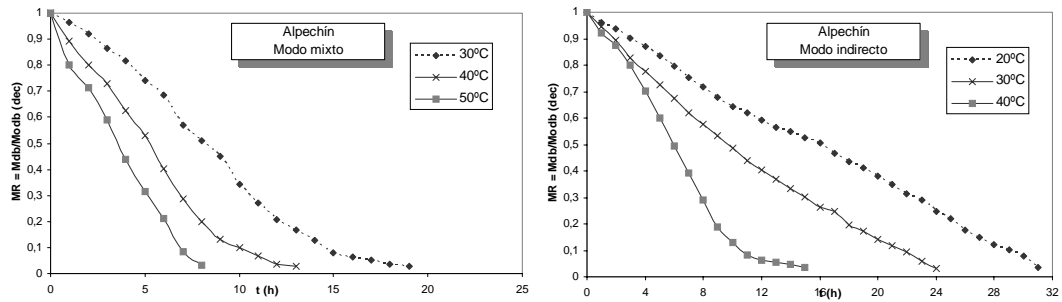


Figura 7.45: Ratio de humedad db. para diferentes temperaturas en modo mixto e indirecto para alpechín.

La influencia de la radiación solar y del flujo másico de aire en la temperatura de entrada a la cámara se mostró en la figura 7.9 y 7.10, respectivamente. La mejora de dicha temperatura por el aumento de la radiación solar o por la reducción del flujo másico, influirá, tal y como se ha expuesto anteriormente, en la cinética de secado de los subproductos.

En las figuras 7.26, 7.27 y 7.28 se indicaron los ratios de humedad en base seca de los tres subproductos para diferentes caudales de aire. La comparación de los tiempos de secado para los flujos másicos de aire característicos en convección natural y forzada, esto es,  $0,05 \text{ kg/s}$  y  $0,22 \text{ kg/s}$ , se presenta en la figura 7.46. Como se observa, se consiguen reducciones aproximadas de dichos tiempos, dependiendo del subproducto, entre un 30 y un 80 %, verificando de nuevo la mejora de la cinética de secado en el modo activo (para ese caudal de aire) respecto al modo pasivo.

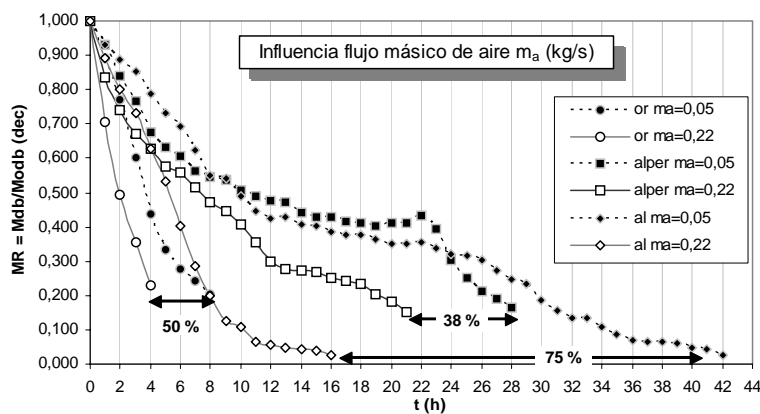


Figura 7.46: Influencia del caudal de aire en la cinética de secado.

Por otro lado y por tratarse de un secadero solar con posibilidades de transferencia

de calor mixta o distribuida, la intensidad de la radiación solar también va a influir de forma directa en las temperaturas de producto y, por tanto, en la cinética de secado.

Así, en la figura 7.47 se comparan dichas temperaturas en el funcionamiento mixto e indirecto, para los tres subproductos en convección forzada. Se observa que, generalmente, las temperaturas de producto son superiores en el modo mixto (para la intensidad de radiación media indicada), registrándose los mayores valores para el orujo (35-40 °C), seguido del alperujo (30-35 °C) y el alpechín (25-30 °C).

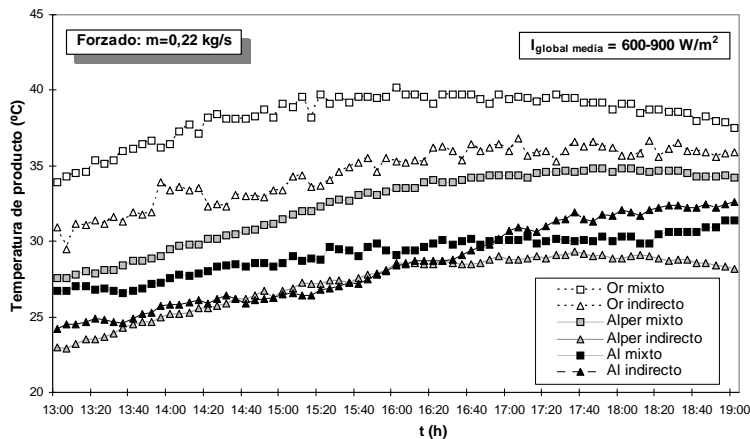


Figura 7.47: Temperaturas de producto para funcionamiento mixto y distribuido.

### 7.4.3. Eficiencia de la cámara de secado.

Para completar el estudio relativo a la evaluación del funcionamiento del prototipo de secadero solar, se ha determinado la eficiencia del mismo a través de los diferentes parámetros definidos en el capítulo 3 (ec. 3.50, ec. 3.51, ec. 3.73-ec. 3.80). Se presentan a continuación las evoluciones horarias de los principales, obtenidas mediante las variables registradas en los ensayos.

Así, en la figura 7.48 se muestra la eficiencia del secado en términos de temperatura (ec. 3.50) para ensayos con orujo en el funcionamiento natural y forzado. Se observa en el modo activo una disminución de dicho parámetro en el tiempo, mientras que en convección natural se mantiene prácticamente constante (durante el mismo periodo). La razón se debe a que la mayor velocidad de secado conseguida en convección forzada provoca progresivamente una menor diferencia de temperatura del aire entre la entrada y la salida del secadero, alcanzando valores próximos a cero para los instantes finales del ensayo.

La variación de la eficiencia de secado, en temperatura y humedad, para dicho

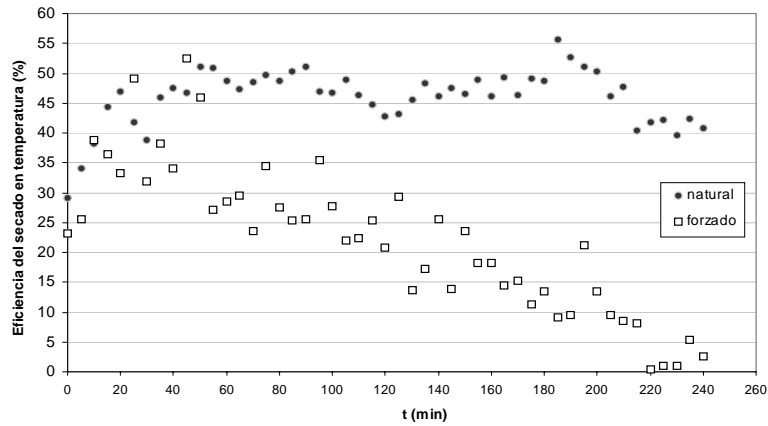


Figura 7.48: Eficiencia del secado en temperatura en modo natural y forzado.

residuo en convección natural y forzada se muestra en la figura 7.49. Como se aprecia de nuevo, ambos parámetros para convección natural permanecen prácticamente constante en las primeras horas del ensayo, con valores respectivos del 45 % y 47 %. Por su parte, en convección forzada se observa una evolución decreciente de los mismos.

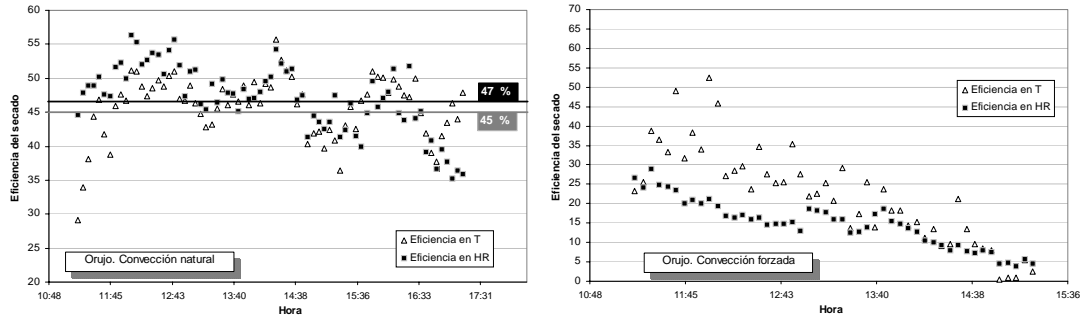


Figura 7.49: Eficiencia en temperatura y humedad en modo pasivo y activo (orujo).

La eficiencia en términos de humedad (“pick-up efficiency”) para los tres subproductos de estudio con un flujo másico medio de aire de  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$  se muestra en la figura 7.50. Puede comprobarse cómo el alpechín, por su mayor contenido en humedad, presenta valores superiores de este parámetro y una evolución creciente en las primeras horas del proceso, siendo decreciente para los residuos orujo y alperujo. Este hecho verifica que la mayor difusividad efectiva del alpechín y su elevado contenido de humedad provoca un aumento de la eficiencia en términos de humedad durante las primeras horas del proceso.

La valoración de la eficiencia del secadero,  $\eta_s$  (%), en los tres residuos para fun-

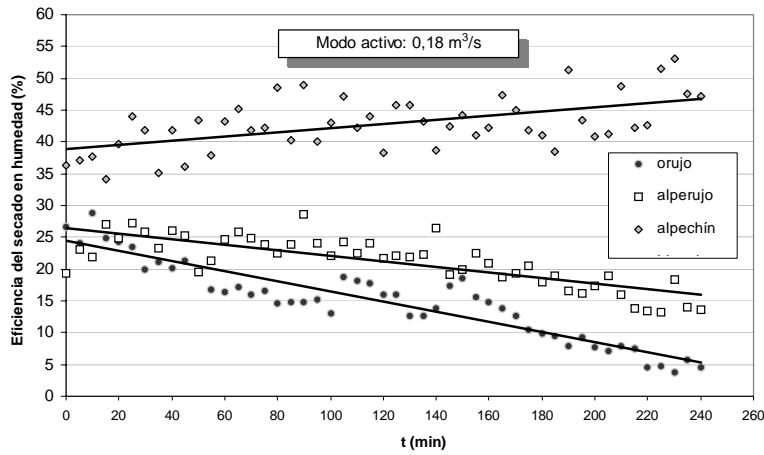


Figura 7.50: Eficiencia del secado en humedad para los diferentes subproductos.

cionamiento en convección natural (ec. 3.74), forzada (ec. 3.75) y en modo híbrido (ec. 3.76) se muestra en la tabla 7.5 (considerando la aportación de radiación solar, los consumos energéticos del ventilador y resistencias, en el periodo de duración del proceso de secado). Los valores alcanzados se encuentran en el intervalo 13-44 %, análogos a los obtenidos en secaderos de características similares [96, 195, 196].

$\eta_s$ (%)	Orujo	Alperujo	Alpechín
Natural	15,34	13,23	14,13
Forzado	23,22	15,95	23,14
Híbrido	44,06	17,31	26,53

Tabla 7.5: Eficiencia del secadero para diferentes subproductos modos de funcionamiento.

Los mayores valores de este parámetro se obtienen en el modo de funcionamiento híbrido, seguidos de los alcanzados en convección forzada y natural. Como se aprecia, se consigue una mejora cuantitativa de la eficiencia en modo activo respecto al modo pasivo, superior en los subproductos orujo y alpechín ( $> 50$  % y  $> 60$  %, respectivamente) que en el alperujo ( $\sim 20$  %). Además, se observa que la eficiencia del sistema para el secado de orujo, en cada modo de funcionamiento, es superior al alcanzado con alperujo o alpechín.

Los valores de eficiencia inferiores se registran en el alperujo. Queda reflejado en el secado de éste que la variación del modo de funcionamiento produce cambios poco significativos en el rendimiento del sistema, aspecto que se ha verificado anteriormente en los tiempos de secado y que hace concluir que no se considerará viable la aplicación del secado solar del alperujo para las condiciones descritas. Se estima necesario un

dispositivo de volteo de este material para mejorar el proceso, que también se podrá utilizar para los otros subproductos mejorando la transferencia de calor.

#### 7.4.4. Comparación secado solar y secado natural.

Diversos autores han analizado y comparado los tiempos de secado [96, 195, 199] en secaderos solares respecto al SDS. En todos los casos se han observado mejoras en dichos tiempos, de mayores o menores proporciones dependiendo de las características del secadero, de los subproductos, de las condiciones climáticas y del modo de funcionamiento.

Para valorar el comportamiento del prototipo de secadero solar frente al secado natural se comparan los ratios de secado en los tres subproductos de estudio, obtenidos para diferentes condiciones ambientales y modos de funcionamiento.

Así, para una cantidad de producto de 2000 g, para unas condiciones medias de temperatura ambiente de 30 °C, velocidad del viento de 3 m/s y radiación solar máxima sobre superficie horizontal de 900 W/m<sup>2</sup> durante el mes de agosto, en las figuras 7.51, 7.52 y 7.53 se muestra la variación del ratio de humedad en base seca en el secadero solar (modo forzado con 0,18 m<sup>3</sup>/s) y en el SDS, para orujo, alperujo y alpechín, respectivamente. Como se puede observar, se consiguen disminuciones considerables en los tiempos de secado, con valores respectivos para dichos subproductos del 96, 83 y 86 %.

La comparación del SDS con el secado híbrido en el prototipo arroja reducciones de dichos tiempos superiores a las mencionadas, con valores aproximados de 98, 89 y 90 %, similares a las obtenidas por Prasad [96].

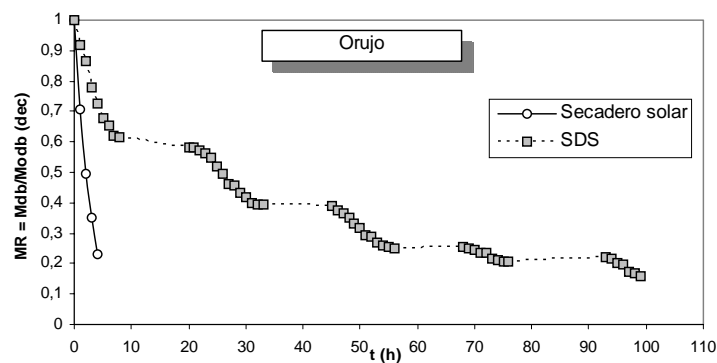


Figura 7.51: Variación del ratio de humedad con el tiempo de secado para orujo en el secadero solar y en el secado natural.

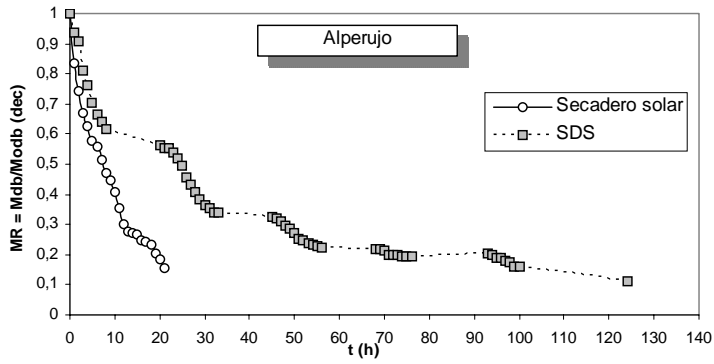


Figura 7.52: Variación del ratio de humedad con el tiempo de secado para alperujo en el secadero solar y en el secado natural.

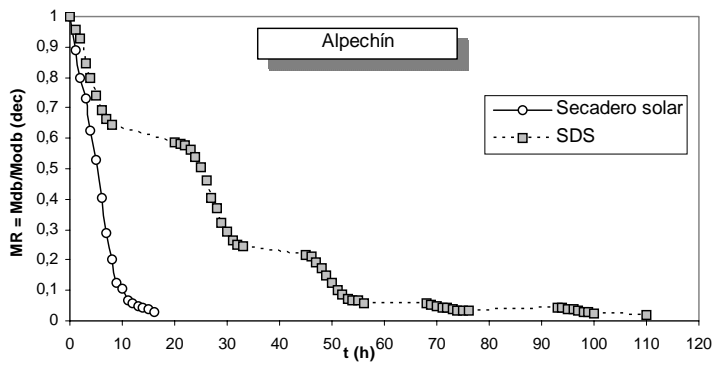


Figura 7.53: Variación del ratio de humedad con el tiempo de secado para alpechín en el secadero solar y en el secado natural.



Como resumen, en la tabla 7.6 se muestran los tiempos de secado alcanzados en el SDS y en el secadero para los diferentes modos de funcionamiento.

	Orujo	Alperujo	Alpechín
SDS	99 h	124 h	110 h
Secadero funcionamiento híbrido	2 h	14 h	11 h
Secadero funcionamiento forzado	4 h	21 h	16 h
Secadero funcionamiento natural	8 h	28 h	42 h

Tabla 7.6: Tiempos de secado en SDS y secadero solar para los tres subproductos.

## 7.5. Modelos de ajuste de los resultados experimentales.

Una alternativa a los modelos teóricos consiste en utilizar relaciones obtenidas de análisis de regresión no lineal sobre datos puramente experimentales. Así, los modelos matemáticos de regresión han sido ampliamente utilizados para evaluar el fenómeno del secado de diversos productos agrícolas, siendo los más habituales los referentes al secado en “capa fina”.

En la tabla 7.7 se presentan algunos modelos matemáticos simples para el ratio de secado utilizados por diferentes autores para una gran variedad de materiales [179–184, 200, 201]. El valor numérico de los coeficientes varía según el tipo de producto a secar y el tipo de secadero utilizado.

Estos modelos semiteóricos son una simplificación de la solución de la segunda ley de Fick y consideran únicamente la resistencia externa de transferencia de humedad entre el producto y el aire, no necesitando datos sobre geometría, coeficientes de difusividad, etc. La limitación más importante de estos modelos reside en que son válidos para el rango de temperaturas, humedades relativas, flujos máscicos de aire y contenidos de humedad para el que han sido desarrollados, debiendo conocer, por tanto, de forma exhaustiva, las características de los procesos que se pretenden ajustar.

De todos los modelos existentes, los más utilizados son: Newton, Page, Henderson, Logarithmic, Two-term y Wang and Sing [179, 180]. Mediante técnicas de regresión no lineal se han obtenido las constantes de los diferentes modelos seleccionados usando el software de análisis estadístico DataFit. Se tomarán aquellos modelos que proporcionen los mayores valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y los menores valores del error cuadrático medio ( $\chi^2$ ). Para determinar el valor de  $\chi^2$  se puede utilizar la ec. 7.2:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - p} \quad (7.2)$$

donde,  $MR_{exp,i}$  es el ratio de humedad obtenido experimentalmente,  $MR_{pred,i}$  es

Modelo	Ecuación del modelo para MR	Referencias
Newton o Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[181]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[179]
Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	[181]
Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	[179, 182]
Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	[62]
Two-term	$MR = a \cdot \exp(-k_0t) + b \cdot \exp(-k_1t)$	[179, 182]
Two-term exponencial	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kat)$	[179, 182]
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[179, 182]
Thompson	$t = a \ln MR + b (\ln MR)^2$	[37]

Tabla 7.7: Modelos matemáticos de ratios de secado.

el ratio de humedad estimado,  $N$  es el número de puntos considerados y  $p$  el número de constantes en el modelo de regresión.

Para el análisis de regresión se utilizan los resultados experimentales a temperaturas de 30, 40 y 50 °C para el modo mixto y de 20, 30 y 40 °C para el modo indirecto, con caudales de aire de 0,22 kg/s ( $\sim 0,19 \text{ m}^3/\text{s}$ ), esto es, velocidades en la cámara de aproximadamente 0,5 m/s.

En las tablas 7.8, 7.9 y 7.10 se presentan los resultados obtenidos en el ajuste del ratio de humedad para los diferentes modelos seleccionados en este trabajo, para el funcionamiento en modo mixto a diferentes temperaturas, de los subproductos orujo, alperujo y alpechín, respectivamente. De igual forma, en las tablas 7.11, 7.12 y 7.13, se muestran estos resultados para el funcionamiento en modo indirecto.

Para cada uno de los subproductos de estudio se muestra en las figuras 7.54, 7.55 y 7.56 la comparación de los modelos considerados para el modo mixto en el rango de temperaturas de secado de 30, 40 y 50 °C, respectivamente.

Igualmente, en las figuras 7.57, 7.58 y 7.59 se presenta dicha comparación de modelos para el modo indirecto y con temperaturas de secado de 20, 30 y 40 °C, respectivamente. Se puede observar, en todos los casos, que, conforme aumenta la temperatura de operación, el ajuste obtenido es ligeramente de peor calidad.

Como se observa, el modelo de Wang and Singh es el que peor aproximación proporciona de los resultados experimentales. Por su parte, los modelos de Page, Logarithmic y Two-term presentan en la mayoría de los casos el mejor comportamiento.

Se ha seleccionado el *modelo de Page* para el ajuste del ratio de secado en base seca en el rango de temperaturas estudiadas, por ser el que proporciona, de forma general, el mejor ajuste de los valores experimentales con valores de  $R^2$  superiores a 0,98 y de  $\chi^2$  inferiores a  $2,322 \cdot 10^{-3}$ .

La comparación de los valores predichos por el modelo de Page y los experimentales para las diferentes temperaturas y subproductos, en el modo mixto e indirecto,

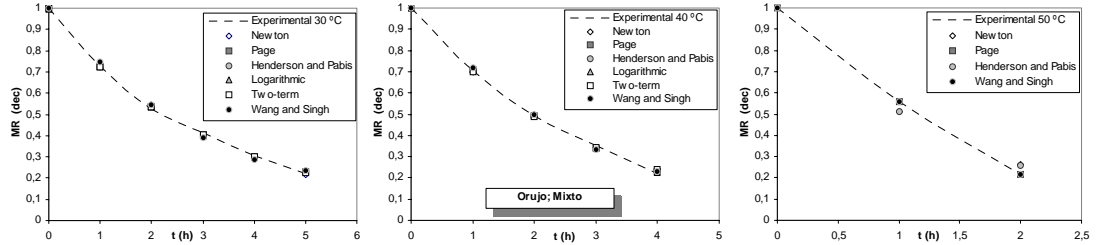


Figura 7.54: Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en orujo y modo mixto.

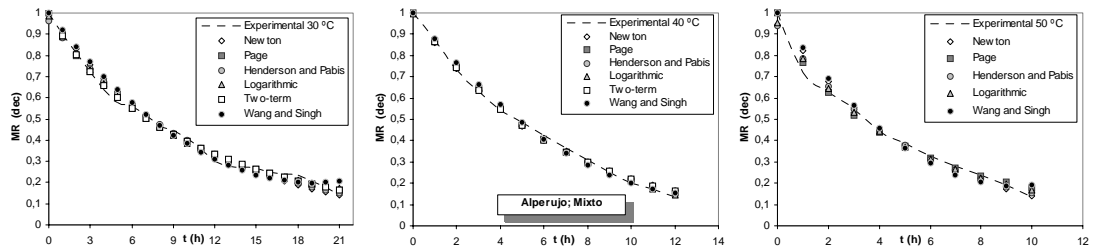


Figura 7.55: Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alperujo y modo mixto.

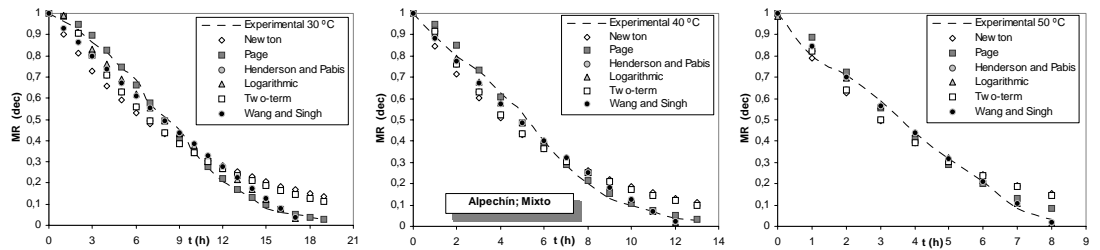


Figura 7.56: Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alpechín y modo mixto.

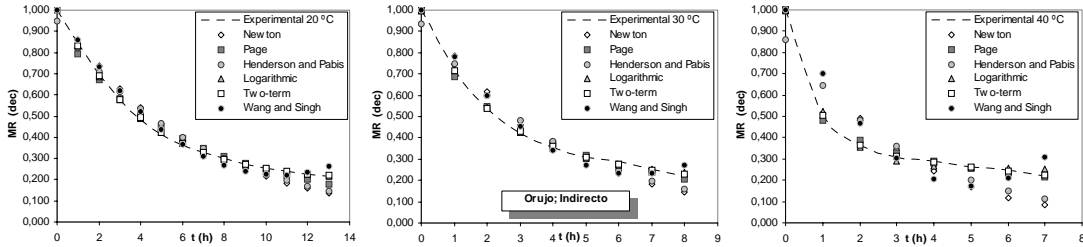


Figura 7.57: Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en orujo y modo indirecto.

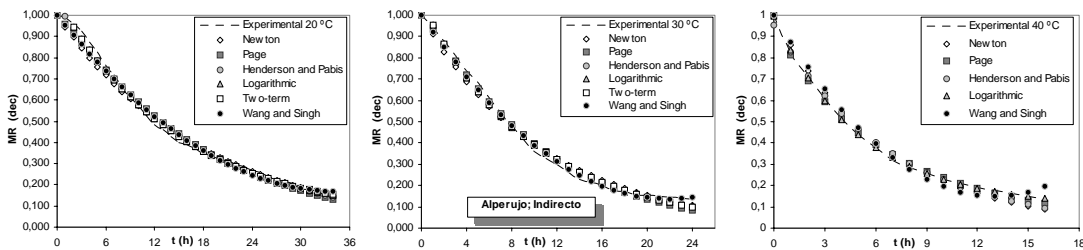


Figura 7.58: Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alperujo y modo indirecto.

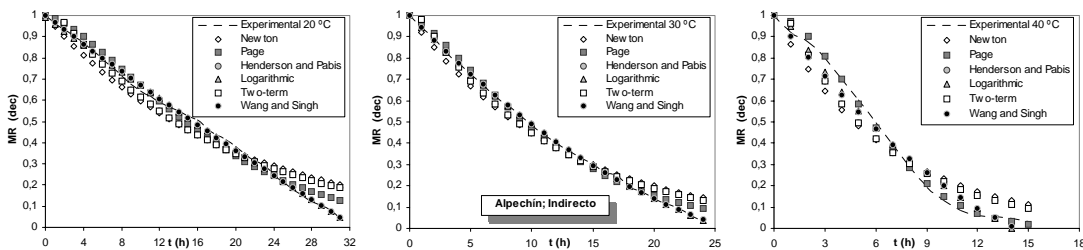


Figura 7.59: Variación del ratio de secado experimental y simulado para varios modelos a diferentes temperaturas en alpechín y modo indirecto.

se presentan en la figura 7.60 y 7.61 respectivamente. Se puede concluir que el modelo de Page para el rango de temperaturas de secado de 20-50 °C, humedades relativas del aire en la cámara de 5-25 % y caudales de aire de aproximadamente 0,2 m<sup>3</sup>/s, describe de forma adecuada la cinética de secado de los subproductos orujo, alperujo y alpechín.

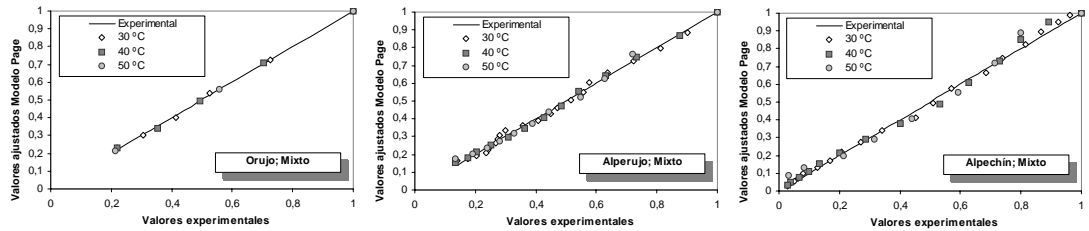


Figura 7.60: Valores del ratio de humedad db. predecidos según el modelo de Page y experimentales a diferentes temperaturas para los tres subproductos en el modo mixto.

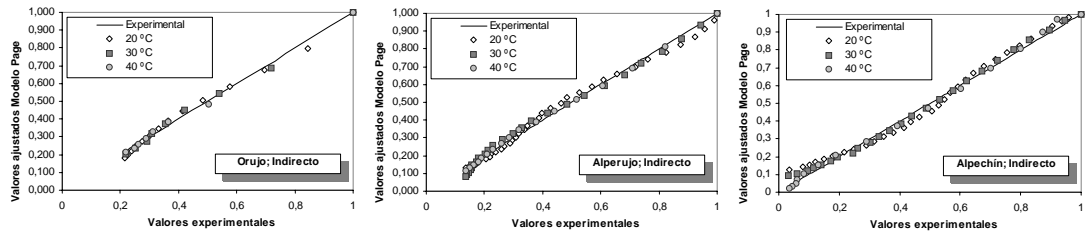


Figura 7.61: Valores del ratio de humedad db. predecidos según el modelo de Page y experimentales a diferentes temperaturas para los tres subproductos en el modo indirecto.

Temper.	Modelos y parámetros constantes	$R^2$	$\chi^2 \cdot 10^{-4}$
30°C	Newton (k=0,3044)	0,9982	1,524
	Page (k=0,3235; n=0,9441)	0,9991	0,949
	Henderson and Pabis (a=0,9919; k=0,3013)	0,9984	1,696
	Logarithmic (a=0,9487; k=0,3317; c=0,0483)	0,9988	1,676
	Two-term (a=0,9427; k <sub>0</sub> =0,2844; b=0,0576; k <sub>1</sub> =1,4734)	0,9992	1,178
	Wang and Singh (a=-0,2775; b=0,0249)	0,9955	4,696
40°C	Newton (k=0,3571)	0,9984	1,486
	Page (k=0,3416; n=1,0487)	0,9989	1,295
	Henderson and Pabis (a=1,0042; k=0,3589)	0,9985	1,912
	Logarithmic (a=1,0974; k=0,3040; c=-0,0997)	0,9994	1,110
	Two-term (a=0,5021; k <sub>0</sub> =0,3589; b=0,5021; k <sub>1</sub> =0,3589)	0,9985	5,736
	Wang and Singh (a=-0,309; b=0,029)	0,9982	2,253
50°C	Newton (k=0,67177)	0,9858	21,98
	Page (k=0,58307; n=1,40047)	1	0
	Henderson and Pabis (a=1,01157; k=0,67998)	0,9863	42,55
	Logarithmic (-)	-	-
	Two-term (-)	-	-
	Wang and Singh (a=-0,49091; b=0,049091)	1	0

Tabla 7.8: Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo mixto para los diferentes modelos (orujo).

Temper.	Modelos y parámetros constantes	$R^2$	$\chi^2 \cdot 10^{-4}$
30°C	Newton (k=0,09286)	0,9886	6,906
	Page (k=0,12193; n=0,88498)	0,9949	3,203
	Henderson and Pabis (a=0,9645; k=0,0888)	0,9914	5,429
	Logarithmic (a=0,9032; k=0,1097; c=0,0846)	0,9943	3,792
	Two-term (a=0,1627; k <sub>0</sub> =0,3491; b=0,8420; k <sub>1</sub> =0,0777)	0,9952	3,402
	Wang and Singh (a=-0,08347; b=0,00217)	0,9829	10,85
40°C	Newton (k=0,15119)	0,9969	2,365
	Page (k=0,1408; n=1,0383)	0,9974	2,173
	Henderson and Pabis (a=1,0075; k=0,1525)	0,9969	2,478
	Logarithmic (a=1,0776; k=-0,0833; c=0,12999)	0,9982	1,613
	Two-term (a=0,5037; k <sub>0</sub> =0,1525; b=0,5037; k <sub>1</sub> =0,1525)	0,9969	3,029
	Wang and Singh (a=-0,1267; b=0,0047)	0,9949	4,183
50°C	Newton (k=0,1963)	0,9767	15,71
	Page (k=0,26899; n=0,80928)	0,9926	5,562
	Henderson and Pabis (a=0,9411; k=0,1824)	0,9855	10,88
	Logarithmic (a=0,8894; k=0,2142; c=0,0658)	0,9869	11,01
	Two-term (-)	-	-
	Wang and Singh (a=-0,172599; b=0,009156)	0,9619	28,44

Tabla 7.9: Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo mixto para los diferentes modelos (alperujo).

Temper.	Modelos y parámetros constantes	$R^2$	$\chi^2 \cdot 10^{-4}$
30°C	Newton (k=0,105384)	0,9058	11,58
	Page (k=0,0138; n=1,8908)	0,9977	2,934
	Henderson and Pabis (a=1,1573; k=0,1219)	0,9351	84,21
	Logarithmic (a=2,0372; k=0,20419; c=-0,9629)	0,9831	23,15
	Two-term (a=0,5787; k <sub>0</sub> =0,1219; b=0,5787; k <sub>1</sub> =0,1219)	0,9351	94,74
	Wang and Singh (a=-0,068926; b=0,0007192)	0,9778	28,78
40°C	Newton (k=0,16843)	0,9385	72,48
	Page (k=0,052; n=1,630)	0,9937	8,031
	Henderson and Pabis (a=1,0989; k=0,1848)	0,9513	62,13
	Logarithmic (a=1,6049; k=0,08366; c=-0,56901)	0,9870	18,09
	Two-term (a=0,5495; k <sub>0</sub> =0,1848; b=0,5495; k <sub>1</sub> =0,1848)	0,9513	74,56
	Wang and Singh (a=-0,1184; b=0,0031)	0,9881	15,21
50°C	Newton (k=0,23462)	0,9476	58,62
	Page (k=0,1183; n=1,4583)	0,9818	23,22
	Henderson and Pabis (a=1,0513; k=0,2473)	0,9522	61,02
	Logarithmic (a=2,5218; k=0,0611; c=-1,5347)	0,9959	6,185
	Two-term (a=0,5257; k <sub>0</sub> =0,2473; b=0,5256; k <sub>1</sub> =0,2473)	0,9522	85,43
	Wang and Singh (a=-0,1580; b=0,0044)	0,9956	5,574

Tabla 7.10: Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo mixto para los diferentes modelos (alpechín).

Temper.	Modelos y parámetros constantes	$R^2$	$\chi^2 \cdot 10^{-4}$
20°C	Newton (k=0,2844)	0,9991	21,41
	Page (k=0,2299; n=0,7831)	0,9902	6,506
	Henderson and Pabis (a=0,9471; k=0,1432)	0,9719	18,67
	Logarithmic (a=0,8277; k=0,2480; c=0,1832)	0,9993	0,504
	Two-term (a=0,8799; k <sub>0</sub> =0,2312; b=0,1289; k <sub>1</sub> =-0,024)	0,9994	0,498
	Wang and Singh (a=-0,1477; b=0,0070)	0,9853	9,705
30°C	Newton (k=0,2426)	0,9471	30,70
	Page (k=0,3749; n=0,6920)	0,9943	4,317
	Henderson and Pabis (a=0,9324; k=0,2219)	0,9595	30,70
	Logarithmic (a=0,7844; k=0,4326; c=0,2129)	0,9984	1,410
	Two-term (a=0,6165; k <sub>0</sub> =0,5540; b=0,3855; k <sub>1</sub> =0,0701)	0,9991	0,913
	Wang and Singh (a=-0,2379; b=0,0184)	0,9697	23,00
40°C	Newton (k=0,3556)	0,7813	146,0
	Page (k=0,7285; n=0,3841)	0,9967	2,538
	Henderson and Pabis (a=0,8613; k=0,2909)	0,8289	133,2
	Logarithmic (a=0,7714; k=1,0061; c=0,2536)	0,9938	5,751
	Two-term (a=0,6132; k <sub>0</sub> =1,4397; b=0,3869; k <sub>1</sub> =0,0779)	0,9997	0,290
	Wang and Singh (a=-0,3322; b=0,0334)	0,8396	124,9

Tabla 7.11: Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo indirecto para los diferentes modelos (orujo).

Temper.	Modelos y parámetros constantes	$R^2$	$\chi^2 \cdot 10^{-4}$
20°C	Newton (k=0,0556)	0,9869	9,584
	Page (k=0,0419; n=1,0994)	0,9904	7,219
	Henderson and Pabis (a=1,0589; k=0,0595)	0,9929	5,346
	Logarithmic (a=1,0350; k=0,0641; c=0,0333)	0,9933	5,212
	Two-term (a=1,0628; k <sub>0</sub> =0,062; b=0,0046; k <sub>1</sub> =-0,0494)	0,9933	5,334
	Wang and Singh (a=-0,0480; b=6,934)	0,9892	8,130
30°C	Newton (k=0,0936)	0,9873	10,28
	Page (k=0,0698; n=1,1216)	0,9918	6,875
	Henderson and Pabis (a=1,0509; k=0,0988)	0,9912	7,420
	Logarithmic (a=1,0421; k=0,1019; c=0,0128)	0,9913	7,675
	Two-term (a=0,5254; k <sub>0</sub> =0,0988; b=0,5254; k <sub>1</sub> =0,0988)	0,9912	8,126
	Wang and Singh (a=-0,0793; b=0,0018)	0,9960	3,358
40°C	Newton (k=0,1516)	0,9858	9,511
	Page (k=0,2064; n=0,8436)	0,9973	1,957
	Henderson and Pabis (a=0,9545; k=0,1437)	0,9898	7,321
	Logarithmic (a=0,8919; k=0,1945; c=0,1017)	0,9994	0,427
	Two-term (a=0,1189; k <sub>0</sub> =0,0085; b=0,8754; k <sub>1</sub> =0,1983)	0,9994	0,458
	Wang and Singh (a=-0,1307; b=0,0050)	0,9811	13,53

Tabla 7.12: Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo indirecto para los diferentes modelos (alperujo).

Temper.	Modelos y parámetros constantes	$R^2$	$\chi^2 \cdot 10^{-4}$
20°C	Newton (k=0,0516)	0,9415	47,87
	Page (k=0,0143; n=1,4446)	0,9826	14,70
	Henderson and Pabis (a=1,0848; k=0,0569)	0,9546	38,43
	Logarithmic (a=6,5610; k=0,0050; c=-5,5697)	0,9980	1,769
	Two-term (a=0,5424; k <sub>0</sub> =0,0569; b=0,5424; k <sub>1</sub> =0,0569)	0,9546	41,18
	Wang and Singh (a=-0,0339; b=0,0001)	0,9978	1,837
30°C	Newton (k=0,0807)	0,9696	26,57
	Page (k=0,0358; n=1,3204)	0,9940	5,501
	Henderson and Pabis (a=1,0712; k=0,0871)	0,9776	20,37
	Logarithmic (a=1,5684; k=0,0401; c=-0,5618)	0,9997	0,244
	Two-term (a=0,5356; k <sub>0</sub> =0,0871; b=0,5356; k <sub>1</sub> =0,0871)	0,9776	22,31
	Wang and Singh (a=-0,0589; b=0,0008)	0,9996	0,354
40°C	Newton (k=0,1463)	0,9197	100,3
	Page (k=0,0288; n=1,8165)	0,9965	4,667
	Henderson and Pabis (a=1,1333; k=0,1650)	0,9407	79,39
	Logarithmic (a=1,6180; k=0,0769; c=-0,5503)	0,9781	31,60
	Two-term (a=0,5666; k <sub>0</sub> =0,1650; b=0,5666; k <sub>1</sub> =0,1650)	0,9407	92,63
	Wang and Singh (a=-0,1023; b=0,0022)	0,9763	31,76

Tabla 7.13: Ajuste del ratio de humedad con la temperatura en modo indirecto para los diferentes modelos (alpechín).



## Capítulo 8

# Modelado teórico del funcionamiento del secadero solar.

### 8.1. Introducción.

Las técnicas de simulación numérica resultan cada vez de mayor utilidad para la caracterización de procesos [202–204]. Así, los modelos matemáticos para la implementación por ordenador de los sistemas de secado solar proporcionan una herramienta importante para predecir la influencia de diferentes parámetros en su funcionamiento, posibilitando la obtención del diseño del sistema de secado más eficiente energéticamente [205–207].

La necesidad de tales modelos para el desarrollo y optimización de los diseños de secaderos radica en el hecho de considerar que la experimentación a escala con sistemas que incorporen diferentes combinaciones de diseño, variaciones en las condiciones climatológicas y en los parámetros de secado, resulta altamente complicada. Sin embargo, en la medida de lo posible será interesante contrastar los valores obtenidos por simulación de un modelo teórico con los resultados alcanzados en una investigación puramente experimental.

Dependiendo fundamentalmente del tipo de secadero solar (directo [208], indirecto [209], mixto [197], híbrido [95], activo [210], pasivo [211], en túnel [199, 212, 213], en cabina [214], invernadero [215, 216], etc) y de las características del producto a secar (contenido de humedad, difusividad efectiva, coeficientes convectivos, etc) será necesario un modelo matemático u otro.

De forma general, en la figura 8.1 se representa un esquema, para los secaderos del

tipo colector-cabina, de las variables necesarias a introducir para conseguir un modelo apropiado de estos dispositivos. En resumen, serán necesarios parámetros climatológicos, así como un extenso número de variables relacionadas con el colector y la cámara de secado.

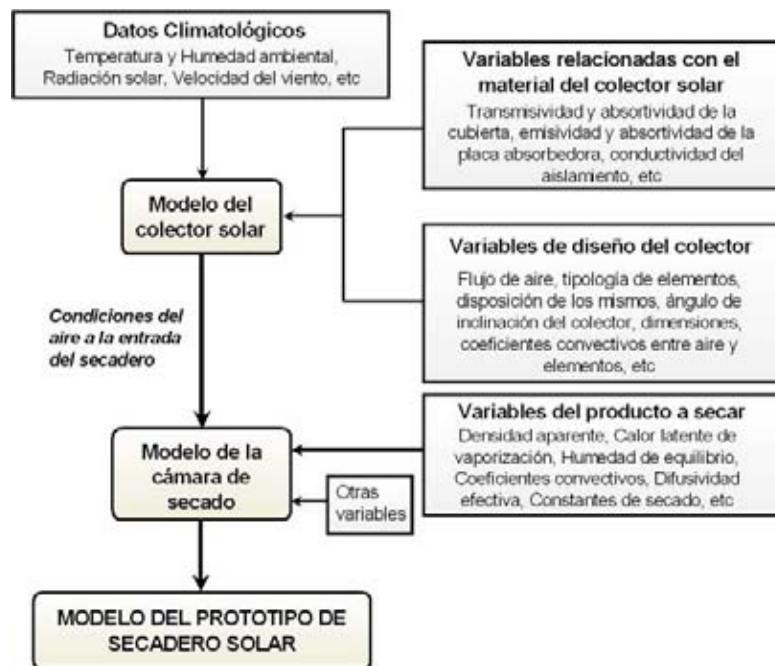


Figura 8.1: Esquema general de las variables necesarias para la simulación.

En este trabajo, el modelo matemático desarrollado para el prototipo de secadero solar descrito en el capítulo 6 consta de dos partes bien diferenciadas, correspondientes, evidentemente, a los elementos fundamentales de dicho dispositivo, el captador solar como unidad de precalentamiento del aire y la cámara de secado como equipo en el que se produce propiamente la desecación de los subproductos.

Diversos autores han realizado modelos para secaderos similares al propuesto [192, 197, 201, 208, 209, 214, 217–225]. En general, todos ellos se basan en la aplicación de los balances de masa y energía en los diferentes elementos de los que consta el sistema de secado.

La realización de un modelo matemático de una unidad de secado solar y su implementación en ordenador no resulta trivial debido, fundamentalmente, al gran número de variables que entran en juego en cada caso específico. Así, es difícil encontrar modelos similares para los secaderos, proponiendo cada investigador aquél que considera que se ajusta mejor a su dispositivo, producto a secar, condiciones ambientales, etc.

El modelo matemático que se presenta a continuación se basa en las ecuaciones

que describen el proceso en el colector y en la cámara de secado. Su implementación se ha realizado mediante programación en Visual Basic [226, 227] y la utilización del método numérico iterativo de Runge-Kutta de orden cuatro [228, 229]. Se detallarán en los apartados siguientes tanto las expresiones utilizadas en el modelo como los parámetros de entrada necesarios para una simulación apropiada.

Además, por la estrecha dependencia de las condiciones climáticas en la eficiencia del proceso [96, 186, 189, 205, 206, 230–232], tanto en el colector como en la cámara, se ha realizado un análisis de regresión de las principales variables ambientales. Aunque, en general, para la validación del modelo se utilizarán las propiedades registradas durante el ensayo mediante los equipos instalados (capítulo 6), resulta interesante disponer de valores horarios medios mensuales de los parámetros climáticos para futuras simulaciones de procesos.

Para validar los modelos teóricos se compararán los resultados obtenidos en las simulaciones (colector, cámara y variables climáticas) con los alcanzados experimentalmente.

## **8.2. Modelo para el colector.**

### **8.2.1. Introducción.**

El captador solar de aire, como ya se ha indicado, es el elemento necesario en una instalación de secado solar para precalentar el aire ambiente (y disminuir su humedad relativa a humedad absoluta constante) y guiarlo e introducirlo en la cámara de secado de subproductos.

Para caracterizar el proceso que tiene lugar en él, las dos variables más importantes a conocer son la temperatura del aire a la salida del calentador y su rendimiento. Por un lado, la temperatura de salida es una variable imprescindible para el modelado de la cámara de secado y, por otro, el rendimiento del captador resulta importante para evaluar la eficiencia del proceso [233].

La obtención de ambos parámetros en dispositivos de calentamiento de agua está altamente documentada, mientras que para los colectores de aire la información técnica existente es algo más reducida y está basada fundamentalmente en los trabajos realizados por Duffie y Beckman [84, 85], los cuales, posteriormente, han sido complementados por otros investigadores [92, 173, 234, 235]. Sin embargo, aunque el modelado del colector no es tarea fácil, se puede decir que su simulación resulta bastante más sencilla que la de la cámara de secado.

### 8.2.2. Rendimiento del colector y temperatura del aire a la salida.

En el capítulo 3 se presentó la expresión para el rendimiento del colector (ec. 3.70) en función del calor útil ( $Q_u$  según ec. 3.71), la irradiancia global y el área de captación. Para obtener, mediante simulación, el rendimiento de un captador solar, es necesario definir el factor de disipación en el colector,  $F_R$  (ec. 8.1), dado como el cociente entre el calor útil realmente proporcionado por el colector y el calor útil que proporcionaría si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido.

$$F_R = \frac{m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{fo} - T_{fi})}{A_c \cdot [S - U_L \cdot (T_{fi} - T_a)]} \quad (8.1)$$

siendo  $m_a$  el caudal másico de aire ( $kg/s$ ),  $c_{pa}$  el calor específico del aire ( $J/kg^\circ C$ ),  $A_c$  la superficie del colector ( $m^2$ ),  $S$  la energía absorbida por la placa según la ec. 8.32 ( $W/m^2$ ),  $U_L$  el coeficiente global de pérdidas en el colector ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),  $T_a$  la temperatura del aire ambiente ( $^\circ C$ ),  $T_{fo}$  la temperatura de salida del aire en el colector ( $^\circ C$ ) y  $T_{fi}$  la temperatura de entrada del aire en el colector ( $^\circ C$ ).

Despejando ( $T_{fo} - T_{fi}$ ) de la ec. 8.1 y sustituyendo en la ec. 3.71 se obtiene la expresión final para el calor útil (8.2).

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [S - U_L \cdot (T_{fi} - T_a)] \quad (8.2)$$

De esta forma, el rendimiento del colector,  $\eta$ , a partir de las expresiones dadas anteriormente, se indica en la ecuación 8.3.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_c} = \frac{m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{fo} - T_{fi})}{I_T \cdot A_c} \equiv F_R \cdot (\tau\alpha)_e - F_R \cdot U_L \frac{(T_{fi} - T_{fo})}{I_T} \quad (8.3)$$

siendo  $I_T$  la radiación total incidente sobre la superficie inclinada del colector ( $W/m^2$ ) y  $(\tau\alpha)_e$  el producto transmisividad-absortividad efectivo dado en la expresión 8.33.

Asumiendo una variación lineal de temperatura a lo largo del colector, la temperatura a la salida del mismo,  $T_{fo}$ , resulta:

$$T_{fo} = T_{fi} + \frac{Q_u}{m_a \cdot c_{pa}} \quad (8.4)$$

### 8.2.3. Modelo matemático.

El modelo implementado para el colector de aire está basado en los estudios previos realizados por Duffie y Beckman sobre este tipo de dispositivos [84].

El colector utilizado en este trabajo, como se describió en el capítulo 6, es un calentador plano de aire de una cubierta y con paso de aire superior sobre el absorbedor.

Las hipótesis bajo las cuales se ha realizado el modelo son las siguientes: el régimen es estacionario (consideración para variaciones horarias de los parámetros); el caudal de aire que entra en el colector es constante y conocido; las temperaturas del fluido y de la superficie absorbidora serán temperaturas medias calculadas como se describirá posteriormente; y se desprecian las pérdidas por los bordes del colector.

En la figura 8.2 se muestran las principales variables que intervienen en el modelo y que se definirán a continuación.

De forma esquemática, la energía solar absorbida,  $S$ , de la radiación incidente,  $I_T$ , función de la emisividad y transmisividad de la cubierta ( $\varepsilon_1$ ,  $\tau_1$ ) y de la emisividad y absorptividad de la placa ( $\varepsilon_2$ ,  $\alpha_2$ ), calienta a esta última a una temperatura  $T_p$ . Por un lado, la energía absorbida por la placa se transfiere de diferentes formas: desde la placa hasta el aire ambiental, a través del aislamiento, mediante el coeficiente de pérdidas inferiores  $U_b$ ; hasta el fluido a  $T_f$ , a través del coeficiente de transferencia de calor  $h_2$ ; y hasta la base de la cubierta, a través del coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_r$ . Y por otro lado, la energía se transfiere desde el fluido de trabajo a la cubierta (a una temperatura  $T_c$ ) a través del coeficiente de transferencia de calor  $h_1$ , y se pierde al aire ambiental a través del coeficiente de pérdidas superiores  $U_t$ .

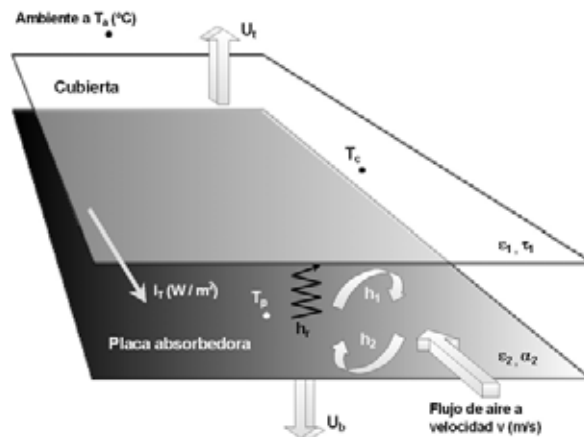


Figura 8.2: Variables que intervienen en el modelo del colector.

De esta forma, los balances energéticos en la cubierta, la placa y el fluido se dan respectivamente en las ecuaciones 8.5, 8.6 y 8.7.

$$U_t \cdot (T_a - T_c) + h_r \cdot (T_p - T_c) + h_1 \cdot (T_f - T_c) = 0 \quad (8.5)$$

$$S + U_b \cdot (T_a - T_p) + h_r \cdot (T_c - T_p) + h_2 \cdot (T_f - T_p) = 0 \quad (8.6)$$

$$h_1 \cdot (T_c - T_f) + h_2 \cdot (T_p - T_f) = q_u \quad (8.7)$$

siendo  $U_t$  el coeficiente global de pérdidas superiores ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ),  $U_b$  el coeficiente global de pérdidas inferiores ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ),  $T_a$  la temperatura ambiente ( $^\circ C$ ),  $T_c$  la temperatura de la cubierta ( $^\circ C$ ),  $T_p$  la temperatura de la placa absorbidora ( $^\circ C$ ),  $T_f$  temperatura del fluido (aire) que circula por el interior ( $^\circ C$ ),  $h_1$  el coeficiente convectivo entre el aire y la cubierta ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ),  $h_2$  el coeficiente convectivo entre el aire y la placa ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ),  $h_r$  el coeficiente de radiación entre la cubierta y la placa ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ),  $S$  la cantidad de energía absorbida por la placa ( $W/m^2$ ) y  $q_u$  la ganancia de calor útil por unidad de área del colector ( $W/m^2$ ).

Las tres ecuaciones anteriores permiten obtener  $q_u$  en función de  $U_t$ ,  $U_b$ ,  $U_L$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_r$ ,  $T_f$  y  $T_a$ . Para ello, es necesario eliminar  $T_p$  y  $T_c$  de las mismas, algo que se consigue despejando los factores  $(T_p - T_f)$  y  $(T_c - T_f)$  de las ecuaciones 8.5 y 8.6, respectivamente. De esta forma, se obtienen las expresiones 8.8 y 8.9.

$$T_p - T_f = \frac{S \cdot (U_t + h_r + h_1) - (T_f - T_a) \cdot (U_t \cdot h_r + U_t \cdot U_b + U_b \cdot h_r + U_b \cdot h_1)}{(U_t + h_r + h_1) \cdot (U_b + h_2 + h_r) - h_2^2} \quad (8.8)$$

$$T_c - T_f = \frac{S \cdot h_r - (T_f - T_a) \cdot (U_t \cdot h_2 + U_t \cdot U_b + U_t \cdot h_r + U_b \cdot h_r)}{(U_t + h_r + h_1) \cdot (U_b + h_2 + h_r) - h_r^2} \quad (8.9)$$

Sustituyendo ambas relaciones en la ecuación 8.7 se alcanza la expresión final de  $q_u$  (ec. 8.10):

$$q_u = F' \cdot [S - U_L \cdot (T_f - T_a)] \quad (8.10)$$

donde  $F'$  se define como el factor de eficiencia del colector y  $U_L$  como el coeficiente global de pérdidas en el colector, y están dados para este tipo de colector, respectivamente, por las ecuaciones 8.11 y 8.12.

$$F' = \frac{h_1 \cdot h_r + U_t \cdot h_2 + h_2 \cdot h_r + h_1 \cdot h_2}{(U_t + h_r + h_1) \cdot (U_b + h_2 + h_r) - h_r^2} \quad (8.11)$$

$$U_L = \frac{(U_b + U_t) \cdot (h_1 \cdot h_r + h_2 \cdot h_r + h_1 \cdot h_2) + [U_b \cdot U_t \cdot (h_1 + h_2)]}{h_1 \cdot h_r + U_t \cdot h_2 + h_2 \cdot h_r + h_1 \cdot h_2} \quad (8.12)$$

Para determinar  $F'$  y  $U_L$ , y de esta forma  $q_u$ , es necesario conocer y determinar los parámetros que a continuación se van a comentar.

### Coefficiente global de pérdidas superiores e inferiores en el colector.

El coeficiente global de pérdidas en el colector,  $U_L$ , como se ha expresado en la ecuación 8.12, es función de otros dos coeficientes globales de pérdidas, el de la parte superior  $U_t$  y el de la parte inferior  $U_b$ .

Por un lado, las pérdidas superiores se producen por convección y radiación. La expresión para determinarlo es la 8.13 [84]. Como se puede apreciar, para obtener dicho coeficiente se han de conocer las temperaturas en las diversas superficies, que a priori son desconocidas; por lo tanto, será necesario aplicar un proceso iterativo para su obtención.

$$U_t = \left( \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \cdot \left[ \frac{(T_{pm} - T_a)}{N+f} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_{pm} + T_a) \cdot (T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_2 + 0,000591 \cdot N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2 \cdot N + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_1}{\varepsilon_1} - N} \quad (8.13)$$

donde  $N$  es el número de cubiertas en el colector,  $f$ ,  $C$  y  $e$  son coeficientes que se obtienen mediante las expresiones 8.14, 8.15 y 8.16, respectivamente ( $\beta_{rad}$  es la inclinación del colector en radianes),  $\varepsilon_1$  es la emisividad de la cubierta,  $\varepsilon_2$  es la emisividad de la superficie absorbadora,  $T_a$  la temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ),  $T_{pm}$  la temperatura media de la superficie absorbadora ( $^{\circ}C$ ) y  $h_w$  el coeficiente de transferencia debido al viento entre la cubierta y el aire ambiente ( $W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$ ).

$$f = (1 + 0,089 \cdot h_w - 0,1166 \cdot h_w \cdot \varepsilon_2) \cdot (1 + 0,07866 \cdot N) \quad (8.14)$$

$$C = 520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot \beta_{rad}^2) \quad (8.15)$$

$$e = 0,430 \cdot \left( 1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (8.16)$$

Las pérdidas de energía que sufren los colectores debido al viento,  $h_w$ , en general, son importantes. Sin embargo, el cálculo de este coeficiente no es tarea sencilla debido a la infinidad de casos que se pueden presentar y a la dificultad de estimar las características exactas del viento al que estará sometido el colector. Existen multitud de estudios y relaciones sobre casos concretos, válidos solamente para unas configuraciones y valores determinados. En este caso se considerará, por su simplicidad y generalidad, la expresión 8.17 dada por Watmuff (1977) [84, 235].

$$h_w = 2,8 + 3,0 \cdot v \quad (8.17)$$

siendo la  $v$  la velocidad del viento en  $m/s$ .

Y por otro lado, las pérdidas que se producen por la parte inferior del colector,  $U_b$ , son debidas, en su mayor parte, a las características del aislante. Suponiendo que la parte superior del aislante coincide con la superficie absorbedora, se puede expresar el coeficiente de pérdidas inferiores por la ecuación 8.18.

$$U_b = \frac{k_{ais}}{e_{ais}} \quad (8.18)$$

siendo  $k_{ais}$  y  $e_{ais}$  la conductividad térmica ( $W/m^{\circ}C$ ) y el espesor del aislante ( $m$ ) respectivamente.

### Coefficientes convectivos.

Para el colector de estudio se puede suponer que los coeficientes convectivos entre el aire y la cubierta y entre el aire y la placa son iguales ( $h_1 = h_2 \equiv h$ ). Este coeficiente se obtendrá a partir del número de Nusselt, mediante la expresión 8.19.

$$h = Nu \cdot \frac{K_v}{D_h} \quad (8.19)$$

siendo  $h$  el coeficiente convectivo ( $W/m^2 \text{ }^{\circ}C$ ),  $K_v$  la conductividad térmica del aire ( $W/m^{\circ}C$ ) y  $D_h$  la longitud característica en el colector, esto es, su diámetro hidráulico ( $m^2$ ), que para superficies paralelas se considera como dos veces la distancia entre placas.

Para determinar el número de Nusselt, según Duffie y Beckman [84], es posible utilizar la expresión 8.20.

$$Nu = 0,0158 \cdot Re^{0,8} \quad (8.20)$$



Supuesta conocida la temperatura media del aire dentro del colector, se pueden obtener sus propiedades y, por tanto, el número de Reynolds mediante la ecuación 8.21.

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} = \frac{m_a \cdot D_h}{A_f \cdot \mu} \quad (8.21)$$

siendo  $\rho$  la densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  $\mu$  su viscosidad dinámica ( $kg/m \cdot s$ ) y  $A_f$  la sección transversal del conducto por donde circula ( $m^2$ ).

#### Caudal másico de aire en el colector.

La ecuación 7.1 indicada en el capítulo 7 permite determinar el caudal másico de aire en el colector en función de su sección de paso, la densidad del aire y la velocidad.

#### Temperatura media del fluido y de la superficie absorbadora.

La temperatura media del fluido,  $T_{fm}$ , para la que se evaluarán las propiedades del fluido, se puede calcular mediante la expresión 8.22.

$$T_{fm} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L T_f(y) dy = T_i + \frac{Q_u}{A_c \cdot F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F'') \quad (8.22)$$

donde  $F''$  es el factor de flujo del colector dado en la ec. 8.30.

Por otro lado, la temperatura media de la superficie absorbadora,  $T_{pm}$ , será siempre mayor que la temperatura media del fluido,  $T_{fm}$ . Esta diferencia de temperatura para colectores que usan líquido como fluido es muy reducida; sin embargo puede ser importante en calentadores de aire. Si se indica la ganancia útil del colector a partir de la temperatura media de la placa (ec. 8.23) combinada con la expresión 8.2 anteriormente dada, se obtiene la relación para determinar la temperatura media de la superficie absorbadora 8.24.

$$Q_u = A_c [S - U_L \cdot (T_{pm} - T_a)] \quad (8.23)$$

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_u}{A_c \cdot F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F_R) \quad (8.24)$$

Como se aprecia en las ecuaciones dadas 8.22 y 8.24, las expresiones de las temperaturas medias dependen del coeficiente global de pérdidas  $U_L$ , que a su vez es función la temperatura media de la placa (ec. 8.12 y ec. 8.13). Por tanto, el cálculo de éstas necesitaría de un proceso iterativo que consiste en suponer una  $T_{pm}$ , a partir de la

cual se calcula un primer valor de  $U_L$ , con éste y unos valores supuestos de  $F_R$  y  $F''$  se calcula  $T_{fm}$  y, a partir de ella, se recalculan  $U_L$ ,  $F_R$  y  $F''$ , repitiéndose el proceso hasta converger. Si se inicia con un valor adecuado en el proceso, la segunda iteración generalmente es innecesaria. Para colectores de aire, un buen valor para comenzar el proceso es el dado en la ecuación 8.25 con  $T_{pm}$  y  $T_i$  en  $^{\circ}C$  [84].

$$T_{pm} = T_i + 20 \quad (8.25)$$

### Coefficiente de radiación entre la cubierta y la placa.

El coeficiente de radiación entre la cubierta y la placa se determina mediante la expresión 8.26, que se puede aproximar mediante la ecuación 8.27.

$$h_r = \frac{\sigma \cdot (T_p^2 + T_c^2) \cdot (T_p + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1} \quad (8.26)$$

$$h_r = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_{fm}^3}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1} \quad (8.27)$$

siendo  $\sigma$  la constante de Steffan-Boltzmann, cuyo valor es  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}C^4$ .

### Factor de disipación de calor, de eficiencia del colector y de flujo.

Existe una relación entre el factor de disipación de calor,  $F_R$ , el factor de eficiencia del colector,  $F'$ , y el factor de flujo,  $F''$ .

Como se ha visto anteriormente en la ecuación 8.2, el calor útil cedido al aire depende del factor  $F_R$  y se puede determinar mediante la expresión 8.1 o mediante la ecuación 8.28. Para este tipo de colectores existe una relación entre los tres factores dada por 8.29.

$$F_R = \frac{m_a \cdot c_{pa}}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[ 1 - \exp \left( -\frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{m_a \cdot c_{pa}} \right) \right] \quad (8.28)$$

$$F_R = F' \cdot F'' \quad (8.29)$$

La expresión para determinar  $F'$  se indicó en 8.11 y la expresión para obtener  $F''$  se da en 8.30 [84].

$$F'' = \frac{m_a \cdot c_{pa}}{A_c \cdot U_L \cdot F'} \cdot \left[ 1 - \exp \left( -\frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{m_a \cdot c_{pa}} \right) \right] \quad (8.30)$$

**Producto transmisividad-absortividad  $(\tau\alpha)$ .**

El producto  $(\tau\alpha)$  tiene tal importancia que conviene verlo como una propiedad en sí del conjunto cubierta-superficie absorbedora, más que como el producto de dos propiedades [84].

Este producto es el resultado de las sucesivas reflexiones que se producen entre la placa absorbedora y la cubierta translúcida. Así, si  $\tau$  es la transmisividad del recubrimiento en un determinado ángulo de incidencia y  $\alpha$  es la absortividad angular de la superficie absorbedora, de toda la energía incidente,  $(\tau\alpha)$  es absorbida por la placa y  $(1 - \alpha)\tau$  es reflejado hacia la cubierta, siendo de esta última la cantidad  $\tau(1 - \alpha)\rho_d$  reflejada de nuevo hacia la superficie absorbedora ( $\rho_d$  es la reflectividad para radiación difusa de la cubierta). Este fenómeno se repite indefinidamente, de forma que la fracción de la energía incidente que es finalmente absorbida, resulta:

$$(\tau\alpha) = \tau \cdot \alpha \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_d} \quad (8.31)$$

De forma general, la radiación absorbida por la placa para la inclinación del colector,  $S$ , viene dada por la expresión 8.32.

$$S = I_T \cdot (\tau\alpha) \quad (8.32)$$

Debido al calentamiento de la cubierta se reducen las pérdidas térmicas a través de la misma. Para tener en cuenta este hecho, es habitual utilizar el producto transmisividad-absortividad efectivo, llamado  $(\tau\alpha)_e$ , el cual es ligeramente superior al producto  $(\tau\alpha)$ . Pese a existir fórmulas para el cálculo del producto  $(\tau\alpha)_e$  [84], rara vez éste es mayor que el 1 ó 2% de  $\tau \cdot \alpha$ . De esta forma, se tomará para los materiales habituales de cubiertas la relación dada en 8.33.

$$(\tau\alpha)_e = 1,02 \cdot \tau \cdot \alpha \quad (8.33)$$

**8.2.4. Parámetros de entrada y proceso de cálculo.**

El procedimiento para calcular la eficiencia horaria y la temperatura de salida en el colector es el siguiente:

1. Se suponen unos valores iniciales de las temperaturas medias de la superficie absorbedora ( $T_{pm0}$ ) y del fluido ( $T_{fm0}$ ).
2. Se obtiene el coeficiente global de pérdidas,  $U_L$  (ec. 8.12).

3. Se calcula  $F'$ ,  $m_a$ ,  $F''$  y  $F_R$  (ec. 8.11, 7.1, 8.30 y 8.29).
4. Se halla la energía absorbida del colector,  $S$ , a partir de la ec. 8.32 y se determina el calor útil,  $Q_u$ , según ec. 8.2.
5. Se recalculan las temperaturas  $T_{pm}$  (ec. 8.24) y  $T_{fm}$  (ec. 8.22) con el valor obtenido de  $Q_u$ .
6. Con estas nuevas temperaturas medias se repiten los pasos 2 a 5 hasta converger con una tolerancia previamente definida.
7. Alcanzados los valores deseados de  $T_{pm}$  y  $T_{fm}$  se puede obtener la eficiencia horaria del colector y la temperatura de salida según las ecuaciones 8.34 y 8.35.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_c} \quad (8.34)$$

$$T_{fo} = T_a + \frac{Q_u}{m_a \cdot c_{pa}} \quad (8.35)$$

Las datos iniciales necesarios son:

- $T_a$ , temperatura ambiente (se ha considerado que la temperatura del fluido a la entrada es igual a la temperatura ambiente, esto es,  $T_{fi} = T_a$ ).
- $T_{pm0}$ , temperatura media de la placa inicial (como se indicó en la ec. 8.25 se ha tomado  $20^\circ\text{C}$  superior a la temperatura ambiente).
- $T_{fm0}$ , temperatura media del fluido inicial (comprendida entre  $T_a$  y  $T_{pm0}$ , se ha considerado  $10^\circ\text{C}$  sobre la temperatura ambiente).
- $I_T$ , radiación solar incidente para la inclinación del colector,  $v$ , velocidad del viento y  $v_c$ , velocidad del aire en el colector.
- Y parámetros constantes durante todo el proceso de secado:  $A_c$ , superficie del colector,  $A_f$ , sección transversal del colector,  $D_h$ , diámetro hidráulico (en superficies paralelas se considera dos veces la distancia entre placas),  $\beta$ , ángulo del colector con la horizontal (en las ecuaciones se utiliza su valor en radianes),  $k_{ais}$  y  $e_{ais}$ , conductividad térmica y espesor del aislante,  $\sigma$ , constante de Steffan-Boltzmann,  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$ , emisividades de la cubierta y la placa,  $\tau$ , transmisividad de la cubierta,  $\alpha$ , absorptividad de la placa, y constantes relativas al aire (densidad, viscosidad dinámica y conductividad térmica, definida en el capítulo 3 su variación con la temperatura).

En la tabla 8.1 se muestran los parámetros considerados constantes durante la simulación del proceso en el colector.

$A_c = 0,9284 (m^2)$	$\varepsilon_c = 0,94$
$A_f = 0,0467 (m^2)$	$\varepsilon_{pl} = 0,35$
$N = 1; D_h = 0,1 (m)$	$(\tau\alpha)_e = 1,02 \cdot (0,81 \cdot 0,9)$
$\beta = 20^\circ, 25^\circ, 35^\circ \text{ ó } 40^\circ$	$cp_a \sim 1004,35 (J/kg^\circ C)$ . Ver ec. 3.39
$k_{ais} = 0,05 (W/m^\circ C)$	$K_v \sim 0,027 (W/m^\circ C)$ . Ver ec. 3.43
$e_{ais} = 0,04 (m)$	$\rho \sim 1,147 (kg/m^3)$ . Ver ec. 3.40
$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (W/m^2 \circ C^4)$	$\mu \sim 2 \cdot 10^{-5} (kg/m \cdot s)$ . Ver ec. 3.41

Tabla 8.1: Parámetros constantes para el modelo del calentador solar.

El modelo del colector, como se ha indicado, se ha implementado en Visual Basic (figura 8.3). Mediante las ecuaciones y los parámetros de entrada anteriormente presentados, el programa realiza un proceso iterativo hasta que entre dos iteraciones sucesivas haya una diferencia inferior a 0,1 en los valores correspondientes a  $T_{pm}$  y  $T_{fm}$ . Cuando se da esta condición la simulación abandona el bucle, calculándose los valores intermedios,  $U_b$ ,  $U_t$ ,  $U_L$  y  $m_a$ , así como los resultados finales buscados: la temperatura del aire a la salida del colector,  $T_{fo}$  (temperatura de entrada para el modelo de la cámara), y su rendimiento instantáneo,  $\eta$ .

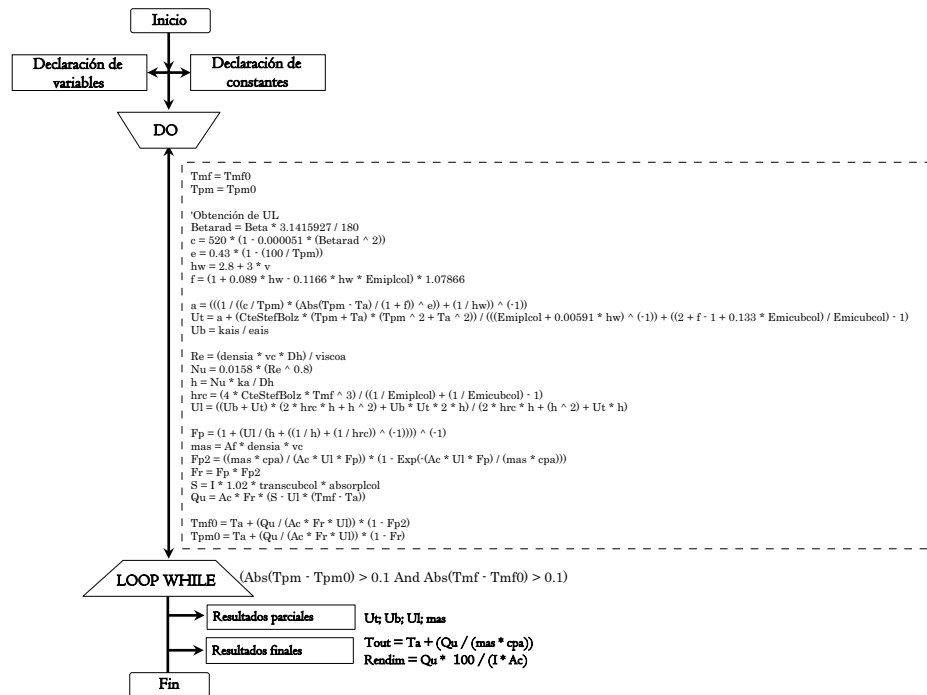


Figura 8.3: Diagrama de bloques de la simulación del colector.

### 8.3. Modelo para la cámara de secado.

#### 8.3.1. Introducción.

La cámara de secado es el elemento de una instalación de secado solar que recibe el aire precalentado del captador y en la que se produce propiamente el secado de los productos. En general, el establecimiento de los balances de masa y energía, junto con un modelo empírico que represente la cinética del proceso, va a permitir la simulación de la operación y mejora de las diferentes configuraciones de dispositivos de secado térmico.

A lo largo de los años, distintos modelos de simulación han sido desarrollados para el secado de los más diversos productos [174, 197, 201, 208, 209, 217–225], y básicamente todos ellos se apoyan en las ecuaciones de la transmisión de calor y en la cinética del material a secar. Uno de los métodos que mejor se adaptan a las diferentes configuraciones es el método paso a paso [207, 220], aunque existen modelos más elaborados y complejos de cámaras de secado [192, 214, 215].

En los siguientes puntos se presentan las ecuaciones del balance de masa y energía en una instalación genérica de secado, se muestra el modelo matemático para la cámara de secado objeto de estudio y se establecen los parámetros de entrada de dicho modelo.

#### 8.3.2. Balances de masa y energía en sistema genérico de secado.

Una instalación genérica de secado, en equilibrio, se presenta en la figura 8.4. Las ecuaciones del balance de masa y energía para esta instalación genérica serían las siguientes [207, 220]:



Figura 8.4: Esquema de un proceso genérico de secado.

1) El flujo de aire caliente produce un intercambio entre el propio agente desecante, el producto y las paredes internas del secadero (figura 8.5) dado en la ecuación 8.36.

$$m_{as} \cdot c_{p_{as}} \cdot \Delta T = h_{as,ph} \cdot S_{ph}(T_{as} - T_{ph}) + 4h_{as,pi} \cdot S_{pi}(T_{as} - T_{pi}) \quad (8.36)$$

siendo  $m_{as}$  el caudal másico de aire seco ( $kg/s$ ),  $cp_{as}$  el calor específico del aire ( $J/kg^{\circ}C$ ),  $\Delta T$  la diferencia de temperatura del aire que entra y sale ( $^{\circ}C$ ),  $h_{as,ph}$  el coeficiente de transmisión de calor convectivo aire-producto ( $W/m^2^{\circ}C$ ),  $S_{pi}$  la superficie de intercambio ( $m^2$ ),  $T_{as}$  la temperatura del agente desecante ( $^{\circ}C$ ),  $T_{ph}$  la temperatura del producto húmedo ( $^{\circ}C$ ),  $h_{as,pi}$  el coeficiente de transmisión de calor convectivo aire-pared ( $W/m^2^{\circ}C$ ),  $S_{pi}$  la superficie de una de las paredes de la cámara ( $m^2$ ) y  $T_{pi}$  la temperatura de la pared interna ( $^{\circ}C$ ).

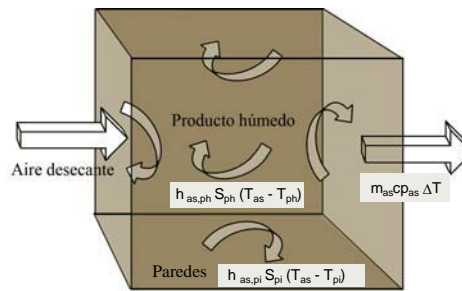


Figura 8.5: Intercambio aire-producto-paredes internas.

2) El producto húmedo recibe energía del aire, una parte es acumulada y otra se emplea en evaporar su humedad (figura 8.6) según la 8.37.

$$m_{ph} \cdot cp_{ph} \cdot \left( \frac{dT_{ph}}{dt} \right) = h_{as,ph} \cdot S_{ph} \cdot (T_{as} - T_{ph}) - m_{ms} \cdot L_v \cdot \left( \frac{dM}{dt} \right) \quad (8.37)$$

donde  $m_{ph}$  es la masa del producto húmedo ( $kg$ ),  $cp_{ph}$  el calor específico del producto húmedo ( $J/kg^{\circ}C$ ),  $m_{ms}$  la masa de la materia seca ( $kg$ ),  $L_v$  el calor latente de vaporización ( $J/kg$ ) y  $M$  el contenido en humedad ( $kg/kg_{db}$ ).

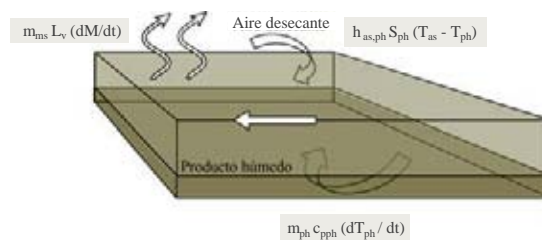


Figura 8.6: Intercambio aire desecante-producto húmedo.

La energía es transmitida a las paredes interiores del secadero por convección y conducción; el intercambio térmico entre las paredes exteriores y el medio sucede por convección y radiación.

3) En la superficie interna de la pared (figura 8.7) se cumple la ecuación 8.38.

$$m_{pi} \cdot cp_{pi} \cdot \left( \frac{dT_{pi}}{dt} \right) = 4 \cdot [k_{pi} \cdot S_{pi} \cdot (T_{ais} - T_{pi}) + h_{as,pi} \cdot S_{pi} \cdot (T_{as} - T_{pi})] \quad (8.38)$$

siendo  $m_{pi}$  la masa de la pared de la cámara de secado ( $kg$ ),  $cp_{pi}$  el calor específico de la pared interna ( $J/kg^{\circ}C$ ),  $k_{pi}$  el coeficiente de intercambio por conducción de la pared interna ( $W/m^2^{\circ}C$ ) y  $T_{ais}$  la temperatura del aislamiento ( $^{\circ}C$ ).

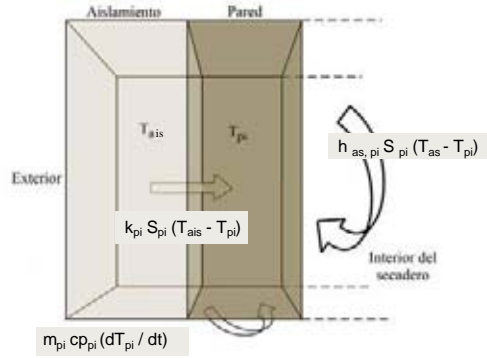


Figura 8.7: Intercambio pared interna-aire-aislamiento.

4) El intercambio entre la pared y el aislamiento (figura 8.8) viene dado por la expresión 8.39.

$$m_{ais}cp_{ais} \left( \frac{dT_{ais}}{dt} \right) + 4[k_{ais}S_{ais}(T_{ais} - T_{ae})] = m_{pi}cp_{pi} \left( \frac{dT_{ais}}{dt} \right) + 4[k_{pi}S_{pi}(T_{ais} - T_{ai})] \quad (8.39)$$

siendo  $m_{ais}$  la masa del aislamiento ( $kg$ ),  $cp_{ais}$  el calor específico del aislamiento ( $J/kg^{\circ}C$ ),  $k_{ais}$  el coeficiente de intercambio por conducción del aislamiento ( $W/m^2^{\circ}C$ ),  $S_{ais}$  la superficie de una de las paredes de aislamiento ( $m^2$ ),  $T_{ae}$  la temperatura exterior del aislamiento ( $^{\circ}C$ ) y  $T_{ai}$  la temperatura interior del aislamiento ( $^{\circ}C$ ).

5) Por último, el intercambio en la superficie externa del aislamiento (figura 8.9) está dado por la ecuación 8.40.



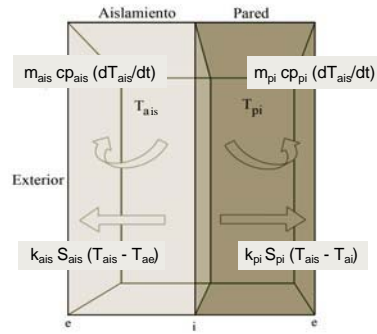


Figura 8.8: Intercambio pared interna-aislamiento.

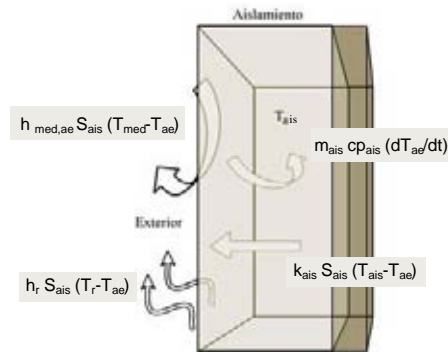


Figura 8.9: Intercambio superficie externa del aislamiento-medio.

$$m_{ais}c_{p_{ais}} \left( \frac{dT_{ae}}{dt} \right) = 4[k_{ais}S_{ais}(T_a - T_{ae}) + h_{med,ae}S_{ais}(T_{med} - T_{ae}) + h_rS_{ais}(T_r - T_{ae})] \quad (8.40)$$

con  $h_{med,ae}$  el coeficiente de transmisión de calor convectivo medio-aislamiento exterior ( $W/m^2\text{°C}$ ),  $T_{med}$  la temperatura del medio exterior-aire ( $\text{°C}$ ),  $h_r$  el coeficiente de intercambio por radiación ( $W/m^2\text{°C}$ ) y  $T_r$  la temperatura media radiante del exterior ( $\text{°C}$ ).

El conjunto de ecuaciones puede ser resuelto mediante un método iterativo computerizado para las distintas condiciones de partida.

### 8.3.3. Modelo matemático para la cámara de secado.

A partir de las ecuaciones anteriores, referidas a una instalación genérica de secado, y particularizando para la cabina de secado del prototipo de secadero solar propuesto, es posible simular el comportamiento de la misma.

La cámara de secado, como se describió en el capítulo 6, dispone de dos paredes translúcidas que permiten la entrada de la radiación solar directa permitiendo el secado mixto de los materiales que se dispondrán en las dos bandejas previstas. De esta forma, el modelo implementado para la cámara se basa en los balances de masa y energía que tienen lugar en ella para dichas dos bandejas, así como en la cinética de secado de los subproductos utilizados (capítulo 4). A partir de la resolución de estas ecuaciones, es posible obtener, en cada instante, las temperaturas de producto y la temperatura del aire a la salida.

Las hipótesis bajo las cuales se ha realizado el modelo son las siguientes: el agua extraída del producto se incorpora en forma de vapor saturado a la corriente de aire; los intercambios de radiación entre las paredes de la cámara y el producto se consideran despreciables; el agua del producto se supone que está en estado líquido y distribuida uniformemente en él; la temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado se estima que coincide con la temperatura a la salida del colector ( $T_{a,e} = T_{f_o}$ ); la temperatura del aire situado entre las dos bandejas de producto se determina como la media entre la temperatura del aire a la entrada y a la salida (ec. 8.42); por la disposición de las bandejas, para la simulación del secado en modo mixto se considera exclusivamente la acción de la radiación en la bandeja inferior; se ha supuesto, inicialmente, que las superficies de las paredes interior y exterior son diferentes; por último, se consideran dos de las paredes de la cabina opacas (acero) y las otras dos translúcidas (metacrilato).

El esquema de las variables para la cámara de secado modelada se muestra en la figura 8.10.

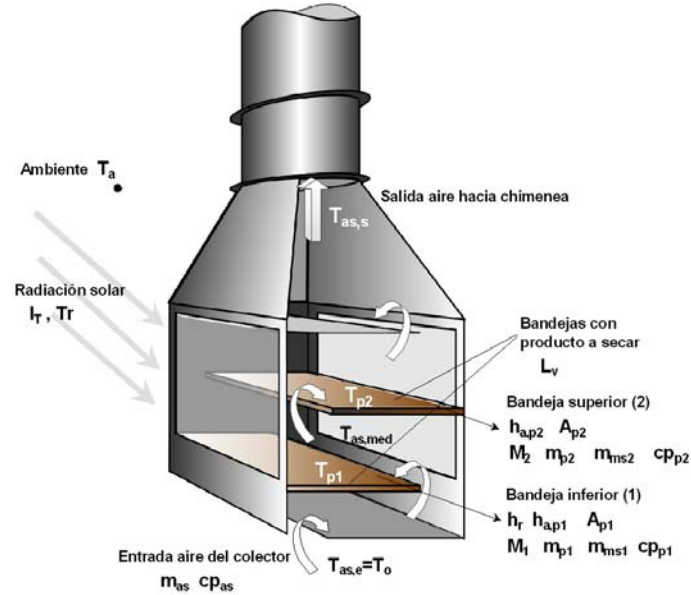


Figura 8.10: Variables para el modelo de la cámara de secado.

Siguiendo la misma secuencia en los balances que la mostrada para la instalación genérica, particularizando para la disposición que nos ocupa, se establecen las siguientes ecuaciones:

1) Intercambio entre el flujo de aire caliente, el producto y las paredes internas del secadero (8.41):

$$m_{as} \cdot cp_{as} \cdot (T_{as,e} - T_{as,s}) = h_{a,p1} \cdot A_{p1} \cdot (T_{as,e} - T_{p1}) + h_{a,p2} \cdot A_{p2} \cdot (T_{as,med} - T_{p2}) + 2 \cdot h_{a,pi1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_{as,e} - T_{pi1}) + 2 \cdot h_{a,pi2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_{as,e} - T_{pi2}) \quad (8.41)$$

siendo  $m_{as}$ : caudal másico de aire seco ( $kg/s$ );  $cp_{as}$ : calor específico del aire ( $J/kg^{\circ}C$ );  $T_{as,e}$  y  $T_{as,s}$ : temperatura del agente desecante (aire) a la entrada y salida de la cámara de secado respectivamente ( $^{\circ}C$ );  $T_{as,med}$ : temperatura del aire situado entre las dos bandejas del producto ( $^{\circ}C$ ), calculada mediante la ec. 8.42;  $h_{a,p1}$  y  $h_{a,p2}$ : coeficientes convectivos aire-producto para la bandeja inferior y superior ( $W/m^2^{\circ}C$ );  $A_{p1}$  y  $A_{p2}$ : superficie de las bandejas inferior y superior que contienen al producto ( $m^2$ );  $T_{p1}$  y  $T_{p2}$ : temperaturas del producto húmedo de las bandejas inferior y superior respectivamente ( $^{\circ}C$ );  $h_{a,pi1}$ : coeficiente de transmisión de calor convectivo aire-pared translúcida

$(W/m^2\text{°C})$ ;  $S_{pi1}$ : superficie de una de las paredes translúcidas de la cámara ( $m^2$ );  $T_{pi1}$ : temperatura de la pared interna translúcida ( $\text{°C}$ );  $h_{a,pi2}$ : coeficiente de transmisión de calor convectivo aire-pared opaca ( $W/m^2\text{°C}$ );  $S_{pi2}$ : superficie de una de las paredes opacas de la cámara ( $m^2$ );  $T_{pi2}$ : temperatura de la pared interna opaca ( $\text{°C}$ ).

$$T_{as,med} = \frac{T_{as,e} + T_{as,s}}{2} \quad (8.42)$$

2) El producto húmedo recibe energía del aire. Una parte es acumulada y otra se emplea en evaporar humedad, por tanto, se cumple en el equilibrio para la bandeja inferior la ec. 8.43 y para la superior la ec. 8.44.

$$m_{p1} \cdot cp_{p1} \cdot \left( \frac{dT_{p1}}{dt} \right) = h_{a,p1} \cdot A_{p1} \cdot (T_{as,e} - T_{p1}) - m_{ms1} \cdot L_v \cdot \left( \frac{dM_1}{dt} \right) \quad (8.43)$$

$$m_{p2} \cdot cp_{p2} \cdot \left( \frac{dT_{p2}}{dt} \right) = h_{a,p2} \cdot A_{p2} \cdot (T_{as,med} - T_{p2}) - m_{ms2} \cdot L_v \cdot \left( \frac{dM_2}{dt} \right) \quad (8.44)$$

con  $m_{p1}$  y  $m_{p2}$ : masa del producto húmedo de la bandeja inferior y superior ( $kg$ );  $cp_{p1}$  y  $cp_{p2}$ : calor específico del producto húmedo de la bandeja inferior y superior ( $J/kg\text{°C}$ );  $m_{ms1}$  y  $m_{ms2}$ : masa de la materia seca de la bandeja inferior y superior ( $kg$ );  $M_1$  y  $M_2$ : contenido de humedad en base seca del producto para la bandeja inferior y superior respectivamente ( $kg/kg_{db}$ );  $L_v$ : calor latente de vaporización ( $J/kg$ ).

3) El intercambio entre la superficie interna de la pared translúcida y el exterior se da en la ecuación 8.45, y el intercambio entre la superficie interna de la pared opaca y el exterior en la expresión 8.46.

$$m_{pi1} \cdot cp_{pi1} \cdot \left( \frac{dT_{pi1}}{dt} \right) = 2 \cdot k_{pi1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_{pe1} - T_{pi1}) + 2 \cdot h_{a,pi1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_{as,e} - T_{pi1}) + 2 \cdot h_{med,pe1} \cdot S_{pe1} \cdot (T_a - T_{pe1}) + h_r \cdot S_{pe1} \cdot (T_r - T_{pe1}) \quad (8.45)$$

$$m_{pi2} \cdot cp_{pi2} \cdot \left( \frac{dT_{pi2}}{dt} \right) = 2 \cdot k_{pi2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_{pe2} - T_{pi2}) + 2 \cdot h_{a,pi2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_{as,e} - T_{pi2}) + 2 \cdot h_{med,pe2} \cdot S_{pe2} \cdot (T_a - T_{pe2}) \quad (8.46)$$

siendo  $m_{pi1}$  y  $m_{pi2}$ : masa de la pared translúcida y opaca de la cámara de secado ( $kg$ );  $cp_{pi1}$  y  $cp_{pi2}$ : calor específico de la pared interior translúcida y opaca ( $J/kg\text{°C}$ );

$k_{pi1}$  y  $k_{pi2}$ : coeficiente de intercambio por conducción de la pared interior translúcida y opaca ( $W/m^2\text{°C}$ );  $T_{pe1}$  y  $T_{pe2}$ : temperatura de la pared exterior translúcida y opaca ( $\text{°C}$ );  $h_{med,pe1}$  y  $h_{med,pe2}$ : coeficiente de transmisión de calor convectivo medio-pared exterior ( $W/m^2\text{°C}$ );  $S_{pe1}$  y  $S_{pe2}$ : superficie de la pared exterior translúcida y opaca, respectivamente ( $m^2$ );  $T_a$ : temperatura ambiente ( $\text{°C}$ );  $h_r$ : coeficiente de intercambio por radiación ( $W/m^2\text{°C}$ );  $T_r$ : temperatura media radiante del exterior ( $\text{°C}$ ).

Estas últimas variables ( $h_r$  y  $T_r$ ) se encuentran relacionadas mediante la expresión 8.47. Hay que tener en cuenta que el coeficiente de transmisión de calor por radiación tendrá un valor nulo para las simulaciones en modo indirecto.

$$h_r = \varepsilon_{p1} \cdot \sigma \cdot (T_{pe1} + T_r^2) \cdot (T_{pe1} + T_r) \quad (8.47)$$

donde:  $\varepsilon_{p1}$  es la emisividad del producto de la bandeja inferior y  $T_r$  se puede obtener mediante la relación de Swinbank [173] (ec. 8.48, donde  $T_r$  y  $T_a$  están expresados en  $K$ ).

$$T_r = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (8.48)$$

### 8.3.4. Parámetros de entrada y proceso de cálculo.

Las parámetros iniciales necesarios para el modelo de la cámara son los siguientes:

- Variables tomadas de la simulación del colector:  $T_{a,e} \equiv T_{fo}$ , temperatura de entrada a la cámara,  $m_{as}$ , flujo másico de aire y  $T_a$ , temperatura ambiente;
- Parámetros relativos al producto:
  - Coeficientes convectivos entre el aire y el producto: se toman los determinados en convección natural y forzada para cada uno de los subproductos, según las tablas 4.15 y 4.16 para modo indirecto o mixto, respectivamente.
  - Ratio de humedad: definida en el capítulo 4 su variación con la temperatura para los diferentes subproductos y modos de funcionamiento (figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19). Con la expresión indicada en dicho capítulo ( $\ln MR = A + Bt$ ) se tienen los valores de A y B para cada temperatura (figuras 4.20, 4.21 y 4.22). De esta forma, es posible obtener la ecuación que define la variación de ambos parámetros en función de la temperatura del aire desecante (tabla 8.2), donde dicha temperatura está dada en  $\text{°C}$ , y considerada igual a  $T_{fo}$  para la bandeja inferior y  $T_{as,med}$  (ec. 8.42) para la bandeja superior.

	A	B
Orujo natural	$0,0044T-0,2583$	$-0,0113T+0,3913$
Orujo forzado	$0,0002T^2-0,0161T+0,1647$	$-0,0006T^2+0,0223T-0,3648$
Alperujo natural	$-0,0224T+1,232$	$-0,0012T-0,0185$
Alperujo forzado	$-0,0012T^2+0,0622T-0,7439$	$0,0001T^2-0,0101T+0,1005$
Alpechín natural	$0,0119T-0,1055$	$-0,0081T+0,2684$
Alpechín forzado	$0,0016T^2-0,0863T+1,356$	$-0,0005T^2+0,0246T-0,3464$

Tabla 8.2: Parámetros A y B de simulación del ratio de secado.

Así, considerando la expresión de MR en función de los parámetros A y B y el contenido de humedad inicial del producto (ec. 8.49), se obtiene la ecuación 8.50 de la variación de la humedad con el tiempo para cada subproducto y modo de funcionamiento. Dicha expresión es la utilizada en el modelo para la simulación.

$$MR = e^A \cdot e^{Bt} \equiv \frac{M}{M_o} \quad (8.49)$$

$$\frac{dM}{dt} = M_o \cdot B \cdot e^A \cdot e^{Bt} \quad (8.50)$$

- Calor específico del producto, calculado mediante la expresión 8.51 [220].

$$c_p = 1,159 \cdot m_{seca} + 4,187 \cdot m_{agua} \quad (8.51)$$

donde  $m_{agua} = m_p \cdot M_o$  (kg) y  $m_{seca} = m_p \cdot (1 - M_o)$  (kg), siendo  $M_o$  el contenido de humedad del producto dado en la tabla 4.2 (dec.).

- Otros parámetros: en la tabla 8.3 se muestran otras variables relativas a la cámara (p.ej. referentes a la pared translúcida - 1 - y opaca - 2 -), el producto o el aire desecante, considerados la mayoría constantes durante la simulación.

En lo referente al proceso de cálculo en el modelo indicado de la cámara de secado, se ha utilizado una implementación en Visual Basic con una resolución de las ecuaciones diferenciales mediante el método numérico iterativo de orden cuatro de Runge-Kutta, para cada intervalo de tiempo. Con los valores de entrada dados anteriormente, el programa realiza un proceso iterativo hasta converger.

Mediante dicha simulación se podrán obtener las temperaturas del producto de las bandejas inferior y superior ( $T_{p1}$  y  $T_{p2}$ ), así como del aire a la salida de la cámara ( $T_{as,s}$ ).

$S_{pi1} \equiv S_{pe1} = 0,409 \text{ (m}^2\text{)}$	$S_{pi2} \equiv S_{pe2} = 0,164 \text{ (m}^2\text{)}$
$\lambda_{pi1} = 0,7 \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$ y $e_{pi1} = 0,03 \text{ (m)} \Rightarrow$ $\Rightarrow k_{pi1} = 23,33 \text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	$\lambda_{pi2} = 54 \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$ y $e_{pi2} = 0,03 \text{ (m)} \Rightarrow$ $\Rightarrow k_{pi2} = 1800 \text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$
$m_{p1} = 2 \text{ (kg)}$	$m_{p2} = 2 \text{ (kg)}$
$\rho_1 = 2515 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\rho_2 = 7850 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
$cp_{pi1} = 840 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}$	$cp_{pi2} = 887,43 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}$
$\varepsilon_{p1} = 0,8$ ; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}^4\text{)}$ ;	$T_r = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$
$h_{a,pi1} = h_{a,pi2} = 9,09 \text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	$h_{med,pe1} = h_{med,pe2} = 16,67 \text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$
$L_v = 2,4 \cdot 10^6$ . Según la ec. 3.7	$A_t = 0,28 \times 0,89 \text{ (m}^2\text{)}$

Tabla 8.3: Parámetros constantes para el modelo de la cámara de secado.

## 8.4. Validación de los modelos teóricos del secadero.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales es posible comparar la bondad de los modelos teóricos desarrollados para el colector y la cámara de secado. A continuación se muestra dicha comparación.

### 8.4.1. Colector.

Para comprobar la validez del modelo implementado del colector se han representado los parámetros temperatura de salida y eficiencia instantánea, experimentales y simulados, para diferentes condiciones de entrada [186].

Así, en la figura 8.11 se muestran, para un ensayo específico, los valores medidos y simulados de eficiencia instantánea e incremento de temperatura alcanzados en el calentador solar de aire.

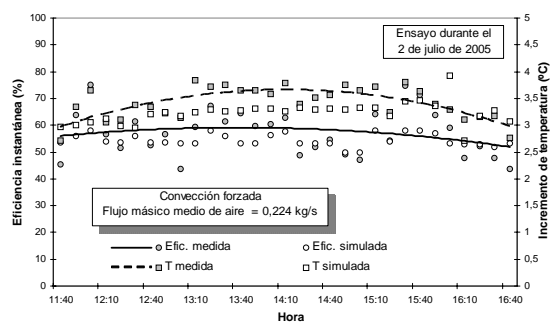


Figura 8.11: Valores medidos y simulados de la eficiencia instantánea y el incremento de temperatura en el colector para un ensayo específico.

De igual forma, en las figuras 8.12 y 8.13 se representan los parámetros temperatura de salida y rendimiento instantáneo, experimentales y simulados, en función de la

radiación solar incidente sobre el plano del colector, para un flujo másico en éste de 0,06 kg/s y 0,22 kg/s, respectivamente. Se observan en todos los casos errores relativos en el intervalo 1-5 % para la temperatura y 3-6 % para la eficiencia.

Como ejemplos, en la tabla 8.4 y 8.5 se muestran los parámetros característicos del colector (temperatura de salida, potencia calorífica proporcionada y rendimiento instantáneo) para una temperatura de entrada del aire de 30 °C y velocidades en el colector de 1 m/s y 3 m/s, respectivamente.

	I = 900 W/m <sup>2</sup>		I = 600 W/m <sup>2</sup>		I = 300 W/m <sup>2</sup>	
	Exper.	Modelo	Exper.	Modelo	Exper.	Modelo
T <sub>salida</sub> (°C)	35,19	35,09	33,89	33,47	31,83	31,77
Q <sub>u</sub> (W)	316,56	311,06	237,26	211,61	111,62	107,95
η (%)	37,88	37,23	42,59	37,99	40,01	38,76

Tabla 8.4: Comparación de valores característicos del colector experimentales y simulados (T<sub>a</sub> = 30 °C y v<sub>c</sub> = 1 m/s).

	I = 900 W/m <sup>2</sup>		I = 600 W/m <sup>2</sup>		I = 300 W/m <sup>2</sup>	
	Exper.	Modelo	Exper.	Modelo	Exper.	Modelo
T <sub>salida</sub> (°C)	32,75	32,3	31,72	31,55	31,06	30,82
Q <sub>u</sub> (W)	503,19	421,49	314,73	284,52	193,96	145,02
η (%)	60,22	50,44	56,49	51,08	69,64	52,07

Tabla 8.5: Comparación de valores característicos del colector experimentales y simulados (T<sub>a</sub> = 30 °C y v<sub>c</sub> = 3 m/s).

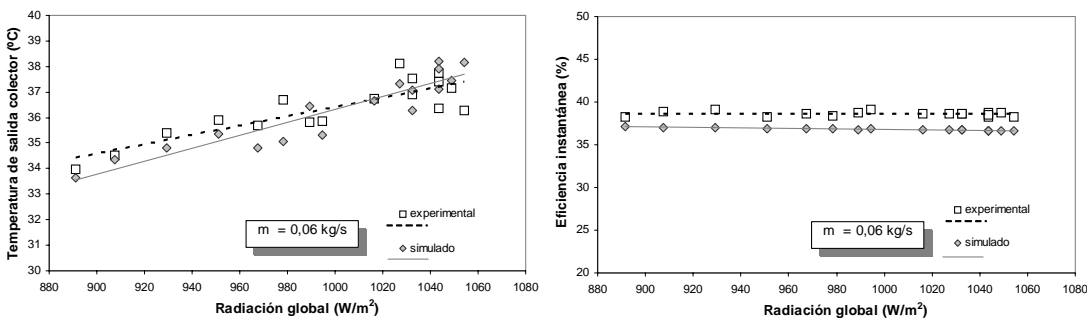


Figura 8.12: Comparación de los valores experimentales y simulados de la temperatura de salida del colector y la eficiencia instantánea para m=0,06 kg/s.

La comparación entre los valores medidos en los ensayos y simulados mediante el modelo teórico se presenta en la figura 8.14.

Por los resultados alcanzados, se puede concluir que el modelo teórico desarrollado



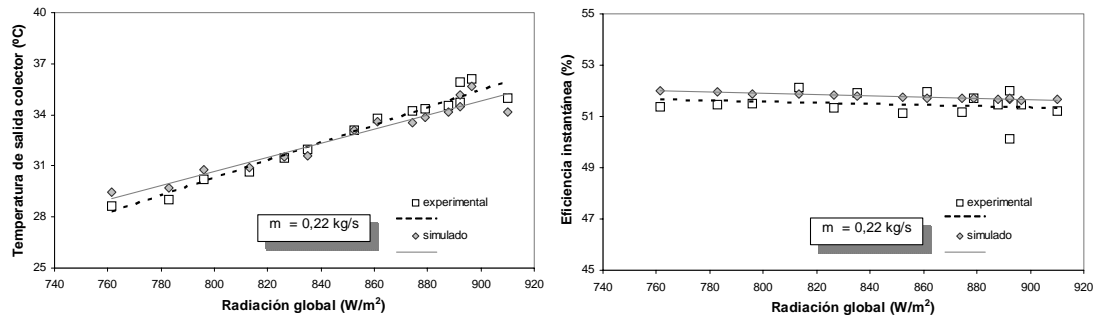


Figura 8.13: Comparación de los valores experimentales y simulados de la temperatura de salida del colector y la eficiencia instantánea para  $m=0,22$  kg/s.

para el colector describe adecuadamente el proceso de calentamiento de aire en el mismo.

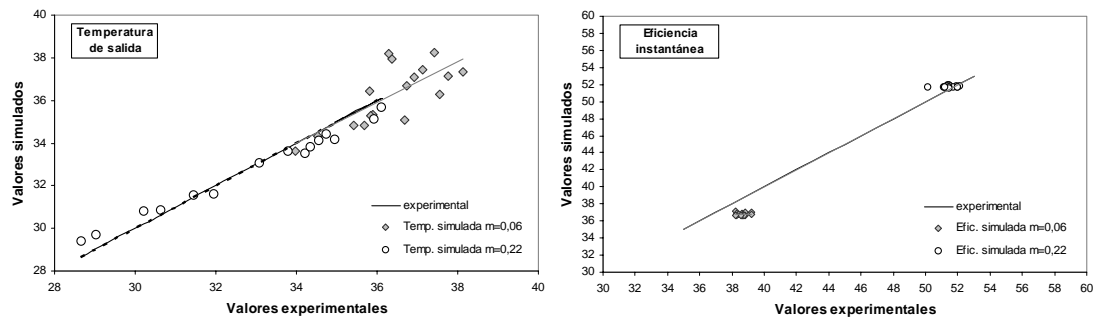


Figura 8.14: Valores medidos frente a simulados de los parámetros del colector.

#### 8.4.2. Cámara de secado.

Como se ha indicado anteriormente, mediante una serie de parámetros de entrada, constantes o variables, es posible simular el comportamiento en la cámara durante el secado de los subproductos orujo, alperujo y alpechín en funcionamiento mixto, para convección natural o forzada. Análisis similares han sido llevados a cabo por diversos investigadores [208, 214, 220].

Las propiedades obtenidas mediante la implementación y simulación del modelo teórico de la cámara serán, por un lado, las temperaturas de producto en la bandeja inferior ( $T_{p1}$ ) y superior ( $T_{p2}$ ), y por otro, la temperatura del aire a la salida de la misma ( $T_{as,s} \equiv T_3$ ).

Así, en las figuras 8.15, 8.16 y 8.17 se muestran los resultados obtenidos experimen-

tales y simulados de dichos parámetros en el secado de orujo, alperujo y alpechín para unas condiciones medias de temperatura ambiente de 30, 32 y 35 °C, respectivamente, con radiación solar de  $900 \text{ W/m}^2$  y flujo másico de  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ .

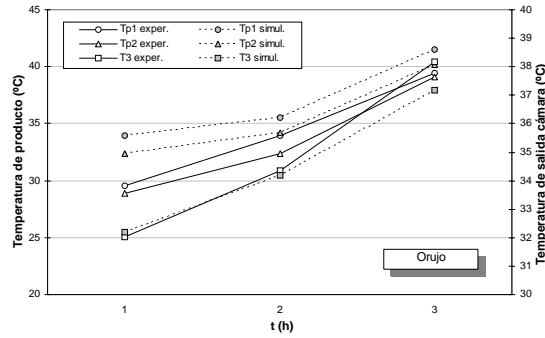


Figura 8.15: Comparación de parámetros experimentales y simulados en la cámara de secado para orujo.

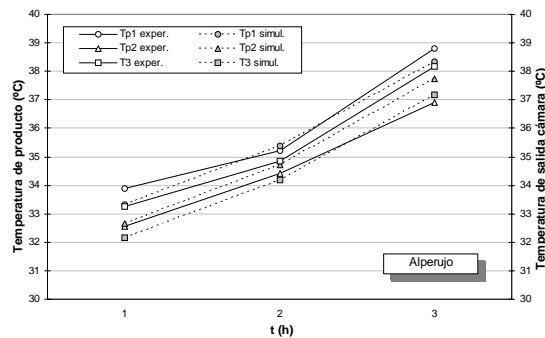


Figura 8.16: Comparación de parámetros experimentales y simulados en la cámara de secado para alperujo.

Los errores relativos (%) obtenidos en cada uno de los subproductos para las temperaturas ambiente indicadas se muestran en la tabla 8.6. Se tienen valores entre 0,5 y 5 % para la temperatura de salida, entre 0,2 y 15 % para la temperatura de producto de la bandeja inferior y entre 0,2 y 12 % para la del producto de la bandeja superior.

Por tanto, se puede decir que el modelo permite simular el proceso de secado en la cámara para los diferentes subproductos con errores relativamente pequeños para la temperatura de salida y moderados para las temperaturas de producto.

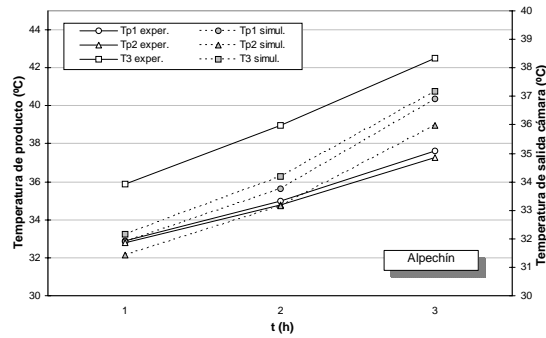


Figura 8.17: Comparación de parámetros experimentales y simulados en la cámara de secado para alpechín.

% Error	Orujo			Alperujo			Alpechín		
	$T_a$ (°C)	$T_3$	$T_{p1}$	$T_{p2}$	$T_3$	$T_{p1}$	$T_{p2}$	$T_3$	$T_{p1}$
30	0,5	14,7	12,3	3,2	1,7	0,3	5,1	0,2	2,0
32	0,4	4,6	5,7	1,9	0,5	0,9	5,0	1,8	0,2
35	2,6	5,3	2,6	2,6	1,2	2,2	3,0	7,3	4,5

Tabla 8.6: Errores porcentuales obtenidos en la simulación del proceso en la cámara de secado.

## 8.5. Modelos de ajuste de variables climatológicas.

### 8.5.1. Introducción.

En los últimos años, el interés por la evaluación del funcionamiento de los sistemas de energía solar y la simulación de los mismos, ha hecho necesario disponer de valores medios de los parámetros climáticos de entrada. Diversos estudios se han realizado para conocer las condiciones ambientales del lugar que tienen influencia en estas aplicaciones [230, 236].

En un secadero solar, el ratio de secado,  $DR$ , es uno o dos órdenes de magnitud inferior que en un secadero convencional [237], dando lugar a que influyan considerablemente sobre él tanto las características del producto como las propiedades del aire que lo rodea, y por tanto, las condiciones del aire ambiente.

Así, para el diseño de las instalaciones de secado solar es imprescindible disponer de datos climatológicos horarios de la máxima exactitud posible, relativos a la localidad o localidades en las que se pretenda llevar a cabo dicha instalación. Los parámetros que definen un clima (función de variables tales como latitud, relieve, continentalidad, etc) y que más influencia tienen sobre los sistemas solares son: temperatura, humedad relativa, radiación solar global y velocidad del viento.

En este sentido, a partir de datos horarios diarios mensuales de la localidad de Badajoz (coordenadas: latitud  $38,88^\circ$ , longitud  $-6,97^\circ$ , huso 30 con  $X_{UTM}$  e  $Y_{UTM}$  de 155802 y 4309528, respectivamente) proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM), se ha desarrollado un modelo de ajuste para cada una de las variables anteriormente indicadas. Éste se considera especialmente útil en aplicaciones de simulación, siendo la metodología extrapolable a cualquier otra ubicación.

### 8.5.2. Análisis de regresión.

El objetivo de este análisis es disponer de valores horarios de las variables ambientales que en mayor medida influyen en un dispositivo de secado solar.

Se han considerado para el estudio los valores horarios-diarios-mensuales, referentes a los últimos seis años (1999-2004) para la localidad de Badajoz y proporcionados por el INM (estaciones meteorológicas 4452 y 4478), sobre temperatura, humedad relativa, radiación solar global y velocidad del viento.

A partir de dichos valores horarios-diarios, se ha realizado la media para el conjunto de días del mes y los seis años considerados, obteniendo así de cada una de las propiedades los valores horarios medios para un mes característico.

Finalmente, mediante un análisis de regresión no lineal se ha realizado el ajuste de las variables utilizando el software Datafit.

El modelo de ajuste elegido en todos los casos es un polinomio de sexto grado (ecuación 8.52) que proporciona valores aceptables en el coeficiente de determinación ( $R^2 > 0,98$ ) y en el error cuadrático ( $\chi^2 < 10^{-10}$ ).

$$Var = a \cdot t_h^6 + b \cdot t_h^5 + c \cdot t_h^4 + d \cdot t_h^3 + e \cdot t_h^2 + f \cdot t_h + g \quad (8.52)$$

siendo  $Var$ , la variable considerada en el ajuste ( $^\circ C$ ,  $\%$ ,  $W/m^2$  o  $m/s$ ),  $a, b, c, \dots, g$ , las constantes del ajuste para cada variable y mes seleccionado (tablas 8.7, 8.8, 8.9 y 8.10) y  $t_h$  la hora del día considerada ( $h$ ).

Referente a la hora del día, se ha tomado, según los datos proporcionados por el INM, el valor  $t_h = 0$  para las 24:00 h y el valor  $t_h = 23$  para las 23:00 h. Sin embargo, un caso particular corresponde a la radiación ya que para ésta sólo se utilizará en el ajuste la hora solar. De esta forma:

- Para el horario de invierno español (Noviembre-Marzo) el valor de  $t_h = 0$  corresponde con la hora transcurrida entre las 5:00-6:00 h, siguiendo una asignación sucesiva para el resto de horas hasta  $t_h = 15$  para el intervalo 20:00-21:00 h.

- Para el horario de verano español (Abril-Octubre)  $t_h = 0$  se identifica para el periodo 6:00-7:00  $h$ , siguiendo de nuevo una asignación sucesiva para el resto de horas hasta  $t_h = 15$  para el intervalo 21:00-22:00  $h$ .

En las tablas 8.7, 8.8, 8.9 y 8.10 se indican las constantes del ajuste obtenidas para la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, respectivamente.

	a	b	c	d	e	f	g
Enero	8,274363E-8	9,949597E-5	-0,00571	0,10476	-0,66202	0,960187	6,71854
Febrero	-6,56074E-07	0,000162	-7,69E-3	1,31E-1	-0,7872	1,0104431	8,0525
Marzo	4,1311E-6	0,00038506	-0,012772	0,1794975	-0,9461505	1,08841112	10,8908
Abril	-4,87531E-6	0,0004125	-0,012651	0,164053	-0,754555	0,4729	12,276
Mayo	-3,643318E-6	3,20E-4	-0,01002048	1,29E-1	-5,25E-1	-0,0659922	15,8025
Junio	-2,52431E-6	2,54E-4	-8,72E-3	0,1164203	-0,42491612	-0,62516555	21,12517
Julio	-2,215276E-6	2,46E-4	-8,96E-3	0,1265395	-0,52415637	-0,379582	22,04296
Agosto	-2,848833E-6	3,03E-04	-1,08E-2	0,1543066	-0,71480518	0,07463472	22,450527
Septiembre	-4,702031E-6	4,39E-4	-1,45E-2	0,20106211	-1,00485908	0,826371	19,6951
Octubre	-5,00789E-6	0,00043967	-0,013951	0,190637	-1,0100055	1,36366161	15,22517
Noviembre	-4,51528E-6	0,00041319	-0,0135405	0,190876	-1,057731	1,588039	9,3396
Diciembre	-1,765447E-6	2,06E-4	-7,78E-3	0,11988	-0,705311	1,10696	8,0892

Tabla 8.7: Coeficientes de regresión relativos a la temperatura horaria media mensual.

	a	b	c	d	e	f	g
Enero	-7,972036E-6	0,00011866	0,00966596	-0,26507137	1,90605218	-3,37005455	90,3596099
Febrero	-2,59784E-6	-0,00028645	0,02124198	-0,41126454	2,58985287	-3,80544535	85,7315042
Marzo	2,013973E-5	-0,00172088	0,0532058	-0,6981189	3,35176893	-3,38144709	84,7179553
Abril	3,089692E-5	-0,00236367	0,06649067	-0,8009318	3,43447228	-1,83151434	78,3805437
Mayo	3,022959E-5	-0,00227014	0,06238914	-0,72247654	2,76716025	0,0117011	75,7192687
Junio	3,056649E-5	-0,0022531	0,06107443	-0,69873897	2,54198452	1,73085514	62,1333629
Julio	2,669558E-5	-0,0020161	0,05617039	-0,66370255	2,54849925	1,26132153	61,2777021
Agosto	3,177479E-5	-0,00242626	0,06873976	-0,8437788	3,72337607	-1,31676262	62,264302
Septiembre	3,166308E-5	-0,00247813	0,07166859	-0,89981469	4,19168373	-2,88361396	65,6607172
Octubre	2,383648E-5	-0,0020032	0,06149999	-0,81736493	4,18277096	-5,139376	80,1069582
Noviembre	1,232599E-5	-0,00127394	0,04493306	-0,66331762	3,80870571	-6,45733475	87,6590172
Diciembre	1,584594E-6	-0,00050637	0,02476176	-0,43334232	2,81797083	-5,5381886	90,2035456

Tabla 8.8: Coeficientes de regresión relativos a la humedad relativa horaria media mensual.

	a	b	c	d	e	f	g
Enero	-0,00460361	0,20996675	-3,36852011	21,5485015	-42,288081	21,0664094	0,751341
Febrero	-0,004097	0,18716058	-2,95344313	17,6167476	-23,975461	-0,17763396	2,4483578
Marzo	-0,00111219	0,04817564	-0,47715503	-3,30444855	55,623153	-75,0954441	5,4467387
Abril	0,00184479	-0,0875641	1,83575709	-21,0280234	110,79365	-94,5142702	3,7740171
Mayo	0,00103746	-0,05170591	1,21626861	-15,7466364	86,890844	-35,7819052	1,80772375
Junio	0,00061206	-0,0275292	0,72389961	-11,3963912	70,7106093	-10,627511	3,54413881
Julio	0,00134562	-0,05656129	1,11850765	-13,5445363	73,7548345	7,82342162	1,68953393
Agosto	-0,00066199	0,02601836	-0,09943286	-4,7557671	32,0043693	109,920774	26,637258
Septiembre	0,00066165	-0,02722702	0,68781659	-11,004961	72,394122	-55,0128592	1,2595943
Octubre	-0,00325054	0,14432223	-2,10886772	9,6594981	9,3732209	-34,6851581	6,481399
Noviembre	-0,00491583	0,21848943	-3,3996893	20,7906494	-36,2862834	12,1354915	4,70700214
Diciembre	-0,00484688	0,22129723	-3,59828582	24,1014631	-56,0287873	39,4389853	-1,0046835

Tabla 8.9: Coeficientes de regresión relativos a la irradiancia global horaria media mensual.

	a	b	c	d	e	f	g
Enero	-6,82285E-7	0,00011369	-0,00473769	0,07392334	-0,40747373	0,53329599	8,16518803
Febrero	-1,91E-6	0,0002034	-0,00724343	0,10608524	-0,57877454	0,73784508	7,57383304
Marzo	-2,69E-6	0,00026769	-0,00913262	0,12946861	-0,69010322	0,92903924	9,0414313
Abril	-2,97E-7	8,43E-5	-0,00384855	0,05811301	-0,22971878	-0,29630183	10,302782
Mayo	6,13E-6	-0,0003859	0,00883795	-0,09405455	0,54083788	-1,68759801	10,5937737
Junio	-7,51104E-7	8,951918E-5	-0,00355695	0,056814376	-0,2731938	-0,64153942	13,704977
Julio	-8,05543E-7	8,559909E-5	-0,00323384	0,050222631	-0,2264498	-0,72665566	13,731047
Agosto	3,22E-6	-0,00019957	0,00439929	-0,04503024	0,32313887	-1,94839071	13,5690349
Septiembre	1,03E-6	-2,90E-05	-0,00039535	0,01409018	-0,00715225	-0,97247442	10,555782
Octubre	-6,86E-6	0,00054306	-0,01581621	0,20275637	-1,04578224	1,47577551	8,835023
Noviembre	-4,03E-6	0,0003534	-0,01110162	0,14978691	-0,79950908	1,30396975	7,0972123
Diciembre	-7,87E-6	0,00061241	-0,01759348	0,22435531	-1,19128757	2,04336372	8,9844521

Tabla 8.10: Coeficientes de regresión relativos a la velocidad del viento horaria media mensual.

### 8.5.3. Comparación de resultados medidos y ajustados.

Mediante el polinomio de ajuste indicado y los parámetros para cada mes dados en las tablas 8.7, 8.8, 8.9 y 8.10 se obtienen las curvas de ajuste horarias de cada una de las variables. A modo de ejemplo, en las figuras 8.18, 8.19, 8.20 y 8.21 se representan los valores medidos y simulados para la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, respectivamente, relativos a los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

En la figura 8.22 se comparan los valores medidos y simulados de cada una de las

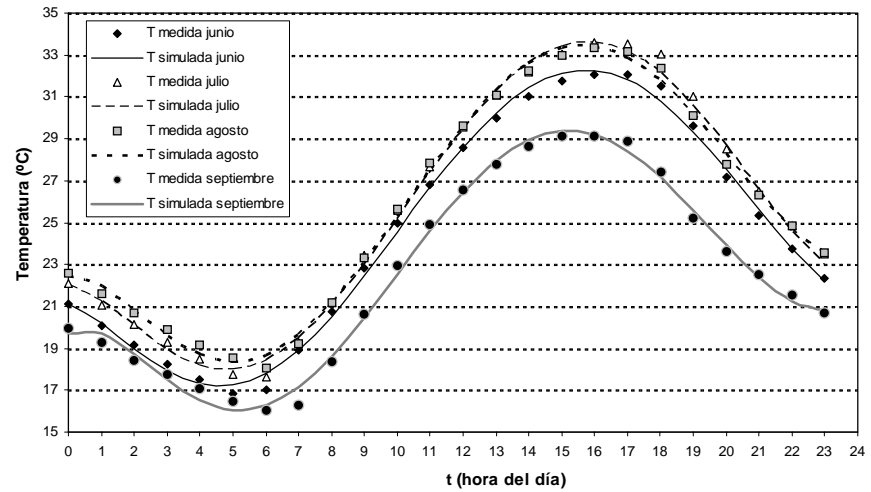


Figura 8.18: Comparación valores medidos y simulados de temperatura.

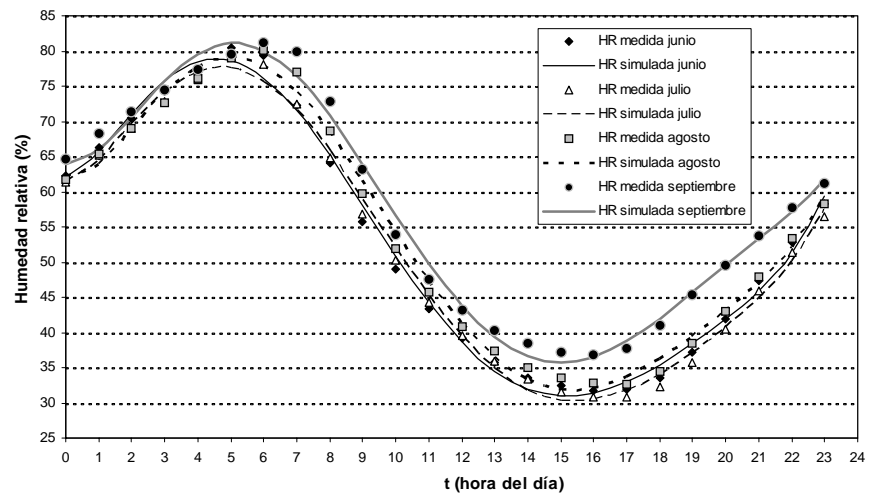


Figura 8.19: Comparación valores medidos y simulados de humedad relativa.

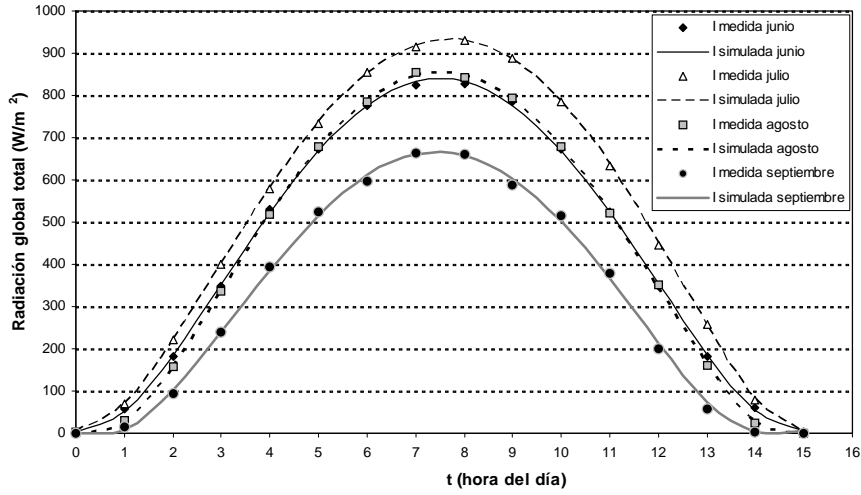


Figura 8.20: Comparación valores medidos y simulados de irradiación solar.

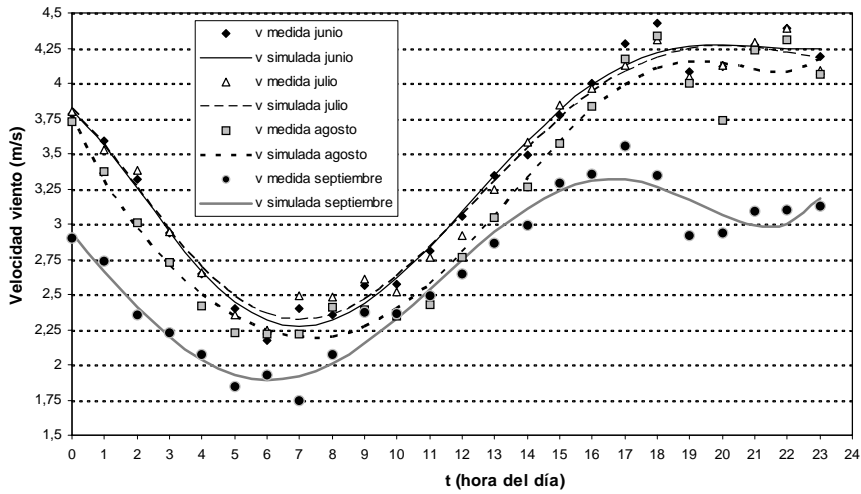


Figura 8.21: Comparación valores medidos y simulados de velocidad del viento.



variables climáticas. Como se aprecia, los modelos de regresión alcanzados se ajustan de forma aceptable a las variables medidas con errores inferiores al 1-5 %.

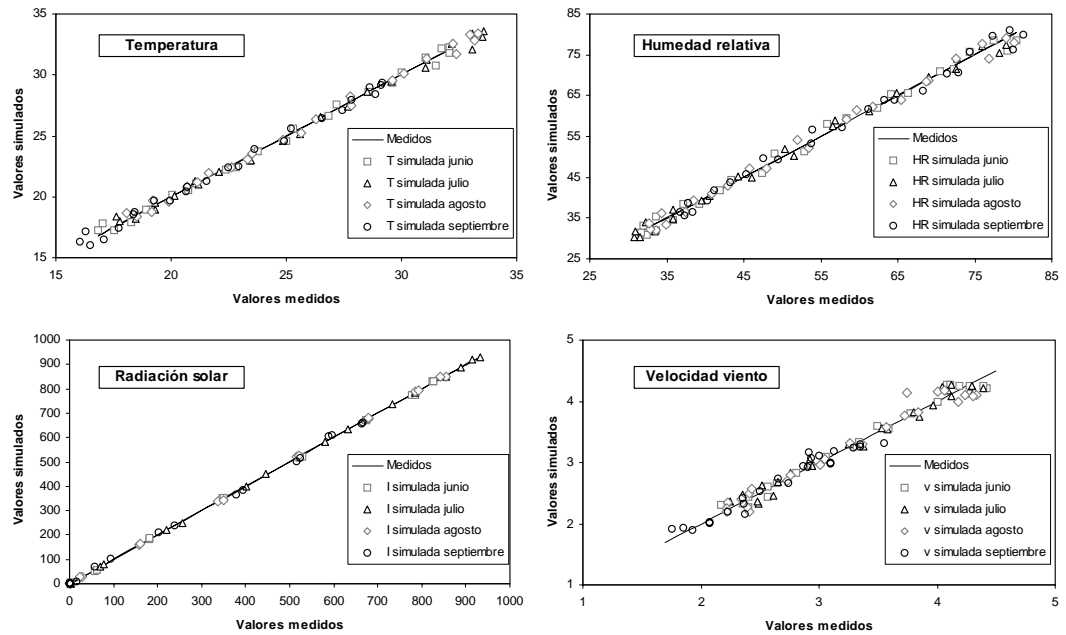


Figura 8.22: Valores medidos de las variables climáticas frente a los simulados.



## Capítulo 9

# Propuesta final de secado solar para subproductos de almazara.

### 9.1. Introducción.

En este capítulo se pretende plantear una propuesta de secado solar de subproductos procedentes de la producción de aceite de oliva, para su posible utilización industrial, fundamentalmente centrada en el residuo más problemático en estas instalaciones, esto es, el alpechín, y a su vez para el secado de orujo tres fases. Sin embargo, el sistema planteado podría aplicarse para la reducción del contenido de humedad presente en otros residuos agroindustriales (p.ej. residuo de tomate, paja de cereal o similares), efluentes de procesos [238, 239], productos agrícolas diversos [97, 172, 216, 240–243], madera [232, 244, 245], etc.

Como se describió en el capítulo 4, el proceso habitual previo al secado del residuo de almazara dos fases consiste en el repaso mecánico en tres fases del alperujo para obtener el aceite residual que contiene, así como los subproductos orujo y alpechín. Éstos, con un alto contenido de humedad, presentan una necesidad posterior de tratamiento diferenciado.

Además, el pretratamiento de secado de los residuos de estudio puede representar uno de los ítem de mayor coste en una planta de procesado. Por tanto, mediante la utilización del secado solar se intenta dar una mayor valorización energética, medioambiental y, en su caso, económica, a los subproductos de la industria almazarera.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, presentados en capítulos anteriores y teniendo en cuenta diversas consideraciones, se plantearán, entre otros, las cantidades de subproductos a tratar, la superficie de secado necesaria, el diseño del sistema más adecuado al residuo, las dimensiones estimadas para el secadero, la velocidad y el caudal de aire óptimos para el proceso, la potencia de los ventiladores a

instalar, la demanda térmica del proceso, la producción de excedente de subproducto seco y las necesidades de zonas de almacenamiento.

## **9.2. Solución adoptada de secado solar.**

### **9.2.1. Valoración de necesidades y parámetros de influencia.**

#### **Cantidades de subproductos a tratar.**

Para seleccionar, dimensionar y analizar un sistema de secado solar es necesario, en primer lugar, considerar las cantidades de producto a procesar en el mismo y el tiempo disponible.

En este trabajo se ha dimensionado una planta de tratamiento de alperujos de tamaño medio ubicada en Badajoz en la que se procesan  $10000 t_{alperujo/año}$ , con un contenido de humedad medio del 70 % (como se presentó en el capítulo 4, la cantidad de alperujo generada en la comarca de Badajoz es de aproximadamente  $7000 t/año$ ). De esta cantidad, en el repaso tres fases se obtiene aproximadamente un 1 % de aceite y como residuos,  $5647 t_{orujo/año}$  y  $4243 t_{alpechín/año}$ , con contenidos medios de humedad del 55 y 90 %, respectivamente.

Considerando la estacionalidad de tratamiento de la aceituna, de la producción de aceite y de la operación de repaso, en general, los meses en los que se procesa el alperujo son los comprendidos en el periodo diciembre-mayo, lo que supone aproximadamente 180 días de operación al año. De esta forma, la planta de tratamiento estaría diseñada para generar diariamente como residuos del repaso  $31,4 t$  de orujo y  $23,6 t$  de alpechín, considerándose éstas las cantidades diarias de subproducto con necesidades de secado.

La situación de ambos subproductos es muy diferente:

El orujo húmedo tres fases, producto que procesan las extractoras previo secado, debe ser tratado rápidamente para evitar su degradación y la obtención de aceites de orujo de menor calidad. Así, los secaderos rotativos habitualmente empleados trabajan con temperaturas entre  $300-700\text{ }^{\circ}C$  y tiempos de secado de pocos minutos. En este sentido, la utilización del secado solar en el orujo sólo tendría sentido para autoabastecimiento de la planta.

Sin embargo, el alpechín es propiamente un residuo, con un elevado índice de contaminación y sin, hasta ahora, una alternativa adecuada de eliminación-utilización. Por lo tanto, su valorización mediante la aplicación del secado solar y su posterior utilización como combustible, presenta excelentes expectativas.

**Superficie de secado.**

La superficie de secado va a ser función de la cantidad diaria de producto a procesar, de su densidad y espesor, de los días de funcionamiento del secadero y de los días necesarios para el secado de los subproductos, siendo este último aspecto función de las condiciones ambientales conseguidas en el secadero (temperatura, humedad, radiación, velocidad y caudal de aire, etc).

Un parámetro importante en la estimación de esta superficie es el que relaciona la masa de producto con la superficie de exposición,  $MS$  ( $kg/m^2$ ). Teniendo en cuenta la densidad aparente de ambos subproductos,  $703 kg/m^3$  el orujo y  $1022 kg/m^3$  el alpechín, en la figura 9.1 se muestran los valores de  $MS$  para diferentes espesores de producto. Se puede apreciar cómo al incrementarse dicho espesor aumenta  $MS$ , significando que serán necesarias menores superficies de terreno para el procesamiento de la misma cantidad de producto, aunque en contrapartida se precisarán mayores tiempos de secado. Además, por la superior densidad aparente del alpechín se puede observar que éste presenta, frente al orujo, un menor valor de  $MS$  para igual espesor de producto, aumentando la diferencia entre ambos con el incremento del espesor.

De igual forma, en dicha figura se presenta la estimación de superficie necesaria diaria para el almacenamiento y secado de ambos subproductos con las cantidades de producción indicadas anteriormente ( $31,4 t/día$  de orujo y  $23,6 t/día$  de alpechín). Se identifica que, para espesores por encima de  $18 cm$  ( $MS \sim 125 kg/m^2$ ), la superficie necesaria se encuentra por debajo de los  $250 m^2$ .

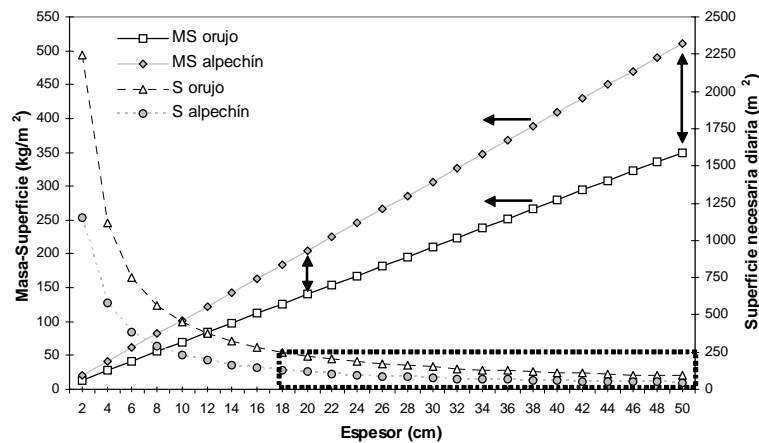


Figura 9.1: Relación masa-superficie y superficie necesaria diaria, en orujo y alpechín, para diferentes espesores de producto.

Con las premisas anteriores, se seleccionará para cada uno de los subproductos una

superficie de secado de  $250 \text{ m}^2$ . Será necesario tener en cuenta el tiempo empleado en la reducción de humedad hasta los niveles establecidos para valorar, según las cantidades generadas diarias de cada residuo, la disponibilidad de almacenamiento de éstas en el secadero. Así, en la tabla 9.1 se muestran, para diferentes espesores de orujo y alpechín, los valores de superficie que se precisan diariamente y los días disponibles para el secado de los subproductos en las mismas (considerándose el límite establecido en cada uno de  $250 \text{ m}^2$ ).

	Orujo				Alpechín			
e (m)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5
S ( $\text{m}^2$ )	224	150	112	90	116	77	58	46
Días	1,11	1,67	2,23	2,79	2,17	3,25	4,33	5,41

Tabla 9.1: Superficie y días disponibles de almacenamiento en función del espesor para cada subproducto.

Para los incrementos de temperatura estudiados en este trabajo ( $30\text{-}50 \text{ }^\circ\text{C}$ ), disminuciones de humedad relativa ( $10\text{-}25 \%$ ), valores de irradiación solar global ( $500\text{-}900 \text{ W/m}^2$ ), velocidad del aire desecante ( $0,5\text{-}1 \text{ m/s}$ ) y espesor de producto ( $1\text{-}3 \text{ cm}$ ) se estimaron unos tiempos de secado en el prototipo de  $4 \text{ h}$  para el orujo y de  $15 \text{ h}$  para el alpechín, con una cantidad de producto de  $2000 \text{ g}$  y alcanzando un contenido de humedad final del  $20 \%$ <sub>wb</sub>.

Los espesores que se consideran prácticos en el sistema de secado solar propuesto se encuentran en el intervalo  $20\text{-}50 \text{ cm}$ . De esta forma, la altura seleccionada para la balsa de contención de subproductos es  $50 \text{ cm}$ .

Con este dimensionado para una superficie de exposición de  $250 \text{ m}^2$ , se dispondrá, como valores máximos, de un volumen de producto de  $125 \text{ m}^3$ , lo que supondría aproximadamente una masa de  $87,875 \text{ t}$  de orujo y  $127,75 \text{ t}$  de alpechín.

Por último, con las cantidades de subproductos húmedos generadas diarias y la superficie disponible de secado, se obtiene un espesor de producto de  $18 \text{ cm}$  para orujo y  $9 \text{ cm}$  para alpechín, considerándose éstos adecuados para la utilización del secado solar.

### **Demanda térmica diaria del proceso de secado.**

Para realizar el análisis de la demanda térmica en el secado se consideran las siguientes premisas:

- Producción diaria de producto húmedo:  $31,4 \text{ t/día}$  de orujo y  $23,6 \text{ t/día}$  de alpechín, con  $55$  y  $90 \%$  de humedad, respectivamente.

- Demanda energética específica: se ha estimado como energía necesaria para reducir la humedad del orujo  $3226 \text{ kJ/kg}_{\text{agua}}$  y del alpechín  $3352 \text{ kJ/kg}_{\text{agua}}$  (justificado por la menor difusividad efectiva que presenta éste respecto aquél). Además, como demanda energética por el incremento de temperatura se considera  $25 \text{ kJ/kg}_{\text{seco}}$  en el orujo y  $30 \text{ kJ/kg}_{\text{seco}}$  en el alpechín.
- Regímenes de funcionamiento previsible de 8, 16 ó 24 h.
- Contenido de humedad final del producto (dependiendo de este porcentaje, las necesidades energéticas variarán sustancialmente). Se considera la reducción de humedad hasta el  $20 \%_{wb}$ , obteniendo en este caso cantidades finales diarias de producto seco de  $17,66 \text{ t}$  de orujo y  $2,95 \text{ t}$  de alpechín, siendo la cantidad de agua evaporada de  $13,74$  y  $20,65 \text{ t}_{\text{agua/día}}$  en orujo y alpechín, respectivamente. Como se observa, se consigue una reducción considerable en peso y volumen de alpechín ( $87,5\%$  de la masa inicial).

Con las magnitudes anteriores, se prevé una demanda térmica diaria para el orujo de  $44,6 \cdot 10^6 \text{ kJ}$  y para el alpechín de  $69,2 \cdot 10^6 \text{ kJ}$ , lo que supone en el orujo una potencia térmica de  $1551, 775$  ó  $517 \text{ kW}_t$  y en el alpechín de  $2405, 1202$  ó  $801 \text{ kW}_t$ , para regímenes de funcionamiento de 8, 16 ó 24 h, respectivamente. Esta energía necesaria para la evaporación de la humedad de los residuos se obtendrá del sistema solar híbrido que se propone en el apartado siguiente.

La variación de la potencia térmica demandada ( $\text{kW}$ ), de la cantidad de agua evaporada ( $\text{kg}$ ) y de la masa final de producto ( $\text{kg}$ ) respecto al porcentaje final de humedad y al régimen de funcionamiento se muestra en la figura 9.2 para orujo y en la figura 9.3 para alpechín.

### Horas de sol estimadas disponibles para el secado.

Otro factor importante a considerar en el diseño de un sistema de secado solar es el número de horas de sol diarias disponibles para la localidad en cuestión. La variable meteorológica *horas de sol* se define como el número de horas en las que la irradiación solar directa está por encima de un cierto valor umbral, establecido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en  $120 \text{ W/m}^2$ . Su medida diaria es registrada en un gran número de localidades mediante los conocidos heliógrafos.

El valor teórico de este parámetro se definió en la ecuación 3.59, obteniendo para la latitud de Badajoz un total de 4380 horas de sol teóricas anuales. Sin embargo, condicionado por el factor de nubosidad ( $k_h$ ), el número de horas de sol real es inferior al teórico. Según los datos del INM relativos a un periodo de 18 años, en Badajoz se dispone de una media de 2830 horas de sol al año. En la tabla 9.2 se muestran los

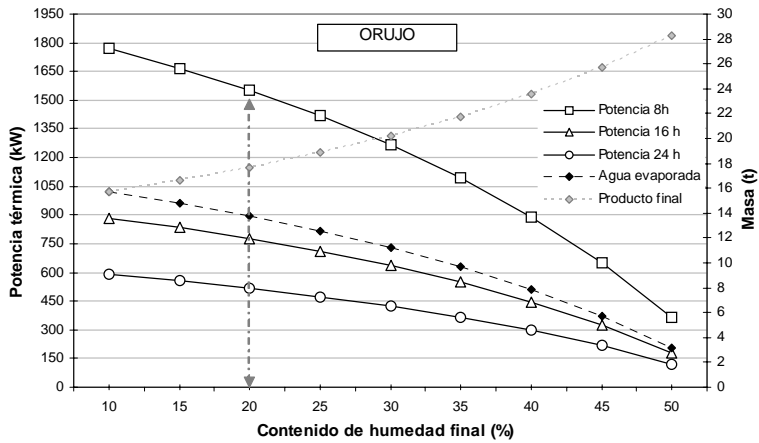


Figura 9.2: Potencia térmica y cantidad final de orujo seco en función del porcentaje de humedad.

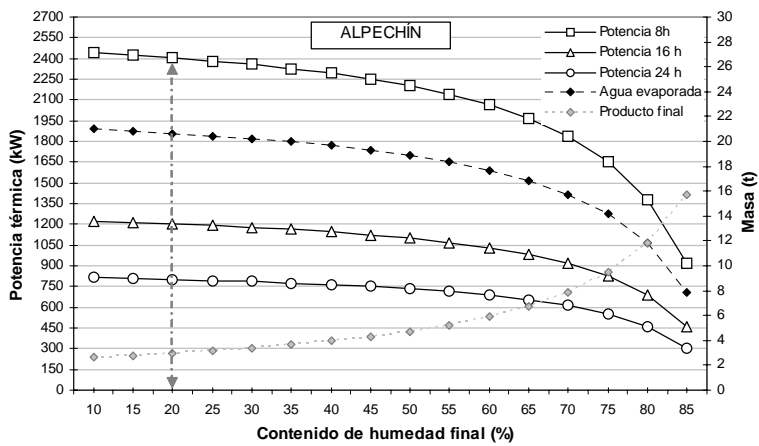


Figura 9.3: Potencia térmica y cantidad final de alpechín seco en función del porcentaje de humedad.



valores teóricos y medidos de este parámetro, así como el factor de nubosidad calculado para cada mes.

Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov	Dic	AÑO
n° h sol teor.	298	295	364	391	438	440	447	418	366	339	295	289	4380
n° h sol real	147	162	224	233	283	321	366	342	258	211	165	120	2830
$k_h$	0,49	0,55	0,62	0,60	0,65	0,73	0,82	0,82	0,70	0,62	0,56	0,42	0,63

Tabla 9.2: Número de horas de sol y factor de nubosidad en Badajoz, mensual y total anual.

Considerando la estacionalidad de los subproductos, se estima un funcionamiento del secadero de 8 meses (marzo-octubre). De esta forma, se dispone aproximadamente de un total de 2238 *h* de sol. Por tanto, suponiendo para el sistema sólo solar (sin aporte energético complementario) una media en dicho periodo de nueve horas de sol diarias se dispondrían de 245 días para el procesado de los subproductos. No obstante, en la estimación de las necesidades energéticas se van a tomar 180 días “solares” para considerar posibles fluctuaciones en las condiciones climatológicas y una radiación media de 600 *W/m²*.

**9.2.2. Descripción del sistema propuesto.**

Basándose en los resultados obtenidos en el prototipo de secadero solar se ha seleccionado un dispositivo de secado mixto (radiación solar directa y colectores para calentamiento de aire). Además, teniendo en cuenta la inviabilidad de la utilización del secado solar para el total de orujos húmedos, se ha previsto un sistema que pueda utilizarse, indistintamente, para el secado de alpechín, orujo o incluso alperujo (interesante si en ciertos periodos se repasa en dos fases). De esta forma, se ha dimensionado un secadero de doble cámara en las que se reducirá la humedad del alpechín de repaso y de la cantidad de orujo destinada al autoabastecimiento de la planta.

La solución adoptada consta de dos secaderos-invernaderos tipo túnel, situados en paralelo y de idénticas características (figura 9.4), para funcionamiento en convección forzada y dotados de calentadores solares de aire inflables. La selección de un sistema activo frente a uno pasivo, aunque incrementa los costes de instalación y utilización de la planta, permitirá un mejor control de las condiciones de secado en la cámara mejorando sustancialmente el proceso (este hecho se ha demostrado en los ensayos realizados en el prototipo).

Adicionalmente, se ha previsto un horno de combustión de biomasa (orujo y alpechín seco) que posibilitará el secado en continuo del producto depositado en el invernadero (secadero híbrido).

Para mejorar la transferencia de calor se ha considerado en el diseño un dispositivo que permite remover el material durante el proceso de secado (figuras 9.5 y 9.6). Por otro lado, el sistema de ventilación estará formado por diferentes elementos activos (ventiladores) y pasivos (aberturas en el secadero) que conseguirán un mayor contacto entre el aire y el producto. Dichos dispositivos evitarán, a su vez, la estratificación del residuo y la formación de una película aislante sobre el mismo que dificultaría la extracción de humedad.



Figura 9.4: Sistema propuesto de secado solar de subproductos de almazara.

De manera resumida, las partes fundamentales del sistema son las siguientes:

- Cámara de secado tipo invernadero con balsa de almacenamiento de subproductos. Con este sistema se provoca un aumento de la temperatura desecante cercano a  $10-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y en general, para el funcionamiento habitual en convección forzada, para las dimensiones establecidas, dicho incremento de temperatura estará entre 2-3 % de la radiación solar incidente [172].
- Volteador de material (figura 9.5), dotado de raspadores y de sistema de desplazamiento (figura 9.6), que remueve el residuo a secar y mejora la transferencia aire-producto (similar al sistema *Wendewolf* instalado en países como Alemania, Francia o Suiza [22] o al sistema desarrollado por la Universidad Hohenheim en Alemania [23], ambos para el secado solar de lodos y fangos de depuradoras).

- Sistema de colectores inflables de aire [241] con ventiladores axiales de impulsión. Para las dimensiones establecidas de los calentadores (descritas y justificadas posteriormente), se estima, en cada uno, un incremento de temperatura sobre la del ambiente de  $4-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (para radiación solar comprendida entre  $600-900\text{ W/m}^2$  y velocidad de aire en el colector de  $3\text{ m/s}$ ).
- Ventiladores helicoidales murales para extracción de aire, situados en la salida del secadero (zona de descarga) a  $0,5\text{ m}$  de altura sobre el terreno para mejorar el contacto del aire con el producto.
- Ventiladores axiales situados en el interior del secadero sobre el producto a una altura de  $3\text{ m}$ , que inducen una turbulencia del aire sobre la superficie del residuo y disminuyen la estratificación de temperatura y humedad, aspecto éste muy importante para conseguir un secado óptimo.
- Aberturas cenitales de apertura eléctrica, conformando parte del cerramiento del secadero, para controlar en todo instante adecuadamente las condiciones de la cámara de secado.
- Sistema de combustión de biomasa sobre parrilla como dispositivo de aporte de energía suplementaria en los periodos de baja insolación y nocturnos.
- Para el seguimiento del proceso en tiempo real (temperaturas de las cámara, humedad relativa, velocidad del aire desecante, temperatura y humedad del producto, etc), se recomienda utilizar sondas conectadas a un sistema inalámbrico que enviará las medidas a una unidad de adquisición de datos.

El esquema general de la planta de tratamiento se muestra en la figura 9.7. Las características de los elementos principales así como su dimensionado se presenta a continuación.

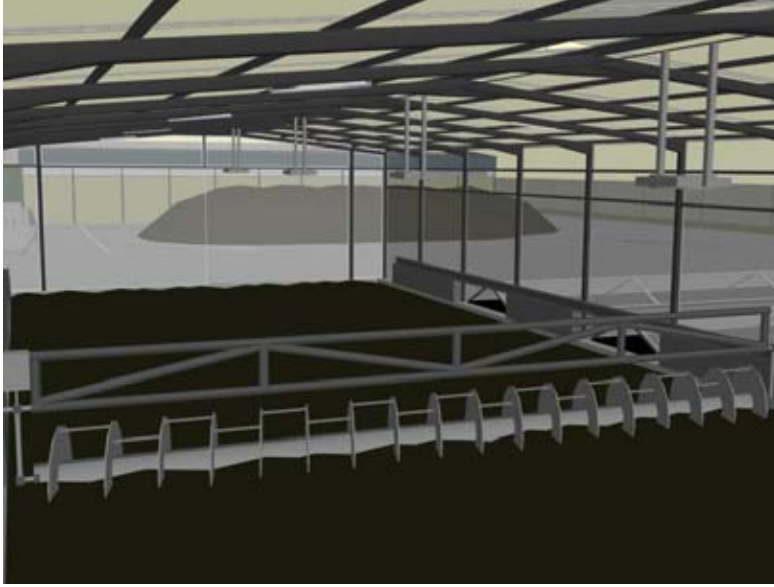


Figura 9.5: Volteador de producto.

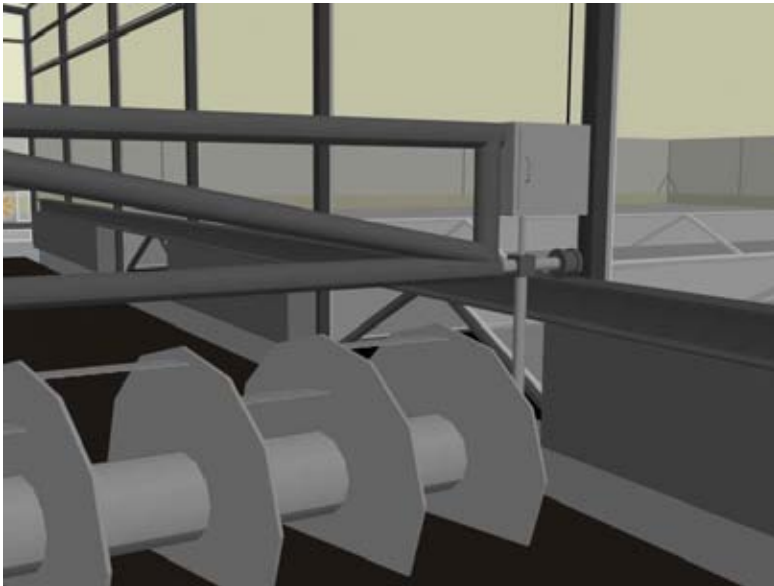


Figura 9.6: Raspadores y sistema de desplazamiento del volteador de producto.

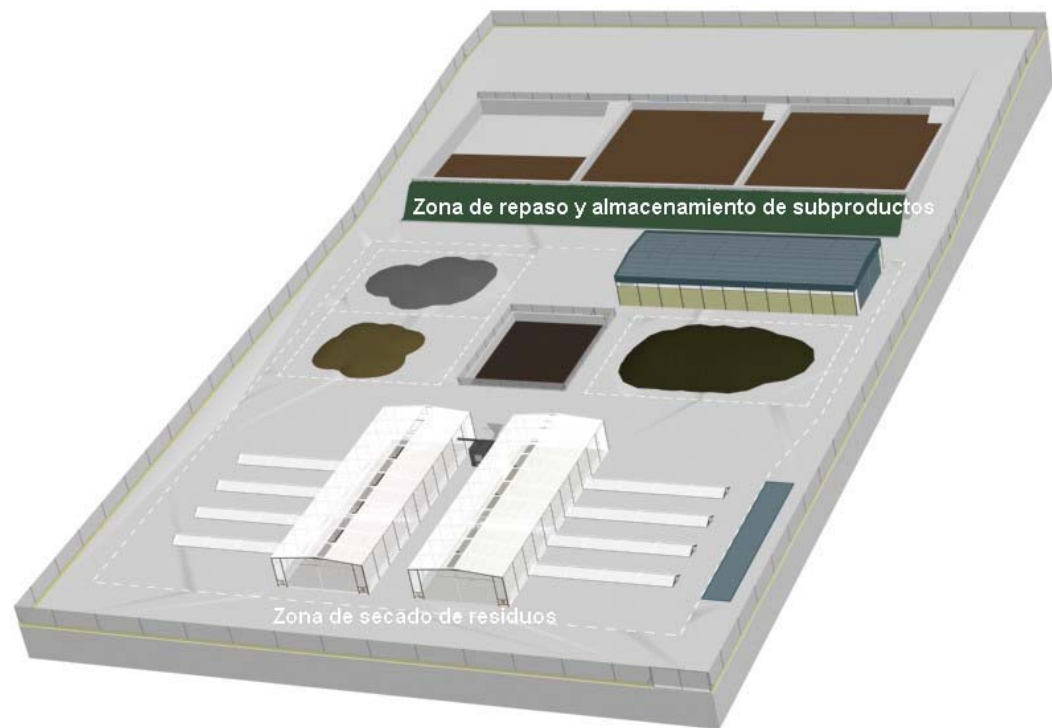


Figura 9.7: Distribución en planta de la instalación de tratamiento y secado de alperujos.

Los materiales para la construcción del sistema de secado se han seleccionado teniendo en cuenta parámetros como calidad, durabilidad, facilidad de montaje y mantenimiento, coste, etc. La estructura de la cámara de secado tipo invernadero es de acero galvanizado de dimensiones  $10 \times 27,5 \text{ m}^2$  con una altura de pilares  $3,5 \text{ m}$  y de coronación  $4 \text{ m}$ . Se encuentra recubierta de un plástico tricapa PE+EVA, esto es, de polietileno (PE) y etileno-acetato de vinilo (EVA), con buena transparencia a la radiación solar y resistencia al desgaste.

La balsa en la que se emplazarán los subproductos a secar se encuentra  $50 \text{ cm}$  por debajo del nivel del suelo, dispone de rampas de acceso para facilitar la carga y descarga de los materiales y tiene unas dimensiones de  $9,5 \times 27,5 \text{ m}^2$  (incluyendo rampas).

Considerando el incremento de temperatura conseguido en los calentadores de aire inflables y el proporcionado en el invernadero-secadero como colector solar [172], para velocidades de  $3$  y  $0,4 \text{ m/s}$ , respectivamente, con una radiación solar media de  $600 \text{ W/m}^2$  y para temperatura ambiente entre  $20\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$ , en general, la temperatura de salida alcanzada estará en el intervalo  $40\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Además, mediante la utilización del horno de combustión de biomasa (figura 9.8),

de dimensiones  $2 \times 2 \times 1,5 \text{ m}$ , se logrará secar la cantidad diaria total de alpechín y orujo en un periodo de funcionamiento de  $16 \text{ h/día}$  (justificado posteriormente en el apartado “*Balance energético en el sistema de secado*”).

Dispondrá de tolva de alimentación con capacidad aproximada de orujo seco de  $1,35 \text{ m}^3$ , con sin-fin de inyección automática y capacidad de regulación de la velocidad de entrada. De esta manera, para las densidades del orujo y alpechín secos ( $\sim 600$  y  $1050 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente) y el consumo de combustible estimado (tabla 9.4), se obtiene una capacidad de la tolva para ambos subproductos de aproximadamente  $10 \text{ h}$ .

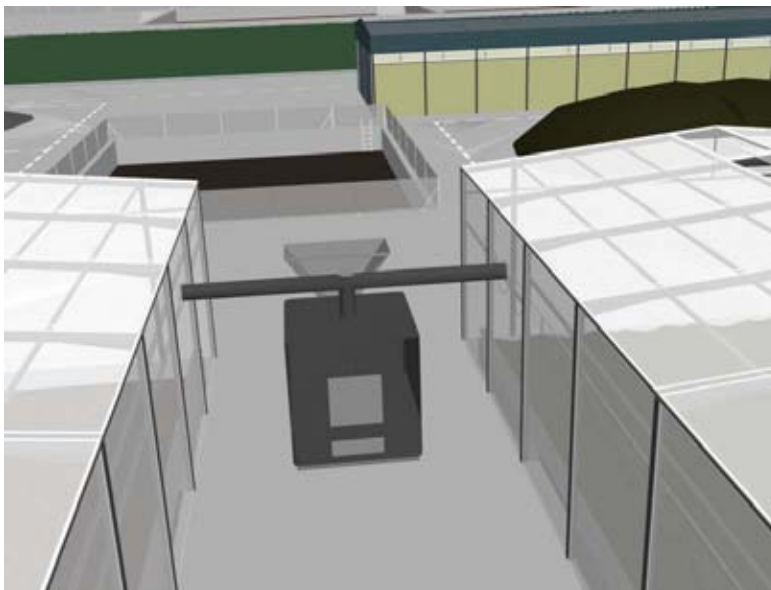


Figura 9.8: Detalle de horno de combustión de biomasa para secaderos.

La carga y descarga del producto en el secadero se realizará de diferente forma dependiendo del tipo de subproducto. El alpechín a tratar, obtenido en el repaso de alperujo, se transportará mediante bombas de pistón desde la piscina de almacenamiento. Por el reducido contenido en sólidos del producto seco hasta el  $20 \%_{wb}$  se utilizará para la descarga una retroexcavadora cargadora frontal. Por otro lado, tanto el llenado y vaciado de orujo se hará con retroexcavadora cargadora común.

Se han previsto zonas de almacenamiento de los productos húmedos y secos. El dimensionado de las mismas se presenta en un apartado posterior.

### Selección del caudal de aire y sistema de ventilación.

Por los resultados obtenidos en el prototipo se estima conveniente una velocidad de paso del fluido sobre el producto de  $0,4-1 \text{ m/s}$ . De esta forma, será necesario instalar un sistema de ventilación que proporcione un caudal de aire de aproximadamente  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este caudal se consigue, por un lado, a través de dos ventiladores axiales de extracción ubicados en la parte posterior del secadero (zona de descarga) de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  cada uno (figura 9.9), y por otro, a partir de los cuatro ventiladores de impulsión dispuestos en los calentadores solares de aire, de  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  cada uno (figura 9.10). La potencia nominal absorbida por estos equipos se estima en  $1,5$  y  $0,35 \text{ kW}$  para los ventiladores de extracción e impulsión, respectivamente.

Por otro lado, se instalarán equipos de ventilación en el interior del secadero que mantendrán de forma constante un flujo de aire a una velocidad óptima sobre los productos a secar (figura 9.11). Por las dimensiones de la planta se han ubicado cinco ventiladores axiales con caudal máximo de  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  y potencia de  $0,11 \text{ kW}$  cada uno.

Y además, para controlar adecuadamente la calidad del aire desecante se han previsto aperturas cenitales a lo largo de toda la cubierta, de dimensiones  $2,4 \times 1 \text{ mm}$  (figura 9.12).

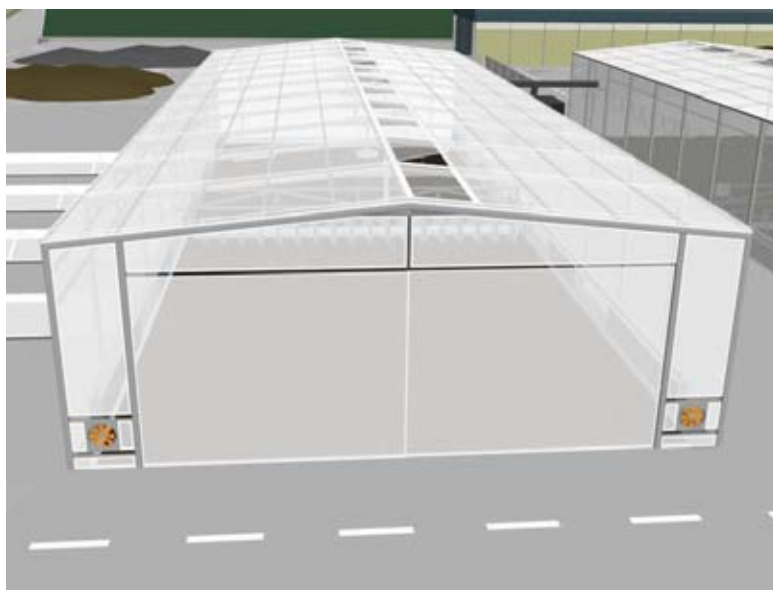


Figura 9.9: Ventiladores de extracción en salidas de secaderos.

La potencia total instalada en el sistema de ventilación asciende a  $5 \text{ kW}$ . El consumo de energía diario del sistema completo de ventilación para un funcionamiento en continuo de  $24 \text{ h}$  será aproximadamente de  $115 \text{ kWh}$ .

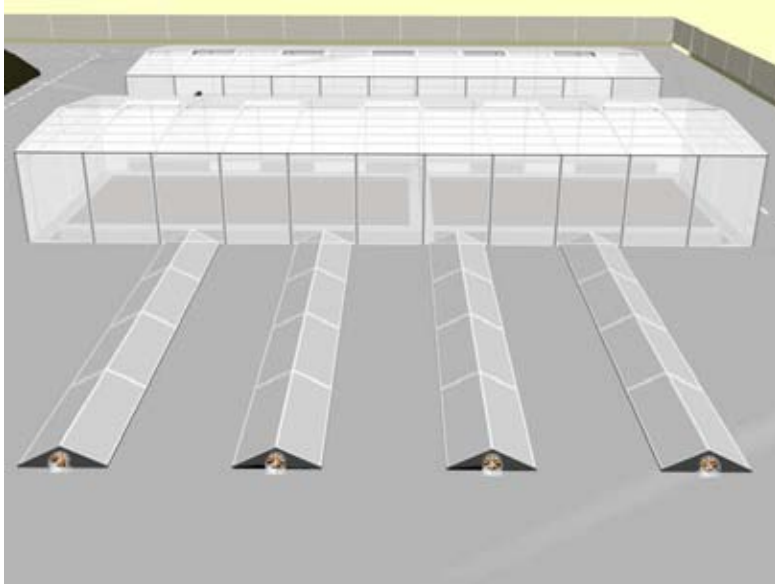


Figura 9.10: Ventiladores de impulsión en colectores inflables.



Figura 9.11: Ventiladores de interior cenitales.





Figura 9.12: Aperturas cenitales del secadero.

Los ventiladores de extracción de aire, los ubicados sobre el producto para evitar la estratificación y las ventanas cenitales del secadero, se deberían controlar automáticamente mediante sensores de temperatura y humedad situados en el interior y exterior del mismo.

#### **Dimensionamiento de los calentadores solares de aire.**

Con el objetivo de proporcionar el caudal de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  que se ha considerado para el sistema de impulsión de aire, se decide instalar cuatro colectores del tipo inflables [241] (figura 9.13) dotado cada uno de ventilador helicoidal que proporcionará una velocidad media al fluido de  $3 \text{ m}/\text{s}$ .

La construcción de los mismos se realiza con materiales típicos de invernaderos para disminuir los costes de instalación. Se instalarán sobre el terreno y estarán compuestos de un aislamiento inferior, lámina absorbadora de aluminio negro y cubierta triangular de plástico tricapa PE+EVA. La sección de paso del fluido es triangular de  $0,5 \text{ m}^2$  y  $15 \text{ m}$  de longitud cada uno.

Mediante un análisis energético similar al utilizado en el colector instalado en el prototipo de secadero solar, se obtiene la caracterización de cada uno de los colectores mostrada en la tabla 9.3, para una velocidad del fluido de  $3 \text{ m}/\text{s}$ , área de colector de  $30 \text{ m}^2$  y velocidad del aire ambiental de  $1 \text{ m}/\text{s}$ .

Para un valor medio de radiación de  $600 \text{ W}/\text{m}^2$ , los cuatro colectores aportarían

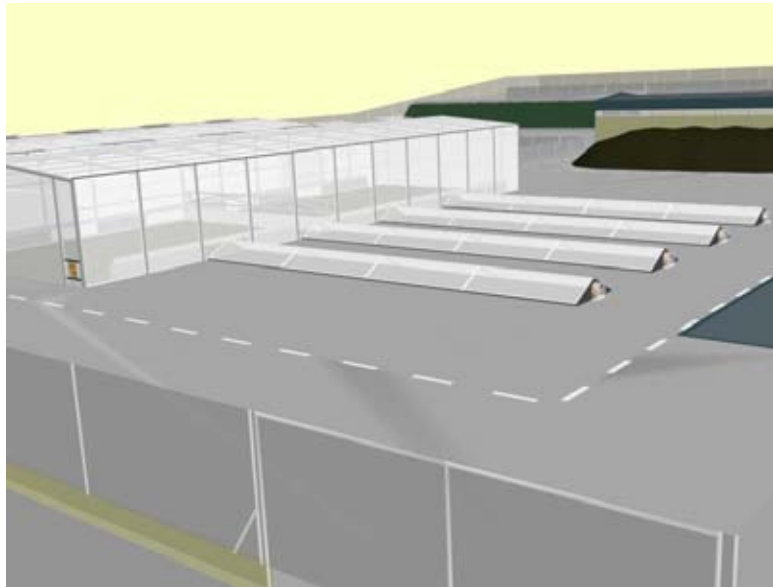


Figura 9.13: Calentadores de aire inflables.

al sistema  $31,164 kW_t$ . Como se observa, la potencia térmica máxima obtenida por colector es de  $11543 W$ .

	$I = 900 W/m^2$	$I = 600 W/m^2$	$I = 300 W/m^2$
$T_{entrada} (^{\circ}C)$	30	30	30
$T_{salida} (^{\circ}C)$	35,89	33,97	32,03
$U_t (W/m^2^{\circ}C)$	4,28	4,02	3,65
$U_b (W/m^2^{\circ}C)$	1,25	1,25	1,25
$U_l (W/m^2^{\circ}C)$	4,61	4,56	4,34
$Q_u (kW)$	11,543	7,791	3,975
$\eta (\%)$	42,7	43,2	44

Tabla 9.3: Caracterización de los calentadores de aire inflables.

### Balance energético en el sistema de secado.

Es necesario cuantificar el aporte de energía en cada dispositivo para valorar las posibilidades de secado. Como se indicó anteriormente, la potencia térmica demandada en el proceso, para un funcionamiento de  $24 h$  ( $8 h$  secado solar y  $16 h$  secado convencional), es de  $517 kW_t$  en el orujo y de  $801 kW_t$  en el alpechín.

Como se ha justificado, mediante los colectores de aire se conseguirá un aporte medio en cada secadero de aproximadamente  $31 kW_t$ .

Por otro lado, con la utilización del secadero-invernadero se obtendrían  $120 kW_t$

(mediante un análisis de éste como colector solar [172], para un valor medio de radiación solar de  $600 \text{ W/m}^2$ , un área de exposición de  $250 \text{ m}^2$ , un coeficiente de pérdida de  $3 \text{ W/m}^2\text{°C}$  y un incremento de temperatura de  $10 \text{ °C}$ ).

Por tanto, con cada dispositivo de secado solar (secadero-invernadero más colectores) se aportan  $151 \text{ kW}_t$  diarios. De esta forma, se precisarían con el sistema “todo solar”, de forma aproximada, 4 y 6 días para la eliminación de la humedad de la producción diaria de orujo y alpechín, respectivamente.

Con el objetivo de conseguir el secado de la cantidad diaria de subproductos, hasta los niveles de humedad establecidos, se propone el secado híbrido mediante la utilización de un horno de combustión que se autoabastece de los propios residuos secos de la planta. De esta forma, serían necesarios, adicionalmente,  $366 \text{ kW}_t$  para el secado de orujo y  $650 \text{ kW}_t$  para el secado de alpechín, que se obtendrían de dicho sistema de combustión.

Considerando un rendimiento del horno del 90 %, un poder calorífico inferior en el orujo y alpechín de 18,91 y 19,82  $\text{MJ/kg}$  (tabla 4.10), respectivamente, se precisarían las cantidades de combustible mostradas en la tabla 9.4, en función del residuo utilizado en el horno y del residuo a secar.

	Secado de orujo	Secado de alpechín
Necesidades de orujo seco (kg/h)	77,42	137,49
Necesidades de alpechín seco (kg/h)	73,64	131,2

Tabla 9.4: Necesidades de residuo en función del subproducto a secar.

En el sistema propuesto, inicialmente se reduciría la humedad tanto de orujo húmedo como de alpechín, con necesidades térmicas convencionales de  $1016 \text{ kW}_t$ . Así, para un funcionamiento del horno de 16 h sería posible consumir la totalidad diaria de alpechín seco generada en la planta ( $2950 \text{ kg}$ ) obteniendo  $916 \text{ kW}_t$  y además se necesitarían  $100 \text{ kW}_t$  procedentes de la combustión del orujo seco (consumo diario de  $338 \text{ kg}$ ).

Con el periodo de operación estimado en la planta de 180 días, serían necesarias para autoabastecimiento  $60,92 \text{ t}$  de orujo seco procedentes del secado solar y, por tanto, con la producción de  $17,66 \text{ t}$  de orujo seco diarias, se precisarían aproximadamente 4 días para obtener dicha cantidad de orujo para autoabastecimiento.

Posteriormente, el secadero se utilizaría exclusivamente para el secado de alpechín mediante secado solar híbrido con la combustión del propio residuo seco generado. En esta situación, se dispondrían de  $500 \text{ m}^2$  de superficie de secado para  $23,6 \text{ t/día}$  de alpechín con demanda de  $801 \text{ kW}_t$ . Producidos  $302 \text{ kW}_t$  del sistema solar, los  $499 \text{ kW}_t$  restantes se conseguirían en la combustión de  $1,28 \text{ t/día}$  de alpechín más el orujo diario

de autoabastecimiento. Y por tanto, la cantidad diaria de producto seco generada en el secado solar híbrido, serían  $1,67 t/día$  de alpechín.

En definitiva, se logra reducir la humedad hasta los niveles establecidos de la cantidad de alpechín generada diaria y se obtiene un excedente de alpechín seco para su posible utilización como combustible en otros procesos.

### Superficies necesarias de procesado y almacenamiento.

Se deben valorar las dimensiones de las superficies de almacenamiento del producto húmedo y seco. Para ello es necesario considerar las densidades aparentes de cada uno de los subproductos (tablas 4.4 y 4.5), la cantidad de producto a manejar, la altura de producto considerada y el tiempo de almacenamiento estimado.

En lo que se refiere al producto entrante, alperujo, la capacidad de la balsa de acumulación se va a tomar la correspondiente a tres meses de procesado. El resto de superficies de almacenamiento se dimensionan para un periodo de un mes, teniendo en cuenta posibles paradas por mantenimiento y/o reparación, por adversidades climatológicas que aumenten el ratio de secado, etc.

Así, en la tabla 9.5 se muestran las necesidades de terreno aproximadas para los productos húmedos en volumen y superficie, anuales y mensuales, considerando un espesor de almacenamiento en todos los casos de  $2 m$ . De igual forma, en la tabla 9.6 se presentan dichas necesidades de terreno para el producto seco.

	Alperujo	Orujo	Alpechín
Cantidad anual (t/año)	10000 (70 % <sub>wb</sub> )	5647 (55 % <sub>wb</sub> )	4243 (90 % <sub>wb</sub> )
Volumen anual (m <sup>3</sup> /año)	9390	8033	4152
Superficie anual (m <sup>2</sup> /año)	4695	4017	2076
Volumen mensual (m <sup>3</sup> /mes)	783	670	346
Superficie mensual (m <sup>2</sup> /mes)	392	350	173

Tabla 9.5: Volumen y superficie de producto húmedo anual y mensual.

	Orujo	Alpechín
Cantidad anual (t/año)	3176 (20 % <sub>wb</sub> )	472 (20 % <sub>wb</sub> )
Volumen anual (m <sup>3</sup> /año)	5672	456
Superficie anual (m <sup>2</sup> /año)	2836	228
Volumen mensual (m <sup>3</sup> /mes)	473	38
Superficie mensual (m <sup>2</sup> /mes)	236	19

Tabla 9.6: Volumen y superficie de producto seco anual y mensual.

A partir de la superficie mensual necesaria estimada para espesores de  $2 m$  se establecen las dimensiones aproximadas de almacenamiento de subproductos mostradas

en la tabla 9.7. En la figura 9.14 se muestra un esquema de la distribución de dichas zonas.

	Alper. <i>húmedo</i>	Or. <i>húmedo</i>	Al. <i>húmedo</i>	Or. <i>seco</i>	Al. <i>seco</i>
Superficie (m <sup>2</sup> )	3 x (20 x 20)	15 x 25	12 x 15	12 x 20	4 x 5

Tabla 9.7: Dimensionado de superficies de almacenamiento de subproductos.



Figura 9.14: Distribución de las zonas de almacenamiento.

Como resumen final, mediante el sistema descrito se posibilitaría la eliminación-aprovechamiento del alpechín, obteniendo, además, un producto de valor que, por su elevado poder calorífico (superior al del orujo), se podría utilizar como combustible teniendo en cuenta las particularidades de su combustión.



## Capítulo 10

# Conclusiones y líneas futuras.

La elevada generación en España de subproductos procedentes de la producción de aceite de oliva ha conducido a la búsqueda de múltiples soluciones como tecnologías de aprovechamiento-eliminación.

La utilización térmica de los residuos de almazara se considera la alternativa con mayores perspectivas actuales y futuras. El proceso de secado es el pretratamiento necesario, más importante y que mayor consumo energético representa, para la utilización térmica de los subproductos agroindustriales de alta humedad ( $> 50 \%$ ).

En la actualidad, la inmensa mayoría de plantas de producción de aceite oliva trabajan en sistema dos fases, siendo el alperujo generado tratado posteriormente mediante una operación de repaso, obteniendo los residuos finales orujo y alpechín.

El secado de orujo en secaderos convencionales tipo trommel es un proceso con elevados costes de inversión y operación. La necesidad de un secado rápido del subproducto para la obtención del orujo que procesan las extractoras, no aconseja, en principio, la aplicación del secado solar a los mismos.

Sin embargo, el alpechín, residuo altamente contaminante representa el mayor problema en una planta de tratamiento de subproductos de la industria almazarera. Actualmente no se cuenta con una tecnología eficaz y rentable de eliminación.

Una opción que puede resultar viable consiste en el secado solar del alpechín hasta porcentajes de humedad del  $20 \%_{wb}$  y la posterior utilización como combustible de la fracción seca.

Con las premisas anteriores en esta tesis se ha analizado la cinética de secado de los subproductos de almazara mediante la utilización de un prototipo de secadero solar híbrido. Las principales consideraciones, conclusiones del trabajo y líneas futuras se establecen a continuación.

### 10.1. Consideraciones relativas a las cantidades y características de los subproductos.

Como punto de partida en este trabajo se planteó necesario la cuantificación y caracterización de los diferentes subproductos. Del estudio realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

- En Extremadura se genera una cantidad elevada de subproductos procedentes de la industria almazarera y además se encuentra altamente concentrada en diversas zonas. La producción media anual de cada subproducto es de aproximadamente 120000 t de alperujo, 18500 t de orujo y 43000 t de alpechín, de las cuales el 73 % se generan en la provincia de Badajoz y el 27 % en la de Cáceres.
- La humedad que presentan los residuos (55 % orujo, 70 % alperujo y 90 % alpechín) hace inviable su utilización térmica, por lo que será necesario un proceso previo de secado. Mediante la utilización del secado solar se ha reducido dicha humedad hasta valores inferiores al 20 %, aunque para la comparación de la cinética se utiliza éste como valor límite.
- El alpechín posterior al proceso de secado presenta un valor muy elevado de densidad aparente ( $\sim 1035 \text{ kg/m}^3$ ), superior incluso al obtenido en húmedo y al que tienen muchos combustibles convencionales.
- Del análisis inmediato realizado a las muestras húmedas y secas se puede concluir que, para el rango de temperaturas estudiadas en este trabajo y comunes en el secado solar, la variación de materia volátil es muy reducida.
- Del análisis elemental se comprueba que los residuos, por un lado, presentan elevados contenidos de C, H y O, del mismo orden al de otros residuos biomásicos concentrados o combustibles convencionales y, por otro, respecto al contenido de N, Cl y S, destaca el reducido nivel de azufre y en contrapartida los altos porcentajes de nitrógeno y cloro.
- En la determinación del poder calorífico hay que resaltar el aumento de éste tras el proceso de secado en el alpechín, con valores superiores a los del orujo y a los de otros combustibles convencionales. Además, la densidad energética obtenida para este residuo es prácticamente el doble a la obtenida en orujo o alperujo.
- Los coeficientes convectivos, necesarios para los balances energéticos en el proceso de secado y los modelos de simulación, presentan valores medios comprendidos en el intervalo  $0,7 - 2,2 \text{ W/m}^2\text{C}$ .



- Los valores de difusividad efectiva, en convección forzada y para el rango de temperaturas 20-40 °C, son superiores en el orujo, seguido del alpechín y alperujo, dando lugar a mayores tiempos de secado en el último. Por el contrario, la energía de activación alcanzada en el alpechín es mayor que la registrada en los otros residuos, provocando en éste un retardo en el comienzo del proceso de secado.

### 10.2. Consideraciones relativas al secado natural.

Para disponer de una referencia en el diseño y en la valoración del funcionamiento de los secaderos solares, se realizó un análisis experimental del proceso de secado natural de los residuos. Las conclusiones que se pueden destacar son:

- Para el contenido de humedad inicial propio de cada residuo, los tiempos de secado alcanzados en las baterías de ensayos, hasta el nivel del 20 % $_{wb}$ , oscilan entre las 72 h para el orujo y las 170 h para alperujo y alpechín. En general, los tiempos de secado en alperujo son superiores a los alcanzados en alpechín, justificado por su menor difusividad efectiva (granulometría específica y mayor contenido en aceite). Además, en la mayoría de ensayos se observaron incrementos de humedad en los periodos nocturnos.
- El espesor de producto influye en los ratios de secado alcanzados, aumentando el tiempo de secado de forma no lineal con dicho espesor. El valor máximo que se considera apropiado para el secado solar es de 50 cm.
- Los dos parámetros externos que más condicionan el SDS son la temperatura y la velocidad del aire ambiente. Además, se ha comprobado que el incremento de temperatura mejora en mayor medida la cinética de secado del alperujo respecto al alpechín, ocurriendo al contrario con el aumento de velocidad. De esta forma será necesario un compromiso entre la temperatura de secado y la velocidad de paso del fluido para obtener un secado óptimo en este último.

### 10.3. Consideraciones relativas al diseño del prototipo.

Para llevar a cabo las pruebas experimentales que permitieron estudiar la cinética de secado de los subproductos se ha utilizado un prototipo de secadero solar híbrido. La puesta en marcha del mismo llevó a las siguientes consideraciones:

- Por estar ubicado el secadero en Badajoz y para el periodo de realización de los ensayos de secado se seleccionó como inclinación del colector la correspondiente a  $20^\circ$ .
- La temperatura de salida del colector será función del modo de funcionamiento, siendo superiores en modo pasivo que en modo activo, teniendo un efecto contrario en la eficiencia del sistema. No obstante, las pruebas de secado arrojarán mejoras considerables en los tiempos de secado mediante el sistema forzado.
- De los ensayos en vacío, se deduce que el modo de funcionamiento mixto respecto al modo indirecto presenta mejoras considerables en el proceso de secado.
- La selección del caudal adecuado a las características del secadero es un aspecto crítico para su optimización. De las diferentes pruebas realizadas en vacío se seleccionó un flujo másico de aire de  $0,22 \text{ kg/s}$ .

#### 10.4. Consideraciones relativas al funcionamiento del secadero solar y la cinética de secado de los subproductos.

Se realizaron múltiples ensayos relativos a los diferentes subproductos (orujos, alpechín) y a los diferentes modos de funcionamiento (mixto, indirecto, activo, pasivo e híbrido).

En lo relativo al funcionamiento del colector solar se obtuvieron los resultados siguientes:

- Para el modo pasivo, con valores de caudal medio de  $0,055 \text{ kg/s}$ , se consiguieron incrementos de temperatura de aproximadamente  $12,5^\circ\text{C}$ . De igual forma, para el modo activo, con caudales del orden de  $0,22 \text{ kg/s}$  se alcanzaron incrementos de temperatura en torno a los  $4^\circ\text{C}$ .
- Existe una marcada influencia, evidentemente, de la radiación solar y del flujo másico en la temperatura del aire de salida y en la eficiencia del colector. Los valores de esta última oscilan aproximadamente entre 30 y 70 %, para convección natural, y entre 40 y 80 %, para convección forzada. Existe, además, un valor límite de flujo de aire para el que no se consiguen mejoras en la eficiencia del colector, siendo éste de  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Los parámetros característicos del colector obtenidos para dicho flujo de aire óptimo son: factor de eficiencia  $F_R(\tau\alpha)_e = 0,6124$  y de pérdida  $F_R U_L = 72,705$ .

- Para el diseño del colector, con los valores típicos de incremento de temperatura alcanzados con un flujo másico de  $0,22 \text{ kg/s}$  y radiación solar media de  $600 \text{ W/m}^2$ , se consigue un aporte calorífico en el mismo de  $300\text{-}450 \text{ W}$ .

En lo referente al funcionamiento de la cámara de secado y la cinética de secado, destacan las siguientes conclusiones:

- La regulación óptima de velocidad del ventilador de aire se corresponde con  $m_a \sim 0,22 \text{ kg/s}$ .
- Las diferencias máximas de temperatura y humedad relativa entre la entrada y la salida de la cámara de secado para el funcionamiento en convección natural, forzado y forzado-híbrido, son de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $7 \%$ ,  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $3 \%$  y  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $27 \%$ , respectivamente.
- Los mayores tiempos de secado se dan en el sistema pasivo para todos los subproductos. Se observaron mejoras en dicho tiempo en el modo activo respecto al pasivo entre un  $30$  y un  $80 \%$ .
- Dependiendo del modo de funcionamiento, se registraron tiempos de secado entre  $2\text{-}8 \text{ h}$  para orujo, entre  $10\text{-}28 \text{ h}$  para alperujo y entre  $11\text{-}42 \text{ h}$  para alpechín. Además, no se detectó durante el periodo nocturno, generalmente, reabsorción de humedad en los subproductos. Puesto que para el alpechín en convección natural se obtuvieron tiempos de secado muy elevados, se considera conveniente, para la reducción de humedad de este subproducto, la selección adecuada de los caudales de aire del secadero solar.
- Al igual que en los ensayos en vacío, se observó una mejora del proceso para el funcionamiento en modo mixto.
- En lo relativo a las temperaturas de producto se obtuvieron, para convección forzada y en los tres subproductos, valores del orden de  $35\text{-}40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Como era de esperar, los mayores valores de este parámetro se producen en el modo híbrido con valores cercanos a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  para orujo, a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  para alperujo y a  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  para alpechín, relativos a valores medios de temperatura en la cámara de secado de  $57 \text{ }^\circ\text{C}$ . Así, la utilización de una fuente de energía auxiliar para los periodos de baja insolación o nocturnos presenta gran interés.
- Al igual que en el secado natural se analizó la influencia de diferentes parámetros. Los resultados demuestran que el incremento de la temperatura del aire desecante, así como la disminución de su humedad relativa, origina reducciones

considerables en los tiempos de secado entre un 20 y un 50 %. Se observaron en el modo mixto, para una temperatura de 40 °C, tiempos de secado de 4, 12 y 13 h, para orujo, alperujo y alpechín, respectivamente. Los resultados alcanzados para este último, arrojan muy buenas previsiones para la aplicación del secado solar.

- En cuanto a la eficiencia del secadero, los valores se encuentran, dependiendo del modo de funcionamiento y del subproducto, en el intervalo 13-44 %.
- De la comparación de los tiempos de secado obtenidos en el prototipo y los alcanzados en el SDS, para orujo, alperujo y alpechín, se obtienen mejoras de dichos tiempos con el primero de 96, 83 y 86 %, respectivamente.
- Por último, relativo a los ajustes de regresión del ratio de humedad para los ensayos con los diferentes subproductos y temperaturas, se concluye que el *modelo de Page* proporciona el mejor ajuste de los valores experimentales con valores de  $R^2$  superiores a 0,98 y de  $\chi^2$  inferiores a  $2,322 \cdot 10^{-3}$ .

### 10.5. Consideraciones relativas al modelo teórico del sistema.

Se implementó un modelo matemático (en Visual Basic) para la simulación teórica del proceso en el prototipo de secado solar, relativo al funcionamiento del calentador solar de aire y la cámara de secado de los subproductos. Por otro parte, se realizó un ajuste de regresión de los parámetros climatológicos más relevantes en el secado solar. Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

- Tanto el modelo del colector como de la cámara de secado obtiene resultados satisfactorios en la simulación del proceso.
- Para el colector, los valores obtenidos en la simulación de la temperatura de salida comparados con los alcanzados experimentalmente arrojan diferencias inferiores a 0,5 °C.
- Respecto a la cámara de secado, los errores relativos entre los valores experimentales y simulados se encuentran entre 0,5 y 5 % para la temperatura de salida, entre 0,2 y 15 % para la temperatura de producto de la bandeja inferior y entre 0,2 y 12 % para la del producto de la bandeja superior. Estos valores, por la complejidad del sistema, se consideran aceptables para la simulación de la cámara de secado.

- Referente a las variables climáticas temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, éstas se han ajustado mediante un polinomio de sexto grado que proporciona valores aceptables en el coeficiente de determinación ( $R^2 > 0,98$ ) y en el error cuadrático ( $\chi^2 < 10^{-10}$ ).

### 10.6. Consideraciones relativas a la propuesta de secado solar.

Mediante los resultados obtenidos anteriormente se planteó una propuesta de secado solar de residuos de almazara cuyos características y conclusiones más relevantes se señalan a continuación:

- Se dimensiona una planta de tratamiento de alperujos de tamaño medio ubicada en Badajoz en la que se procesan 10000  $t_{alperujo/año}$ . Para un periodo de operación de 180 días se tienen unas cantidades diarias de subproducto con necesidades de secado 31,4  $t$  de orujo y 23,6  $t$  de alpechín.
- El sistema propuesto consta de dos secaderos-invernaderos tipo túnel, situados en paralelo y de idénticas características, para funcionamiento en convección forzada, dotados de calentadores solares de aire inflables y con horno de combustión de biomasa que posibilitará el secado en continuo del producto depositado en el invernadero (secadero híbrido). De esta forma, el régimen de funcionamiento diario del sistema se establece en 24  $h$ .
- El objetivo es el secado, mediante el sistema híbrido, de la cantidad total de alpechín generado y del orujo necesario para autoabastecimiento. Para espesores entre 10-20  $cm$  se selecciona para cada uno de los subproductos una superficie aproximada de 250  $m^2$ . Con una reducción de humedad hasta el 20 % $_{wb}$ , se alcanzarían unas cantidades finales diarias de producto seco de 17,66  $t$  de orujo y 2,95  $t$  de alpechín, con una demanda térmica del sistema de 517  $kW_t$  y 801  $kW_t$ , respectivamente.
- Por los resultados obtenidos en el prototipo se estima conveniente una velocidad de paso del fluido sobre el producto de 0,4-1  $m/s$ , esto es, un caudal de aire 16  $m^3/s$ .
- A través del dimensionado de los diferentes sistemas y mediante el correspondiente balance de masa y energía se consigue secar la cantidad generada diaria de alpechín con un excedente de 1,67  $t/día$  de alpechín seco, para su posible utilización como combustible en otros procesos.

### 10.7. Conclusiones globales y líneas de trabajo futuras.

- En este trabajo se propone una alternativa para la eliminación-utilización del alpechín, residuo altamente problemático para el que hasta la fecha no se dispone de una tecnología interesante y viable de utilización, que consiste en la utilización del secado solar híbrido.
- Para ello, se ha diseñado, construido y puesto en marcha un prototipo de secadero solar, en el cual se ha estudiado el proceso de secado de los diferentes residuos, con resultados muy positivos.
- Del análisis de la cinética de secado de los tres subproductos se han obtenido las siguientes conclusiones:
  - La aplicación del secado solar para alperujo, en las condiciones estudiadas, no resulta de interés.
  - El orujo 3f, aunque presenta un excelente comportamiento en el secado solar, por disponer de una utilización posterior (extractado), puede resultar más interesante el secado rápido en secaderos convencionales, siendo sin duda ésta una operación con muy alto coste.
  - El alpechín presentó un buen comportamiento en el proceso con tiempos inferiores a los obtenidos en el alperujo. El residuo reducido hasta un 20 % de humedad, es fácilmente manejable y presenta una utilización viable como combustible.
- Se planteó una propuesta de planta de secado solar de residuos de almazara con la que se consigue eliminar la cantidad total de efluente líquido, obteniendo además un excedente de producto seco con aplicaciones diversas.
- Hasta la fecha no existe ninguna instalación comercial que implemente el sistema propuesto para los subproductos de estudio. Sin embargo, por los resultados alcanzados, se considera que la extrapolación del secado solar a una planta de grandes dimensiones presenta excelentes perspectivas.
- Como líneas de trabajo futuro se proponen:
  - Modificaciones en la planta propuesta para optimizar el proceso de secado, fundamentalmente relacionadas con la selección exhaustiva de los flujos de aire, alcanzando una situación de compromiso entre el aumento de la velocidad de paso de fluido y la disminución de la temperatura.

- Determinación de los calores latentes de vaporización de los diferentes subproductos de almazara mediante ensayos termogravimétricos.
- Evaluación de emisiones en el proceso de secado solar.
- Valoración de coeficientes convectivos, difusividad efectiva, etc, para un mayor rango de temperaturas y para otros residuos.
- Análisis de la cinética de secado solar de otros subproductos agroindustriales (concentrado de alpechín, residuo de tomate, etc). En lo referente al concentrado de alpechín, la disminución de un porcentaje de su humedad mediante secado solar con un aporte energético convencional reducido, incrementaría las posibilidades para su posible combustión combinada multifásica.





# Nomenclatura.

Símbolo	Definición	Unidades
$A_c$	Superficie de captación	$m^2$
$A_f$	Sección transversal del colector	$m^2$
$A_{p1}$	Superficie de la bandeja inferior	$m^2$
$A_{p2}$	Superficie de la bandeja superior	$m^2$
$C$	Calor específico	$J/kg^\circ C$
$c_{pa}$	Calor específico del aire	$J/kg^\circ C$
$CEU$	Consumo energético unitario	$J/kg$
$cp_{ais}$	Calor específico del aislamiento	$J/kg^\circ C$
$cp_{p1}$	Calor esp. del prod. húmedo en bandeja inferior	$J/kg^\circ C$
$cp_{p2}$	Calor esp. del prod. húmedo en bandeja superior	$J/kg^\circ C$
$cp_{ph}$	Calor específico del producto húmedo	$J/kg^\circ C$
$cp_{pi}$	Calor específico de la pared interna	$J/kg^\circ C$
$cp_{pi1}$	Calor específico de la pared interior translúcida	$J/kg^\circ C$
$cp_{pi2}$	Calor específico de la pared interior opaca	$J/kg^\circ C$
$D_{eff}$	Difusividad efectiva	$m^2/s$
$D_h$	Longitud característica en el colector	$m^2$
$D_0$	Factor de frecuencia o pre-exponencial	$m^2/s$
$DR$	Ratio de secado	$kg_{agua}/kg_{seco}h$
$dt$	Variación de tiempo	$h$
$E$	Capacidad evaporativa	$kg/s$
$E_a$	Energía de activación de la difusión de humedad	$J/kmol$
$e_{ais}$	Espesor del aislante	$m$
$F_R$	Factor de disipación de calor	-
$F_R(\tau\alpha)_e$	Factor de eficiencia	-

Símbolo	Definición	Unidades
$F_R U_L$	Factor de pérdida	-
$F'$	Factor de eficiencia del colector	dec. o %
$F''$	Factor de flujo del colector	dec. o %
$g$	Aceleración de la gravedad	$m/s^2$
$g$	Orientación de la superficie	°
$Gr$	Número de Grashof	Adimensional
$H$	Irradiación	$J/m^2$
$h$	Altura solar	°
$h_1$ y $h_2$	Entalpía	$J/kg_{as}$
$h_{a,p1}$	Coefficiente conv. aire-producto en bandeja inferior	$W/m^{2\circ}C$
$h_{a,p2}$	Coefficiente conv. aire-producto en bandeja superior	$W/m^{2\circ}C$
$h_{a,\pi 1}$	Coefficiente convectivo aire-pared translúcida	$W/m^{2\circ}C$
$h_{a,\pi 2}$	Coefficiente convectivo aire-pared opaca	$W/m^{2\circ}C$
$h_{as,ph}$	Coefficiente convectivo aire-producto	$W/m^{2\circ}C$
$h_{as,\pi}$	Coefficiente convectivo aire-pared	$W/m^{2\circ}C$
$h_{as}$	Entalpía del aire seco	$J/kg_{as}$
$H_B$	Irradiación directa	$J/m^2$
$h_c$	Altura de culminación	°
$h_c$	Coefficiente de transmisión de calor convectivo	$W/m^{2\circ}C$
$H_D$	Irradiación difusa	$J/m^2$
$H_G$	Irradiación global	$J/m^2$
$h_{med,ae}$	Coefficiente convectivo medio-aislamiento exterior	$W/m^{2\circ}C$
$h_{med,pe1}$	Coefficiente convectivo medio-pared translúcida	$W/m^{2\circ}C$
$h_{med,pe2}$	Coefficiente convectivo medio-pared opaca	$W/m^{2\circ}C$
$H_R$	Irradiación reflejada	$J/m^2$
$h_r$	Coefficiente de intercambio por radiación	$W/m^{2\circ}C$
$h_r$	Coefficiente de radiación entre cubierta y placa	$W/m^2 \circ C$
$H_T$	Irradiación horaria incidente sobre el colector	$J/m^2$
$h_v$	Entalpía del vapor de agua	$J/kg_{as}$
$h_w$	Coefficiente de pérdida de energía debido al viento	$W/m^2 \circ C$
$\overline{H}_0$	Irradiación extraterrestre diaria media mensual	$J/m^2$
$h_1$	Coefficiente convectivo entre aire y cubierta	$W/m^2 \circ C$
$h_2$	Coefficiente convectivo entre el aire y la placa	$W/m^2 \circ C$
$I$	Irradiancia	$W/m^2$
$I_{CS}$	Constante solar	$1367 W/m^2$
$I_{SN}$	Irradiancia extraterrestre normal a la radiación	$W/m^2$
$I_T$	Radiación total incidente sobre el colector	$W/m^2$
$I_0$	Irradiancia extraterrestre horaria	$W/m^2$

Símbolo	Definición	Unidades
$k_{ais}$	Conductividad térmica del aislante	$W/m^2\text{°}C$
$K_B$	Cociente entre exposición directa y rad. horizontal	Adimensional
$K_D$	Cociente entre exposición difusa y rad. horizontal	Adimensional
$k_{pi}$	Coefficiente de conducción de la pared interna	$W/m^2\text{°}C$
$k_{pi1}$	Coefficiente de cond. de la pared inter. translúcida	$W/m^2\text{°}C$
$k_{pi2}$	Coefficiente de cond. de la pared inter. opaca	$W/m^2\text{°}C$
$K_T$	Coefficiente de transmisión total atmosférico	Adimensional
$K_v$	Conductividad térmica	$W/mK$
$L$	Dimensión característica del producto "capa fina"	$m$
$l$	Latitud	$^{\circ}$
$L_v$	Calor latente de vaporización	$J/kg$
$L_w$	Calor latente de vaporización del agua pura	$J/kg$
$m_a$	Caudal másico de aire	$kg/s$
$m_{ais}$	Masa del aislamiento	$kg$
$m_{as}$	Masa de aire seco	$kg$
$M_{as}$	Peso molecular del aire seco	$kg/mol$
$m_c$	Masa del combustible utilizado	$kg$
$M_{db}$	Humedad en base seca	$kg_{agua}/kg_{prod.seco}$
$M_e$	Humedad de equilibrio	$kg$
$m_{ev}$	Cantidad de agua evaporada	$kg$
$m_{ms}$	Masa de la materia seca	$kg$
$m_{ms1}$	Masa de la materia seca de la bandeja inferior	$kg$
$m_{ms2}$	Masa de la materia seca de la bandeja superior	$kg$
$M_o$	Humedad inicial	$kg$
$M_o$	Humedad inicial en base húmeda o seca	$dec.$
$m_{p1}$	Masa del producto húmedo en bandeja inferior	$kg$
$m_{p2}$	Masa del producto húmedo en bandeja superior	$kg$
$m_{ph}$	Masa del producto húmedo	$kg$
$m_{pi}$	Masa de la pared de la cámara de secado	$kg$
$m_{pi1}$	Masa de la pared translúcida de cámara de secado	$kg$
$m_{pi2}$	Masa de la pared opaca de la cámara de secado	$kg$
$M_t$	Humedad instantánea	$kg$
$M_{t\_db}$	Humedad instantánea en base seca	$kg_{agua}/kg_{prod.seco}$
$M_{t\_wb}$	Humedad instantánea en base húmeda	$kg_{agua}/kg_{prod.húm.}$
$M_v$	Peso molecular del vapor de agua	$kg/mol$
$m_v$	Masa de vapor de agua	$kg$
$M_w$	Peso molecular del agua	$18,01\text{ }kg/kmol$
$M_{wb}$	Humedad en base húmeda	$kg_{agua}/kg_{prod.húm.}$

Símbolo	Definición	Unidades
$M_1$	Humedad en base seca del prod. en bandeja inferior	$kg/kg_{db}$ .
$M_2$	Humedad en base seca del prod. en bandeja superior	$kg/kg_{db}$ .
$MR$	Ratio de humedad	dec. o %
$MR_{exp,i}$	Ratio de humedad experimental	dec. o %
$MR_{pred,i}$	Ratio de humedad estimado	dec. o %
$n$	Número de día del año	-
$N$	Número de cubiertas en el colector	-
$n_h$	Número de horas antes o después del mediodía solar	-
$Nu$	Número de Nusselt	Adimensional
$P(T_p)$	Presión parcial del vapor a la temp. del producto	$Pa$
$P(T_{sp})$	Presión parcial del vapor a la temp. superficial	$Pa$
$P_{aceite}$	Producción de aceite	$kg$
$p_{as}$	Presión parcial del aire seco	$Pa$
$p_T$	Presión absoluta total	101325 $Pa$
$p_v$	Presión parcial del vapor de agua	$Pa$
$P_v$	Consumo de energía producido por los ventiladores	$J$
$p_{vs}$	Presión parcial de saturación del vapor de agua	$Pa$
$PCI$	Poder calorífico inferior	$J/kg$
$PCS$	Poder calorífico superior	$J/kg$
$PCS_{db}$	PCS de los combustibles biomásicos	$J/kg$
$Pr$	Número de Prandtl	Adimensional
$q/A$	Flujo de calor	$W/m^2$
$Q_a$	Energía consumida	$J/h$
$Q_e$	Potencia para evaporar la humedad del producto	$J/sm^2$
$Q_u$	Calor útil que desplaza el aire por el colector	$W$
$r$	Coefficiente medio de reflexión	dec.
$R$	Constante de los gases	8314 $J/kmolK$
$R_m$	Factor de conversión de la radiación directa	Adimensional
$R^2$	Coefficiente de determinación	-
$Re$	Número de Reynolds	Adimensional
$S$	Energía absorbida por la placa	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$s$	Inclinación de la superficie plana	$^\circ$
$S_{ais}$	Superficie de una de las paredes de aislamiento	$m^2$
$S_{pe1}$	Superficie de la pared exterior translúcida	$m^2$
$S_{pe2}$	Superficie de la pared exterior opaca	$m^2$
$S_{pi}$	Superficie de intercambio	$m^2$
$S_{pi1}$	Superficie de las paredes translúcidas de la cámara	$m^2$
$S_{pi2}$	Superficie de las paredes opacas de la cámara	$m^2$

Símbolo	Definición	Unidades
$SMER$	Ratio de extracción de humedad específico	$kg/J$
$t$	Tiempo	$h$
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$T_a$	Temperatura del aire ambiente	$^{\circ}C$
$T_{ae}$	Temperatura exterior del aislamiento	$^{\circ}C$
$T_{ai}$	Temperatura interior del aislamiento	$^{\circ}C$
$T_{ais}$	Temperatura del aislamiento	$^{\circ}C$
$T_{as,e}$	Temperatura del aire a la entrada de cámara de secado	$^{\circ}C$
$T_{as,med}$	Temperatura del aire entre las bandejas del producto	$^{\circ}C$
$T_{as,s}$	Temperatura del aire a la entrada de cámara de secado	$^{\circ}C$
$T_{as}$	Temperatura del agente desecante	$^{\circ}C$
$T_{bh}$	Temperatura de bulbo húmedo	$^{\circ}C$
$T_c$	Temperatura media radiante del medio exterior	$^{\circ}C$
$T_d$	Número de horas de sol	-
$T_f$	Temperatura del fluido que circula por el interior	$^{\circ}C$
$T_{fi}$	Temperatura de entrada del aire en el colector	$^{\circ}C$
$T_{fm}$	Temperatura media del fluido	$^{\circ}C$
$T_{fo}$	Temperatura de salida del aire en el colector	$^{\circ}C$
$T_i$	Temperatura de entrada del fluido en el colector	$^{\circ}C$
$T_m$	Temperatura media del fluido	$^{\circ}C$
$T_{med}$	Temperatura del medio exterior-aire	$^{\circ}C$
$T_p$	Temperatura del producto	$^{\circ}C$
$T_p$	Temperatura de la placa absorbadora	$^{\circ}C$
$T_{p1}$	Temperatura del producto húmedo en bandeja inferior	$^{\circ}C$
$T_{p2}$	Temperatura del producto húmedo en bandeja superior	$^{\circ}C$
$T_{pe1}$	Temperatura de la pared exterior translúcida	$^{\circ}C$
$T_{pe2}$	Temperatura de la pared exterior opaca	$^{\circ}C$
$T_{ph}$	Temperatura del producto húmedo	$^{\circ}C$
$T_{pi}$	Temperatura de la pared interna	$^{\circ}C$
$T_{pi1}$	Temperatura de la pared interna translúcida	$^{\circ}C$
$T_{pi2}$	Temperatura de la pared interna opaca	$^{\circ}C$
$T_{pm}$	Temperatura media de la superficie absorbadora	$^{\circ}C$
$T_{pr}$	Temperatura de rocío	$^{\circ}C$
$T_{ps}$	Temperatura superficial del producto	$^{\circ}C$
$T_r$	Temperatura media radiante del exterior	$^{\circ}C$
$T_s$	Temperatura seca	$^{\circ}C$
$U_b$	Coficiente global de pérdidas inferiores	$W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$
$U_L$	Coficiente global de pérdidas en el colector	$W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$

Símbolo	Definición	Unidades
$U_t$	Coefficiente global de pérdidas superiores	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$V$	Volumen del gas	$m^3$
$v$	Volumen específico del aire húmedo	$m^3/kg_{as}$
$v$	Velocidad del viento	$m/s$
$v_c$	Velocidad del fluido en el captador	$m/s$
$v_0$	Velocidad del aire sobre la superficie del producto	$m/s$
$W_a$	Cantidad de agua retirada en el intervalo de tiempo	$kg_{agua}/h$
$W_d$	Peso de la materia seca en el producto	$kg$
$W_o$	Peso inicial de material sin secar	$kg$
$W_t$	Peso del material en el tiempo $t$	$kg$
$W_w$	Cantidad de agua en el producto húmedo	$kg$
$X$	Dimensión característica de la superficie de exposición	$m$

### Símbolos griegos

Símbolo	Definición	Unidades
$\alpha$	Absortividad	Adimensional
$\beta$	Ángulo de inclinación del colector	$^\circ$
$\beta t$	Coefficiente de expansión térmica	$K^{-1}$
$\Delta T$	Incremento de temperatura	$^\circ C$
$\delta$	Declinación solar	$^\circ$
$\varepsilon$	Emisividad	Adimensional
$\varepsilon$	Eficiencia del secado	%
$\theta$	Ángulo de incidencia	$^\circ$
$\eta$	Eficiencia del calentador de aire	-
$\eta$	Rendimiento del colector	dec. o %
$\eta_p$	Eficiencia del secado en términos de humedad	%
$\eta_s$	Eficiencia horaria del secadero	-
$\mu$	Viscosidad dinámica	$N \cdot s/m^2$
$\nu$	Viscosidad cinemática	$m^2/s$
$\rho$	Densidad	$kg/m^3$
$\rho_a$	Densidad del aire a la temperatura de trabajo	$kg/m^3$
$\sigma$	Constante de Steffan-Boltzmann	$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \text{ } ^\circ C^4$
$\tau$	Transmisividad	-
$(\tau\alpha)_e$	Producto transmisividad-absortividad efectivo	Adimensional
$\phi$	Humedad relativa	dec.
$\omega$	Humedad absoluta	$kg_{agua}/kg_{aire}$

---

Símbolo	Definición	Unidades
$\omega_h$	Ángulo horario	o
$\omega_a$	Humedad absoluta del aire ambiente	$kg_{agua}/kg_{aire}$
$\omega_e$	Efectividad del aire de secado	$kg_{agua}/kg_{aire}$
$\omega_s$	Hora de salida y puesta de Sol	o
$\omega_1$	Humedad absoluta del aire a la entrada del secadero	$kg_{agua}/kg_{aire}$
$\omega_2$	Humedad absoluta del aire a la salida del secadero	$kg_{agua}/kg_{aire}$
$\omega_{2e}$	Humedad absoluta en equilibrio con el producto	$kg_{agua}/kg_{aire}$





# Bibliografía

- [1] M. Cámara de la Fuente, *Gestión medioambiental y contabilidad. Una aplicación al sector del aceite de oliva*. Diputación Provincial de Jaén, Jaén, 1997.
- [2] L. Liberti, J. Rodrigo, J.A. Fiestaas, A. García y otros, “Reunión Internacional sobre tratamiento de alpechines.” Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Córdoba, 1991.
- [3] A. Ruiz Celma, “Modelización de plantas de biomasa para la generación de energía eléctrica,” *Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura*, Febrero, 2003.
- [4] A. Ruiz Celma y otros, “Tratamiento energético de alperujos,” *Energía. Ed. Alción*, vol. 162, pp. 95–100, 2002.
- [5] L. Armesto, A. Bahillo, A. Cabanillas, K. Veijonen, J. Otero, A. Plumed and L. Salvador, “Co-combustion of coal and olive oil industry residues in fluidised bed,” *Fuel*, vol. 82, no. 8, pp. 993–1000, 2003.
- [6] S. Rojas, T. Miranda, I. Montero y J.M. de la Rosa, “Utilización combinada de residuos biomásicos. Análisis de viabilidad,” *Energía. Ed. Alción*, vol. 179, pp. 98–104, 2004.
- [7] R. Borja, B. Rincón, F. Raposo, J. Alba and A. Martín, “A study of anaerobic digestibility of two-phases olive mill solid waste (OMSW) at mesophilic temperature,” *Process Biochemistry*, vol. 38, no. 5, pp. 733–742, 2002.
- [8] R. Borja, E. Sánchez, B. Rincón, F. Raposo, M.A. Martín and A. Martín, “Study and optimisation of the anaerobic acidogenic fermentation of two-phase olive pomace,” *Proces Biochemistry*, vol. 40, no. 1, pp. 281–291, 2005.
- [9] C. Balis and M. Antonakou, “Composting and biorremediation,” in *Workshop Improlive-2000*. Editorial Complutense, 2000.

- [10] J. Aragon, "Improvements of treatments and validation of the liquid-solid waste from the two-phase olive oil extraction," Project Improlive (FAIR CT96-1420) Final Report Annex A2, 2000.
- [11] M.T. Miranda García-Cuevas, "Utilización térmica de biomasa. Aplicación al caso del alpechín," *Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura*, Junio, 2005.
- [12] K. Fadil, A. Chanlaoui, A. Ouahbi, A. Zaid and R. Borja, "Aerobic biodegradation and detoxification of wastewaters from the olive oil industry," *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 51, no. 1, pp. 37–41, 2003.
- [13] E. Turano, S. Curcio, M. De Paola, V. Calabrò, and G. Iorio, "An integrated centrifugation-ultrafiltration system in the treatment of olive mill wastewater," *Journal of Membrane Science*, vol. 209, no. 2, pp. 519–531, 2002.
- [14] R. Borsani and B. Ferrando, "Ultrafiltration plant for olive vegetation waters by polymeric membrane batteries," *Desalination*, vol. 108, no. 1-3, pp. 281–286, 1996.
- [15] I.P. Marques, "Anaerobic digestion treatment of olive mill wastewater for effluent re-use in irrigation," *Desalination*, vol. 137, no. 1-3, pp. 233–239, 2001.
- [16] C. Paredes, M. Bernal, J. Cegarra, and A. Roig, "Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes," *Bioresource Technology*, vol. 85, no. 1, pp. 1–8, 2002.
- [17] W. Gernjak, M.I. Maldonado, S. Malato, J. Cáceres, T. Krutzler, A. Glaser and R. Bauer, "Pilot-plant treatment of olive mill wastewater (OMW) by solar TiO<sub>2</sub> photocatalysis and solar photo-fenton," *Solar Energy*, vol. 77, no. 5, pp. 567–572, 2004.
- [18] D. Potoglou, A. Kouzeli-Katsiri, and D. Haralambopoulos, "Solar distillation of olive mill wastewater," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 4, pp. 569–579, 2004.
- [19] D. Atanassova, P. Kefalas, C. Petrakis, D. Mantzavinos, N. Kalogerakis, and E. Psillakis, "Sonochemical reduction of the antioxidant activity of olive mill wastewater," *Environment International*, vol. 31, no. 2, pp. 281–287, 2005.
- [20] D. Mantzavinos and N. Kalogerakis, "Treatment of olive mill effluents part I. Organic matter degradation by chemical and biological processes - An overview," *Environment International*, vol. 31, no. 2, pp. 289–295, 2005.

- [21] R. Sarika, N. Kalogerakis, and D. Mantzavinos, "Treatment of olive mill effluents part II. Complete removal of solids by direct flocculation with poly-electrolytes," *Environment International*, vol. 31, no. 2, pp. 297–304, 2005.
- [22] U. Luboschik, "Solar Drying of Sewage Sludge," IST, Alemania, Tech. Rep., 2004. [Online]. Available: [www.ist-anlagenbau.de](http://www.ist-anlagenbau.de)
- [23] Thermo -System, "Secado solar de lodos de depuración," Universidad Hohenheim, Alemania, Tech. Rep., 2004. [Online]. Available: [www.thermo-system.com](http://www.thermo-system.com)
- [24] S. Rojas Rodríguez, "Evaluación del potencial energético de residuos agrícolas en Extremadura," *Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UNED*, Madrid, 1989.
- [25] S. Rojas Rodríguez, A. Ruiz Celma, M.T. Miranda García-Cuevas, F.L. Mondragao Rodrigues, G. Pargana Barradas y J. Rato Nunes, *Potencial energético de residuos concentrados de la vid en Extremadura y Alentejo*. Junta de Extremadura. Tecnigraf Editores, Badajoz, 1999.
- [26] S. Rojas, A.R. Celma, M.T. Miranda, I. Montero y C. Pérez, "Evaluación de la biomasa agrícola como recurso energético en Extremadura." IV Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica. Logroño, La Rioja, 2005.
- [27] A. Ruiz Celma, S. Rojas Rodríguez y M.T. Miranda García-Cuevas, *Necesidades energéticas de la industria almazarera*. Junta de Extremadura. Tecnigraf Editores, Badajoz, 1999.
- [28] A.S. Mujumdar, *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*. Science Publishers, Inc, Enfield - NH, USA, 2000.
- [29] A.C. Caputo, F. Scacchia and P.M. Pelagagge, "Disposal of by-products in olive oil industry: waste-to-energy solutions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 197–214, 2003.
- [30] F. Kneule, *El secado*. Urmo, S.A. de Ediciones, Bilbao, 1982.
- [31] S. Breto, J.L. Serrano y M. Muñoz, *Manual de secaderos*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1998.
- [32] P. Fito, A. Grau, J.M. Barat y A. Albors, *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Editorial de la UPV, Valencia, 2001.

- [33] P.S. Negi and S.K. Roy, "Effect of drying conditions on quality of green leaves during long term storage," *Food Research International*, vol. 34, no. 4, pp. 283–287, 2001.
- [34] W.A. Amos, "Report on Biomass Drying Technology," *National Renewable Energy Laboratory*, vol. NREL/TP-570-25885, 1998.
- [35] T. Liang, M.A. Khan and Q. Meng, "Spatial and temporal effects in drying biomass for energy," *Biomass and Bioenergy*, vol. 10, no. 5-6, pp. 353–360, 1996.
- [36] C. McCallum, B.R. Blackwell and L. Torstein, "Cost Benefit Analysis of Systems using Fuel Gas or Steam for Drying of Wood Waste Feedstocks," in *Final Report. Canadian Forest Service*, 1981.
- [37] O.V. Ekechukwu, "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, no. 6, pp. 593–613, 1999.
- [38] R. Corvalan, M. Horn, R. Roman y L. Saravia, *Ingeniería del secado solar*. CYTED-D, 1995.
- [39] ASAE D245.4 DEC93, "Moisture relationships of grains," ASAE STANDARDS, Tech. Rep., 1994.
- [40] M.E. Schmalko and S.M. Alzamora, "Modelling the drying of a twig of yerba maté considering as a composite material Part I: shrinkage, apparent density and equilibrium moisture content," *Journal of Food Engineering*, vol. 66, no. 4, pp. 455–461, 2005.
- [41] J.A. Ribeiro, D.T. Oliveira, M.L. Passos and M.A.S. Barrozo, "The use of non-linearity measures to discriminate the equilibrium moisture equations for Bixa orellana seeds," *Journal of Food Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 63–68, 2005.
- [42] J. Stencl, "Modelling the water sorption isotherms of yoghurt powder spray," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 65, no. 1-2, pp. 157–164, 2004.
- [43] A.G. Durakova and N.D. Menkov, "Moisture sorption characteristics of chickpea flour," *Journal of Food Engineering*, vol. 68, no. 4, pp. 535–539, 2005.
- [44] N. Arslan and H. Togrul, "Modelling of water sorption isotherms of macaroni stored in a chamber under controlled humidity and thermodynamic approach," *Journal of Food Engineering*, vol. 69, no. 2, pp. 133–145, 2005.

- [45] A. Pezzutti and G.H. Crapiste, "Sorptional Equilibrium and Drying Characteristics of Garlic," *Journal of Food Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 113–123, 1997.
- [46] J.A. Barreiro, S. Fernández and A.J. Sandoval, "Water sorption characteristics of six row barley malt (*Hordeum vulgare*)," *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, vol. 36, no. 1, pp. 37–42, 2003.
- [47] G.L. Barker, "Equilibrium Moisture Content of Cotton Plant Components," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 63, no. 4, pp. 353–364, 1996.
- [48] M.L. Medeiros, A.M. Bartolomeu, R. Nogueira and S. Caetano, "Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products," *Journal of Food Engineering*, vol. 73, no. 4, pp. 402–406, 2006.
- [49] N. Arslan and H. Togrul, "The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity," *Journal of Stored Products Research*, 2005.
- [50] M. Maskan and F. Göğüs, "The Fitting of Various Models to Water Sorption Isotherms of Pistachio Nut Paste," *Journal of Food Engineering*, vol. 33, no. 3-4, pp. 227–237, 1997.
- [51] W.J. Lamond and R. Graham, "The Relationship between the equilibrium moisture content of grass mixtures and the temperature and humidity of the air," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 56, no. 4, pp. 327–335, 1993.
- [52] A. Lopez, A. Iguaz, A. Esnoz and P. Virseda, "Modelling of Sorption Isotherms of Dried Vegetable Wastes from Wholesale Market," *Drying Technology*, vol. 18, no. 4-5, pp. 985–995, 2000.
- [53] S.A. Giner and M.C. Gely, "Sorptional Parameters of Sunflower Seeds of Use in Drying and Storage Stability Studies," *Biosystems Engineering*, vol. 92, no. 2, pp. 217–227, 2005.
- [54] N.A. Aviara, O.O. Ajibola and U.O. Dairo, "Thermodynamics of Moisture Sorption in Sesame Seed," *Byosystems Engineering*, vol. 83, no. 4, pp. 423–431, 2002.
- [55] N.A. Aviara, O.O. Ajibola and S.A. Oni, "Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean," *Byosystems Engineering*, vol. 87, no. 2, pp. 179–190, 2004.

- [56] D.A. Balladin, I. Chang Yen, D.R. McGaw and O. Headley, "Solar drying of west Indian ginger rhizome using a wire basket dryer," *Renewable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 409–418, 1996.
- [57] T.Y. Tunde-Akintunde, T.J. Afolabi and B.O. Akintunde, "Influence of drying methods on drying of bell-pepper (*Capsicum annum*)," *Journal of Food Engineering*, vol. 68, no. 4, pp. 439–442, 2005.
- [58] E. Kavak, Y. Bicer and F. Cetinkaya, "Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun," *Journal of Food Engineering*, 2005.
- [59] T. Koyuncu, U. Serdar, and I. Tosum, "Drying characteristics and energy requirement for dehydration of chestnuts (*Castanea sativa* Mill.)," *Journal of Food Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 165–168, 2004.
- [60] L. Ait Mohamed, M. Kouhila, A. Jamali, S. Lahsasni, N. Kechaou and M. Mahrouz, "Single layer solar drying behaviour of *Citrus aurantium* leaves under forced convection," *Energy Conversion and Management*, vol. 29, no. 2, pp. 1473–1483, 2005.
- [61] D. Gudiño, "Estudio comparativo de varios secadores solares tipo charola en el proceso de secado de jamaica." ISES Forum, 2000.
- [62] I.T. Togrul and D. Pehlivan, "Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 413–425, 2004.
- [63] I. Montero, M.T. Miranda, A.R. Celma y S. Rojas, "Programación para el cálculo numérico de propiedades psicrométricas." IV Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica. Logroño, La Rioja, 2005.
- [64] J.I. Arranz Barriga, "Herramienta de Simulación de Procesos Aplicados al Secado Solar de Biomasa," *Proyecto. Universidad de Extremadura*, 2005.
- [65] A. Ayensu, "Dehydration of food crops using a solar convective heat flow," *Solar Energy*, vol. 59, no. 4-6, pp. 121–126, 1997.
- [66] G.S. Mittal and J. Zhang, "Artificial Neural Network-based Psychrometric Predictor," *Biosystems Engineering*, vol. 85, no. 3, pp. 283–289, 2003.
- [67] A.K. Sing, H. Singh, S.P. Singh and R.L. Sawhney, "Numerical calculation of psychrometric properties on a calculator," *Building and Environment*, vol. 37, no. 4, pp. 415–419, 2002.

- [68] P.W. Egolf, B. Frei and R. Fuster, "Thermodynamics of moist air: contribution to error estimates," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 1–19, 2000.
- [69] R. Yun, Y. Kim and M. Min, "Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate," *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, no. 3, pp. 362–371, 2002.
- [70] G.N. Tiwari, *Solar Energy. Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Alpha Science International Ltd., New Delhi, India, 2002.
- [71] M. Augustus Leon, S. Kumar and S.C. Bhattacharya, "A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 4, pp. 367–393, 2002.
- [72] O.V. Ekechukwu and B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, no. 6, pp. 615–655, 1999.
- [73] J.G. Brammer and A.V. Bridgwater, "Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 3, no. 4, pp. 243–289, 1999.
- [74] T. Kudra and A.S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies*. Marcel Dekker, Inc, New York, 2002.
- [75] K.J. Chua and S.K. Chou, "Low-cost drying methods for developing countries," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 14, no. 12, pp. 519–528, 2003.
- [76] M. Grupp, H. Bergler, M. Owen and G. Schröder, "Comparative test of solar dryers," *TDC Serial Report 2/95. PSA - CIEMAT*, 1995.
- [77] L.H. Bériz, *Secadores solares para productos agropecuarios e industriales*. Centro de Investigaciones de Energía Solar, La Habana, Cuba, 1993.
- [78] U. Luboschik and P. Schalaajda, "Diseño, construcción y resultados de seguimiento de dos secaderos solares de tamaño medio en Alemania y España usando convección natural," *Technical Report PSA - CIEMAT*, 1990.
- [79] A. Bellevue, "A survey of solar agricultural dryers," *Brace Research Institute. Technical Report*, 1975.
- [80] J.C. Hollick, "Commercial scale solar drying," *Renewable Engineering*, vol. 16, no. 1-4, pp. 714–719, 1999.

- [81] G. Wisniewski, "Market development of the solar crops drying in Poland and Europe," *Renewable Energy*, vol. 16, no. 1-4, pp. 1278–1283, 1999.
- [82] J. Blanco Gálvez, "Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua," *Tesis Doctoral. Plataforma Solar de Almería. CIEMAT*, Abril, 2002.
- [83] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Academic Press, 1983.
- [84] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Edition*. John Wiley and Sons, Inc., 1991.
- [85] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Procesos Térmicos en Energía Solar*. Editorial Grupo Cero, Madrid, 1979.
- [86] R. Bernard, G. Menguy and M. Schwart, *La radiación solar. Conversión térmica y aplicaciones*. Technique and Documentation. Ed. Lavoisier, 1982.
- [87] W.A. Beckman, S.A. Klein and J.A. Duffie, *Proyecto de sistemas térmico-solares por el método de las curvas-f*. Editorial Index (Maveco), Madrid, 1984.
- [88] E. Alaiz, *Energía solar. Cálculo y diseño de instalaciones*. Sección de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales, Madrid, 1981.
- [89] D.R. Pangavhane and R.L. Sawhney, "Review of research and development work on solar dryers for grape drying," *energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 1, pp. 45–61, 2002.
- [90] C. Palaniappan and S.V. Subramanian, "Economics of solar air pre-heating in south indian tea factories: a case study," *Solar Energy*, vol. 63, no. 1, pp. 31–37, 1998.
- [91] O.V. Ekechukwu and B. Norton, "Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, no. 6, pp. 657–667, 1999.
- [92] G.N. Tiwari and S. Suneja, *Solar Thermal Engineering Systems*. Narosa Publishing House, New Delhi, India, 1999.
- [93] A. Abene, V. Dubois, M. Le Ray and A. Ouagued, "Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 15–22, 2004.



- [94] A. El Bouchairi, R.L. Luque y A.L. Pinto, "Análisis comparativo de la eficiencia de los colectores solares de aire." XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar (CIES 2004). vigo, España, 2004.
- [95] J. Prasad, V.K. Vijay, G.N. Tiwari and V.P.S. Sorayan, "Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric drying at village scale," *Journal of Food Engineering*, 2005.
- [96] J. Prasad and V.K. Vijay, "Experimental studies on drying of Zingiber officinale, Curcuma longa l. and Tinospora cordifolia in solar-biomass hybrid drier," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 14, pp. 2097–2109, 2005.
- [97] E.A. Arinze, S. Sokhansanj, G.J. Schoenau, and F.G. Trauttmansdorff, "Experimental Evaluation, Simulation and Optimization of a Commercial Heated-Air Batch Hay Drier: Part 1, Drier Functional Performance, Product Quality, and Economic Analysis of Drying," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 63, no. 4, pp. 301–314, 1996.
- [98] E.A. Arinze, G.J. Schoenau and S. Sokhansani, "Design and experimental evaluation of a solar dryer for commercial high-quality hay production," *Renewable Energy*, vol. 16, no. 1-4, pp. 639–642, 1999.
- [99] S. Prakash, S.K. Jha and M. Datta, "Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers," *Journal of Food Engineering*, vol. 62, no. 3, pp. 305–313, 2004.
- [100] H.E.S. Fath, "Thermal performance of a simple design solar air heater with built-in thermal energy storage system," *Energy Conversion and Management*, vol. 36, no. 10, pp. 989–997, 1995.
- [101] A. Ahmad, J.S. Saini and H.K. Varma, "Effect of geometrical and thermophysical characteristics of bed materials on the enhancement of thermal performance of packed bed solar air heaters," *Energy Conversion and Management*, vol. 36, no. 12, pp. 1185–1195, 1995.
- [102] A. Ahmad, J.S. Saini and H. Varma, "Thermohydraulic performance of packed-bed solar air heaters," *Energy Conversion and Management*, vol. 37, no. 2, pp. 205–214, 1996.
- [103] C. Tiris, M. Tiris and I. Dincer, "Energy efficiency of a solar drying system," *International Journal of Energy Research*, vol. 20, no. 9, pp. 767–770, 1996.

- [104] C. Tiris, N. Ozbalta, M. Tiris and I. Dincer, "Thermal performance of a new solar air heater," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 22, no. 3, pp. 411–423, 1995.
- [105] C. Tiris, M. Tiris and I. Dincer, "Investigation of the thermal efficiencies of a solar dryer," *Energy Conversion and Management*, vol. 36, no. 3, pp. 205–212, 1995.
- [106] S.O. Enibe, "Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage," *Renewable Energy*, vol. 27, no. 1, pp. 69–86, 2002.
- [107] M.A. Karim and M.N.A. Hawlader, "Development of solar air collectors for drying applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 3, pp. 329–344, 2004.
- [108] A.A. El-Sebaei, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan and H.G. El-Gohary, "Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer," *Energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 16, pp. 2251–2266, 2002.
- [109] Y. Jannot and Y. Coulibaly, "The evaporative capacity as a performance index for a solar-drier air-heater," *Solar Energy*, vol. 63, no. 6, pp. 387–391, 1998.
- [110] J. Werther, M. Saenger, E.U. Hartge, T. Ogada and Z. Siagi, "Combustion of agricultural residues," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 26, no. 1, pp. 1–27, 2000.
- [111] B.M. Jenkins, L.L. Baxter, T.R. Miles Jr and T.R. Miles, "Combustion properties of biomass," *Fuel Processing Technology*, vol. 54, no. 1-3, pp. 17–46, 1998.
- [112] R.L. Bain, R.P. Overend and K.R. Craig, "Biomass-fired power generation," *Fuel Processing Technology*, vol. 54, no. 1-3, pp. 1–16, 1998.
- [113] R. Arjona Antolín, "Análisis del proceso de secado del alpeorrujo," *Proyecto. Universidad de Sevilla*, 1999.
- [114] D.A. Tillman, *The combustion of solid fuels and wastes*. Academic Press, San Diego, 1991.
- [115] A. Strehler, "Technologies of wood combustion," *Ecological Engineering*, no. 16, pp. S25–S40, 2000.

- [116] M. Ståhl, K. Granström, J. Berghel and R. Renström, "Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 6, pp. 621–628, 2004.
- [117] M.K. Krokida, E. Foundoukidis and Z. Maroulis, "Drying constant: literature data compilation for foodstuffs)," *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 3, pp. 321–330, 2004.
- [118] A.P. Vesilind and T.B. Ramsey, "Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge," *Waste Management and Research*, vol. 14, no. 2, pp. 189–196, 1996.
- [119] A. Dermiba, "Calculation of higher heating values of biomass fuels," *Fuel*, vol. 76, no. 5, pp. 431–434, 1997.
- [120] T. Cordero, F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol and J.J. Rodriguez, "Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis," *Fuel*, vol. 80, no. 11, pp. 1567–1571, 2001.
- [121] A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter and K. Varmuza, "Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition," *Analytica Chimica Acta*, vol. 544, no. 1-2, pp. 191–198, 2005.
- [122] P. Thipkhunthod, V. Meeyoo, P. Rangsunvigit, B. Kitiyanan, K. Siemanond and T. Rirksomboon, "Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses," *Fuel*, vol. 84, no. 7-8, pp. 849–857, 2005.
- [123] R. Castro Abengoza, "Estudio metodológico para la optimización del secado forzado de biomasa lignocelulósica, en secadero de bandejas, en función de su poder calorífico superior," *Tesis Doctoral. Universidad de León*, Octubre, 2000.
- [124] A.R. Celma e I. Montero, "Secado solar de residuos industriales de la aceituna," *Alimentación, Equipos y Tecnología*, vol. 197, pp. 122–126, 2005.
- [125] E. Kavak, "Evaluation of convective heat transfer coefficient of various crops in cyclone type dryer," *Energy Conversion and Management*, vol. 46, no. 15-16, pp. 2439–2454, 2005.
- [126] G.N. Tiwari, S. Kumar and O. Prakash, "Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jaggery," *Journal of Food Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 219–227, 2004.

- [127] S.I. Anwar and G.N. Tiwari, "Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 5, pp. 627–637, 2001.
- [128] S.I. Anwar and G.N. Tiwari, "Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying - an experimental study," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 14, pp. 1687–1698, 2001.
- [129] G. Mwithiga and J.O. Olwal, "The drying kinetics of kale (*brassica oleracea*) in a convective hot air dryer," *Journal of Food Engineering*, vol. 71, no. 4, pp. 373–378, 2005.
- [130] A.L. Gastón, R.M. Abalone, S.A. Giner and D.M. Bruce, "Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat," *Biosystems Engineering*, vol. 88, no. 2, pp. 175–185, 2004.
- [131] I. Doymaz, "Convective air drying characteristics of thin layer carrots," *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 3, pp. 359–364, 2004.
- [132] G.P. Sharma and S. Prasad, "Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, no. 4, pp. 609–617, 2004.
- [133] I. Doymaz, "Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (*Morus alba* L.)," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, no. 2, pp. 205–209, 2004.
- [134] S. Simal, A. Femenia, M.C. Garau and C. Rosselló, "Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit," *Journal of Food Engineering*, vol. 66, no. 3, pp. 323–328, 2005.
- [135] I. Doymaz, "Drying kinetics of white mulberry," *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 3, pp. 341–346, 2004.
- [136] A.D. Demir and K. Cronin, "Modelling the kinetics of textural changes in hazelnuts during roasting," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 13, no. 2, pp. 97–107, 2005.
- [137] I. Doymaz, "Thin-layer drying behaviour of mint leaves," *Journal of Food Engineering*, 2005.
- [138] S.J. Baalis and V.G. Belessiotis, "Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 449–458, 2004.

- [139] I. Doymaz, "Drying characteristics and kinetics of okra," *Journal of Food Engineering*, vol. 69, no. 3, pp. 275–279, 2005.
- [140] P.S. Madamba, R.H. Driscoll and K.A. Buckle, "The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 75–97, 1996.
- [141] I. Doymaz, "Drying behaviour of green beans," *Journal of Food Engineering*, vol. 69, no. 2, pp. 161–165, 2005.
- [142] W. Senadeera, B.R. Bhandari, G. Young and B. Wijesinghe, "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 58, no. 3, pp. 277–283, 2003.
- [143] D. Velić, M. Planinić, S. Tomas, and M. Bilić, "Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 97–102, 2004.
- [144] Md.A. Karim and M.N.A. Hawlader, "Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation," *Journal of Food Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 35–45, 2005.
- [145] P.N. Sarsavadia, R.L. Sawhney, D.R. Pangawhane and S.P. Singh, "Drying behaviour of brined onion slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 64, no. 3, pp. 219–226, 1999.
- [146] S. Simal, A. Mulet, J. Tarrazo and C. Rosselló, "Drying models for green peas," *Food Chemistry*, vol. 55, no. 2, pp. 121–128, 1996.
- [147] S. Mujaffar and C.K. Sankat, "The air drying behaviour of shark fillets," *Canadian Biosystems Engineering*, no. 47, pp. 3.11–3.21, 2005.
- [148] D.S. Sogi, U.S. Shivshare, S.K. Garg and A.S. Bawa, "Water sorption isotherm and drying characteristics of tomato seeds," *Biosystems Engineering*, vol. 84, no. 3, pp. 297–301, 2003.
- [149] P.C. Panchariya, D. Popovic and A.L. Sharma, "Thin-layer modelling of black tea drying process," *Journal of Food Engineering*, vol. 52, no. 4, pp. 349–357, 2002.
- [150] S. Prachayawarakorn, S. Soponronnarit, S. Wetchacama and K. Chinnabun, "Methodology for enhancing drying rate and improving maize quality in a fluidised-bed dryer," *Journal of Stored Products Research*, vol. 40, no. 34, pp. 379–393, 2004.

- [151] D. Doulia, K. Tizia and G. Gekas, "A knowledge base for apparent mass diffusivity coefficient (Deff) of foods: Physical properties of food database." *Nelfood.com*, 2000.
- [152] D. Jain and G.N. Tiwari, "Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 5, pp. 765–783, 2004.
- [153] E. Kavak, "Experimental determination of convective heat transfer coefficient of some agricultural products in forced convection drying," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 31, no. 4, pp. 585–595, 2004.
- [154] D. Jain and G.N. Tiwari, "Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II. Thermal modeling and experimental validation," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 17, pp. 2777–2793, 2004.
- [155] F. Freire, A. Figueiredo and P. Ferrao, "Modelling High Temperature, Thin Layer, Drying Kinetics of Olive Bagasse," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 78, no. 4, pp. 397–406, 2001.
- [156] N.A. Akgun and I. Doymaz, "Modelling of olive cake thin-layer drying process," *Journal of Food Engineering*, vol. 68, no. 4, pp. 455–461, 2005.
- [157] I. Doymaz, O. Gorel and N.A. Akgun, "Drying characteristics of the solid by-product of olive oil extraction," *Byosystems Engineering*, vol. 88, no. 2, pp. 213–219, 2004.
- [158] F. Göğüs and M. Maskan, "Air drying characteristics of solid waste (pomace) of olive oil processing," *Journal of Food Engineering*, vol. 72, no. 4, pp. 378–382, 2006.
- [159] A. Lopez, A. Iguaz, A. Esnoz and P. Virseda, "Thin-Layer Drying Behaviour of Vegetable Wastes from Wholesale Market," *Drying Technology*, vol. 18, no. 4-5, pp. 995–1007, 2000.
- [160] M.A. Basunia and T. Abe, "Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection," *Journal of Food Engineering*, vol. 47, no. 4, pp. 295–301, 2001.
- [161] L. Saravia, L. Zunino y R. Echazú, "Perfomance y diseño de secaderos-invernaderos de convección forzada." V Congreso Ibérico y IV Congreso Iberoamericano de Energías Renovables. Madrid, España, 1990.

- [162] V.T. Karathanos and V.G. Belessiotis, "Sun and Artificial Air Drying Kinetics Products," *Journal of Food Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 35–46, 1997.
- [163] A. Esper and W. Mühlbauer, "Solar Drying - An Effective Means of Food Preservation," *Renewable Energy*, vol. 15, no. 1-4, pp. 95–100, 1998.
- [164] T. Koyuncu, "An investigation on the performance improvement of greenhouse-type agricultural dryers," *Renewable Energy*, 2005.
- [165] T. Mahmutoglu, F. Emír and Y. Birol, "Sun solar drying of differently treated grapes and storage stability of dried grapes," *Journal of Food Engineering*, vol. 29, no. 3-4, pp. 289–300, 1996.
- [166] S. Touré and S. Kibangu-Hkembo, "Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 6, pp. 975–990, 2004.
- [167] J.K. Gigler, W.K.P. Van Loon and C. Sonneveld, "Experiment and modelling of parameters influencing natural wind drying of willow chunks," *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, no. 6, pp. 507–514, 2004.
- [168] I. Türk, "Determination of convective heat transfer coefficient of various crops under open sun drying conditions," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 30, no. 2, pp. 285–294, 2003.
- [169] R. Arjona, A. García and P. Ollero, "The drying of alpeorujo, a waste product of the olive oil mill industry," *Journal of Food Engineering*, vol. 41, no. 3-4, pp. 229–234, 1999.
- [170] R. Arjona, P. Ollero and F. Vidal, "Automation of an olive waste industrial rotary dryer," *Journal of Food Engineering*, vol. 68, no. 2, pp. 239–247, 2005.
- [171] D. Jain and G.N. Tiwari, "Thermal aspects of open sun drying of various crops," *Energy*, vol. 28, no. 1, pp. 37–54, 2003.
- [172] M. Condorí, R. Echazú and L. Saravia, "Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier," *Renewable Energy*, vol. 22, no. 4, pp. 447–460, 2001.
- [173] A. Belghit, M. Belahmidi, A. Bennis, B.C. Boutaleb and S. Benet, "Numerical study of a solar dryer in forced convection," *Revue Générale de Thermique*, vol. 36, no. 11, pp. 837–850, 1997.

- [174] L.M. Diamante and P.A. Munro, "Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 99–109, 1991.
- [175] A.R. Celma, I. Montero, M.T. Miranda y S. Rojas, "Simulación de secado solar de alperujos en diferentes modos de funcionamiento," *Alimentación, Equipos y Tecnología*, vol. 200, pp. 79–82, 2005.
- [176] A.R. Celma, S. Rojas, I. Montero y M.T. Miranda, "Diseño, construcción y funcionamiento de un secadero solar híbrido." IV Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica. Logroño, La Rioja, 2005.
- [177] A.R. Celma, I. Montero, M.T. Miranda y S. Rojas, "Comprobación experimental del funcionamiento de secadero solar mediante simulador de radiación." Congreso Nacional sobre las Energías Renovables (CONEERR). Murcia, 2005.
- [178] E.A. Arinze, S. Sokhansanj, G.J. Schoenau and V. Ellis, "Design and experimental evaluation of a new commercial-type mobile solar grain dryer provided with high efficiency fined-plate collector." WREC, 1996.
- [179] A. Midilli and H. Kucuk, "Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 7, pp. 1111–1122, 2003.
- [180] V. Demir, T. Gunhan, A.K. Yagcioglu and A. Degirmencioglu, "Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves," *Biosystems Engineering*, vol. 88, no. 3, pp. 325–335, 2004.
- [181] O. Yaldiz, C. Ertekin and H. Ibrahim Uzum, "Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes," *Energy*, vol. 26, no. 5, pp. 457–465, 2001.
- [182] S. Lahsanin, M. Koujila, M. Mahrouz and J.T. Jaouhari, "Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)," *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 173–179, 2004.
- [183] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali, "Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*)," *Energy*, vol. 29, no. 2, pp. 211–224, 2004.
- [184] I.T. Togrul and D. Pehlivan, "Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers," *Journal of Food Engineering*, vol. 55, no. 3, pp. 209–216, 2002.



- [185] H. Hallak, J. Hilal, F. Hilal and R. Rahhal, "The staircase solar dryer: design and characteristics," *Renewable Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 177–183, 1996.
- [186] S. Chemkhi, F. Zagrouba and A. Bellagi, "Drying of agricultural crops by solar energy," *Desalination*, vol. 168, no. 15, pp. 101–109, 2004.
- [187] S. Aboul-Enein, A.A. El-Sebaii, M.R.I. Ramadan and H.G. El-Gohary, "Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications," *Renewable Energy*, vol. 21, no. 3-4, pp. 505–522, 2000.
- [188] H.P. Garg and R. Kumar, "Studies on semi-cylindrical solar tunnel dryers: thermal performance of collector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 115–131, 2000.
- [189] M. Adsten, B. Perers and E. Wäckelgard, "The influence of climate and location on collector performance," *Renewable Energy*, vol. 25, no. 4, pp. 499–509, 2002.
- [190] S. K. K. Sopian, H.T. Liu and T. Veziroglu, "Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems," pp. 353–365.
- [191] E. Akpinar, A. Midilli and Y. Bicer, "Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 10, pp. 1689–1705, 2003.
- [192] I. Simate, "Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 435–453, 2003.
- [193] D.R. Pangavhane, R.L. Sawhney and P.N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer," *Energy*, vol. 27, no. 6, pp. 579–590, 2002.
- [194] M.N. Nijmenh, A.S. Ragab, M.S. Emeish and B.A. Jubran, "Design and testing of solar dryers for processing food wastes," *Applied Thermal Engineering*, vol. 18, no. 12, pp. 1337–1346, 1998.
- [195] B. Bena and R.J. Fuller, "Natural convection solar dryer with biomass back-up heater," *Solar Energy*, vol. 72, no. 1, pp. 75–83, 2002.
- [196] A.A. El-Sebaii, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan and H.G. El-Gohary, "Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables," *Energy*, vol. 27, no. 9, pp. 845–859, 2002.

- [197] D. Jain, "Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage," *Journal of Food Engineering*, vol. 71, no. 1, pp. 44–54, 2005.
- [198] V. Passamai y L. Saravia, "Túnel experimental para la obtención de curvas de secado." V Congreso Ibérico y IV Congreso Iberoamericano de Energías Renovables. Madrid, España, 1990.
- [199] K. Sacilik, R. Keskin and A.K. Elicin, "Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato," *Journal of Food Engineering*, vol. 73, no. 3, pp. 231–238, 2005.
- [200] B.K. Bala and J. L. Woods, "Thin layer drying models for malt," *Journal of Food Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 239–249, 1992.
- [201] L.M. Diamante and P. Munro, "Mathematical modelling of thin layer solar drying of sweet potato slices," *Solar Energy*, vol. 51, no. 4, pp. 271–276, 1993.
- [202] R. Torres Claros, "Modelado de un secadero de bentonita mediante energía solar térmica," *Proyecto. Universidad de Málaga*, 1999.
- [203] F.J. Garrido Adrián, "Diseño, modelado y simulación de un secadero solar de bentonita," *Proyecto. Universidad de Málaga*, 2000.
- [204] A. Iguaz Gaínza, "Modelización, simulación y control del proceso de deshidratación de vegetales trozados en un secadero rotatorio," *Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra*, 2002.
- [205] O.P. Dubey and T. Pryor, "A simulation model for deep bed solar drying." WREC, 1996.
- [206] O.P. Dubey and T.L. Pryor, "A user oriented simulation model for deep bed solar drying of rough rice." WREC, 1996.
- [207] A.R. Celma, S. Rojas e I. Montero, "Simulación térmica del proceso de secado," *Alimentación, Equipos y Tecnología*, vol. 192, pp. 86–90, 2004.
- [208] A.H. Bahansawy and M.E. Shenana, "A mathematical model of direct sun and solar drying of some fermented dairy products (Kishk)," *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 3, pp. 309–319, 2004.
- [209] B.K. Bala and J.L. Woods, "Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice," *Solar Energy*, vol. 53, no. 3, pp. 259–266, 1994.

- [210] T.F.N. Thoruwa, J.E. Smith, A.D. Grant and C.M. Johnstone, "Developments in solar drying using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials." WREC, 1996.
- [211] P.A. dos Santos Ribeiro Horta, "Concepção e Modelação Numérica de Secador Solar Passivo para Tratamento de Efluente de Processo de Dessalinização," *Tesis Doctoral. Universidad Técnica de Lisboa*, 2005.
- [212] E. Torres, J.J. Navarrete y J. F. Ramírez, "Análisis termodinámico de un secador solar directo." ISES Forum, 2000.
- [213] M.A. Hossain, J.L. Woods and B.K. Bala, "Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 729–742, 2005.
- [214] S. Chirarattananon, C. Chinporncharoenpong and R. Chirarattananon, "A steady-state model for the forced convection solar cabinet dryer," *Solar Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 349–360, 1988.
- [215] M. Condori and L. Saravia, "Analytical model for the performance of the tunnel-type greenhouse drier," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 467–485, 2003.
- [216] D. Jain, "Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application," *Journal of Food Engineering*, vol. 71, no. 2, pp. 170–178, 2005.
- [217] J. Salom, O. Ortega y J.J. Felipe, "Modelo matemático para secadores solares indirectos." VIII Congreso Ibérico de Energía Solar. Oporto, Portugal, 1997.
- [218] C. Ratti and A.S. Mujumdar, "Solar drying of foods: modeling and numerical simulation," *Solar Energy*, vol. 60, no. 3/4, pp. 151–157, 1997.
- [219] N. Sogari y L. Saravia, "Modelización de un secadero solar de maderas con circulación de aire por convección natural," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 7, no. 1, pp. 02.07–02.12, 2003.
- [220] L. Bennamoun and A. Belhamri, "Design and simulation of a solar dryer for agriculture products," *Journal of Food Engineering*, vol. 59, no. 2-3, pp. 259–266, 2003.
- [221] A. Hachemi, B. Abed and A. Asnoun, "Theoretical and experimental study of solar dryer," *Renewable Energy*, vol. 13, no. 4, pp. 439–451, 1998.

- [222] E. Torres-Reyes, J.J. Navarrete-Gonzalez and B.A. Ibarra-Salazar, “Thermodynamic method for designing dryers operated by flat-plate solar collectors,” *Renewable Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 649–660, 2002.
- [223] I. Farkas, I. Seresm and C.S. Meszaros, “Analytical and experimental study of a modular solar dryer,” *Renewable Energy*, vol. 16, no. 1-4, pp. 773–778, 1999.
- [224] E. Torres, J.J. Navarrete, B. Ibarra y M. Picón, “Metodología termodinámica para el diseño de secadores operados con calentadores solares planos.” ISES Forum, 2000.
- [225] A. Busso, N. Sogari, H.G. Lancelle, F. Arrieta, J.P. Tokeff y M. Leyes, “Optimización de un secadero solar de tipo gabinete: Evaluación y modelización del proceso de secado y tipificación del producto seco,” *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, 2001.
- [226] E. Petroustos, *Visual Basic 6*. Editorial Anaya Multimedia, Madrid, 1999.
- [227] F.J. Ceballos, *Visual Basic. Curso de programación (2ª edición)*. Editorial Ra-Ma, Madrid, 1999.
- [228] D.M. Bruce and S.A. Giner, “Mathematical modelling of grain drying in counter-flow beds: Investigation of crossover of air and grain temperatures,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 55, no. 2, pp. 143–161, 1993.
- [229] V. K. Srivastava and J. John, “Deep bed grain drying modeling,” *Energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 13, pp. 1689–1708, 2002.
- [230] I. Sezai and E. Tasdemiroglu, “Evaluation of the meteorological data in Northern Cyprus,” *Energy Conversion and Management*, vol. 36, no. 10, pp. 953–961, 1995.
- [231] D. Ivanova and K. Andonov, “Analytical and experimental study of combined fruit and vegetable dryer,” *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 8, pp. 975–983, 2001.
- [232] M. Reuss, St. Benkert, A. Aeberhard, P. Martina, G. Raush, B.V. Rentzell and N. Sogari, “Modelling and experimental investigation of a pilot plant for solar wood drying,” *Solar Energy*, vol. 59, no. 4-6, pp. 259–270, 1997.
- [233] I. Luminosu and L. Fara, “Determination of the optimal operation mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation,” *Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 731–747, 2005.

- [234] S. Bistoni, A. Iriarte y L. Saravia, “Análisis teórico de un colector solar de aire,” *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2003.
- [235] N.H. Abu-Hamdeh, “Simulation study of solar air heater,” *Solar Energy*, vol. 74, no. 4, pp. 309–317, 2003.
- [236] K. Skeiker, “Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein Schafer statistical method,” *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 1, pp. 99–112, 2004.
- [237] R. Román, R. Corvalán e I. Napoleoni, “Secador solar semi-industrial. Resultados experimentales.” V Congreso Ibérico y IV Congreso Iberoamericano de Energías Renovables. Madrid, España, 1990.
- [238] M. Collares-Pereira, J. Farinha and P. Horta, “Advanced solar dryer for salt recovery from brine effluent of desalination med plant.” ISES Solar World Congress. Solar Energy for a Sustainable Future. Göteborg, Sweden, 2003.
- [239] M. Collares-Pereira, J. Farinha and P.A. Horta, “Primeiros resultados experimentais do secador solar passivo para produção de sal e tratamento de efluente de dessalinização.” XII Congreso Ibérico y VII Congreso Ibero Americano de Energía Solar (CIES 2004). Vigo, España, 2004.
- [240] H. Hüseyin Öztürk, “Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating,” *Energy Conversion and Management*, vol. 46, no. 9-10, pp. 1523–1542, 2005.
- [241] A. Flores-Irigollen, J.L. Fernández, E. Rubio-Cerda and F.T. Poujol, “Heat transfer dynamics in an inflatable-tunnel solar air heater,” *Renewable Energy*, vol. 29, no. 8, pp. 1367–1382, 2004.
- [242] B.K. Bala, M.R.A. Mondol, B.K. Biswas, B.L. Das Chowdury and S. Janiai, “Solar drying of pineapple using solar tunnel drier,” *Renewable Energy*, vol. 28, no. 2, pp. 183–190, 2003.
- [243] A. Farhat, S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel and A. Belghith, “Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, no. 1, pp. 53–58, 2004.
- [244] M. Martins, A. Nogueira, E. Ataíde, S. Enoch, D. Loureiro, A.C. Costa, Á. Ramalho, J. Santos and L. Pestana, “Monitoring and control of an energetically efficient wood drying process.” EFITA WCCA 2005. Vila Real, Portugal, 2005.

- [245] A. Nogueira, E. Ataíde, M.J. Martins, S. Enoch, D. Loureiro, A. Costa, Á. Ramalho and J.Santos, “Simulation and control strategies for an energetically efficient wood drying process.” EFITA WCCA 2005. Vila Real, Portugal, 2005.