USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

TESE DE DOUTORAMENTO

DISEÑO, MODELO MATEMÁTICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADERO OPTIMIZADO CON ENERGÍAS LÍMPIAS

Emérita Delgado Plaza

DOCTORADO EN ENERGÍAS RENOVABLES
Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA
FACULTAD DE FÍSICA

SANTIAGO DE COMPOSTELA
AÑO 2014

TESE DE DOUTORAMENTO

DISEÑO, MODELO MATEMÁTICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADERO OPTIMIZADO CON ENERGÍAS LÍMPIAS

Asdo. .....

Emérita Delgado Plaza

DOCTORADO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA
FACULTAD DE FÍSICA

SANTIAGO DE COMPOSTELA

AÑO 2014

ÁNGELES LÓPEZ AGÜERA, PROFESORA TITULAR DEL AREA DE FISICA ATOMICA MOLECULAR Y NUCLEAR DE LA UNIVERSIDAD SANTIAGO DE COMPOSTELA

AUTORIZA a Dña. Emérita Delgado Plaza a presentar la tesis titulada "DISEÑO, MODELO MATEMÁTICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADERO OPTIMIZADO CON TECNOLOGÍAS LIMPIAS", para optar por el grado de Doctor, la cual ha sido realizada bajo mi dirección en el departamento de Física de Partículas en el marco del programa Doctoral de Energías Renovables y Sostenibilidad Energética.

Y para que así conste, se expide en Santiago de Compostela en Septiembre de 2014



Fdo. Dra. Ángeles López Agüera

Fdo Dña. Emérita Delgado Plaza

A mis padres:
María Eugenia Plaza Rosado
Héctor Delgado Zambrano

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a la Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno de la República del Ecuador , por la beca otorgada para mi formación académica de cuarto nivel ,a la vez por impulsar al fortalecimiento de la educación a los jóvenes Ecuatorianos.

De más profundo agradecimiento a la Prof. Dra. Ángeles López Agüera, por su disposición durante la elaboración de esta tesis. Por otro lado, por ser una excelente persona y amiga por sus valiosos consejos y enseñanzas que seguramente me servirán para continuar en mi futuro profesional.

A mis grades amigos que me han apoyado incondicionalmente durante el traslado del prototipo experimental y al transcurso de la elaboración de este trabajo; Juan Peralta , Ian Sosa, Vanessa Miramontes, Iago Rodríguez, Manuel Mayorga, Gagik Gyulumyan y Joao Domingues.

Y sin olvidarme de mi gran amigo , maestro y director del CDTS , el Dr. Alfredo Barriga por todas sus enseñanza y consejos durante muchos años.

RESUMEN

En determinadas épocas del año, en costas y lagos aparece una ingente cantidad de biomasa macroalgar, que afecta a los ecosistemas circundantes y acaba pudriéndose en la playa. Se trata de una biomasa de alto poder productivo en sectores que van desde la alimentación a productos farmacéuticos, fertilizantes e incluso biocombustibles que puede constituir una fuente de ingresos económicos a las comunidades localizadas en la línea costera.

Previo a su explotación, esta biomasa algar necesita sufrir un proceso de deshidratación o eliminación fraccionaria de humedad presente que permita su conservación prolongada, exalte su calidad y facilite su transporte. Este proceso de secado o deshidratación requiere una cantidad de calor constante que resulta energéticamente muy exigente, hasta punto que, en muchos casos, inhibe la viabilidad económica de su explotación. A esto hay que añadir los efectos medioambientales asociados cuando el aporte energético de debe a la utilización de energías convencionales. En los últimos años, el aumento en el costo de los combustibles y los problemas de la contaminación ambiental han originado la necesidad de innovar en el campo, en busca de alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

El trabajo que se presenta explora la utilización de sistemas de secado de alta eficiencia y uniformidad, alimentados por fuentes energéticas sustentables, mediante la construcción de un prototipo de cámara de secado de aporte de calor suplementario hibrido basado en energía solar térmica, solar fotovoltaica y/o aerotermia. Para ello, y como paso previo a la construcción del prototipo experimental optimizado, se ha procedido al diseño, simulación y modelamiento fluido dinámico (CFDs). Una vez construido, se ha caracterizado experimentalmente de modo exhaustivo tanto en pruebas controladas en laboratorio como en ensayos en ambientales reales. Durante los ensayos se han analizado las prestaciones y eficiencia del mediante la medida de parámetros tanto internos como externos que afecten al proceso y velocidad de secado (temperaturas, velocidad de viento, humedad, radiación, perdida de humedad, actividad de agua, espesor y distribución de carga de biomasa, consumo de energía, materiales y otros) determinándose las curvas de operación y de velocidad de secado de la biomasa, y los tiempos y eficiencia del secado y del secador. Como factor diferencial añadido, el trabajo se ha focalizado en un diseño innovador de fácil construcción y montaje que permita la utilización de materiales locales. La investigación realizada contribuirá tanto en el proceso de innovación, desarrollo y adaptación tecnológica de los sistemas de secado en el mercado nacional e internacional como a la utilización y afianzamiento de las energías renovables.

PALABRAS CLAVES: Macroalgas, secado, energía, solar, aerotermia, hibrido, isoterma de desorción.

ABSTRACT

At certain times of the year, there is an affectation on the local surroundings due to a large quantity of macroalgae biomass that bath shores and lakes around the world. This biomass has a high productive capacity on the research fields of food production, pharmaceutical, agrochemistry and even biofuels that could constitute as a source of economic income for the communities localized on the shore line.

Before the utilization of this biomass, the algae needs to suffer a process of dehydration or a factionary removal of humidity; this process allows the product for long term storage, quality enlightening and shipping easiness. The drying process or dehydration requires a large amount of constant heat, thus results a high energy consumption that in some point, in many cases, undermine the economic viability for its exploitation. Moreover the energy consumption implies an environmental impact due to utilization of conventional energy. On recent years, the increasing cost on fuels and the environment pollution have created the necessity to innovate on the field by using environmentally respectful and alternative energy.

The research presented explores the use of highly efficient and uniform drying systems, powered by sustainable energy sources, by the construction of a drying chamber prototype with heat input hybrid based on solar thermal and photovoltaic energy and low enthalpy geothermal energy. A Computer Fluid Dynamic (CFD) model was used, as a first step, in order to design the dryer. Once built, the dryer was experimentally characterized using laboratory controlled tests and real under ambient tests. During the experiments several internal and external parameters that affect the process and the drying speed were analyzed (temperatures, wind speed, flow, humidity, irradiation, humidity loss, water activity, biomass thickness and load distribution, energy consumption, between others) in order to determine the operation curves, the biomass drying speed and the drying efficiency.

As a differential factor added, the research is focused on an innovative design of easy construction and mounting that also allows the utilization of local materials. This work contributes on the process of innovation, development and technology adaptation on the drying systems on the national and international market as well as the strengthening and use of renewable energies.

KEY WORDS: macroalgae, drying, energy, solar, low enthalpy geothermal, hybrid, desorption isotherms.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Antecedentes 1

1.2 Problemática y Motivación 2

1.3 Presentación del estudio 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 5

2.1 Introducción 5

2.2 Deshidratación de la biomasa 6

2.2.1 Alga marina 6

2.2.1.1 Macroalgas en el litoral de Galicia (España). 7

2.2.1.2 Zona de la Costa de la provincia de Santa Elena (Ecuador). 9

2.2.2 El secado de la biomasa 12

2.2.3 Factores considerados en el proceso de secado. 13

2.2.3.1 Temperatura 14

2.2.3.2 Flujo de aire. 15

2.2.3.3 Contenido de Humedad. 15

2.2.3.4 Uniformidad del corte. 16

2.2.4 Cinética de secado. 17

2.2.4.1 Actividad de agua. 19

2.2.4.2 Isoterma de sorción. 20

2.2.4.3 Curva de secado. 21

2.2.4.4 Velocidad de secado. 22

2.2.4.4.1 Curva de velocidad de secado 22

2.2.4.5 Tiempo de secado 24

2.2.5 Parámetros físicos -químico del alga marina y métodos utilizados. 25

2.2.5.1 Parámetros físicos 25

2.2.5.2 Parámetros químicos. 25

2.3 EL SECADO Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES 27

2.3.1 Las Energías renovables. 27

2.3.1.1 Energía solar 29

2.3.2 Energía geotérmica. 33

2.3.2.1.1 Intercambiador aerotérmico. 34

2.3.3 Tecnología de secado. 35

2.3.3.1 Métodos de transmisión calor. 36

2.3.4 Consumo de energía utilizada en el proceso de secado. 37

2.3.5 Eficiencia térmica del secador. 38

2.3.6 Secadores convencionales. 39

2.3.7 Secaderos solares sencillos. 42

2.3.8 Secaderos híbridos 43

3. ANÁLISIS DE LA CINETICA DE SECADO DEL ALGA 45

3.1 Introducción 45

3.2 Protocolo de medición. 45
3.2.1 Equipos de medición. 46
3.3 Selección de la biomasa “Alga marina” 47
3.4 Metodología experimental. 49
3.4.1 Determinación de la base seca. 49
3.4.2 Determinación de la actividad de agua 50
3.4.3 Determinación de la humedad de equilibrio. 51
3.5 Resultados experimentales. 52
3.5.1 Isotermas de equilibrio. 52
3.5.2 Cinética de secado 56
3.6 Conclusiones. 64
4. DIMENSIONAMIENTO, SIMULACIÓN Y AMBITO CONSTRUCCIONAL DEL SECADERO EXPERIMENTAL 67
4.1 Introducción. 67
4.2 Energía Solar 68
4.2.1 Dimensionamiento de la cámara de secado. 68
4.2.1.1 Balance de masa y energía 68
4.2.1.1.1 Metodologías utilizadas para obtención del consumo energético. 70
4.2.1.1.2 Distribución del flujo de aire. 77
4.2.1.1.3 Tiempo teórico del secado. 77
4.2.2 Dimensionamiento y selección del colector solar. 78
4.2.2.1 Flujo de aire del colector 78
4.2.2.2 Balance de energía. 79
4.2.2.3 Selección del colector solar plano. 82
4.2.2.4 Posición optima de un panel térmico o fotovoltaico 82
4.2.3 Dimensionamiento y selección del sistema autónomo fotovoltaico. 88
4.2.3.1 Determinación del consumo eléctrico. 89
4.2.3.2 Recurso solar y posición optima del panel Fotovoltaico. 90
4.2.3.3 Dimensionamiento de los complementos del sistema aislado a la red. 92
4.2.3.3.1 Generadores fotovoltaicos 92
4.2.3.3.2 Sistema de acumulación 93
4.2.3.3.3 Calculo de la intensidad del servicio y selección de cables. 94
4.2.4 Eficiencia teórica del sistema 97
4.2.4.1 Eficiencia del secador. 98
4.2.4.2 Eficiencia en la eliminación del agua de la biomasa. 98
4.2.4.3 Eficiencia del colector solar. 98
4.3 Aerotermia (geointercambio de calor). 100
4.3.1 Características del suelo 101
4.3.1.1 Análisis del perfil de temperatura del suelo. 102
4.3.2 Dimensionamiento del intercambiador enterrado. 104
4.4 Modelamiento dinámico de flujo en el secador hibrido 108
4.4.1 Fundamentos teóricos del CFDs 108
4.4.2 Simulación de la Cámara de secado 109
4.4.2.1 Preparación de la simulación 110

4.4.2.2 Malla o Rejilla de Simulación (grid). 112
4.4.2.3 Solución del modelo 113
4.4.2.4 Resultados de la simulación. 113
4.4.3 Simulación del sistema de aerotermia. 117
4.4.3.1 Resultados de la simulación del modelo fluido dinámico 118
4.5 Prototipo experimental 120
4.5.1 Cámara de secado 120
4.5.1.1 Equipos complementarios 121
4.5.2 Construcción del intercambiador enterrado..... 124
4.5.3 Colector solar adaptado para aerotermia. 124
4.6 Conclusiones..... 125
5. PRUEBA EXPERIMENTAL EN LA CAMARA DE SECADO. 127
5.1 Introducción. 127
5.2 Protocolo de medición. 127
5.2.1 Instrumentación. 128
5.3 Metodología experimental. 130
5.3.1 Punto de medición y frecuencia..... 130
5.3.2 Metodología. 133
5.4 Resultados experimentales 135
5.4.1 Evaluación del secadero solar en condiciones controladas. 135
5.4.1.1 Secador con circulación natural e irradiación directa. 135
5.4.1.2 Secador con circulación forzada e irradiación directa. 138
5.4.2 Evaluación del secador híbrido en condiciones controladas 142
5.4.3 Evaluación de la cámara de secado térmica en condiciones ambientales. 151
5.4.4 Evaluación del secadero solar con el colector solar placa plana (Secador mixto) 155
5.4.5 Evaluación del Secador hibrido en condiciones ambientales. 157
5.4.6 Consumo de energía suministrado por el Sistema Fotovoltaico 161
5.4.7 Validación entre valores del ensayo experimental y simulado del modelo 163
5.5 Prueba experimental de un secador mixto utilizando energía aerotermia. 165
5.5.1 Instrumentación. 167
5.5.2 Metodología..... 167
5.5.3 Resultados experimentales 169
5.5.4 Comparación de resultados entre el modelo simulado y el experimental . 172
5.6 Capacidad tecnológica en el uso de alternativas de energías renovables 174
5.7 Conclusiones..... 176
6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SECADOR HIBRIDO EN LA FASE DE SECADO DE LA BIOMASA ALGAL 179
6.1 Introducción..... 179
6.2 Metodología experimental..... 180
6.2.1 Operación de secado y evaluación del prototipo experimental en condiciones controladas o de laboratorio. 181

6.2.2 Evaluación del prototipo experimental en condiciones climáticas libres. 182
6.3 Resultados experimentales. 184
6.3.1 Análisis de tipo de bandejas y distribución apropiada en los carros porta bandejas 184
6.3.2 Análisis de la cinética de secado de las muestras a distintos espesores... 187
6.3.3 Análisis del prototipo experimental en condiciones de laboratorio. 189
6.3.4 Análisis del funcionamiento del secador solar en condiciones climáticas ambientales 194
6.3.5 Análisis del funcionamiento del secador hibrido en condiciones climáticas ambientales 203
6.3.6 Eficiencia del proceso de secado. 206
6.3.7 Uniformidad y homogeneidad del proceso de secado. 208
6.4 Conclusiones 211
7. CONCLUSIONES GENERALES Y LINEAS FUTURAS 213
NOMENCLATURA 217
BIBLIOGRAFÍA 221
ANEXOS 229

ÍNDICE DE LÁMINAS

Lám. 2. 1 a) Sargassum , espagueti de mar, lechuga de mar. b) Laminaria o Kambu. c) Wakame. d) Roja. e) Codium. 8
Lám. 2. 2 a. Macroalgas pardas, b. Algas verdes 10
Lám. 2. 3 Costa Ecuatoriana: ubicación de punto de muestreo. 11
Lám. 2. 4 Tipo de humedad 16
Lám. 2. 5 Carta Psicrométrica 18
Lám. 2. 6 Clasificación de las Isotermas de sorción. 21
Lám. 2. 7 Deshidratación de producto con respecto al tiempo. 22
Lám. 2. 8 Curva de velocidad de secado de un sólido (kgh/m^2 vs humedad libre gH_20 /gss). 23
Lám. 2. 9 Consumo energético primario mundial 2011 27
Lám. 2. 10 Aprovechamiento tecnológico de la energía renovable en el mundo 2011. 28
Lám. 2. 11 Tasas medias de crecimiento del uso de la energía renovable y Biocombustibles durante el año 2012 a nivel mundial, Comparación realizada entre los 2007 -2012. 29
Lám. 2. 12 Espectro electromagnético de la radiación solar extraterrestre (NASA). 30
Lám. 3. 1 Sitio de muestreo. a. La Coruña, b. Baiona 48
Lám. 3. 2 a. Macroalgas pardas (Sargassum) . b. Macroalgas pardas (Laminaria). c . Macroalgas verde (Codium). 49
Lám. 3. 3 Medición de la actividad de agua aw en el medidor digital AQUA Lab. 51
Lám. 3. 4.Determinación del porcentaje de humedad; Termobalanza. y accesorios. 52
Lám. 3. 5. Isoterma de desorción del alga Sargassum, a_w (25ºC, presión a 1 atm). 54
Lám. 3. 6 Isoterma de desorción del alga Laminar, a_w (25ºC, presión a 1 atm). 55
Lám. 3. 7 Isoterma de desorción del alga Codium , a_w (25ºC, presión a 1 atm). 55
Lám. 3. 8 Variación de la masa con el tiempo para las muestras de algas Sargassum. 57
Lám. 3. 9 Variación de la masa con el tiempo para las muestras de algas laminaria. 57
Lám. 3. 10 Variación de la masa con el tiempo para las muestras de alga codium. 58
Lám. 3. 11 Humedad libre de las muestras del alga Sargassum. 59
Lám. 3. 12 Humedad libre de las muestras de alga laminaria. 60
Lám. 3. 13 Humedad libre de las muestras de alga Codium. 60
Lám. 3. 14. Curva de velocidad de secado de las muestras de algas Sargassum. 61
Lám. 3. 15 Curva de velocidad de secado de las muestras de algas Laminarias. 62
Lám. 3. 16 Curva de velocidad de secado de las muestras de algas Codium. 62
Lám. 3. 17 Cantidad de agua eliminada con respecto al tiempo en las muestras de algas Sargassum. 63
Lám. 3. 18 Cantidad de agua eliminada con respecto al tiempo en las muestras de algas Laminarias. 64
Lám. 3. 19 Cantidad de agua eliminada con respecto al tiempo en las muestras de algas Codium. 64
Lám. 4.1. Transferencia de masa y calor durante el periodo de velocidad de secado constante 74
Lám 4.2. Diseño de la cámara de secado. Condiciones de trasferencia de calor y masa. 76
Lám 4.3. Flujo de aire en la entrada de la cámara de secado 77
Lám 4.5. Angulo de declinación a lo largo del año. 83
Lám 4.6. Aproximación de los ángulos cenital y acimutal en función del día del año. 85
Lám 4.7. Ángulos para una superficie inclinada. 87

Lám 4.8. Análisis del ángulo de inclinación β para una placa inclinada 88
Lám 4.9. Ubicación del área de instalación del prototipo experimental 90
Lám 4.10. Irradiación solar global promedio entre los años 2005-2013. Estación Santiago EOAS 90
Lám 4.11. Paneles fotovoltaicos. 91
Lám 4.12: Eficiencia teórica calculada para una radiación de 1000 W, flujo volumétrico de 110m^3/h: Curva característica del rendimiento de un colector plano de aire. 99
Lám 4.13. Parámetros de funcionamiento del colector Solar Venti modelo SV14. 100
Fuente: Catalogo Solar Venti. 100
Lám 4.14 : Esquema de un intercambiador horizontal 101
Lám 4.15. Distancia del tubo desde la superficie del suelo. 102
Lám 4.16. Temperatura del fluido Tx durante 24 horas, para una temperatura de suelo Ts constante de 20 ºC 103
Lám 4.17. Estabilidad de la temperatura del suelo Ti analizado a distintas profundidades. 104
Lám 4.18. Geometría de los Modelos de cámara de secada analizada (modelo tipo domo) . 110
Lám 4.19. Visualización de la pantalla del Flow Simulation analysis tree 112
Lám 4.20. Malla 3D automática del modelo geométrico de la cámara de secado. 113
Lám 4.21. Salida del modelo: a) Velocidad de aire (m/s). b) Temperatura del fluido de la cámara de secado del modelo tipo. 113
Lám 4.22. Simulación del funcionamiento teórico del secador. a) Efecto invernadero b) Adaptación de una corriente de aire 1.4 m/s c) Adaptación de un colector solar y sistemas de aire d) Funcionamiento de sistema eléctrico y componente térmico. 115
Lám 4.23. Simulación del funcionamiento teórico del secador adaptando un cuerpo negro. a) efecto invernadero b) adaptación de una corriente de aire 1.4 m/s c) adaptación de un colector solar y sistemas de aire d) funcionamiento de sistema eléctrico y componente térmico. 116
Lám 4.24.Diferencia de la temperatura entre los modelos 3 y 4. 117
Lám 4.25. Comportamiento de la cámara de secado a) cámara sin cuerpo negro. b) adaptación de una placa 117
Figura 4.26. Malla en 3D del modelado; región de frontera y condiciones iniciales del captador 118
Lám 4.27. a) Simulación del perfil térmico del suelo. b) Calentamiento del fluido caloportador 118
Lám 4.28. Perfil del suelo durante el día. a) Temperatura promedia b) diferencia de temperatura por cada 10 cm de distancia entre punto de medición. 119
Lám 4.29. Construcción, ensamblaje del prototipo experimental 121
Lám 4.30. Conjunto del sistema de generación de aire caliente 122
Lám 4.31. Sistema de control: a) Termostato de doble canal y fusibles. b) Potenciómetro .. 122
Lám 4.32. Componentes del sistema aislado para generación eléctrica. 123
Lám 4.33. Colector solar 123
Lám 4.34. Etapa construcción del intercambiador horizontal para aerogeotermia. 124
Lám 4.35. Prototipo experimental de secado aprovechando la energía proveniente de la aerotermia 125
Lám. 5. 1. Esquema de ubicación de los sensores de medición 131
Lám. 5. 2. Ensayo realizado para condiciones controladas utilizando 2500 W de potencia de lámparas a 100 cm de distancia a la cámara. 132

Lám. 5. 3.Ensayo realizado para una radiación solar de 405 W/m^2, que incide sobre la pared y techo de la cámara y colector solar. 132
Lám. 5. 4.Ensayo realizado para una radiación solar de 405 W/m^2: Temperatura interna registrada en distintos puntos de muestreo. 132
Lám. 5. 5.Temperatura promedia alcanzada en la cámara de secado (convección natural) para radiaciones de 80 W/m^2 a 3.28 W/m^2 137
Lám. 5. 6.Temperatura promedia alcanzada en la cámara de secado (convección natural) para radiaciones de232 W/m^2 a 499.48 W/m^2 137
Lám. 5. 7.Tiempo de estabilidad en la cámara. 138
Lám. 5. 8.Influencia la radiación solar incidente sobre la cámara relacionada al incremento de temperatura interna. 138
Lám. 5. 9.Curva de tendencia de la temperatura interna de la cámara. a) Sin Placas 139
Negras b) Con Placas Negras 139
Lám. 5. 10.Variación de temperatura en la cámara para diferentes irradiaciones (W/m^2). a) sin placa metálicas, b) adaptación de placas negras 140
Lám. 5. 11.Temperatura promedia e incremento de temperatura de dos modelo estudiados con flujo de aire. a) Cámara de secado sin placas negras. b) Adaptación de placas negras, 140
Lám. 5. 12.Uniformidad de temperatura en la cámara de secado, sensores ubicados en 4 secciones (8 puntos de medición). 141
Lám. 5. 13.Ganancia promedia del sistema con circulación forzada con respecto a la irradiación. 141
Lám. 5. 14. Eficiencia del secadero solar con circulación forzada. Ta laboratorio 17-20 ºC. 142
Lám. 5. 15. Comparación de velocidad de aire con irradiación directa para sistema con flujo forzado. 143
Lám. 5. 16. a) Velocidad de aire en la salida del colector solar b) Temperatura de salida del colector solar, en condiciones ambientales para días con intervalos nublados. Temperatura ambiente 17 a 23 ºC. 144
Lám. 5. 17. Incremento de temperatura del colector solar, en condiciones ambientales para días con intervalos nublados. En el recuadro el rango de funcionamiento en laboratorio. 144
Lám. 5. 18. Pruebas controladas del colector solar a diferentes radiaciones y velocidades constantes 145
de 1.5 m/s. 145
Lám. 5. 19. Comparación de velocidad de aire adaptando fuentes de calor (resistencias). a) velocidad de aire, b) distribución de la temperatura interna de la cámara. 146
Lám. 5. 20. Sistema hibrido; temperatura de operación de la cámara a distintas radiaciones a) sin placas negras. b) Adaptación de placa negra. 146
Lám. 5. 21. Sistema hibrido; Incremento de temperatura interna de la cámara, Ta a 25 ºC. . 147
Lám. 5.22. Ganancia del sistema híbrido Ta = 20-25 ºC. 148
Lám. 5. 23. Comparación de la eficiencia teórica y eficiencia experimental del sistema híbrido. Condiciones de laboratorio Ta entre 20- 25 ºC. 148
Lám. 5. 24. Comparación de los ensayos realizados en la cámara en vació (Ta de 18 a 25 ºC). a) Temperatura interna de la cámara, b) incremento de temperatura. 149
Lám. 5. 25. Comparación de los ensayos realizados en la cámara en vació adaptando una placa captadora (Ta de 18 a 25 ºC). a) Temperatura interna de la cámara, b) incremento de temperatura. 149
Lám. 5. 26. Curva de operación del sistema hibrido sin cuerpo negro. 150
Lám. 5. 27. Curva de operación del sistema hibrido adaptando una placa de captación. 150

Lám. 5. 28. Influencia de las condiciones climáticas a la temperatura interna del secador solar. 152
Lám. 5. 29. Influencia de las condiciones climáticas en la temperatura interna del secador solar utilizando una placa captadora (placa negra). 153
Lám. 5. 30. Temperatura interna del secador solar con flujo forzado a) sin placa, b) placa absorbente. 153
Lám. 5. 31. Ganancia de la temperatura del secador solar indirecto. 154
Lám. 5.32. Eficiencia del secador solar indirecto. 154
Lám. 5.33 Temperatura interna de la cámara de secado adaptada con un colector solar a) sin placa absorbente, Ta de 17 a 23 ºC, b) con placa captadora, Ta de 13 a 19 ºC. 155
Lám. 5.34 Ganancia del secador con un colector solar a) son placa absorbente, Ta de 17 a 23 ºC b) placa metálica negra Ta de 13 a 19 ºC. 156
Lám. 5. 35. Eficiencia del secador mixto en condiciones climáticas al aire libre a) Sin placa captadora, Ta de 17 a 23 ºC , b) Con Placa captadora, Ta de 13 a 19 ºC. 156
Lám. 5.36. Colector solar a) temperatura de salida de aire caliente, b) Rendimiento del captador solar plano Ta 17 a 22 ºC. 157
Lám. 5. 37. Funcionamiento del Secador hibrido para un día con cielo despejado. 158
Lám. 5. 38. Prototipo experimental; secador híbrido 158
Lám. 5. 39. Secador hibrido: Temperatura de la cámara de secado. a) modelo sin placa, Ta de 22 a 28 ºC, b) modelo con placa, Ta 18 a 25 ºC. 158
Lám. 5. 40. Ganancia del secador hibrido a) sin placa captadora Ta de 22 a 28 ºC, b) placa captadora Ta 18 a 25 ºC. 159
Lám. 5. 41. Eficiencia del secador hibrido a condiciones climáticas al aire libre. 159
Lám. 5. 42 Influencia de la placa captadora en la cámara de secado con convección forzado. 160
Lám. 5. 43. Influencia de la placa captadora en el secadero solar mixto con colector solar 160
Lám. 5. 44.Influencia de la placa captadora en el Secador hibrido. 161
Lám. 5. 45.Funcionamiento de las resistencias eléctricas para un día despejado, Ta de 25 ºC. Humedad relativa de 60 % 163
Lám. 5. 46.Funcionamiento de las resistencias eléctricas para un día con cielo con intervalo nuboso, Ta de 22 ºC. Humedad relativa de 66 %. 163
Lám. 5. 47. Valores de temperatura interna y MBE. 165
Lám. 5. 48.Comparación de resultados para 500 W/m^2 a 25 ºC a) modelo simulado, b) modelo experimental 165
Lám. 5. 49. Prototipo experimental: Secador mixto conectado con energía aerotermia. 166
Lám. 5. 50.Perfil de temperatura en la superficie del suelo. 168
Lám. 5. 51.Esquema unifilar del sistema de aerotermia conectado al secado. 169
Lám. 5. 52. Perfil de la temperatura de superficie del suelo. Medición realizada durante 24 horas. 169
Lám. 5. 53 Temperatura del aire de salida proveniente del intercambiador enterrado. 170
Lám. 5. 54.Temperatura del aire de salida del intercambiador horizontal. 171
Lám. 5. 55.Temperatura de operación del secador mixto utilizando aerotermia. 171
Lám. 5. 56 Eficiencia del secador mixto con aerotermia. 172
Lám. 5. 57. Simulación del calentamiento del subsuelo con el tiempo. 173
Lám. 5. 58. Promedio RMSE y MBE del perfil de suelo. 173
Lám. 5. 59.Temperatura interna de un secadero solar con circulación natural. 174

Lám. 5. 60 Variación del calor útil para los diferentes ensayos realizados (modelos con placas negras). 176
Lám 6. 1. Pruebas experimentales y selección de bandejas 184
Lám 6. 2 Variación del peso con respecto al tiempo. 185
Lám 6. 3 Variación temporal de la humedad en relación al tipo de bandeja utilizada 186
Lám 6. 4 Ratios de humedad frente al contenido de humedad en base seca. 186
Lám 6. 5 Variación temporal de la humedad según el espesor 188
Lám 6. 6 Tiempo de secado por espesor de biomasa. 188
Lám 6. 7. Influencia del espesor del producto en la velocidad de secado de la biomasa 189
Lám 6. 8. Temperatura de la cámara de secado con respecto al tiempo y la irradiación solar que llega en la superficie de la cámara de secado. 190
Lám 6. 9. Temperatura de la muestra y humedad en la cámara de secado con respecto al tiempo de deshidratación. 191
Lám 6. 10. Variación del peso de la biomasa con respecto al tiempo de secado. 191
Lám 6. 11. Variación temporal de la humedad según la temperatura por efecto de la Irradiación. 192
Lám 6. 12. Ratios de humedad frente al tiempo de secado. 192
Lám 6. 13. Velocidad de secado de la biomasa a distintas irradiacione 193
Lám 6. 14. Consumo de energía por hora de operación con respecto a la variación temporal de humedad. 193
Lám 6. 15. Temperatura, humedad y radiación que fue expuesta la muestra al secado natural y secado artificial. 195
Lám 6. 16. Comparación entre el secado natural y el secado de la muestra utilizando un secador solar. 195
Lám 6. 17 Variables climáticas en relación al ensayo 3 y 5 (Cámara de secado sin placa captadora). 197
Lám 6. 18 Variables climáticas en relación al ensayo 4 y 6 (Cámara de secado con placa captadora) 197
Lám 6. 19. Ensayo 1 y 2; Prueba de secado para 627.8 g. 198
Lám 6. 20. Ensayo 3 y 4 ; Prueba de secado para masa de 1000 g. 199
Lám 6. 21. Ensayo 5 y 6 ; Prueba de secado para una masa de 1333 g. 199
Lám 6. 22 Temperatura de salida del colector solar. Ensayo 1 y 2. 200
Lám 6. 23 Temperatura de salida del colector solar. Ensayo 5 y 6. 200
Lám 6. 24. Variación temporal de la humedad con respecto a la cantidad de masa secada en el secador solar mixto. 201
Lám 6. 25. Curva de secado experimental de la biomasa para tres cantidades de masas, deshidratadas en el secador solar. 201
Lám 6. 26. Curva de velocidad experimental de secado de la biomasa, deshidratadas en el secador solar. 202
Lám 6. 27 Consumo de energía por hora de operación con respecto a la variación temporal de humedad. 202
Lám 6. 28. Variación temporal de la humedad según la cantidad de masa a deshidrataren el secador híbrido. 204
Lám 6. 29.Curva de secado experimental de la biomasa para tres cantidades de masas, deshidratadas en el secador híbrido. 204
Lám 6. 30. Curva de velocidad experimental de secado de la biomasa, deshidratadas en el secador híbrido 205

Lám 6. 31. Curva de velocidad experimental de secado de la biomasa, deshidratadas en el secador híbrido adaptando placas negras 205
Lám 6. 32 Consumo de energía por hora de operación con respecto a la variación temporal de humedad. 206
Lám 6. 33. Eficiencia del secado en condiciones de laboratorio. 207
Lám 6. 34 Eficiencia del secado en condicionales ambientales. Secador solar. 207
Lám 6. 35 Mediciones de temperatura y humedad registrados en los ensayos del secado de las muestras sargassum y laminaria. 208
Lám 6. 36 Perdida de humedad por bandejas (627,8 g). 208
Lám 6. 37 Temperatura por bandejas (627,8 g). 209
Lám 6. 38 Variación de la temperatura en la bandejas. 210
Lám 6. 39 Puntos de muestreo de humedad y actividad de agua de la biomasa seca. 211

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Características de algas de las divisiones verdes, pardas y rojas 6
Tabla 2. 2 Especies de algas comunes encontradas en las costas Gallegas 7
Tabla 2. 3 Ubicación de estudio para identificación de praderas de algas 10
Tabla 2. 4 Especies identificadas por División en las 3 estaciones de muestreo entre octubre y noviembre del 2009. 11
Tabla 2. 5 Temperatura máxima tolerable para la deshidratación de producto. 14
Tabla 2. 6 Parámetros sugeridos para el tamaño de la muestra. 17
Tabla 2. 7 Comparación de los distintos métodos que determinan la humedad de un producto 25
Tabla 2. 8 Resultados del Análisis experimental (Porcentaje de lípidos en las tres distintas muestras) utilizando el método oficial de la AOAC 14.059. (1960) (Delgado,2011) 26
Tabla 2. 9 Composición bromatológica de algunas macroalgas del Caribe (Bula, 2004) 26
Tabla 2. 10 Porcentaje de humedad en base seca de la muestras en Galicia (Punin, 2005). 26
Tabla 2. 11 Tipos de paneles fotovoltaicos. 32
Tabla 2. 12 Parámetros determinantes del rendimiento de un intercambiador aerogeotérmico. 35
Tabla 2. 13 Poder calórico de algunas combustibles. 38
Tabla 2. 14 Clasificación de secadores. 40
Tabla 2. 15 Colectores solares sin concentración. 43
Tabla 2. 16 Las energías renovables en sistemas de secado. 43
Tabla 3. 1 Muestras de algas utilizarse para el análisis de cinética de secado 48
Tabla 3. 2.Contenido de humedad de las muestras. Deshidratación a 50 ºC 52
Tabla 3. 3 Parámetros de ajuste del modelo GAB. Muestra de alga Sargassum. 55
Tabla 3. 4 Parámetros de ajuste del modelo GAB. Muestra de alga laminar. 55
Tabla 3. 5 Parámetros de ajuste del modelo GAB. Muestra de alga Codium 55
Tabla 3. 6. Tiempo de secado de las muestras a diferente temperatura. 56
Tabla 3. 7 Parámetros Iníciales para determinar las curva secado. 58
Tabla 4.1. Variables fijadas para el desarrollo del cálculo. 75
Tabla 4.2. Resultados teóricos obtenidos aplicando diferentes metodologías de análisis 76
Tabla 4.3. Resultado del flujo de aire del colector. 79
Tabla 4.4. Resultados obtenidos para la selección del colector solar 81
Tabla 4.5. Día Julio a partir del primero de Enero 83
Tabla 4.6. Mediodía solar (Santiago de Compostela) 84
Tabla 4.7. Parámetros de radiación solar promedios y albedo en una superficie horizontal para la localidad de Santiago de Compostela (kWh/m^2 día). 86
Tabla 4.8. Radiación solar mensual (Kw h/m^2 día) para distintos ángulos de inclinación de una placa solar. 88
Tabla 4.9. Consumo eléctrico de la cámara de secado 89
Tabla 4.10. Pendiente optima del panel para un periodo de diseño, recomendada por IDAE. 91
Tabla 4.11. Inclinación del campo de panel. 92
Tabla 4.12. Resultados del campo de Captación (Paneles fotovoltaicos). 93
Tabla 4.13 .Cuadro de resultados del conjunto de Baterías 94
Tabla 4.14. Ecuaciones Empleadas 95
Tabla 4.15. Valores de conductividad (γ_{cond}) de los cables con respecto a la temperatura de operación 95

Tabla 4.16 . Resultados del cálculo de cables por secciones 96
Tabla 4.17. Corriente máxima de soporte del cable para baterías marca Trojan 97
Tabla 4.18. Propiedades térmicas de entrada. 106
Tabla 4.19 . ε Rugosidad absoluta de la tubería..... 107
Tabla 4.20. Valores de Coeficiente de resistencia $K_{p,c}$ en pérdidas singulares (constante adimensional) 107
Tabla 4.21. Dimensionamiento del intercambiador enterrado 107
Tabla 4.22. Ventanas generadas en el Wizard para la ejecución del proyecto 110
Tabla 4.23. Condiciones de fronteras, tipos de materiales y parámetros iniciales establecidos para la simulación del diseño del modelo completo. 112
Tabla 4.24. Resultados teórico de la cámara al vacio simulado en SolidWorks Flow Simulation. 114
Tabla 4.25. Resultados teórico de la cámara en vacio simulado en SolidWorks Flow Simulation adaptando una placa negra lateral. 115
Tabla 4.26. Variación de temperatura interna de la cámara al vacio en 8 puntos. 116
Tabla 4.27. Resultados del perfil de temperatura del suelo en los primeros 70 cm (SolidWorks Flow Simulation) 119
Tabla 5. 1 Pruebas controladas: Irradiación (W/m^2) equivalentes medidas en la superficie de la pared. 136
Tabla 5.2. Media y Desviaciones estándar de la temperatura interna en la cámara de secado sin placas captadoras. 151
Tabla 5.3. Media y Desviaciones estándar de la temperatura interna en la cámara de secado con placas captadoras. 151
Tabla 5. 4 Consumo de energía eléctrica del sistema auxiliar (resistencias eléctricas) 162
Tabla 5.5: Valores RMSE y MBE (%) del secador hibrido 164
Tabla 5.6 RMSE y MBE (%), de la temperatura de perfil del suelo 173
Tabla 5.7 Comparación de tecnologías de secado utilizando energías renovables 175
Tabla 6. 1 Sitios de recolección de la macroalga. 180
Tabla 6. 2 Porcentaje de humedad, masa final de tres muestras deshidratada en diferentes diseños de bandejas 185
Tabla 6. 3 Análisis de la distancia entre bandejas. 187
Tabla 6. 4 Tiempo de secado de la macroalga con respecto a distintas irradiaciones 190
Tabla 6. 5 Valores de energía total consumida y aprovechada obtenida de los ensayos experimentales 194
Tabla 6. 6 Resultados de los ensayos realizados por secado natural y secado artificial 196
Tabla 6. 7 Ensayo del tiempo de secado utilizando el secador solar mixto 198
Tabla 6. 8 Valores de energía total consumida y aprovechada en el proceso de secado (secador solar con placa captadora) 203
Tabla 6. 9 Ensayos de tiempo de secado utilizando el secador hibrido. 203
Tabla 6. 10 Valores de energía total consumida y aprovechada, así como eficiencia en el proceso de secado (Secador hibrido) 206
Tabla 6. 11 Resultados del secado de los ensayos realizados con la especie Sargassum 209
Tabla 6. 12 Resultados del secado de los ensayos realizados con la especie laminar. 210
Tabla 6. 13 Resultados de humedad y actividad de agua de la muestra seca. 211

CAPITULO 1.
INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Las algas constituyen uno de los grupos más variados de especies y además son productores de materia orgánica del medio marino, capaces de vivir en casi todo tipo hábitats marinos que ofrezcan iluminación y humedad suficiente. La gran capacidad de adaptación que pueden lograr algunas especies, hace que algunas sean consideradas invasivas en varias regiones del planeta. Las algas son especies que presentan un alto contenido en minerales y carbohidratos y, en menor porcentaje, proteínas y grasas. Entre los minerales encontramos fósforo, sodio, magnesio, potasio, y calcio, y algunos metales en forma orgánica. Justamente su capacidad para captar compuestos orgánicos, hace que puedan ser usadas como indicador de calidad medioambiental de los ecosistemas marinos y costeros, debido a su limitada movilidad y abundancia en los sistemas acuáticos. (María casa, 2004), (Punín ,2005), (Bula Meyer, 2004)

Sin embargo, su excesiva proliferación en ciertas épocas del año puede llegar a afectar negativamente a los ecosistemas circundantes. Por ejemplo, a nivel costero puede generar importantes impactos ambientales asociados a la acumulación de biomasa algar en las orillas de las playas transportadas por el efecto de las mareas. En muchas ocasiones, la cantidad es tal que sobrepasa la capacidad de limpieza o recolección por parte de las entidades públicas y privadas, por lo cual, la biomasa acaba pudriéndose o, en casos como Galicia, disminuyendo la productividad de zonas de pesca y/o marisqueo.

En este sentido, la presencia de esta biomasa algal acaba convirtiéndose en un importante problema para las comunidades que realizan sus actividades a nivel de la línea de costa. (Rubira, 2012).(Delgado,2012) En el año 2009, la Comisión de las Comunidades Europea según el reglamento (CE) Nº 710/2009 establece la disposición de la aplicación del reglamento (CE) nº 834/2007, en lo que se refiere a la fijación de disposición de la aplicación para la producción ecológica de animales de la acuicultura y de algas marina. En el titulo II del capítulo I - articulo 6, de este reglamente establece las normas de producción especifica aplicables a la recogida y cultivo de algas marinas. En el artículo 6 se hace referencia a la adecuación del medio acuático y plan de gestión sostenible en los centros de operaciones, recolección sostenible de algas silvestres para evitar impacto significativo en las zonas de recolección, cultivos de algas, medidas anti incrustaciones y limpieza del equipamiento en las instalaciones de producción.

La recogida, tratamiento y comercialización de las algas y sus derivados presenta un claro ejemplo de cadena de valor, siendo utilizadas en los últimos años para obtener productos con fines alimentarios, farmacológicos, energéticos y agrícolas, entre otros. En la actualidad existe un amplio mercado para ser la comercialización de esta materia prima que como tal presenta coste cero (recolección en playa). Sin embargo, no todo son ventajas, y el producto necesita ser deshidratado para su manipulación, siendo este proceso de secado relativamente

exigente energéticamente. Hasta el momento, las técnicas convencionales no han logrado un buen compromiso ni de costes ni de sostenibilidad.

1.2 PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN

Como se ha comentado en el apartado previo, el secado es un proceso que requiere gran demanda de energía tanto debido al calor latente de evaporación del agua que se requiere eliminar como y a la baja eficiencia energética que tienen los secaderos.(Samaneh y col, 2011).

Esta alta demanda energética lleva asociado un alto coste tanto económico como medioambiental hasta punto tal que, en muchos casos, hace peligrar la factibilidad de la cadena productiva. A nivel ambiental, el proceso de secado es una fuente de emisión de contaminantes y gases de efecto invernadero. A todo esto, se debe sumar la problemática asociada a la dependencia de combustibles fósiles y el aumento de los precios en el mercado mundial.

Todo lo anterior conlleva a la necesidad de desarrollar sistemas tecnológicos que permitan lograr la sostenibilidad medioambiental y por ende energética en los procesos de secado. En este contexto, el empleo de las fuentes de energías renovables pueden ser consideras como fundamentales en alcanzar dichos objetivos.

De hecho, actualmente las líneas de innovación asociadas a los procesos de secado están dirigidas principalmente a conseguir modelos de secadores menos costosos y compactos que puedan operar con varias fuentes de energía no convencional, y que se catalogan como "secadores híbridos". En paralelo, se trabaja en implementar equipos de secado con menores consumos energéticos asociados a sofisticados sistemas de control que permitan garantizar mayor seguridad y fiabilidad del proceso y menores costes.

Sobre la bases de las ideas expuestas, el objetivo último de este trabajo es el diseño, modelado, construcción y estudio de comportamiento de un sistema de secadero bajo un nuevo enfoque de "mixing energético" basado en fuentes renovables y medioambientalmente sostenible.

1.3 PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO

El presente trabajo, se centra en el modelado, diseño y construcción de un prototipo experimental de secadero. Para ello, inicialmente se presentan las características del prototipo experimental, junto con las variaciones de las propiedades de temperatura, humedad relativa, el flujo de masa de aire, y la eficiencia para los diferentes modos de funcionamiento. El modelo de operación térmico más eficiente será el híbrido, seguido por los modos pasivos y activos. Se presentan los resultados del análisis de la cinética de secado de la biomasa algal seleccionada. Por último, se muestran los resultados experimentales obtenidos en el proceso de secado la biomasa a diferentes regímenes de operación.

El secador híbrido propuesto, consiste de una cámara aislada construida con materiales transparentes adecuados que permitan el aprovechamiento de la radiación global del medio. El prototipo utiliza como fuentes energéticas asociadas un colector solar de placa plana y un

sistema auxiliar de calentamiento por sistemas eléctricos abastecidos por sistemas fotovoltaicos autónomos. En paralelo, el mismo prototipo experimental fue analizado utilizando un sistema de intercambiador enterrado (aerotermia) como fuente energética asociada.

El desarrollo del trabajo se comienza con una de la revisión de la literatura especializada publicada hasta la fecha y centrada en dos direcciones: la biomasa algar y los procesos de secado. En el primer apartado se identificaron, cuantificaron y caracterizaron algunas de las algas más comunes de las costas de Galicia. En el segundo, se estudiaron los parámetros directos e indirectos que influyen en el proceso de secado, sobre todo en aquellos que pudieran afectar las propiedades físicas y químicas de la biomasa. Se identificaron las diferentes tecnologías de secado y su capacidad de adaptación a fuentes de energías renovables.

A continuación, se detallan los diversos ensayos experimentales de la deshidratación del producto, entre los que figuran; pérdida de peso, humedad, tiempo de deshidratación, actividad de agua. En el análisis del producto se determina las isotermas de desorción de humedad, en tres diferentes especies de algas como son; *Laminar, Sargassum y Codium*. En las pruebas se determinan la relación que existe entre el contenido de humedad de equilibrio del alimento y la actividad de agua del mismo (a_w) a una temperatura y presión constante. Los resultados experimentales se ajustan al modelo más destacados en la bibliografía, siendo el propuesto por Brunnauer, Deming y Teller. Por otra parte, con estas pruebas nos permitirá obtener información relativa de los parámetros principales que influyen en el proceso de secado y seleccionar el tipo de diseño de secador más adecuado para deshidratar este tipo de biomasa.

Posteriormente, se presenta el proceso de diseño y construcción de un secadero convectivo de bandejas a escala prototipo (Secador hibrido solar-eléctrico y solar – aerotermico), siempre cumpliendo con los parámetros establecidos en el proceso de secado para macroalgas. Para ello, se realizó el análisis de transferencia de calor y masa en el sistema, determinando la energía necesaria, dimensiones y eficiencias que engloba el aporte energético del colector solar, cámara de secado, sistema auxiliar de calentamiento, e intercambiador de calor enterrado (aerotermia). En paralelo se modeló el funcionamiento del sistema, variando parámetros como la velocidad del aire, la temperatura de entradas en el modelo, la radiación solar y el flujo másico, siendo. Para este proceso se utilizó el software SOLID WORKS.

Tras la etapa de construcción y puesta en marcha del prototipo hibrido, se procedió a las pruebas experimentales pertinentes tanto en condiciones controladas en laboratorio como en condiciones ambientales. Esto permitió obtener una información muy detallada sobre el aporte e incremento de temperaturas, consumo energético, curva de operación, ganancia del equipo, eficiencia de la cámara, colector solar y del sistema auxiliar. Los ensayos se realizaron para cada uno de los sistemas energéticos propuestos (solar térmico-solar fotovoltaico y solar térmico-aerotérmico). Para completar este apartado, se ha realizado la validación del modelo computacional de flujo dinámico (CFD) a través de la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos controlados. Seguidamente, se presenta el análisis de los resultados experimentales obtenidos durante el secado del producto utilizando el

secador hibrido. Esto permitió determinar no solo la cinética de secado sino la homogeneidad de la pérdida de humedad de la biomasa en el proceso.

Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones derivadas. Una sección de anexos permite un mayor nivel de detalle.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

CAPITULO 2.
FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Las energías renovables contribuyen decisivamente a la garantía del suministro energético a largo plazo, en tanto que son fuentes energéticas autóctonas e inagotables. El recurso a las energías renovables autóctonas permite reducir la dependencia energética exterior contribuyendo a asegurar el suministro futuro. Por otra parte, un modelo energético poco diversificado y excesivamente dependiente del petróleo incrementa el riesgo de desabastecimiento ante cualquier tipo de crisis de suministro que pueda producirse en el futuro.(CIEMAT ,2007).

Actualmente se han realizado varios estudios referentes a la tecnología de las energías renovables aplicadas a equipos de secados, especialmente utilizando energía solar para la deshidratación de alimentos, obteniendo buenos resultados, en cuanto a su funcionamiento, pero no a su eficiencia. Por lo tanto, se continúa en una mejora progresiva de estos secadores adaptándolos con otras fuentes de energías.

El proceso de secado es considerado como el proceso más antiguo utilizado para la preservación de alimentos siendo uno de los métodos más comunes vigente de mayor importancia en todos los sectores para la producción de producto secos. Pero a su vez, es una de las etapas del proceso productivo más costosas, por la cantidad de energía requerida para la deshidratación del producto, llegando a representar la segunda fuente de egresos de una planta procesadora de alimentos.

En este apartado se realiza una revisión bibliográfica que aborda el análisis de los dos aspectos básicos que se tratarán en este estudio: el proceso de la deshidratación de la biomasa y la utilización de las energías renovables en los sistemas de secado.

En primer lugar se presenta un resumen de las diversas especies de macroalgas marinas que se encuentran en la zona del litoral de la provincia de Galicia (España) y la provincia de Santa Elena (Ecuador). Seguidamente se presenta los conceptos básicos del secado y los factores que influyen en este proceso, que servirán como marco de referencia a tomar en consideración para desarrollar las pruebas experimentales a presentarse en los capítulos siguientes de esta tesis.

En la segunda parte de este capítulo se presenta un resumen general de la aplicación de las energías renovables a nivel mundial, el crecimiento en la aplicación y desarrollo de la tecnología (Solar térmica, fotovoltaica, geotermia). Finalmente, se describen las tecnologías de secado existentes que utilizaremos como punto de partida para la selección del sistema más adecuado en el secado de la biomasa macroalgar.

2.2 DESHIDRATACIÓN DE LA BIOMASA

2.2.1 Alga marina

Las macroalgas marinas son organismos acuáticos de naturaleza vegetales sea de agua salada o agua dulce cuyo cuerpo está representado por un talo. Son en su mayoría bentónicas, es decir, viven adherida a un sustrato. Son autótrofos, lo que significa que realizan fotosíntesis a través de la clorofila. Las macroalgas se pueden clasificar en tres grandes grupos; algas verdes (División Chlorophyta), algas pardas (División Phaeophyta) y las algas rojas (División Rhodophyta). (Tapia, 2002)

Las macroalgas marinas, se caracterizan por carecer de tallos, hojas, flores, raíces y sistemas vasculares verdaderos. Se reproducen por via asexual y sexual. Se anclan a objetos sólidos mediante un órgano llamado hapterio o háptero. Las algas marinas, absorben los nutrientes directamente del agua, fabricando su alimento a través de la fotosíntesis. La mayoría de las algas son capaces de elaborar sustancias orgánicas a partir del dióxido de carbono (CO_2) y de sustancias inorgánicas disueltas en el agua.

La reproducción de las algas tiene varias ventajas en el ecosistema, principalmente por ser el primer eslabón dentro de la cadena trófica en los ambientes acuáticos.

En referencia de los nutrientes, las algas son ricas en: proteínas, minerales y vitaminas fundamentales en nuestra alimentación diaria. Además, contienen yodo y minerales que son necesarios para el suelo en tierras desmineralizada por cultivos intensivos.

Las cifras globales de producción de algas registrada por la FAO fue de 23,8 millones de toneladas para el año 2012, de las cuales el 50 % se destinaron a la alimentación humana, consumida especialmente en países asiáticos, donde constituyen una alternativa como fuente de alimentación. En Galicia, por su condición geográfica costera se pueden encontrar variedad de especies de algas pardas y rojas como son; *Laminarias ochroleuca* (kombu), *Sargassum , Undaria pinnatífida* (Wakame), *Himamthalia elongata* (espagueti de mar). Entre las algas rojas se encuentran; *Palmaria palmata* (Dulse) , *Porphyra umbilicalis* (Nori) (Punín Crespo, 2005).

Tabla 2. 1 Características de algas de las divisiones verdes, pardas y rojas

División Phaeophyta (Phaeophyceae) - Algas Pardas	División Chorophyta (Chlorophyceae) - Algas Verdes	División Rhodophyta Algas rojas
La coloración parda es debida a la presencia de ciertos pigmentos carotenoides (fucoxantinas).	Coloración verde intensa que otorga la clorofila A y B.	La coloración se debe a la presencia del pigmento rojo ficoeritrina, constituidas por células conectadas generalmente por sinapsis, pueden aparecer de color verde, por pérdida de pigmentación.
Carecen de clorofila B, A, contiene clorofila C.	Contienen cloroplastos.	Al contener cloroplastos hay pigmentos rojos que acompañan la clorofila A y carotinoides.
Es de crecimiento rápido, y crece en grandes tamaños.	Conformado por pelos pluricelulares incoloros con rizoides, filamentos ramificados y flagelos gelatinosos.	Adherente a las rocas o a otras algas, crecen a mayores profundidades que otras algas.

Presenta una estructura pluricelular, formada por tejidos complejos, además cuenta con pigmentos fotosintéticos especiales.	Formada por cadenas de células cilíndricas y regulares, membrana gruesa, pared celular compuesta por celulosa.	Pluricelulares, las paredes celulares de la mayoría incluye una capa interna celulosa y una capa externa de carbohidratos
Contienen órganos llamados zoosporangios germinan que se encarga de la reproducción de la alga.	Se reproducen de forma vegetativa (por fragmentación y división celular), asexual (por esporas y zoosporas), y sexual por conjugación.	La células sexuales carecen de flagelos
Se utilizan como estabilizantes de la emulsión en la fabricación de helados, como fertilizantes, como fuente de alimentos ricos en vitaminas y para la obtención de yodo.	Constituyen una fuente de alimento (plancton) para otros organismos acuáticos y contribuyen al aporte de oxígeno atmosférico.	Se obtienen agar de ellas que son utilizados para cultivo de bacterias en laboratorio. Además, son utilizadas para varios tratamientos en beneficio de la salud (medicina), y para la alimentación.

Fuente: (Osorio, 2009), (Silvana Miranda, 2013)

2.2.1.1 Macroalgas en el litoral de Galicia (España).

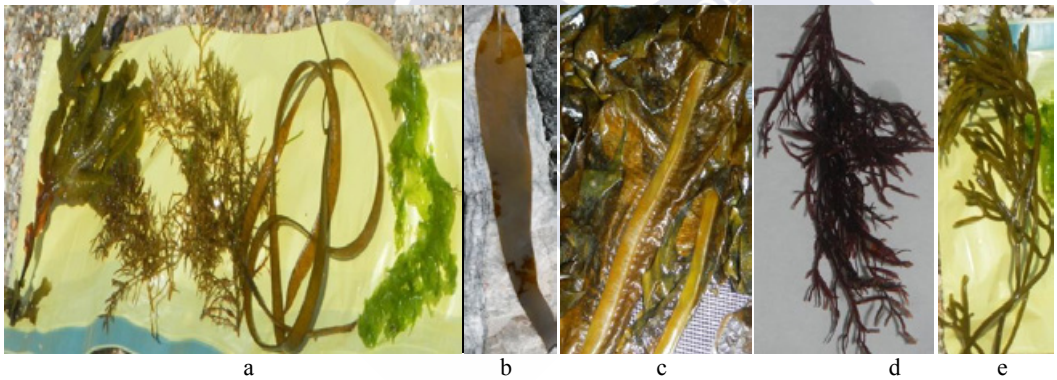
En el año 2008 en Galicia se recolectó unos 600 tones de algas para consumo humano y se han procesado 5.000 tones importadas para aditivos, según datos de la Consellería de Pesca. Desde el año 2004 han sido vendidas a través de lonjas en la provincia de Pontevedra y La Coruña unas 281 toneladas de algas (Lombardero, 2008). Entre las macro algas encontradas en la región se encuentran; las algas pardas, rojas y verdes, siendo las más recolectadas; Undaria pinnatifida (Wakame), Himanthalia eleongata (Espagueti de Mar) y las laminarias (Kombu).

Se estima que en Galicia existen unas 600 especies de macroalgas de que solo 400 han sido registradas (Bárbara, 2009). En un estudio realizado por Monserrat A. (2014) indica que el litoral gallego representa el 35% del total peninsular español donde crecen unas 600.000 toneladas de Kombu, 2.500 ton de musgo de Irlanda, y 3.000 ton de Fucus.

Tabla 2. 2 Especies de algas comunes encontradas en las costas Gallegas

Especies de algas	Descripción
Wakame (*Undaria pinnatifida*)	Pertenece a la división de algas pardas, color verde marrón claro. Viven en aguas profundas y llegan a medir 1.5 a 3 metros. Rica en calcio, yodo, proteínas y fibra.
Espagueti de Mar(*Himanthalia elongata*)	Alga parda, frecuente en litorales profundos y aguas agitadas. Rica en fibra y en hierro
Kombu (*Laminaria Ochroleuca, laminaria hyperborea*, *laminaria saccharina*)	Perteneciente al grupo de algas pardas de la familia de las Laminariáceas, tiene forma de una gran hoja plana, sostenida por un largo pecíolo que se agarra a las rocas submarinas mediante una especie de raíces de gran tamaño, color pardo y consistencia carnosa. Es rica en ácido glutámico y minerales especialmente calcio y magnesio.
Dulce (*Palmaria palmata*)	Alga de color rojo purpureo de la clase de Florideophyceae, familia Plamareaceae. Crecen pegadas por su rizoide tiene hojas planas y lisas que se expande gradualmente, se divide en segmentos anchos y se estima que pueden medir entre 1.5 a 3 metros. Son ricas en proteínas y potasio.
Nori (*Porphyra umbilicalis*)	También llamada Ova marina. De pequeño tamaño color rojo, marrón, grisáceo, se encuentra silvestre a orillas del mar, también crecen en rocas. Tiene proteínas, vitamina A, vitamina B12, hierro y Yodo.

Codium (*Codium tomentosum*)	Perteneciente a la división de las Chlorophyta, familia Codiaceae. Son de color verde carrasca, carnosas. Son dicotómicamente ramificadas de hasta 40 cm de largo en forman de una estructura esponjosa compacta, no calcárea.
Lechuga de mar (*Ulva rígida*)	Son de color verde, con una estructura foliácea, lobulada, formado por dos capas de células. Se encuentras fijadas al sustrato por rizoides que crecen como expansiones de las células basales del talo. Contiene vitaminas C, A, B1, B9. E y minerales.
Agar-agar Atlántica (*Gelidium sesquipedale)*	Son algas rojas ricas en mucilagos que posee capacidad de gelatinizar por lo que se suele emplear como espesante y gelificante (E-406) investigación (microbiología)
Musgo de Irlanda (*Chondrus crispus)*	Son algas rojas, también llamada carrapucho o pata de gallina, son muy abundante, en ocasiones forma céspedes, sobre superficies rocosas. Suelen utilizarse como espesante y postres (E-407).
Sargassum	Son alga parda de la clase Phaeophyceae, familia Sargassaceae. Habitan sobre rocas y en aguas con temperaturas entre 10-30 ºC, crece hasta 10 m de longitud. Tallo delgado que se ramifica alternamente en su parte superior, colocando aquí las ramas en espiral alrededor del eje, donde crecen otras ramas en forma de hojas con margen entero o algo serrado y sin nervios. Se utilizan en la elaboración de medicamentos y productos alimentarios.



a b c d e

Lám. 2. **1** a) Sargassum , espagueti de mar, lechuga de mar. b) Laminaria o Kambu. c) Wakame. d) Roja. e) Codium.

A continuación se citan algunas algas producidas y manufacturas en las costas gallegas:

Espagueti de Mar

Pertenece a la familia Himanthaliacea, comúnmente conocida como correa, judía de mar o espagueti de mar. Es un alga parda, que puede llegar a medir 1,5 m de longitud. (Punín, 2005). Está constituido por un pequeño disco pedunculado. Tradicionalmente esta especie se utiliza en especial para alimentación debido a sus notables características organolépticas y alto valor nutricional, por otra parte , también la utilizan para la agricultura a través de mezclas para abono orgánico.

Su óptimo desarrollo se encuentra en las rocas del litoral medio e inferior de costas moderadamente expuestas a la acción del oleaje, especialmente en la estación de verano cuando podemos observar los mayores valores de cobertura de biomasa, en cambio en invierno éstos son casi nulos. Esta especie es endémica de las costas atlánticas europeas:

desde Noruega e Islas Féroe, hasta las Islas Británicas, Canal de la Mancha y cuadrante noroccidental de la Península Ibérica. Es muy frecuente en las costas de Galicia, enrareciéndose hacia Asturias y País Vasco, de la misma forma su presencia disminuye a medida que descendemos por la costa portuguesa. (Verónica Lagos, 2004)

Laminarias

Provienen de la familia de las Laminariaceae, y existen diferentes especies de ellas, entre las que encontramos con el nombre común de ; kombu, hoja de mar, hoja de mayo, cachopo, algazo. (Punín, 2005).

Alcanza una longitud de al menos 3 m, se encuentra fijada al sustrato por gruesos rizoides ramificada, su forma es de lámina dividida en cintas de textura cartilaginosa lisa y lustrosa. Actualmente las macroalgas laminarias tiene una amplia distribución por toda la franja costera gallega desde Baiona hasta la Ría de Ferrol, con mayor presencia en rías bajas (Bañón, 2012). Son especie rica en fibra, vitaminas B y minerales y baja en grasa.

Sargassum

La Sargassum se considera como una alga invasora dentro de la región gallega .Habitan sobre roca intermareales inferiores y submareales de hasta 10 m, puede viajar y liberar plántulas en otros sitios mediante fragmentos y vesículas flotantes que permite desplazarse en las corriente de rápido crecimiento y gran tolerancia a cambios en el medio (Barbara, 2009).

En Galicia el período de crecimiento se produce entre febrero y marzo, el periodo reproductivo empieza entre los meses de marzo y abril. Se encuentra en mayor presencia en las rías bajas de Muros Aurosa, Pontevedra y Vigo, también encontrándose pero en menos cantidad en las rías de Cedeira, La coruña y Ferrol. Por la gran cantidad de biomasa que produce es una molestia para la población desde el punto ambiental; visual en el sector turístico, salud por la putrefacción y el mal olor generado, además del impacto ecológico de la zona.

Entre los problema generado por el crecimiento de las alga invasoras, se da en los banco marisqueros de la región, lo que podemos citar la ría de Pontevedra. En los últimos años entre los meses de primavera y verano se generan grandes problemas por el volumen de algas que cubren los bancos marisqueros, incluso utilizando maquinarias los empleados no pueden retiran completamente las algas antes que se produzca un efecto perjudicial para los mariscos. Las algas al cubrir los bancos provocan la muerte de los mariscos por anoxia por la ausencia de oxigeno, además que impiden el desarrollo del producto. Entre los proyectos ejecutados en esta zona podemos citar el proyecto de compost de algas que se encargan de recoger una cantidad aproximada de 650 toneladas de algas para el procesamiento y mezcla con estiércol, como medida de solución para eliminar un porcentaje mayoritario de algas. (López, 2013).

2.2.1.2 Zona de la Costa de la provincia de Santa Elena (Ecuador).

En el caso de las Costas Ecuatoriana tenemos la influencia de tres corrientes: *La corriente del Niño* proveniente del norte que se caracteriza por ser de aguas cálidas provocando el aumento de la temperatura superficial, esta corriente es pobre en nutrientes y baja salinidad, aparece entre los meses de diciembre a abril. La *corriente costera de*

Humboldt proveniente del Sur se caracteriza por sus aguas frías, aguas ricas en nutrientes y alta salinidad, produciendo una disminución en la temperatura superficial del mar y del aire, presenta en las costas entre los meses de mayo a noviembre. La subcorriente Ecuatorial que es llamada también Corriente de Cromwell, es una corriente subsuperficial que fluye hacia el Este.

Debido a los cambios de temperaturas del mar producto a la interacción de estas corrientes oceánicas y las condiciones del oleaje costero hacen complicado la reproducción de algas por toda la costa ecuatorial, por lo que solo se sectoriza en ciertas zonas.

En el año 2012 a través del proyecto PCI con fondos Europeos se realizaron los primeros levantamientos de información de línea base sobre especies de algas existentes en la región de la península de Santa Elena incluyendo ubicación de praderas.



a b

Lám. ***2***. 2 ***a***. Macroalgas pardas, b. Algas verdes

Durante la ejecución del proyecto en abril del 2012, se identificaron la existencia de praderas de tres tipos de algas específicamente en las playas de Ballenita y Santa Elena. En ballenita se identifico en la zona intermareal varias especies del grupo de las Phaeophytas (pardas): *Sargassum vulgare* y *Padina durvillaei*, con una densidad promedio de biomasa de 31.15 lbxm^{20,}, y Chlorophyta o algas verdes *Ulva lactuca*. En la zona de La Libertad se observó una pradera en crecimiento de la Chlorophyta *Ulva lactuca.* (Xavier Álvarez, 2012).

Tabla 2. 3 **Ubicación de estudio para identificación de praderas de algas**

Estación	Sitio	Ubicación geográfica
1	La Libertad	80°54´W-2°13´S
2	Ballenita	80°52´W-2°11´S
3	Ayampe	80°30´W-1°40´S
4	Puerto Cayo	80°38´W-1°16´S
5	Crucita	80°33´W-0°15´S
6	Pedernales	80°3´W0°4´N
7	Atacames	79°52´W-0°51´N

Fuente: Informe Proyecto de Cooperación Europea; Universidades participante USC, ESPOL, Universidad de Guayaquil.



Lám. 2. ***3*** Costa Ecuatoriana: ubicación de punto de muestreo.

En el estudio publicado por Katiuska Rubira (2012), se identificaron un total de 21 especies de algas marinas en la provincia de Santa Elena, entre los meses de octubre y noviembre del 2009, de los cuales 9 corresponde a la División Chlorophyta que se obtuvo su mayor abundancia en la zona de La Libertad, 8 especies a Rodophyta o algas rojas y 4 especies a Heterocontonphytas o algas pardas su mayor abundancia predomino en la Zona de Ballenita.

Tabla 2. 4 Especies identificadas por División en las 3 estaciones de muestreo entre octubre y noviembre del 2009.

Chlorophytas/ algas verdes		**Heterocontonphytas/ algas pardas**		**Rhodophytas/ algas rojas**	
Especie	**l/m**	**Especie**	**l/m**	**Especie**	**l/m**
Codium cervicornis	36	*Padina durvillaei*	157	*Champiacompressa*	11
Codium fragile	66	*Padina pavonica*	106	*Ceramiumpacificum*	12
Codium sp.	38	*Colpomenia sinuosa*	64	*Centroceras clavulatum.*	45
Codium faveolatum	50	*Sargassumecuatorianun*	89	*Gelidiumpusillum*	56
Codium capitatum	14			*Phyllophora spp.*	9
Cladophora prolifera	92			*Gracilaria textorii*	37
Ulva lactuca	179			*Gracilaria veleruae*	19
Ulva fasciata	136			*Gracilariopsis spp.*	127
Codium tomentosum	80				

Fuente: (Rubira, 2012)

Al no existir un estudio detallado de la región, no se conoce la existencia de cultivos de algas marinas para comercialización. En otros ámbitos, se conoce muy poco sobre la comercialización del producto realizada por pequeñas empresas, siendo la recolección directa en el sitio que se concentran en las zonas intermareales rocosas.

En cuanto a las macroalgas presentan una humedad entre el 70 % y 95 %. Por su particularidad, este producto se conserva deshidratándolo (disminución de contenido de humedad) por medio del secado, con el fin de lograr disminuir la actividad de agua del alimento, minimizando las reacciones bioquímicas de degradación del producto para prolongar el tiempo de consumo del producto terminado. La deshidratación en particular del alga marina depende de varios factores internos, como son; espesor, geometría del producto, temperatura de secado, humedad relativa y velocidad del aire caliente. El interés del secado se da primordialmente para aumentar el tiempo de conservación del producto, exaltación de la calidad, razones sanitarias o finalmente para incrementar su característica para otros procesos productivos. (Moreira, 1997), (Meyer,2004), (Lodeiro y col, 2005)

Es así, que el cultivo y la comercialización de la biomasa algar, se puede considerar como una industria en crecimiento constante hoy en día.

2.2.2 El secado de la biomasa

El proceso del secado es una operación que ocurre simultáneamente la transferencia de calor al producto por una fuente de calentamiento y la transferencia de masa de la humedad desde el interior del producto a su superficie, y, desde la superficie al aire caliente. Es decir, la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa (aire caliente) en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida sobre el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente de aire (Koyuncu, 2005) , (Kasatkin, 1985).

En otras palabras, el secado es una operación básica que consiste en reducir la humedad de un producto, de forma que el producto final presenta unas características muy diferentes a la inicial. (Montero, 2005).

Al proceso anterior, se lo denomina secado térmico donde el secado por aire caliente se lleva a cabo mediante los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección, utilizando gases secos de diverso origen o vapor de agua. En la mayoría de los casos la eliminación del agua del producto se consigue utilizando aire seco que elimina el agua de la superficie del producto. No obstante, esta no incluye los procesos de secado realizadas por medio de; liofilización, deshidratación osmótica y evaporación. (Ordosgoitía, 2007). (Denisse Jeria Heitmann, 2011)

Existen dos métodos de secado para remover la humedad de un sólido, siendo estos (Fito y col, 2001):

- ***Por evaporación***. Se da cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del sólido es igual a presión atmosférica, debiéndose al aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición.

- ***Por vaporización***. El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire.

En general, el secado de un producto húmedo se realiza con la finalidad de prolongar el almacenamiento o vida en anaquel del mismo, especialmente para un alimento deshidratado la inhibición del crecimiento microbiano y la actividad enzimática se reduce. Por otra parte, permite disminuir los gastos de trasporte, almacenamiento y embalaje, por la reducción del peso y el volumen del producto. En sí, los productos secos se consideran seguros en lo que respecta a la calidad biológica y microbiana cuando no se presentan plagas, insectos y otros contaminantes como hongos. En cuanto a la calidad nutricional, deben cumplir con criterios mínimos de cantidad y retención de nutrientes. (Calva, 2007), (Rincón , col , 2012)

La deshidratación de un producto, se realiza por medio de una cámara cerrada donde se ingresa el calor necesario y se controlan parámetros como; la velocidad de secado, humedad relativa dentro de la cámara, humedad del producto final, temperatura, rendimiento, tiempo de residencia del material y el consumo de energía.

Para cualquier operación de secado se deben de tener en cuenta los siguientes parámetros que influyen en la deshidratación del producto; actividad de agua y tamaño del producto, temperatura de transición, los mecanismos y teoría de deshidratación, a demás de los cambios físicos y químicos. Un inadecuado parámetro de secado incurre en cierta manera, en un alto consumo energético representando elevados costos de operación y por otro lado un daño irreversible a la textura del producto ocasionando encogimiento, cocción lenta y rehidratación incompleta. (Ordosgoitía, 2007), (Tinoco, ,2010)(Samaneh,2011).

2.2.3 Factores considerados en el proceso de secado.

El proceso de secado con aire caliente, continua siendo el método más económico y utilizado para la deshidratación del alimento con respecto a otros procesos empleados para el mismo fin, lo que conlleva a muchas investigaciones sobre la mejora en técnicas de deshidratación.

Durante la deshidratación del producto se pueden presentar cambios físico y químicos tales como: decoloración, pérdida de textura , forma física, pérdida de sustancias volátiles, perdidas de cualidades nutritivas, pérdida de peso ,composición estructural de las muestras, y rendimiento de los lípidos , estos cambios se dan debido a la transferencia de calor y masa, por las temperaturas del proceso y las características físico-químicos del producto (Tania Váquez, 1997). Por todo esto, si un producto ha sido expuesto a altas temperaturas o inadecuada deshidratación, el producto procede a deteriorarse en el sitio de almacenamiento, lo que conlleva a pérdidas económicas al empresario.

Es importante indicar, que el sólido húmedo al ser sometido a un proceso de secado, presenta dos subprocesos:

- Transferencia de calor entre el flujo de aire caliente y el producto que pretende eliminar el agua en forma de vapor en la superficie del sólido, para ello se debe

tener en consideración un control importante en la temperatura, flujo de aire, humedad, área de la superficie expuesta al calor y tamaño del producto.

- Transferencia de humedad interna del sólido hacia la superficie de éste y su subsecuente evaporación. El movimiento de la humedad dentro del solido se encuentra en función de su temperatura, contenido de humedad y naturaleza física del sólido. (Ortiz, 2003)

Como ha venido indicando, durante el secado la temperatura y la velocidad del aire caliente deben de ser las adecuadas para evitar pérdidas del material o largas horas de secado innecesarias.

2.2.3.1 Temperatura

La temperatura de secado es uno de los parámetros importante a conocer para la deshidratación de la biomasa, con el fin de evitar que se produzcan cambios físicos químicos degradando el producto. Se considera que una temperatura de bulbo seco constante en el flujo de aire mejorará la uniformidad del secado, evitando lo anteriormente expuesto. (Fito y col, 2001).

En referencia a las macroalgas se establecen temperatura máximas de secado entre 45º a 65 ºC. Si la temperatura se sobrepasa al valor antes indicado el valor nutricional, el color y el sabor de las algas se degradarán rápidamente. En referencia de la humedad del producto, las algas presentan humedades en torno de los 70 % a 95 %, lo que se hace necesario para su conservación un porcentaje en base seca del 20 al 15% de humedad. (RobertoA. Lemus, 2008), (Xavier Álvarez, 2012).

Para dar una idea del contenido de humedad y la temperatura de secado de esta especie (macroalga marina) a continuación se presenta una tabla con los productos alimenticios con similares contenidos de humedad y las temperaturas recomendadas para su deshidratación.

Tabla 2. 5 Temperatura máxima tolerable para la deshidratación de producto.

Producto	Temperatura máxima de secado (°C)	Humedad inicial (%)	Humedad de conservación (%)
Tubérculos			
patata	55	75	13
Hortalizas			
cebolla	55	80	4
hortaliza en hojas	50	80	10
tomate	55	95	8
repollo/col	55	94	4
zanahoria	60	70	5
pimiento	60	86	5
ajo	55	80	8-10
Frutas			
manzana	50	84	14
uva	55	80	15-20

Fuente: (Martín Almada, 2005), (José Neira, 2009)

2.2.3.2 Flujo de aire.

Otro factor importante que se debe controlar durante el proceso de secado es el flujo o la velocidad del aire caliente. Siendo el aire el medio encargado de transportar la humedad que despide la superficie del producto.

Para obtener un producto seco y uniforme es necesario garantizar una circulación constante del aire caliente por todo el producto. Por lo tanto, se debe controlar el flujo de aire proveniente de los sistemas de ventilación, así como las propiedades psicométricas del aire como son; la humedad y la temperatura de entrada del aire que ingresa a la cámara de secado.

Cabe agregar que la velocidad del aire para el secado de alimentos oscila entre valores de 0.7 a 2 m/s dependiendo del material a secar, tamaño y la longitud de la cámara (Fito y col , 2001). Por ejemplo, para secaderos solares con circulación por convección natural la velocidad del aire estaría entorno de 0,4 a 1 m/s y para secaderos solares con circulación forzada los valores estarían alrededor de 0.5 a 1 m/s. (AgroWaste, 2013)

2.2.3.3 Contenido de Humedad.

El contenido de humedad en un sólido es importante conocer antes que el producto sea deshidratado. Por lo que resulta oportuno determinar la humedad del producto en una de las diferentes condiciones como; humedad en base húmeda, humedad en base seca, humedad libre, humedad límite y humedad en el equilibrio.

A continuación se realiza una descripción referente a cada uno de estos términos.

Contenido de humedad en base húmeda. Definido como el contenido de humedad de un sólido. Se define el porcentaje de humedad como el porcentaje en peso del agua presente en el producto sobre unidad de peso del material sin secar, X , (kg humedad/kg sólido húmedo).

$$X' = \frac{W_w}{W} = \frac{W - W_s}{W}\, x\, 100 \qquad (2.1)$$

Donde W_w, es la cantidad de agua en el producto húmedo (kg), W es el peso total del sólido húmedo en un tiempo determinado (kg) , W_s es el peso del sólido seco (kg).

Contenido de humedad en base seca. Se define como el porcentaje en peso de agua presente en el producto sobre unidad de peso del sólido seco, X, (kg humedad/kg sólido seco).

$$X = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W - W_s}{W_s}\, x\, 100 \qquad (2.2)$$

Humedad en el equilibrio X^*. Se describe como la humedad de una sustancia que se encuentra en el equilibrio con el vapor contenido en el agente de secado.

Humedad limite. Se describe como la humedad contenida en una sustancia ejerciendo una presión de vapor menor a la del líquido puro a cierta temperatura.

Humedad no límite. Se describe como la humedad contenida en una sustancia ejerciendo una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido a la misma temperatura.

Contenido de humedad libre. Definido como la humedad interna de un sólido que esta suelta. Se describe como el contenido de la humedad de un sólido en base seca con respecto a la diferencia del contenido de la humedad cuando se alcanza el equilibrio. X_L .

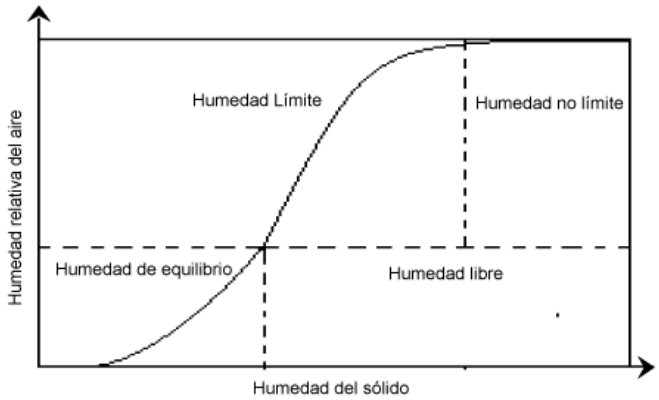
$$X_L = X - X^* \tag{2.3}$$

Donde X_L, es el contenido de humedad libre en función del tiempo t en horas

Contenido crítico de humedad. Se describe como el contenido de humedad de un sólido que presenta cambios en las condiciones de secado, es decir, pasando de un secado a velocidad constante a una velocidad decreciente.

***Humedad superficial de un sólido*:** Definiéndose como el liquido que existe en la capa externa del solido debido a los efectos de tensión superficial.

Con respecto a los tipos de humedades antes mencionadas, a continuación se presenta una grafica representativa de estas, en relación de la humedad del solido con respecto a la humedad relativa del aire (Lám. 2.4)



Lám. 2. 4 Tipo de humedad
Fuente (Moo, 2011)

2.2.3.4 Uniformidad del corte.

La uniformidad del corte se relaciona con el espesor del producto, siendo importante en el momento del secado debido a la homogeneidad del contenido de agua. Si las muestras son deshidratadas en diferentes tamaños se entiende que unas perderán más rápido agua que otras y no existiría un proceso controlado del producto. (Tania Váquez, 1997)

En la tabla 2.6, se describe diferentes parámetros a considerar al momento de realizar el corte de producto.

Tabla 2. 6 Parámetros sugeridos para el tamaño de la muestra.

Parámetros	Trozos grandes	Trozos pequeñas
Carga del secador	+	-
Tiempo del secado	+	-
Merma en el cortado	-	+
Tiempo del cortado	-	+
Uniformidad de los trozos	+	-
Fragilidad del producto seco	-	+
Mermas p/manipuleo producto seco	-	+

Fuente. (Tania Váquez, 1997)

2.2.4 Cinética de secado.

La deshidratación es una de las técnicas más ampliamente utilizada para la deshidratación de alimentos que promueve la conservación de los componentes del producto fresco y evita la proliferación de microorganismos. (Vega, col, 2005).

Cada producto presenta una desecación diferente no solamente por la cantidad de agua que contiene sino por el aspecto que debe presentar. En este caso, el aire caliente que pasa sobre la biomasa para absorbe el vapor de agua no debe estar saturado, es decir, su humedad relativa debe ser baja y deberá renovarse a medida que sea necesario en tanto el producto no haya cedido el agua que contiene en exceso.(Herbotecnia , 2004).

De la premisa anterior, se determina que se hace necesario realizar el estudio de la cinética de secado que nos permita obtener un producto de calidad. Para determinar la cinética de secado de un alimento, es preciso abordar las siguientes partes:

- Se hace necesario determinar los cambios que se producen en las propiedades del agente desecante, utilizando generalmente aire húmedo cuya información se encuentra organizada en las cartas psicométricas.
- Determinación de la cantidad de agua incorporada en la biomasa (actividad de agua).
- Determinación de la isoterma de desorción.
- Determinación de la curva de velocidad de secado del producto
- Tiempo de secado.

Carta Psicométrica.

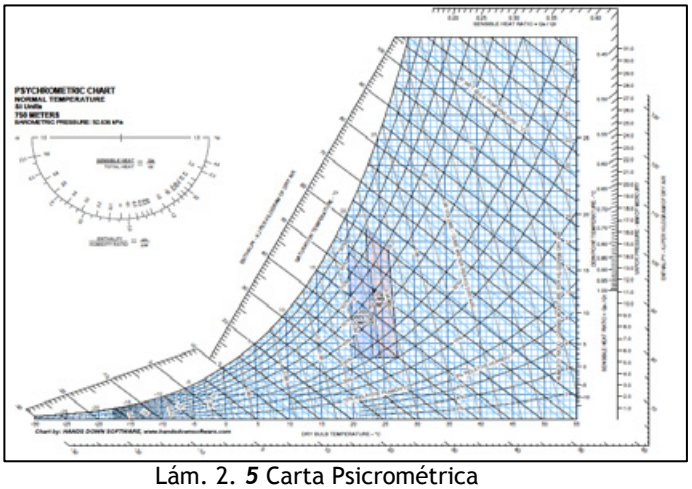
La Psicrometría se define como la medición del contenido de humedad del aire. Es decir, la carta psicométrica es un diagrama que relaciona las diferentes características del aire húmedo, y, permite obtener mediante lectura directa la mayoría de las propiedades de las mezclas aire vapor de agua que es necesario en los cálculos a realizar en la operación de humidificación a una presión determinada. En otras palabras, se utiliza la carta psicométrica para determinar cómo varia las propiedades de temperatura, volumen, presión, entre otras propiedades, al cambiar la humedad del aire. (ASHRAE), (Oros, 2012)

Como se ha indicado anteriormente, una carta psicrométrica es una representación gráfica de las propiedades del aire que son trazadas con los valores de las tablas psicrométricas, siendo estas:

- Humedad relativa. (hr)
- Humedad absoluta. (ha)
- Temperatura de bulbo seco. (Tbs)
- Temperatura de bulbo húmedo.(Tbh)
- Temperatura de bulbo de rocío (Tpr)
- Entalpía (h).
- Volumen específico
- Presión de vapor (Pv)

Existen diversos tipos de cartas psicométricas en uso que pueden basarse en datos obtenidos a la presión atmosférica normal al nivel del mar, o puede estar basada en presiones menores que la atmosférica. Algunas se hacen para rango de baja temperatura, otras para medias o altas temperaturas. Cada una difiere en cuanto a la presión barométrica, la banda de temperaturas, número de propiedades comprendidas, elección de las coordenadas y temperatura de referencia para la entalpía (Oros, 2012). Todas las cartas psicrométrica tienen básicamente la misma función, por lo tanto, la carta a usar deberá seleccionarse para el rango de temperatura y el tipo de aplicación.

Para nuestro estudio, utilizaremos una carta psicométrica basada en una presión atmosférica, también llamada presión barométrica de 92.63 kPa, para una altura de 750 metros. Esta carta cubre un rango de temperatura de bulbo seco (Tbs) de -30ºC hasta 55 ºC, y un rango de temperatura de bulbo húmedo (Tbh) desde -30 ºC hasta 30 ºC. En la lámina 2.5 se muestra la carta psicométrica antes referida, utilizando unidades con Sistema Internacional, S.I. Las temperaturas están en grados centígrados; el volumen en m^3/ kg; la humedad relativa en porcentajes; el contenido de humedad en g/kg aire seco; la entalpía y la entropía están en kilo Joule (kJ) por kg de aire seco.



Lám. 2. ***5*** Carta Psicrométrica
Fuente: http://www.coolerado.com/products/psychometric-charts/

En el apéndice A, se muestran la posición que ocupan cada una de las líneas en la carta psicrométrica. A continuación se describe cada una de las propiedad intervienen en la grafica

y su localización. (ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)

Temperatura de bulbo seco (Tbs). Es la temperatura medida con un termómetro.

Se encuentra sobre la abscisa de la carta, es decir es la línea horizontal inferior localizada en la parte baja. La línea que se extiende verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta, se la llama línea de temperatura de bulbo seco constante.

Temperaturas de bulbo húmedo (Tbh). Corresponde a la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo. Se encuentra localizada a lado superior izquierdo de la carta. Es una rectas de pendiente negativa que comienzan en la curva de saturación y van diagonalmente de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo descienden en la medida de que Tbs aumenta, en un ángulo de 30 º de la horizontal. Estas líneas se denominan también, líneas de saturación adiabáticas.

***Temperatura de punto de* rocío (Tpr).** El punto de roció se define como la temperatura debajo de la cual el vapor de agua en el aire, comienza a condensarse. La temperatura de roció se localiza en la parte vertical del lado derecho de la carta, y la línea de temperatura se mide horizontalmente de izquierda a derecha.

Humedad relativa (hr).- Se define como la relación de la fracción mol de vapor de agua presente en el aire, con la fracción mol de vapor de agua presente en el aire saturado, a la misma temperatura y presión. Son curvas cóncavas que se extiende hacia arriba y hacia la derecha en el interior del diagrama. Se expresan en porcentaje, y dicho valor se indica sobre cada línea.

Humedad absoluta (ha). - escala vertical (ordenada) que se encuentra al lado derecho de la carta psicométrica. Los valores de esta propiedad se expresan en, gramos de humedad por kilogramos de aire seco (g/kg, sistema internacional) o en gramos por libra (gr/lb, sistema ingles)

Volumen específico. Son rectas de pendiente negativa mucho más inclinadas que las líneas de saturación adiabáticas o líneas de T bh , en un ángulo aproximado de 60 º con la horizontal , y van aumentando de valor de izquierda a derecha.

Entalpía o calor total en el punto de saturación (h). Es una escala proyectada al lado izquierdo del diagrama. Son extensiones de las líneas de bulbo húmedo; puesto que el calor total del aire, depende de la temperatura de bulbo húmedo.

2.2.4.1 Actividad de agua.

El principal propósito del secado es extender la vida útil de los alimentos mediante la reducción de la actividad de agua, jugando un papel importante en diferentes aspectos que tienen que ver con la preservación de los alimentos. (Jeria, Col,2011).

Generalmente, el agua incorporada en la biomasa se encuentra en distintas formas, es decir en algunos casos se encuentran ligada a la estructura mientras que en otras se encuentran

literalmente libre. Por tanto, el agua incorporada a la estructura de un cuerpo, se lo clasifica según la naturaleza de la unión entre el agua y la materia seca (Walter Cova) siendo estos:

- Liquido adherente; son aquellos que forma una película sobre la superficie exterior de la materia seca.
- Liquido capilar; es aquel que quedara retenido en la superficie interna de la biomasa
- Liquido de hinchado; formara parte integral de la fase del producto.

La actividad de agua de un material permite expresar el grado de libertad de agua dentro del producto, es así que la biomasa intercambia agua con el ambiente que lo rodea hasta establecer una situación de equilibrio, donde la humedad relativa del aire en contacto con el agua libre del 100 %, por lo tanto se indica que su actividad es de 1.

Se define a la actividad de agua (a_w) como la presión de vapor de agua (P) en el alimento en relación con la presión de vapor de agua pura (Po) a la misma temperatura, con un valor entre 0 y 1. (Ordosgoitía, 2007).

$$a_w = \frac{P}{P_o} = \frac{\%\, HR}{100} \tag{2.5}$$

2.2.4.2 Isoterma de sorción.

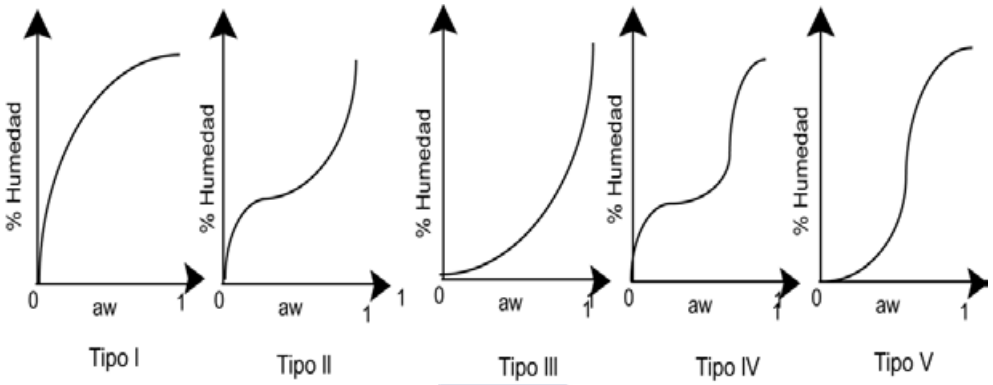
La curva isoterma de desorción es la representación gráfica de la actividad de agua y el contenido de humedad a una temperatura constante de la muestra, donde el material esta en equilibrio higroscópico con el ambiente que se encuentra y no existe cambio en el peso de la muestra. (Miguel López, 2011). El contenido de humedad de equilibrio de un producto higroscópico se refiere al contenido de humedad del producto después de haber sido expuesto a un ambiente particular por un periodo independientemente a largo de tiempo (Bayona, 2011).

La obtención de la grafica representativa de la isoterma de la biomasa es importante en el análisis del comportamiento en el secado del material, permitiéndonos conocer la humedad mínima y la actividad agua adecuada para la conservación y almacenamiento del mismo.

Según Brunnauer, Deming y Teller las Isotermas se clasifican en:

- Tipo I; La isoterma de Langmuir describe la adsorción monomolecular de gas sobre un sólido poroso.
- Tipo II. ; Isoterma conocida como sigmoide característica de productos solubles, muestra una tendencia asintótica conforme la actividad de agua se acerca a la unidad.
- Tipo III o de Flory-Huggings se encuentra en la adsorción de un disolvente o plastificante como el glicerol, característicos de los productos con agentes antiapelmazantes, éste tipo de ingrediente adsorbe agua en sitios específicos, pero la unión de enlaces es muy fuerte, por lo tanto disminuye la actividad de agua drásticamente.

- Tipo IV; muestra la adsorción por un sólido hidrófilo "hinchable", hasta que se alcanza el máximo de sitios de hidratación.
- Tipo V; isoterma BET por Brunauer, Emmett y Teller que representa la adsorción multimolecular observada en la adsorción de vapor de agua sobre carbón. (Omaña,2010).



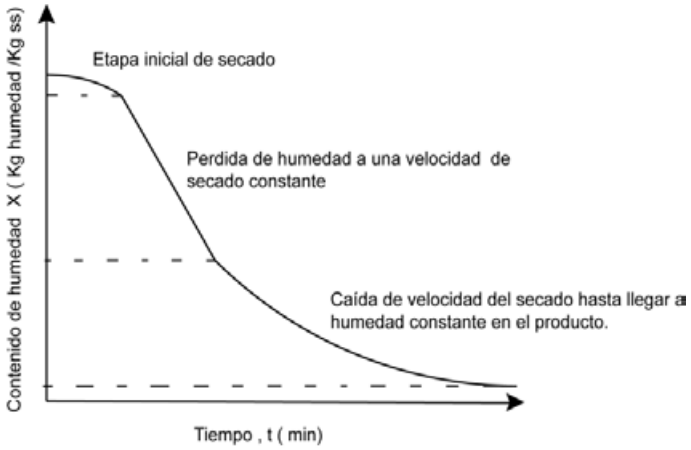
Lám. 2. 6 Clasificación de las Isotermas de sorción.

2.2.4.3 Curva de secado.

La curva de secado es la representación del contenido de humedad en base seca del producto con el transcurso del tiempo. La curva de secado se obtiene de una serie de datos que pueden graficarse en un sistema coordenado (X y Y), representando el contenido de humedad del material (X_w) frente al tiempo trascurrido desde que se inicio la operación de secado (t). (Fito, col, 2001).

En la lámina 2.7, se muestra una curva de secado característica de un material muy húmedo, en la que se observa tres características.

- Primera etapa; la pendiente de la curva aumenta ligeramente con el tiempo, se denomina periodo de inducción.
- Segunda etapa; se denomina periodo con pendiente constante.
- Tercera etapa; la pendiente disminuye con el tiempo, donde la velocidad del movimiento interno de humedad disminuye hasta llegar a un punto de equilibrio, con la humedad de aire de secado (Ortiz, 2003). Denominado periodo de velocidad decreciente.



Lám. 2. 7 Deshidratación de producto con respecto al tiempo.

2.2.4.4 Velocidad de secado.

Se define a la velocidad de secado como la velocidad con que disminuye la humedad de un producto. (Fito, col., 2001). Es decir, la velocidad de secado se estima en función de la cantidad de humedad (X_w) removida de la muestra en cada instante de tiempo (t) por unidad de superficie de secado.

$$R = \frac{\partial X_w}{\partial t} \tag{2.5}$$

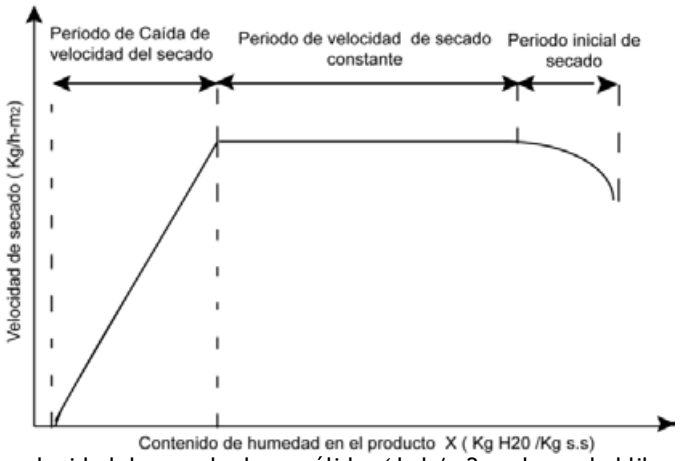
En la ecuación 2.6, muestra en más detalle cuales son las variables necesarias que determina la velocidad de secado durante el proceso.

$$R = -\frac{W_s}{A}\left(\frac{dX}{dt}\right) = -\frac{W_s}{A}\left(\frac{X_{t+dt}-X_t}{dt}\right) \tag{2.6}$$

Siendo, R, la velocidad de secado (g de H_2O/h m^2). A, área superficial expuesta al secado en m^2. (dX /dt), la pendiente de la curva de secado, es decir, corresponde al contenido de humedad libre en función del tiempo t (horas) entre dos puntos. W_S, peso del sólido seco en kg. X_{t+dt}, contenido de humedad de secado en el tiempo t en kg H_2O/kg sólido seco, X_t contenido de humedad de secado en el instante en kg H_2O/kg sólido seco y dt corresponde a la variación de tiempo.

2.2.4.4.1 Curva de velocidad de secado

A partir de las curvas de velocidad de secado de un material, se puede obtener el tiempo de secado del producto, el consumo de energía, el mecanismo de migración de humedad, las condiciones de transferencia de calor, pérdida de masa y la influencia que tiene la velocidad de secado.



Lám. 2. 8 Curva de velocidad de secado de un sólido (kgh/m2 vs humedad libre gH20 /gss**).**

La curva de velocidad de secado nos permiten determinar las etapas características del proceso de secado del producto (Pedro Fito Maupoey, 2001), (Moreira, 1997) siendo estas:

***Periodo de velocidad de secado creciente*;** Empieza en el tiempo cero, con un temperatura inferior a la que se someterá a medida que el tiempo trascurre la velocidad de evaporación va en aumento, el producto se calienta y aumenta la temperatura de interface produciendo una adaptación del material a las condiciones de secado.

***Periodo de velocidad de secado constante*;** Durante este periodo la superficie del sólido se encuentra muy mojada inicialmente y sobre ella una película de agua continua. La velocidad de evaporación del agua en la superficie del solido es menor que la velocidad con que el agua del interior del solido llega a la superficie del mismo. Llegando a un punto donde la velocidad de secado será igual a la velocidad de evaporación del agua y proporcional a la velocidad de flujo de calor de aire caliente que pasa por el sólido hasta llegar a una temperatura constante. Al transcurso del tiempo la biomasa se irá secando hasta que la velocidad del agua del interior del solido sea menor a la velocidad de evaporación. Es decir, entra a la etapa del punto crítico de humedad libre $X_{wc.}$,a partir de este punto el proceso deja de ser una recta para convertirse en una curva. Por otra parte, si el sólido es poroso la mayor parte del agua que se evapora proviene de su interior.

La velocidad de secado en el primer periodo estará en término de la transferencia de calor por convección y la transferencia de masa.

$$R = -W_s \left(\frac{dX}{dt}\right) = \frac{h\,A\,(T - T_w)}{-q_c} = k_g A\,(X_{superficie} - X_{aire\ caliente}) \tag{2.7}$$

Donde; h es la convección del aire caliente W/m^2 K. A área de la superficie en m^2. T, es la temperatura absoluta (ºC), T_w es la temperatura humedad (ºC), k_g coeficiente de trasferencia de masa (kg. mol/ s. m^2), $X_{superficie}$ siendo la saturación en la temperatura de la superficie del material en y $X_{aire\ caliente}$ es la humedad contenida en el agente secante.

Periodo de velocidad de secado decreciente; cumple con dos periodos de secado. La primera parte del contenido crítico de humedad libre $X_{wc,}$, la porción mojada empieza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda totalmente seca. En el segundo periodo la superficie al estar completamente seca la evaporación empieza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie, el calor de evaporación se transfiere a través del sólido en la zona de evaporación. Este proceso continua hasta llegar a la humedad de equilibrio del material X^*, es decir al periodo postcrítico. En esta etapa la eliminación del agua es bastante pequeña, a un largo tiempo.

2.2.4.5 Tiempo de secado

Considerado como el tiempo que debe durar el proceso de deshidratación de la muestra, y, depende exclusivamente del tipo de biomasa y la humedad a deshidratar, con la finalidad de evitar dañar su estructura.

El tiempo de secado se puede determinar a partir de la ecuación de velocidad de secado evaluándose en condiciones distintas de cada sección del periodo de la curva de secado, es decir, el tiempo total de secado será igual al periodo de secado constante más el periodo de velocidad decreciente.

$$t_T = t_1 + t_2 \tag{2.8}$$

Siendo t_1 , el tiempo de periodo constante de secado y t_2 es el tiempo de periodo de velocidad decreciente.

El tiempo de secado en periodo de velocidad constante, se determina utilizando la siguiente ecuación;

$$t_1 = \frac{W_s\,(X_1 - X_2)}{A\,.\,R_1} \tag{2.9}$$

Donde, X_1 será el contenido de humedad inicial, X_2 es el contenido de humedad final del periodo. R_1 es la velocidad de secado que depende de; k_g coeficiente de trasferencia de masa entre el agente de secado y la superficie de secado, además del gradiente de humedad entre $X_{superficie}$ siendo la saturación en la temperatura de la superficie del material y $X_{aire\ caliente}$ siendo la humedad contenida en el agente secante (Dávila Juan)

$$R = k_g.(X_{superficie} - X_{aire\ caliente}) \tag{2.10}$$

El tiempo de caída del secado en el periodo de velocidad decreciente se determina a través de la siguiente ecuación;

$$t_2 = \frac{W_s}{A}\int_{Xfinal}^{X2}\frac{dX}{R_2} = \frac{W_s\,.\,(X_2 - X_{final})}{A.\ (R_1 - R_2)}.ln\frac{R_1}{R_2} \tag{2.11}$$

Siendo; X_{final} el contenido de humedad final de la muestra.

2.2.5 Parámetros físicos -químico del alga marina y métodos utilizados.

Los parámetros físicos y químicos básicos característicos en una muestra son; porcentaje de humedad, lípidos, peso, carbohidratos, nutrientes, poder calorífico, composición química, entre otros. Para caracterizar una muestra se hace necesario un análisis previo.

2.2.5.1 Parámetros físicos

Entre los parámetros físicos importantes que se deberán tener en consideración para el análisis de la biomasa energética están:

Pérdida de masa: Como se ha indicado anteriormente, las macroalgas marinas contienen un porcentaje de humedad superior al 70% con una textura propensa en perder parte de su masa inicial al solo hecho de dejar la biomasa directamente al sol. Por lo tanto, si se necesita determinar la masa inicial y la pérdida de humedad se hace necesario seguir un protocolo de recolección y traslado de biomasa para evitar tener un alto porcentaje de error en el análisis.

Pérdida de humedad: Para determinar el porcentaje de humedad de un producto existen diferentes métodos, como son: Secado en estufa, secado en estufa de vacío, destilación y secado en termobalanza. En la tabla 2.7 se presenta la comparación entre los métodos mencionados.

Tabla 2. 7 Comparación de los distintos métodos que determinan la humedad de un producto

Método	Ventajas	Desventajas	Descripción del método
Secado en estufa	-Es un método convencional -Se pueden acomodar varias muestras -Se llega a la temperatura deseada más rápidamente -Se obtienen resultados en tiempo más largos	-La temperatura va fluctuar debido al tamaño de la partícula, peso de la muestra, posición de la muestra en el horno, etc. -Pérdida de sustancias volátiles durante el secado -Descomposición de la muestra, ejemplo: azúcar.	Se basa en obtener el porcentaje de agua del producto medido en base húmeda.
Secado en termobalanza	-Es un método semiautomático y automático. - Temperatura de trabajo 130 º C. - El error de pesado de este método se minimiza cuando la muestra no se expone contantemente al ambiente. - Se obtienen resultados en poco tiempo.	-Es excelente para investigación pero no es práctico.	Se basa en evaporar de manera continua la humedad de una muestra de un gramo y el registro continuo de las pérdidas de peso, hasta que la muestra se situé a peso constante

Fuente: Nollet, 1996

2.2.5.2 Parámetros químicos.

Entre los Parámetros químicos importantes analizados en la biomasa están: la determinación del contenido de lípidos (aceites) del producto y los metales pesados.

El contenido total de lípidos; se determina comúnmente por métodos de extracción con disolventes orgánicos o por extracción que no incluya disolvente. Los métodos más empleados para la extracción de estos compuestos son las extracción continua con Soxhlet ,

utilizando diferentes disolventes de extracción y su mezclas (Montone y col, 2001) (Punín,2005)

La extracción Soxhlet es la técnica de separación sólido-líquido , que consiste en calentar un disolvente hasta su temperatura de ebullición respectiva , el mismo se volatiliza y condensa goteando sobre la muestra analizada de biomasa que es colocada dentro de un papel filtro , al caer el disolvente en la muestra los lípidos quedan disueltos en este. Posteriormente es sifonado al matraz de calentamiento para empezar de nuevo el proceso. El contenido de grasa se cuantifica por diferencia de peso (Nielsen, 2003)

A continuación se muestran algunos resultados presentados por diferentes autores (Delgado, Bula, Punín) que han realizados estudios para las macroalgas localizadas en zona de las costas Ecuatorianas, en el Caribe y en la zona de Galicia.

Tabla 2. 8 Resultados del Análisis experimental (Porcentaje de lípidos en las tres distintas muestras) utilizando el método oficial de la AOAC 14.059. (1960) (Delgado,2011)

Muestra	Porcentaje %	Método
Sargassum	0,73	Soxhlet
Padina	0,86	Soxhlet
Codium	0,56	Soxhlet

Tabla 2. 9 Composición bromatológica de algunas macroalgas del Caribe (Bula, 2004)

Especie	Cenizas	Grasa	Proteínas	Fibra cruda	Carbohidratos
Codium isthmocadum	57,54	1,04	10,32	0,69	30,40
Padina gymnospora	44,41	0,71	6,76	7,29	40,84
Sargassum platycarpum	36,78	0,37	6,86	7,85	48,70
Sargassum rigidulum	40,70	0,35	5,92	8,20	44,84
Sargassum landigerum	43,70	0,45	6,37	7,94	41,55

La tesis doctoral realizada por María Punín (2005), trata del estudio de algas para consumo humano producidas y manufacturas en Galicia, durante el estudio, analizó 14 especie de alga recolectadas en la región gallega, determinando el contenido de humedad en base seca de estas.

Tabla 2. 10 Porcentaje de humedad en base seca de la muestras en Galicia (Punin, 2005).

Nombre científico	Humedad en base seca
Laminaria ochroleuca	8,5 a 11,7
Himanthalia elongata	8,7 a 7,5
Porphyra sp,	8,8
Saccorhiza polyschides	4,7
Plamaria sp,	6,6
Undaria pinnatifida	6,3 a 13,6

En referencia a la parte ambiental, las algas son buenas purificadoras del agua especialmente del CO_2, sirven de bioindicadores de la calidad de las aguas y que incluso se usan para depurarla. Las algas comúnmente crecen en zonas rocosas, y como suele suceder se vierten aguas residuales en los lagos y océano proveniente de una comunidad, o sector industrial aunque existan leyes para el control de contaminantes sobre el contenido de metales pesados, en ciertos casos no se cumplen.

La contaminación de este tipo de biomasa está directamente relacionada con la acumulación excesiva de metales pesados en el agua, siendo necesario realizar pruebas en

cada una de las muestras recolectas para comprobar el nivel de plomo, cadmio, hierro, mercurio, zinc, níquel, selenio, cromo, arsénico.

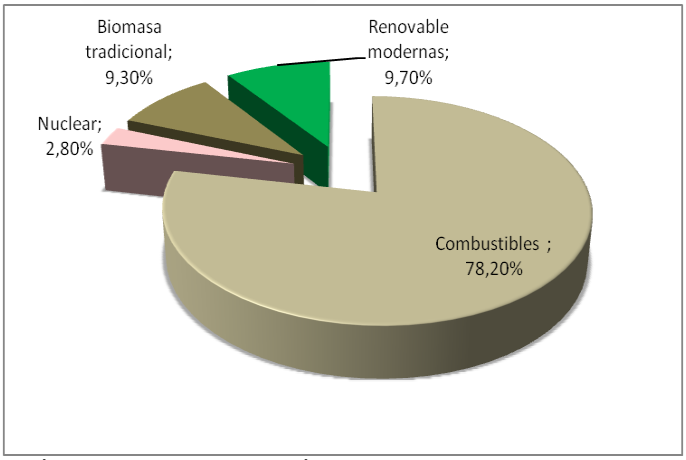
2.3 EL SECADO Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES

2.3.1 Las Energías renovables.

Desde la revolución industrial se han utilizado combustibles convencionales para el desarrollo tecnológico de la humanidad, desde el punto de vista de eficiencia y obtener energía de forma fácil, dejando a un lado el uso de las fuentes renovables de energía, No obstante hace más de cinco décadas se han establecidos leyes, reglamentos de control especialmente a nivel industrial sobre la emisión de contaminantes emitidos al ambiente. Además, se establecen planes de concientización a la población sobre los efectos negativos de la contaminación e institucionalmente planes de estrategias de cuotas de contaminantes a los países industrializados.

El incremento de la demanda energética mundial ha causado el aumento progresivo en los precios de combustibles fósiles, problemas socioeconómicos y medioambientales. En este último contesto las energías renovables pueden ayudar a minimizar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como la dependencia energética de las energías convencionales como son el gas, carbón, derivados de petróleos entre otros,

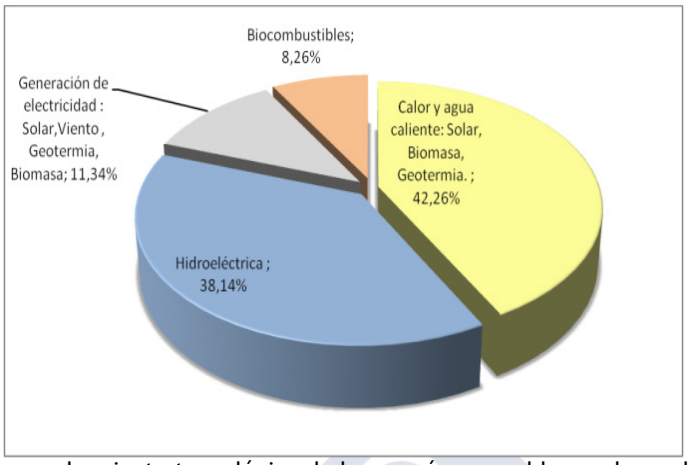
Por esta razón, las Naciones Unidas han propuesto que en el año 2050, la demanda mundial primaria sea cubierta con energías renovables de al menos un 60%. Por otra parte, la Unión Europea tiene como objetivo lograr que las energías renovables representen el 20% del consumo energético dentro de la estrategias de Europa 2020 (Yolanda Benito, 2007). En la UE entre los años 2010 y 2012 se ha incrementado mínimamente la instalación de EERR siendo de un 13 % en este último año (Comisión Europea, 2014).En cambio en los países de América latina en el año 2009 se estima que cubrieron en promedio un 34 % (IRENA, 2012) de su energía primaria con EERR, siendo la más utilizada la biomasa.



Lám. 2. 9 Consumo energético primario mundial 2011
Fuente: (Renevable Energy, 2013)

El crecimiento tecnológico y el uso de las energías renovables cada vez van siendo competitivas con los costos de los combustibles fósiles, tendiendo a ser una solución más

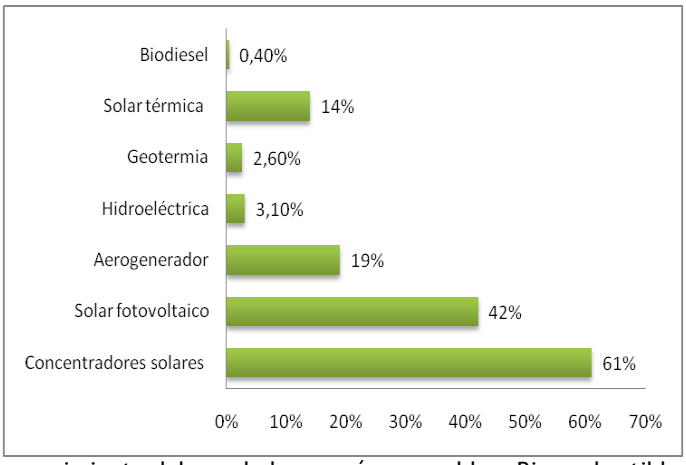
económica para nuevas instalaciones en sectores aislados. Sin dejar a un lado la creación del empleo y al desarrollo tecnológico. Asimismo, debido a la intermitencia de algunas fuentes de energías renovables como la solar y eólica es necesario disponer de un sistema eficiente de almacenamiento de respaldo que sea capaz de asegurar el suministro de energía.



Lám. 2. 10 Aprovechamiento tecnológico de la energía renovable en el mundo 2011.

Los procesos tecnológicos desarrollados para el aprovechamiento de la energía solar directa y convertirla en una forma eficiente de energía se basan en mecanismos fototérmicos y fotoquímicos de conversión, de los cuales se destacan dos grandes grupos: térmicos y fotovoltaicos que en los últimos años ha avanzado tecnológicamente (país de la Unión Europea y asiáticos) para ser competitivas con otras fuentes de energías. Con respecto al desafío tecnológico de la biomasa se denota los cultivos energéticos alternativos para el proceso de producción de biocarburantes como el biodiesel y bioetanol especialmente para el sector de transporte. Otra fuente de energía renovable es el viento, que se emplea para la obtención de electricidad a través de la colocación de aerogeneradores. Con respecto a la geotermia su aplicación van desde muy alta entalpía para la generación de electricidad, la media entalpia asociadas a los sistemas de calefacción y refrigeración, y bajas temperaturas o entalpia que requiere de la intervención de bombas de calor.

Un estudio realizado por la organización Renewable Energy Policy for the 21st Century (REN 21) en el año 2013, acerca del estado de las Energías renovables a nivel mundial indican que los recursos geotérmicos presentaron una capacidad instalada y estimada en 223 TWh en el año 2012. El uso de biomasa en los sectores eléctricos, producción de calor y transporte aumentó 2-3 %, además los biocombustibles líquidos proporcionan alrededor de 3,4 % del transporte vial en el mundo. La producción mundial del etanol cayó entorno del 1,3 % del volumen. Con respecto a la hidráulica se estiman un aumento de 30 GW (aumento del 3% de la capacidad instalada) de nueva energía hidroeléctrica. En instalaciones de energía mareomotriz se mantuvo en torno de 527 MW a finales de año 2011, con poco agregado en el 2012. La energía solar fotovoltaica tuvo una capacidad operativa a nivel mundial de 100 GW, liderada por Europa. La tecnología de concentradores de energía solar térmica (CSP) aumentó más de 60% a alrededor de 2,550 MW. Con respecto a la energía eólica en el 2012 se añade un total combinado de 45 GW de capacidad (más de cualquier otra tecnología renovable), el aumento del total mundial en un 19% a 283 GW “.



Lám. 2. 11 Tasas medias de crecimiento del uso de la energía renovable y Biocombustibles durante el año 2012 a nivel mundial, Comparación realizada entre los 2007 -2012.
Fuente: (Renevable Energy, 2013)

2.3.1.1 Energía solar

La fuente de la energía solar no es otra que la emanada del sol en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética, siendo aproximadamente de 5,6 $x10^{35}$ GeV y de esta, la tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de 1,73 $x10^{14}$ kW. Si analizamos la radiación media incidente por m^2 la *potencia recibida* es de 1,367 kW/m^2 denominada constante solar que varia durante el año ± 3 % a causa de la elíptica de la órbita terrestre, esta cantidad se reduce a la superficie terrestre en aproximadamente 900 a 1000 W/m^2 cuando atraviesa la atmosfera y llega al suelo en vertical, cuando no se tiene en cuenta la reflexión. (Fernández, 2003), (José Carta, 2009) , (Javier Méndez, 2010).

La energía solar directa que llega a la tierra varía, por lo que, al estimar el potencial solar de una zona o región, es necesario conocer los factores que intervienen;

- La hora del día
- Época del año
- Latitud del lugar
- Orientación de la superficie receptora
- Situación atmosférica (nubes, nieblas, smog, viento, entre otras)

La radiación solar terrestre que atraviesa la atmosfera experimenta diversos fenómenos de reflexión, absorción y difusión que se reflejan a toda la superficie disminuyendo su intensidad final, A continuación se describe los componentes de la radiación solar que inciden sobre la superficie de la tierra, a demás de las terminologías que usaremos al trascurso de esta tesis.

Radiación solar: Energía procedente del sol en forma de ondas electromagnéticas,

Radiación solar Directa (G_{bT}): Es la radiación que proviene del sol a través del camino óptico, es decir, es la radiación recibida por el sol sin que se desviara en su paso por la atmosfera,

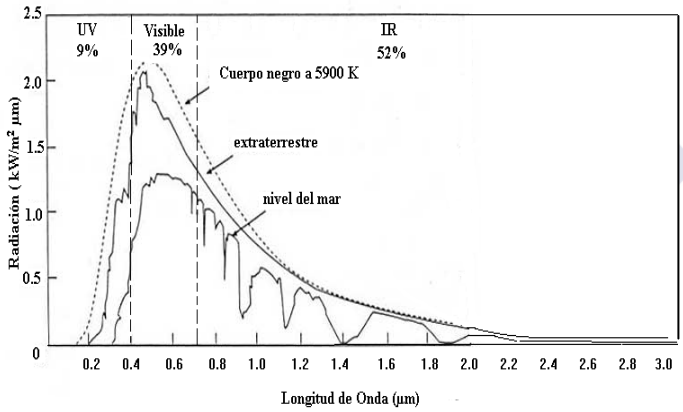
Radiación solar Difusa ($G_{d,T}$). Es la radiación proviene de sol después de haber sido dispersada por la atmosfera sin ser direccional , es decir, sufre cambios en su dirección principalmente debido a la reflexión y difusión en la atmosfera.

Radiación solar total o global (G_T). Es la suma de la radiación directa y difusa, que se mide sobre una superficie horizontal.

Albedo (ρ_g) o radiación reflejada: Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

Irradiancia: Considerada como una densidad de potencia que incide en una superficie, es decir, es un valor instantáneo para una superficie de un m^2, se mide en W/m^2.

Irradiación (I): Es una densidad de energía que se obtiene a través de la integración de la irradiancia sobre un periodo de tiempo específico, típicamente una hora o un día. Es decir, es el valor durante un tiempo de radiación para una superficie de m^2 , se mide en J/m^2 o Wh/m^2.



Lám. 2. 12 Espectro electromagnético de la radiación solar extraterrestre (NASA)[1]

La energía solar térmica

Es una fuente de energía renovable, inagotable, rentable y fácilmente aprovechable donde la radiación proveniente del sol se la puede transformar en calor, y utilizarla para producir agua caliente, climatizar piscinas, calefacción, secado de alimentos, cocinar alimentos, entre otras aplicaciones útiles que bien sirven para el ahorro de energías convencionales, es así, que esta fuente de energía es implementada en lugares con escasos recursos económicos,

Dependiendo de su uso la energía solar térmica puede ser pasiva o activa. Se considera *energía solar térmica pasiva*, aquella que utiliza directamente la radiación que incide sobre una superficie transparente haciendo un efecto invernadero y estructuralmente se encuentra formado de elementos arquitectónicos con capacidad de absorción de energía térmica.

[1] Superpuesto al teórico correspondiente a un cuerpo negro y el espectro de la radiación a nivel del mar.

La *energía solar térmica activa* consiste en el aprovechamiento de la radiación solar para convertirla en calor, calentando un fluido que circulan por el interior de captadores solares.

Energía solar fotovoltaica.

La tecnología de la energía solar fotovoltaica convierte directamente la luz del sol en electricidad. Su aplicación va desde la electrificación rural, postes de iluminación, cargadores, marquesinas para parqueaderos, aplicaciones agrícolas (bombeo de agua), aplicaciones espaciales, entre otras aplicaciones. Actualmente la energía solar fotovoltaica es competitiva con otras fuentes de energía no renovable especialmente en lugares remotos de difícil acceso, considerada como la mejor manera para llevar electricidad a las viviendas y poblados que no cuentan con un suministro eléctrico o agua potable.

Los sistemas fotovoltaicos se clasifican en sistemas aislados o conectados a la red. *Los sistemas autónomos* (aislados de la red eléctrica) dan una solución simple al problema de suministro eléctrico en áreas remotas, alejadas de las redes eléctricas. Su mantenimiento es sencillo de bajo coste y puede instalarse en cualquier lugar.

Los *sistemas conectados directamente a la red eléctrica*, tiene como objetivo principal maximizar anualmente la permiten la producción de energía eléctrica que es inyectada a la red. Es decir permite al usuario reducir la cantidad de electricidad que compra a la compañía eléctrica, además en ciertos casos el usuario puede vender electricidad cuando se produce más de la que se consume. Este sistema no necesita de un acumulador (batería) ni de regulador para su funcionamiento. (Alonso, 2007).

En general, una instalación fotovoltaica básica para un sistema autónomo estará formado por:

- Un panel fotovoltaico
- Una batería
- Un regulador de carga
- Un inversor
- Cables para conexión.

1) Generador fotovoltaico[2]

El generador fotovoltaico es el encargado de transformar la energía del sol en energía eléctrica. Está formado por un conjunto de módulos o paneles conectados en series, paralelos o mixto dependiendo de la carga a suministrar, a su vez cada modulo/panel se encuentra formado por células fotovoltaicas (la mayor parte de los paneles se encuentra formado por 36 celdas). La potencia que puede suministrar un panel fotovoltaico dependerá del número de células que posea. Un valor típico para un panel compuesto por 36 células oscila entre los 50 y 100 W, dependiendo del área de cada una de las células. (Ciemat,2007).

En el mercado existen distintas clases de paneles, que varían por su fabricación, rendimiento y tiempo de vida útil. A continuación se hace referencia de algunos tipos de paneles (Tabla 2.11).

[2] Nos referimos a un generador fotovoltaico a un conjunto de paneles fotovoltaicos.

Tabla 2. 11 Tipos de paneles fotovoltaicos.

Paneles	Descripción	Rendimiento
Silicio Monocristalino	Sus células se obtienen cortando obleas de un solo cristal de silicio puro. Son un poco caros con respecto a los poli cristalinos, su color es azul oscuro con brillo metálico.	15% al 20%,
Silicio Policristalino	Sus células están formadas por pequeñas partículas cristalizadas, por el agrupamiento de cristales de silicio. Son menos costosas, su colores se encuentra entre azules y grises con brillo metálico	15%,
Silicio Amorfo	Desaparece la estructura cristalina ordenada y el silicio se deposita formando una capa fina.	9 al 12%
CIS	Son películas finas de Cobre , indio y Selenio .	12,1 %.
CIGS	Son aleaciones de cobre, indio , galio y del selenio con el azufre	Eficiencia del 20 % en el laboratorio y 11 % en fabrica
CdTe	Formados por células de capa fina de teluro de cadmio. Las células de capa fina de teluro de cadmio	10,5 %
GaAs	Formado por Arseniuro de Galio. Es un material de capa fina de mayor eficiencia real y teórica, se emplea con módulos de concentración mediante lentes de Fresnel	30 %-35%

Fuente : (Miquel Casa, 2012), (Pepeto)

2) Batería.

En los sistemas fotovoltaicos las batería se utilizan como sistema de almacenamiento energético, debido a la variación climática transcurrida durante un día por lo que es necesario almacenar energía eléctrica durante el periodo de generación (en el día) para garantizar el abastecimiento durante el periodo de consumo (durante la noche). Como las baterías son elemento que van cargándose y descargándose cíclicamente, lo que se hace en un sistema fotovoltaico es sobre dimensionar el número de baterías de modo que el sistema sea capaz de suministrar energía cuando no hay disponibilidad de recurso. Por otra parte, si se trata de conectar un conjunto de baterías se puede realizar conexiones en serie, paralela o mixta dependiendo del voltaje proveniente del panel fotovoltaico.

Una batería está *formada* por celdas, vasos o elementos, con una tensión de 2V que conectados en serie proporcionan tensiones de trabajo de 12 V, 24 V, 48 V, entre otros. Es decir, una tensione de trabajo de 12 V corresponden a 6 vasos conectados en serie. (Alonso, Ceimat, 2008). En caso de baterías monoblock[3] su configuración es diferente.

La gran mayoría de las baterías del mercado que son utilizadas en los sistemas fotovoltaicos por ser las más económicas son las de Plomo –acido. (Pb-a) donde el acido pude ser de : Plomo-Antimonio (Pb-Sb) son batería de ciclo profundo, Plomo selenio (Pb-Se) y Plomo-Calcio (Pb-Ca) tienen menor auto descarga y necesitan poco mantenimiento.

Existen otros tipos de baterías, como las de gel (Acido sulfúrico con sílice especial) que tienen menos profundidad de descarga, AGM[4] (son baterías selladas tipo plomo -acido) tiene

[3] Las baterías Monoblock, son baterías de plomo y tecnología de fibra de vidrio (Plomo – Antimonio). Son diseñadas especialmente para instalaciones fotovoltaicas

[4] AGM es l abreviación de Absortion Glass Mat

una mayor profundidad de descarga, baterías de Litio que pueden utilizarse por su baja auto descarga pero al ser costosa no puede competir especialmente con la de plomo-acido. Las baterías Níquel –Hierro (Ni-Fe), Niquel-zinc (Ni-Zn), Zin-Cloro (Zn-Cl) entre otras, por su característica no son apropiadas para usarse en sistemas fotovoltaicos.

3) Regulador de carga,

El regulador de carga es el elemento encargado de proteger la batería contra sobrecargas y sobre descargas excesivas que podrían resultar dañinas para la batería, acortando su vida útil. Es un dispositivo que se instala entre el generador fotovoltaico, las baterías y el consumo (Alonso, 2008).

El funcionamiento del regular es el siguiente: En caso de sobrecarga pone el generador fotovoltaico en circuito abierto evitando el paso de corriente del generador hacia la batería y en caso de detectar un descenso de la carga de la batería en un determinado valor (tensión de corte por sobre descargada) desconecta los consumos. Por otro lado evita que la corriente regrese al generador fotovoltaico durante la noche. Los reguladores en general suelen trabajar en tensión nominal de 12, 24 0 48 V DC (Miquel Casa, 2012).

4) Inversor.

Como los generadores fotovoltaicos producen corriente continua (DC), se hace necesario colocar en los sistemas fotovoltaicos autónomos un inversor para poder utilizar la carga en corriente alterna. Es decir, la función principal de este dispositivo es convertir la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Generalmente, en los sistemas autónomos el inversor está conectado a la batería, y en los sistemas conectados a la red eléctrica el inversor está conectado directamente al generador fotovoltaico.

2.3.2 Energía geotérmica.

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie del suelo, producida por el gradiente térmico entre la temperatura del centro de la tierra y zona exterior encontrándose más fría por lo que el calor fluye a la superficie. La transferencia de calor tiene lugar por conducción en la roca sólidas y a través del agua subterránea que satura los poros de la roca por convección.

A partir que se profundiza en la superficie del suelo (aproximadamente dos metros) la temperatura de la tierra no sufre cambios bruscos, aumentando aproximadamente 3 ºC cada 100 m. Sin embargo, existen zonas de la superficie terrestre que presentan anomalías geotérmicas, especialmente en sectores de la corteza terrestre pueden existir masas de material a gran temperatura (800 ºC a 1,000 ºC) que pueden dar lugar a un gradiente térmico entre 100 ºC y 200 ºC por kilómetro (José Carta R. c., 2009).

A esta energía térmica interna de la tierra se les denomina energía geotérmica, y se la aprovecha a través de la transferencia de calor por medio de intercambiadores de calor utilizando un fluido caloportador, comúnmente agua, si en caso se utilizaría aire se denominaría aero geotermia siendo de configuración simple o doble.

El potencial energético del flujo geotérmico de la tierra se estima entre unos 30 millones de Tera vatios (José Carta R. C., 2009). Hasta el año 2012 en el mundo se han generado más de 12000 MWe de electricidad geotérmica, en instalaciones existentes en 27 países y más de 39000 MWe (Martínez, Geotermia, 2013) de calor aprovechándose en instalaciones situadas en más de 78 países (Renevable Energy, 2013).

La energía geotérmica de alta entalpía es convertida en electricidad que consiste en aprovechar el vapor que pasa a través de una turbina conectada a un generador, los residuos emitidos a la atmosfera de CO_2 producidos son mínimos y de poco impacto ambiental. Entre las desventajas del aprovechamiento de esta energía esta la contaminación de agua cercanas al sitio de instalación de la central térmica, contaminación térmica, deterioro del paisaje entre otras. La energía geotermia de media entalpia es utilizada para calefacción, refrigeración, evaporación, industrial alimenticia, agua caliente, etcétera. Por otra parte, la energía geotermia de baja entalpia se la aprovecha para agricultura, acuacultura, invernaderos, secado y en combinación con la tecnología de la bomba de calor se obtiene una mayor eficiencia energética para climatizar.

Para desarrollar el diseño y puesta en marcha de una instalación se debe considerar los siguientes variables:

- Conocimiento del estudio geológico; tipo de roca, sedimentos y presencia de agua subterránea
- Determinación de la propiedad térmica del terreno (conductividad del terreno, capacidad calorífica volumétrica y difusividad térmica), por medio de test de respuesta térmica.
- Selección del intercambiador geotermia que puede ser abierto o cerrado
- Determinación de la demanda energética
- Selección de la configuración del intercambiador de calor (sonda geotérmica).

Como se ha indicado anteriormente para aprovechar la energía de la geotermia de baja entalpia es necesario adaptar una bomba de calor, siendo un equipo térmico que produce calor y frio de manera eficiente, extrayendo calor de la fuente menos caliente y sumarlo a otra fuente más caliente. Para su dimensionamiento es necesario determinar el rendimiento de la bomba de calor que se encuentra definido por el COP (coefficient of perfomance) que se define como el coeficiente entre la energía generada y la energía consumida bajo unas determinadas condiciones de funcionamiento (J Álvarez, 2012). Las bombas de calor geotérmicas utilizan entre un 25 % y un 50 % menos de electricidad que los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración, reduciendo el consumo energético y las emisiones contaminante entre un 45 % a 70 % (Gracía, 2012),

2.3.2.1.1 Intercambiador aerotérmico.

El intercambio de calor entre la superficie del suelo y el fluido (aire) aumentara la temperatura del aire que entra en el interior de un volumen de control. Es decir, se aprovecha la potencia térmica del suelo, para dar calor a edificaciones, invernaderos, secadores.

En este tipo de instalación, el aire penetra por una toma de aire debidamente protegida que circula por canalizaciones enterradas gracias a un sistema de impulsión y es distribuida

al área a climatizar, cuyo rendimiento depende de las temperaturas involucradas. (J. Escuer, 2012). Para el diseño del intercambiador es necesario determinar la temperatura de salida del aire, así como el flujo máximo de aire que fluye a través del intercambiador que deberá proporcionar la velocidad de aire requerida para mantener el aire caliente, este parámetro dependerá de la magnitud y las características de la superficie de intercambio como son: área, diámetro, longitud, numero de tubos.

Tabla 2. 12 Parámetros determinantes del rendimiento de un intercambiador aerogeotérmico.

Parámetros de rendimiento	Descripción
Geometría del intercambiador	Formado por tubos dispuestos en paralelos o de manera horizontal. Se debe tener en cuenta la dinámica del fluido que se da en el interior para minimizar las pérdidas de cargas.
Velocidad de aire	La velocidad condiciona el flujo entre los conductos (laminar y turbulenta) y la eficiencia del intercambio por convección aire-tubo. A velocidades altas la temperatura del sistema no es favorable.
Diámetro de tubos	Si se utilizan diámetro de tubo muy grande es necesario un mayor caudal para llegar a la velocidad de diseño, obteniendo una temperatura menos eficiente. En cambio a menor diámetro de tubo se requieren mayor número de tubos para obtener el mismo caudal aumentando las pérdidas de carga.
Longitud del tubo	Determina la superficie de intercambio y el tiempo de circulación del aire en el conducto. En cierta longitud no existirá ninguna mejora en el intercambio, por lo que se debe buscar una longitud optima del intercambiador.
Distancia entre tubos	El almacenamiento y descarga térmica del suelo esta proporcionada por el volumen de masa de intercambio, si la distancia entre los tubos es de magnitud similar o menor a la profundidad de penetración , la temperatura interna del aire se verá influenciada entre los tubos ocasionando una reducción de la capacidad local almacenada del suelo.
Presencia de agua en el suelo	La presencia de agua modifica las propiedades del suelo, al circular esta representa una fuente de temperatura estable.
Profundidad de instalación	El subsuelo actúa como un aíslate térmico, la profundidad de la instalación de los tubos es proporcional al espesor del suelo y la difusividad de este.
Radiación solar	La radiación que incide en la superficie calienta el suelo con el paso del tiempo, por lo tanto, durante el balance térmico se deberá tener en cuenta el intercambio del modelo radiativo en la superficie.
Humedad del aire	La humedad del aire que ingresa es un condicionante en el diseño, especialmente en climas húmedos que en fría más rápido el aire por lo que se requiere un intercambiador correctamente diseñado para modular la velocidad de aire interior.

Fuente: (J. Escuer, 2012).

2.3.3 Tecnología de secado.

Con el tiempo se ha desplazando el secado tradicional (tendales del producto expuesto directo a la radiación solar) por equipos dosificados permitiendo el secado a gran escala, en menor tiempo y con mejor calidad. Estos equipos optimizados necesitan estudios dedicados a mejorar; la formas, tamaños, materiales constructivos, tipos de bandejas, recirculación de aire, fuente de energía, entre otros.

2.3.3.1 Métodos de transmisión calor.

Transporte de calor por convección. El calor del aire es cedido por convección para la evaporación del líquido del material a secar. La fuente de energía utilizadas son los agente gaseoso (cuando se trata de materiales con disolvente orgánico, explosivo), el vapor de aire caliente pasa por encima o a través del sólido, evitando el contacto del producto a secar con los producto procedente de la combustión. La temperatura de operación utilizando este método se encuentra en torno a los 150ºC.

Transporte de calor por conducción. El calor se difunde por contacto a través de la conductividad térmica de un sólido caliente y el material húmedo. El calentamiento de la superficie solida (bandejas, platos) se realiza mediante vapor.

Este método es apropiado para productos finos o muy húmedos y pastosos, Los secaderos que utilizan este procedimiento tienen una eficiencia térmica alta.

Secado por energía radiante. El calor se transmite por una superficie radiante, a través del calentamiento por radiación solar o por calentamiento de radiación infrarroja.

El proceso de calentamiento por infrarrojo se produce cuando la energía térmica es obtenida por penetración en el interior del material húmedo causando la vibración de las moléculas para desprender la humedad de esta (Moreira, 1997). Aunque no es un método común mente utilizado, se aplica en proceso de secado de películas de recubrimiento y membrana, tinta, adhesivos, corrección de perfiles de humedad del papel y madera (Pedro Fito Maupoey, 2001).

El *calentamiento por radiación solar*. Procede de calentar un volumen de aire dentro de la cámara de secado, a medida que la temperatura aumenta se produce la evaporación del agua del producto (efecto invernadero). Generalmente se utiliza este método para secar pequeñas cantidad de producto utilizando secadores solares. Entre los inconveniente de la aplicación es al requerir secar grandes cantidad de producto por lo que es necesario un secador de gran superficie, lo que dificultad el control en el proceso. Como consecuencia de esto, se construyen equipos semi artificial con ventiladores para circular el aire dentro de la cámara, es decir, se adapta con otras fuentes de energía cuando sea necesario (secaderos híbridos).

Los secadores solares de este tipo se clasifican en tres grupos ((Mujumdar, 2007):

- Secado solar natural; utilizando solo la fuente de irradiación solar.
- Secado solar semi artificial; utilizando un ventilador eléctrico para mantener el aire a un flujo continúo en el área de secado.
- Secado solar artificial; el sistema es adaptado con dos fuente de energía una natural y una convencional para generar el calor deseado en el proceso.

Secado por calentamiento dieléctrico. La energía es generada en el interior del producto mediante ondas electromagnéticas de alta frecuencia, generando un calentamiento rápido, uniforme, además de poder manejar un mejor proceso de control del producto. El calentamiento se realiza a frecuencia entre 1-100MHz (Pedro Fito Maupoey, 2001).

2.3.4 Consumo de energía utilizada en el proceso de secado.

Como se ha expuesto anteriormente la deshidratación de un alimento consiste en la extracción del agua de esté, para ello se requiere una cantidad de calor constante que deberá ser suministrada por alguna fuente de energía como resistencias eléctricas, calderas de biomasa, calderas de gas, calderas de diesel, entre otras opciones, que se utilizan dentro del contexto del marco industrial para gran producción. En referente a secaderos de pequeña escala en términos generales se utilizan madera, electricidad, carbón y energía solar entre otras. Es necesario indicar que la fuente de energía utilizada depende de la temperatura de secado, tiempo y el tipo de producto a deshidratar para evitar dañar su estructura molecular y por consiguiente su calidad nutricional. A continuación se hace una breve descripción de:

Consumo de combustible liquido.

Los combustibles líquidos utilizados para la operación de los equipos de secado pueden ser; gasóleo, diesel y fueloil. Que al quemarse emiten contaminación ambiental como lo son; dióxido de carbono, hidrocarburo, compuestos de nitrógenos, monóxido de carbono, partículas volátiles inquemadas, entre otras que contribuyen al efecto invernadero.

Se estima que un 29-30 % de consumo de combustible líquido se pierde en el proceso de secado (Calva, 2007). El consumo de combustibles es registrado por litros /hora o tonelada/años, para determinar el consumo especifico de energía de combustible se obtiene entre la relación de kJ total consumido y kg de agua evaporada en el proceso.

Consumo de combustible gaseoso.

Entre los combustibles gaseosos utilizados se encuentran el gas natural y el gas licuado (butano y propano). Concerniente a la contaminación ambiental generan bajo índice de contaminantes con respecto a los combustibles líquidos, principalmente emite dióxido de carbono a la atmosfera.

El gas licuado de petróleo constituye una alternativa cuando existe un mayor costo de operación por concepto del combustible líquido. El consumo de gas se mide en m^3 /h, también puede ser facturado por unidades de energía kWh/m^3, GWh.

Consumo de combustibles sólido.

Los combustibles sólidos utilizados son los pellets, briquetas, astillas, residuos de madera, entre otros. Para ello se requiere de adaptación de calderas de combustión. El consumo total se determina por quintales o toneladas a quemar, por otro lado el consumo horario de la caldera a la potencia nominal se la determina en m^3/h.

Poder calorífico de los combustibles.

Se define al poder calorífico como la cantidad de energía en forma de calor que entrega un kilogramo o metro cubico de combustible al oxidarse en forma completa (kcal/kg , Kcal/m^3 , BTU/lb). El poder calorífico está representado en:

El poder calorífico inferior (PCI), es la cantidad de calor desprendido en la combustión y que no aprovecha la energía del vapor de agua no condensada,

El poder calorífico Superior (PCS) es el aprovechamiento total de la energía en forma de calor de todos los elementos que intervienen en la combustión completa del combustible.

Tabla 2. 13 Poder calórico de algunas combustibles.

Combustibles líquidos	PCI (kJ/kg)	PCS (kJ/kg)
Gasolina	43950	46885
Gasóleo	42275	43115
Fuel oil nº1	40600	42695
Fuel oil nº 2	39765	41860
Combustibles Gaseosos		
Butano	45790	49675
Propano	46350	50450
Gas natural	39900	44000
Combustibles sólidos		
Briquetas(corcho aglomerado)	--------	28761
Carbón	31400	33700
Madera seca (PC medio)	19000	
Pellets de madera	16768	18047

Fuente: (Cachadiña, 2007)

Consumo eléctrico,

En un secadores eléctrico su mayor consumo se genera por el calentamiento de resistencia, además de ventiladores, bandas transportadoras y accesorios, estos últimos se estima que consumen entre el 2 al 3 % de la energía total. No obstante en secadores industriales los ventiladores de recirculación de aire por sus dimensiones representarían un alto consumo eléctrico durante el secado.

2.3.5 Eficiencia térmica del secador.

Para determinar la eficiencia térmica del secador es necesario determinar la cantidad de energía necesaria para secar, teniendo en cuenta las pérdidas producida por conducción, convección y radiación dentro de la cámara. El consumo de la energía no solo depende de la cantidad de combustible utilizado, sino de la cantidad de agua evaporada en el proceso.

La eficiencia energética del proceso de secado se determina a partir del consumo de energía suministrada con respecto al agua evaporada. La ecuación comúnmente utilizada para obtener la eficiencia del secadero se indica a continuación.

$$= \frac{energ\ a\ total\ suministrada}{energ\ a\ utilizada + energia\ perdida\ en\ el\ \ aire\ a\ la\ salida} \tag{2.12}$$

La eficiencia se puede determinar en términos de temperatura interior y exteriores o en términos de humedad absoluta del ambiente, humedad de aire a la entrada y la salida del secadero en condiciones de saturación adiabática eliminada por el aire de secado.

2.3.6 Secadores convencionales.

En el campo de la industrialización de productos alimenticios, farmacéuticos y en general durante la etapa de secado se utilizan grandes equipos que llamaremos secaderos convencionales, y para su funcionamiento consumen gran cantidad de energía eléctrica, combustibles líquidos, gaseoso o sólido.

Cuando hablamos de la clasificación de secadores existes un sin número de estas. Realizando una recopilación bibliográfica de varios autores, los sistemas de secado se pueden clasificar considerando los siguientes parámetros:

- Secaderos directos o indirectos.
- Por método de transferencia de calor.
- Por condiciones físicas del material.
- Por tamaño y escala de producción.
- Por el tipo de flujo.

La diferencia entre secadores *directos e indirectos* se da por la forma de transferencia de calor y masa entre el flujo de aire caliente y la biomasa. En los *secadores directos* el calor que ingresa a la cámara de secado entra en contacto directo con el producto húmedo teniendo lugar la evaporación.

En los Secadores *indirectos,* el calor se obtiene independientemente del fluido que se utiliza, la transmisión de calor al material húmedo se genera por conducción a través de una pared metálica.

Por otra parte, el diseño de un secador depende en gran medida de la naturaleza del producto a secar para mantener su propiedad y calidad.

Tabla 2. 14 Clasificación de secadores.

Secadores	Descripción	Directos/Indirectos	Método de transferencia de calor	Condiciones físicas del producto	Tamaño y escala de producción	Tipo de flujo
Gabinete de bandejas o charolas	Funcionamiento discontinuo, calefacción mediante un ventilador que permite la recirculación de aire, Bandejas perforadas para que el aire pase verticalmente,	Directos	Convección	Sólido, pasta, granulados, fibrosos,	Baja producción	Flujo laminar
Túnel	Adaptación para operación continua de los secadores de gabinete y bandeja, Utilización de carritos para bandejas, Circulación de aire por flujo forzado (ventilador)	Directos	Convección	duros, pasta, granulares , fibrosos	Media producción	Flujo laminar
Rotatorios	El material húmedo es continuamente elevado por la rotación del secador (cilindro que gira sobre su eje), dejándolo caer a través de una corriente de aire caliente que circula a lo largo de la carcasa del secador, El flujo de aire puede ser en paralelo como en contracorriente,	Directos	Convección	Polvo, granulados, fibrosos,	Media y alta producción	Flujo turbulento
Por aspersión (spray)	Atomización o roció de una emulsión en una corriente de aire caliente dentro de la cámara de secado,	Directos	Convección	Liquido sedimento pasta	Media y alta producción	flujo en caída libre
Transporte por vibración	Consta de una cinta transportadora vibratoria inclinada, donde el producto pasa y es secado por una corriente de aire caliente,	Directo	Convección	Sólidos	Media producción	Flujo laminar
Bandas trasportadoras o cinta túnel	Cinta laminar o perforada, donde se ingresa el producto húmedo transportándolo a lo largo del secadero, pasando por un flujo de aire caliente que va en todas direcciones,	Directo	Convección	Sólidos, Pastas	Media producción	Flujo turbulento
Lecho fluidizado,	Utilizan simultáneamente aire caliente y fluidización,	Directo	Convección	Pasta	Alta producción	Flujo turbulento
Horno o estufa	El aire es calentado por un quemador que al ingresar a la cámara pasara el calor de un primer piso a un segundo a través de las bandejas perforadas,	Directo	Convección	Sólidos fibrosos	Baja producción	Flujo turbulento
Cascada	El producto cae en forma continua por gravedad desde lo alto de la torre, mientras que el aire de secado circula transversalmente al desplazamiento del producto,	Directo	Convección	Sólidos granulares, cereales	Alta producción	Flujo turbulento

Tambor	Calentamiento de una superficie metálica (tambor) giratorio, en el interior se evapora una capa delgada de liquido hasta secar el producto,	Indirecto	Conducción	Líquidos, sedimentos, pasta, hojuela	Alta producción	Flujo laminar
Bandeja al vacio	Son gabinetes de bandejas cerrados que operan al vació, La transferencia de calor se da por conducción del calor a través de las paredes y por radiación entre anaqueles,	Indirectos	Conducción	Pastas, sedimentos, fibrosos,	Baja y Media producción	
Microondas / radio frecuencia	Se expone el producto húmedo a ondas de alta frecuencia electromagnética,	Directo/Indirecto	Dieléctrico	Producto termo sensibles papel, textiles,		Flujo laminar
Por Sublimación o liofilizadores	Cámara al vacio , se elimina la humedad por sublimación del vapor de agua a partir de hielo a alto vacio (T<0º)	Indirectos	Conducción	líquidos Sólidos	Media y alta producción	
De rodillo	Son cilindros calentados internamente con vapor de agua (300 ºC), el producto va sobre el cilindro que gira lentamente eliminando el agua	Indirectos	Conducción	liquido, pasta	Media y alta producción	

Fuente: (Pedro Fito Maupoey, 2001), (Moreira, 1997), (Ortiz, 2003)

2.3.7 Secaderos solares sencillos.

El secador solar más simple consiste en una cámara aislada del exterior. El producto húmedo es colocado y ordenado sobre bandejas (malla, material solido) sometiéndose a una circulación de aire caliente para extraer el agua evaporada del material. La circulación puede darse por dos métodos; convección natural (consiste en mover el aire por diferencias de temperatura) o circulación forzada (movimiento por ventiladores). Para mantener un flujo de aire caliente durante el secado se adapta un colector solar donde la irradiación solar calienta el aire que posteriormente ingresara a la cámara de secado. Cuanto más seco y más caliente esté el aire, mayor será la velocidad de secado.

Desde el punto de vista artesanal (construcción simple), un secadero renovable permitirá un mejor control y calidad del producto evitando secar en tendales el producto estando expuesto a la contaminación, la putrefacción y pérdida del mismo. Desde el punto de vista semi-industrial un secador adaptado a energías renovables reducirá las emisiones de monóxido de carbono generada por el uso de fuentes de energías tradicionales.

Los secadores solares sencillos son elaborados con materiales de bajo costo como madera, barro, plástico transparente o negro; que servirán para generar un efecto invernadero cuando la radiación ingresa a través de las paredes de material transparentes calentando el volumen de aire. Entre estos tipos de secadores se encuentran;

-***Secador solar pasivo:*** comprende una cámara de secado con circulación natural de aire, que recibe toda la radiación solar directa sobre el producto. Aunque, el coste de elaboración de este tipo de secadero es económico, uno de los principales inconveniente se da, en no poderse controlar la temperatura del producto.

- ***Secadores solares indirectos:*** La cámara de secado esta acoplada a un colector solar plano. La cámara es recubierta internamente con plástico negro para mejorar el efecto invernadero. Este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder su calidad por una exposición directa al sol.

-***Secador solar mixto:*** formado por una cámara de secado y un colector solar. La diferencia con respecto al secador solar indirecto, se da, en este caso, que la radiación solar incide directamente sobre el producto.

Para el caso de secaderos solares sencillos comúnmente se adapta un *colector solar plano,* su funcionamiento sigue el mismo principio del efecto invernadero, que consiste en captar la radiación directa como difusa en su interior, transformándola en energía térmica e impidiendo su salida al exterior. La radiación con longitud de onda corta (0,2 – 3 μm) atraviesa las cubiertas transparentes e incide sobre una plancha termo aislante denominada placa absorbente, transfiriendo esta energía absorbida a un fluido caloportador que se encuentra circulando (flujo forzado). La plancha negra, al calentarse, emite radiación de onda larga que no puede salir al exterior debido a que la cubierta transparente es opaca, (Delgado Plaza, 2011)

Existen distintos colectores solares y su uso dependerá de la aplicación requerida por el usuario. Los colectores solares se clasifican por el rango de temperatura siendo estos de baja (máximo 50 ºC), media (máximo 90 ºC) y alta temperatura (máximo 150 ºC).

Tabla 2. 15 Colectores solares sin concentración.

Tecnología	Descripción	Aplicación
Colectores solares placa plana.	Estos colectores poseen una cubierta transparente de vidrio o plástico que aprovecha el efecto invernadero, Al calentar una placa la energía almacenada es transferida al fluido,	Producción de agua caliente sanitaria, climatización de piscina y calefacción,
Colectores solares de caucho	Formado por una serie de tubos de caucho, los cuales expuestos al sol absorben la radiación solar y se la transmiten al fluido que atraviesa su interior,	Climatización de piscinas
Colectores de aire	Son de tipo plano, utilizan como fluido calo portador el aire,	Calefacción y agua caliente
Colectores de vacío	Son de doble cubierta envolvente, herméticamente cerrada, aislada del interior y del exterior, en la cual se ha hecho el vacío,	Producción de agua calienta sanitaria y climatización de piscinas
Tubos de calor	Tienen una simetría cilíndrica, formados por dos tubos concéntricos; uno exterior de vidrio y uno interior pintado de negro o con pintura selectiva,	calefacción

Fuente: (AECIT, 2009)

2.3.8 Secaderos híbridos

El empleo y adaptación de fuentes renovables de energía ha ido creciendo derivado de la necesidad de reducir el consumo de energía y minimizar los impactos medioambientales a nivel industrial. Dentro de este contexto el proceso de secado es ideal para el desarrollo de sistemas que funcionen con fuentes convencionales y renovables.

Tabla 2. 16 Las energías renovables en sistemas de secado.

Tipo/Energía	Secadores sencillos de baja producción	Tecnología de los secadores a media o alta producción
Solar térmica	x	x
Fotovoltaica		x
Geotermia		x
Biomasa		x

La energía solar, es la fuente renovable comúnmente utilizada para estos sistemas, pudiendo aprovecharse tanto la energía térmica (efecto invernadero dentro de la cámara, colectores solares plano de aire) como fotovoltaica (para implementos que necesitan electricidad). Se estima que el tiempo de retorno de la inversión en construcción y mantenimiento se encuentra entre 1 y 7 años sobre todo en secadores sencillos (Mujumdar, 2007).

Entre las desventajas de solo utilizar energía solar, se encuentra la variación de la producción de energía debido a que la intensidad de la radiación incidente en función del tiempo, dificultando llevar un control adecuado en el proceso. Por lo que se hace indispensable un sistema auxiliar asistido con otra fuente de energía, de ahí el término de "secadores híbridos",

Entre los sistemas auxiliares que se pueden emplear en los secadores solares se encuentran (Mujumdar, 2007).

- Calentadores auxiliares con gas natural
- Acumuladores de calor
- Bomba de calor de absorción y sistema de almacenamiento de calor
- Sistemas que emplean biomasa
- Sistemas conectados a agua caliente

La energía geotérmica, al aprovechar el calor existente debajo del nivel del suelo puede ser utilizada en múltiples aplicaciones y entre ella se encuentra el proceso de secado. Se estima que el tiempo de retorno de la inversión es de 3 años para pequeñas instalaciones (Martínez, 2013) . El tiempo de retorno dependerá del tamaño del secadero, cantidad de energía requerida, tipo de instalación geotérmica superficial o profunda (horizontal, vertical). Entre las ventajas del uso de esta fuente de energía es no ser estacional ni cíclica.

La energía de la biomasa, es el aprovechamiento del calor generado de la quema de combustibles sólidos, líquidos o biogás. Actualmente es una de la energía mas empleadas para la producción térmica y eléctrica. Con respecto a la implementación en equipos de secado se estima una amortización superior a 2 años dependiendo del tamaño de la caldera, disponibilidad de espacio de almacenaje de la biomasa y de la energía consumida.

CAPITULO 3.
ANÁLISIS DE LA CINETICA DE SECADO DEL ALGA

3.1 INTRODUCCIÓN

La cinética de secado con aire caliente de productos especialmente alimenticios, en general tiene gran interés para estudios de optimización del diseño y operación de los equipos utilizados para la deshidratación.

En el capítulo 2 se explicaron en detalle los aspectos teóricos relacionados con el proceso de deshidratación de la biomasa así como los factores a considerar en el proceso de secado. Igualmente se describió de manera general la cinética de secado de la biomasa, así como los parámetros más relevantes que influyen en el proceso y que deben de valorarse para su análisis. Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, en este capítulo se presentan los resultados experimentales de la curva de cinética y velocidad de secado de la biomasa macroalgal.

En primer lugar se describe el protocolo experimental seguido en la recolección y análisis de las muestras de biomasa. Seguidamente se hace la descripción de los equipos experimentales que se han utilizado para el estudio, así como los procedimientos desarrollados para determinar la pérdida de masa con respecto al tiempo y las actividades de agua y humedad de la muestras. Seguidamente se presentan los resultados del estudio de la humedad de equilibrio y de las isotermas de desorción aplicando el modelo GAB[5] para las tres muestras de macroalgas seleccionadas. Por último, se presentan los resultados obtenidos en el estudio de la cinética de secado determinando la curva característica de velocidad de secado para cada especie en estudio.

3.2 PROTOCOLO DE MEDICIÓN.

Un protocolo de medición es una estructura formal que consiste en desarrollar con datos precisos y necesarios lo que compete al tema en cuestión, desglosar los resultados obtenidos y contrastar con normas y leyes." (Egan Aguirre, 2006) . En el apéndice B, se presenta el protocolo de medición desarrollado para la valoración de la biomasa marina, el mismo, que se ha dividido en tres etapas esenciales: recolección de muestra, caracterización de la biomasa y obtención de la curva de secado. La utilización del protocolo ayudara de manera general a conocer los procedimientos esenciales para la recolección de datos y la metodología de medición para obtener resultados confiables.

[5] Modelos de isotermas de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB). La isoterma GAB aportará información importante sobre la vida de anaquel del producto, mediante el contenido de humedad óptima para el almacenamiento de la biomasa. Además constituye una parte esencial del control del proceso de secado, proporcionando información útil para el diseño de equipo experimental de secado y para el estudio de la cinética del proceso (Viades, 2010).

En el protocolo se establece que, para determinar la velocidad de secado de la biomasa es necesario obtener las isotermas de desorción para poder calcular el contenido de humedad final, como evaluar el consumo energético necesario para secar un producto, siendo los parámetros a medir:

- Pérdida de masa de la muestra (gramos o kilogramos)
- Humedad en base humedad (%)
- Actividad de agua a_w
- Temperatura de secado (ºC)
- Tiempo de deshidratación (minutos , horas)

3.2.1 Equipos de medición.

En los ensayos experimentales se han utilizado equipos de medición de alta precisión previamente calibrados. A continuación se detallan los instrumentos y equipos utilizados para el registro de datos:

Termobalanza : Se trata de una balanza eléctrica acoplada a un módulo calefactor que permite determinar la humedad de un producto a través de la variación del peso, después de ser sometida al proceso de secado con energía infrarroja. (PCE Iberica, 2010).

La balanza contiene una cámara en la que se sitúa la muestra sobre un plato para secarse. Esto hace que la muestra sea continuamente controlada y por lo tanto permite saber cuándo se finaliza el proceso de secado. (Moreira, 1997).

Para los ensayos se utilizó una termobalanza , marca Kern DBS, con máxima capacidad de medida de 60 g, resolución en determinación de la humedad 0,001 g / 0,01%, Rango de temperatura del calefactor de 50 a 200 ºC. Tiempo de estabilidad de 3 segundos, con una velocidad de medición de 15 minutos. La calibración del equipo fue realizada por la misma marca comercial DKN de Kern. Norma Europea DIN EN ISO/IEC 17025, ISO 9001.

Medidor de actividad de agua. Utilizado para medir la actividad de agua de un producto (a_w) , o lo que es lo mismo la humedad relativa de equilibrio. El medidor de actividad de agua nos permitirá obtener los valores necesarios para realizar la curva de isoterma de adsorción – desorción de un producto. Por otra parte, para medir la actividad de agua es necesario que las condiciones ambientales (temperatura y humedad) en la que se encuentra la muestra permanezcan constantes en el equilibrio (Moreira, 1997).

Para los ensayos experimentales se ha utilizado un medidor portátil de actividad de agua, marca Pawkit, con exactitud de ± 0.02 a_w, rangos entre 0 a 1,0 a_w y resolución ±0.01 a_w. Además, dispone de un sensor dieléctrico para medir la humedad relativa dentro de la cámara de medición, a una velocidad de 5 minutos y trabaja en condiciones ambientales para temperaturas entre 5 a 50 ºC y humedad relativa de 0 al 90 %. (Manual de la marca PawKit).

La calibración y certificación del AquaLab fueron realizados de conformidad a la normativa en vigor (HACCP, de ISO 9000).

Balanza. Utilizada para determinar el peso de material de pesaje. Para el ensayo se ha utilizado una balanza no automática, es decir que el material de pesaje se tiene que colocar de manera manual y cuidadosa en el centro del platillo de pesaje. En cuanto se obtenga un valor de pesaje estable, se puede proceder a leer el valor indicado por la balanza.

La Balanza de marca Kern tiene conexión al sistema de adquisición de datos a través del Software instalado en un computador. La balanza utilizada en los ensayos tiene una capacidad máxima de pesaje de 5 kg, y resolución desde 0,001 g. Este tipo de balanza se fabrica según los principios de la DIN ISO 9001:2008 (Manual de la marca KERN).

Termopar (tipo K). Son sensores de temperatura eléctricos, construido por dos alambres de distinto material unidos en un extremo, al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivolts que aumenta con la temperatura. El sensor nos permite controlar los valores de temperaturas interna del secador convencional, conectado a un sistema de adquisición de dato portátil. El termopar calibrado tiene un error del ± 5%, con un tiempo de respuesta 0,1 s y un rango de máxima y mínima temperatura detectada de 250 a -50 C.

El termopar utilizado en este ensayo fue previamente calibrados, por el laboratorio de caracterización energética y meteorológica (LACEM).

3.3 SELECCIÓN DE LA BIOMASA "ALGA MARINA"

En la sección 2.2.1 del capítulo anterior, se describieron los aspectos teóricos relacionados con el estudio de las macroalgas marinas, que serán utilizadas como materia prima para este estudio.

Según se ha citado; las algas son organismos acuáticos, fotoautótrofos oxigénicos (que desprenden oxigeno), y poco complejo morfológicamente (Aulados, 2008). Son capaces de ocupar todos los tipos de hábitats que ofrezcan iluminación y humedad suficiente, ya sean uní o pluricelulares. Las algas se alimentan directamente a través de su superficie y toman los elementos nutritivos del medio que las baña o humedece. (Punín Crespo, 2005)

Las algas se clasifican según el tipo de pigmento, la sustancia de reserva, y la forma de la células reproductoras (Punín Crespo, 2005), (López y col, 2008). Los grupos de algas clasificados en función del color se encuentran:

- Algas rojas
- Algas pardas
- Algas verdes

En la primera fase del estudio, se localizaron sitios de muestreo de macroalgas situados en las Rias Baixas, La Coruña, Baiona y Cambaya, encontrándose especies como; Laminarias (Kombu,), *Himanthalia elongata* (espagueti de mar), codium , ulva lactuca (lechuga de mar), sargassum y palmaria (dulse). El principal objetivo de esta etapa fue determinara la cantidad de producto fresco en el área, y a la vez que no existan fuente de contaminación en el sector.



Lám. 3. 1 Sitio de muestreo. a. La Coruña, b. Baiona

Para el estudio se han seleccionado muestras de tres especies de algas, siendo estas del géneros *sargassum , laminarias y codium*. Las dos primeras pertenecientes a la división de las Phaeophyta o algas pardas, y la última perteneciente a la división de las Clorophyta o algas verdes, como fue indicado anteriormente se tratan de evaluar macroalgas características de la región. Por otro lado, para asegurar la viabilidad técnica y económica de un posible proceso de explotación, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Especie de macroalga con alta cantidad de producción en la mayor parte del año. Para ello será necesario establecer una localización del producto poco sujeto a dependencias estacionales y en zonas cercanas que permitan reducir los costes de transporte.
- Especies de algas de alta proliferación asociada a impactos ambientales en el área de extracción.
- Algas que no necesiten de pre-tratamiento para acondicionar las muestras dado que esto constituye uno de los mayores costes en una valoración de un producto.

Atendiendo a todo lo citado, se seleccionaron 3 especies. Ver detalles en la Tabla 3.1 y la lamina 3.2.

Tabla 3. 1 Muestras de algas utilizarse para el análisis de cinética de secado

División	Familia	Género	Lugar de recogida
Algas pardas	*Sargassaceae*	*Sargassum*	La Coruña, Rías Baixas.
Algas pardas	*Laminariaceae*	*Laminaria*	La Coruña
Algas verdes	*Codiaceae*	*Codium*	La Coruña



Lám. 3. 2 a. Macroalgas pardas (Sargassum) . b. Macroalgas pardas (Laminaria). c . Macroalgas verde (Codium).

3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

El peso, la actividad de agua, la humedad, y las temperaturas se consideran como indicadores para determinar el tiempo y la energía requerida para deshidratar una muestra de biomasa, ya que permiten determinar la curva de velocidad de secado característica del producto. Para determinar esos parámetros, se realizaron ensayos experimentales en condiciones controladas en laboratorio y en condiciones ambientales. Los ensayos fueron realizados con una velocidad de flujo de aire constante y a diferentes temperaturas de secado.

3.4.1 Determinación de la base seca.

La deshidratación de base seca en una muestra de algas se realiza por deshidratación. La deshidratación de las muestras se ha realizado por desecación en una estufa de aire. En cada ensayo se realizaron tres pruebas reguladas a temperaturas de 30 ºC, 40 ºC y 50 ºC. Así mismo, en cada análisis se ha seleccionado y eliminado las posibles porciones en mal estado de las muestras para garantizar la calidad de secado de la biomasa.

Durante el proceso los productos pueden presentar cambios físicos o químicos tales como decoloración, pérdida de textura, forma física, pérdida de sustancias volátiles, perdida de cualidades nutritivas, pérdida de peso, cambio en la composición estructural de la muestra, perdidas de nutrientes, sabor entre otros. Por esta razón, se hace necesario controlar los factores y parámetros que influyen en estos cambios, asociados a la transferencia de calor y masa entre el aire caliente y la muestra a secar.

Dentro de las variables de secado se consideraron objeto de estudio los siguientes parámetros principales para cada una de las pruebas desarrolladas:

- Temperatura de aire caliente, $T_{a,c}$. (ºC)
- Velocidad de aire, V_a (m/s)
- Peso de la muestra , m (gramos)
- Tamaño de la muestra. (centímetros)
- Humedad inicial y final de la muestra, X_{wb} , X_{db} (%)
- Actividad de agua del producto seco , a_w

A continuación se engloban los procedimientos previos a seguir para la deshidratación de la biomasa.

Procedimiento experimental.

Para determinar la curva de secado del producto se utilizaron muestras de macroalgas frescas. Antes de empezar con la deshidratación de la muestra, se procedió a lavar (con agua de mar) y secar las macroalgas para descartar contenido de arena, posteriormente se cortan y se pesan utilizando una balanza de laboratorio hasta obtener un peso de 120 g por muestra. Previo al secado en la estufa se determinó la humedad inicial del producto.

Una vez preparada la muestra es introducida en una bandeja y trasladada a la estufa de aire. El seguimiento de la pérdida de masa se realiza por pesadas periódicas cada 10 minutos, por medio de una balanza Kern (±0.001 g) conectada a un sistema de adquisición de datos. Registrando de esta manera los valores de masa (g) en un computador.

El proceso de secado, se da por finalizado cuando en el trascurso del tiempo se obtiene un peso constante. Finalmente se mide en la muestra seca el contenido de humedad final y la actividad de agua.

Aunque la estufa cuenta con un control de temperatura y velocidad de aire, se colocó un termopar para medir la temperatura del aire caliente conectado a un sistema de adquisición de datos. La humedad del aire medida en la pequeña cámara de la estufa se registró utilizando un registrador de datos USB. Tal como se ha indicado anteriormente, para cada especie de alga se repite el mismo procedimiento tres veces a distintas temperaturas (T) de secado.

3.4.2 Determinación de la actividad de agua

Durante el procedimiento experimental se analizaron un total de 6 muestras de algas húmedas de 60 gramos cada una, referente a los tres tipos de biomasa seleccionada anteriormente. Las pruebas se elaboraron a una temperatura constante de 50 ºC, midiéndose en intervalos cortos la actividad de agua del producto.

Procedimiento experimental.

Inicialmente se aplica el mismo procedimiento descrito en la operación de secado, después del corte de las muestras, se pesa la biomasa utilizando una balanza de laboratorio hasta obtener un peso de 60 g. Previo al secado se determinó la humedad y actividad de agua inicial del producto.

Posteriormente las muestras son llevadas a una estufa experimental de calentamiento forzado a 50 ^{0}C, por 10 min. Después de este tiempo la muestra es sacada de la estufa y pesada en una balanza digital (ver lámina 3.3). Se selecciona una pequeño cantidad de biomasa para medir la actividad de agua, y nuevamente se coloca la muestra en la estufa.

La actividad de la pequeña muestra (ver expresión (3.1)) es medida tras un periodo de estabilización de 5 minutos para asegurar la fiabilidad de la medida. El proceso se repite cada 10 minutos hasta que la actividad de agua en la muestra sea constante

$$a_w = \frac{P}{P_o} = \frac{\%\,HR}{100} \tag{3.1}$$

Las variables registradas durante las pruebas fueron; contenido de humedad, temperatura, actividad de agua, peso inicial y final de la muestra. El mismo procedimiento experimental se repite por duplicado para cada tipo de alga.



Lám. 3. 3 Medición de la actividad de agua aw en el medidor digital AQUA Lab.

3.4.3 Determinación de la humedad de equilibrio.

Para elaborar la isoterma de desorción, es necesario determinar el contenido en humedad que la muestra va perdiendo durante el proceso de deshidratación. Para ello se realiza este ensayo conjuntamente con el análisis anterior (actividad de agua) utilizando una termobalanza (Aponte, 2011). El cálculo de la humedad se determina por la pérdida de peso que sufre la muestra después de ser sometida al proceso de calentamiento.

Procedimiento experimental.

Del mismo procedimiento anterior, mientras que la muestra de biomasa es sacada de la estufa experimental de calentamiento forzada (50 ^{0}C) y pesada en una balanza digital, se selecciona una pequeño cantidad de biomasa para medir la actividad de agua, y la humedad en este tiempo. Se pesa la muestra final y nuevamente se coloca la muestra en la estufa por otro lapso de tiempo (10 min), para volver a repetir la operación.

El método de secado por termobalanza consiste en seleccionar una muestra menor a 1 g, que colocamos en el platillo del equipo de medición de humedad a una temperatura de trabajo estandarizada de 130 ^{o} C (ver lámina 4.4). Se trata de una medida rápida de unos 15 minutos.

En este ensayo, al determinar la humedad en base seca, la variable que se controla es el peso de la biomasa, por lo que hay que tener sumo cuidado a la hora de realizar la pesada, siendo la más rápida posible una vez quitada la muestra de la balanza digital, para evitar que adsorba o pierda la menor cantidad de agua posible del / al ambiente.



Lám. 3. *1.Determinación del porcentaje de humedad; Termobalanza. y accesorios*.

3.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

3.5.1 Isotermas de equilibrio.

En esta sección se presentan y analizan los resultados experimentales de las isotermas de equilibrio determinadas por el modelo de GAB. Las isotermas son realizadas con los valores de pérdida de humedad del sólido y la actividad de agua.

El conocimiento de la relación de la actividad de agua y, el contenido de humedad de equilibrio de los productos especialmente alimenticio, es importante para predecir los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que ocurren mediante el almacenamiento y transformación. La actividad del agua (a_w), es un factor crítico en la determinación de la calidad y seguridad de los productos de consumo diario.(Moreira, 1997), (Ayala, 2011),(María Chavez, 2004).

En la siguiente tabla se presenta los resultados de contenido de humedad obtenidos de las pruebas analizadas en el laboratorio.

Tabla 3. 1.Contenido de humedad de las muestras. Deshidratación a 50 °C.

División	Género	Actividad de agua inicial (aw)	% humedad inicial (base húmeda)	Actividad de agua final (aw)	% humedad final (base seca)
Algas pardas	Sargasumm	0,84	77,00	0,44	9,17
Algas pardas	Laminaria	0,87	89,37	0,45	10,50
Algas verdes	Codium	0,86	79,00	0,50	12,00

La curva isoterma de desorción es la representación gráfica de la actividad de agua y el contenido de humedad a temperatura constante de la muestra, donde el material esta en equilibrio higroscópico con el ambiente que se encuentra y no existe cambio en el peso de la muestra (Moreira, 1997).

Las isotermas se realizaron a una temperatura constante de 25 ^{0}C, una vez obtenido los datos de forma experimental, se procedió a ingresar los valores resultantes en el programa Water Analyzer que ajusta la isoterma al modelo de GAB (aplicable en la tecnología de alimentos) y hace una comparación de la humedad con el modelo BET.

El modelo de GAB es una extensión de los modelos clásicos de Langmuiry (modelo de BET) propuesto por Brunauer, Emmett y Teller (1938), aplicados para efectos a la desaddesorción en multicapas (Ocampo, 2006). Este modelo (GAB) permite determinar parámetros de interés como son el valor de la humedad de la monocapa en base seca, X^* (g/100 g m.s), y los calores asociados al proceso de desorción que son evaluados, habitualmente mediante esta técnica. Durante el proceso, también se genera el calor isostérico de desorción, Qs, llamado también entalpia diferencia de desorción que indica una medida de fuerza de enlace o de unión entre las moléculas de agua y la superficie del sustrato del alimento. Este parámetro sirve como medio indicador del contenido de humedad de equilibrio constante, y proporciona información sobre el producto para su almacenamiento. (Muhtaseb A, 2010).

El modelo de GAB, determina el contenido de humedad (X) kg agua / kg masa seca , aplicando la siguiente ecuación; (JulioGil, 2013).

$$X = \frac{X^* * C * k * a_w}{(1 - k * a_w) * (1 + (C - 1) * k * a_w)} \quad (3.2)$$

Donde; X^*, es el contenido de humedad de la monocapa o humedad en equilibrio C, constante de Guggenheim. k, factor de corrección relacionado con el calor de desorción de la multicapa. a_w , actividad de agua.

Por otra parte, el modelo de GAB, también determina la constante de Guggenheim (C), relacionada con el calor de adsorción de la monocapa y el factor de corrección k relacionado con el calor de desorción de la multicapa. Teóricamente ambas variables se relacionan con la entalpia de desorción del producto a través de las siguientes ecuaciones. (A.H .Al- Muhtaseb, 2002), (Julio Gil, 2013).

$$C = c_o \exp\left(\frac{H_1 - H_m}{RT}\right) \quad (3.3)$$

$$k = k_o \exp\left(\frac{H_1 - H_n}{RT}\right) \quad (3.4)$$

Donde c_o y k_o son factores de alojamiento entrópico. H_1 es el calor de condensación del vapor de agua pura (kJ/mol). H_m es el calor total de adsorción de la capa monomolecular sobre los primeros sitios de adsorción (kJ/mol). H_q es el calor total de desorción de las moléculas de agua de las primeras capas (kJ/mol). R constante universal de los gases (J/ mol K) y T temperatura absoluta (K). (Ceballos Adela, 2009).

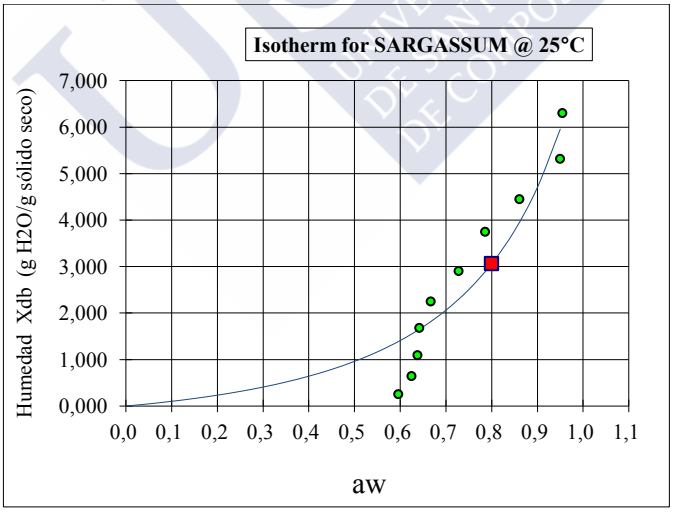
De los resultados obtenidos se observa como las isotermas presentan una forma de tipo III según la clasificación de Brunauer (véase sección de fundamentos teóricos) Este tipo III es la curva característica de los productos con agentes anti- apelmazantes. Este tipo de ingrediente adsorbe agua en sitios específicos, pero la unión de enlaces es muy fuerte, por lo tanto disminuye la actividad de agua drásticamente. (JulioGil, 2013), (Muhtaseb A, 2010)

En las láminas 3.5, 3.6 y 3.7 se presentan los resultados experimentales de las isotermas de desorción a 25 ºC ajustado según el modelo de GAB. Cabe señalar de las pruebas de deshidratación de la macroalga fueron realizadas a 50ºC. Por otra parte, para cada lámina se adjunta una tabla en la que se indica los parámetros de ajuste obtenidos mediante el programa

y su correspondiente coeficiente de regresión, R2. Los resultados se consideran aceptables R2 sea cercano a 1. (María Chavez, 2004), (Ayala, 2011).(Moreira, 1997).

En todos los casos, las curvas muestran un primer tramo exponencial debida a la fuerte absorción del agua sobre los poros de las algas que no han sufrido contracción. Posteriormente, la curva empieza a decaer de forma más lineal. En esta zona, el agua es retenida por condensación capilar. Finalmente se observan pequeñas diferencias de humedad, disminuyendo con el aumento de la temperatura en todo el intervalo de actividad (a partir de aw = 0.2), debido a que no existe una presencia de agua en forma líquida (vapor). Es decir, la biomasa va llegando a la humedad de equilibrio con una la actividad de agua constante. A la vista de los resultados, las isotermas presentan tasas de evaporación altas hasta llegar a valores de actividades de agua de 0,6, por lo que hace necesario un control adecuado del tiempo de deshidratación de este tipo de biomasa (determinación de la curva de velocidad de secado) para evitar daños posteriores de la muestra.

En las tablas 3.3, 3.4 y 3.5, se observan índices de correlación (R^2) aceptables para cada una de las muestras. Los resultados de ajuste del modelo, indican valores de X^* (humedad en equilibrio); 0.36, 0.46 y 0.45 g de H_2O /g sólido seco para las biomasa Sargassum , Laminaria y Codium, respectivamente. Estos valores corresponden al valor de una monocapa[6] que continua adsorbida a la superficie de la biomasa. Los valores de humedad de la monocapa y los calores asociados (c, k) al proceso de desorción son de interés si se evalúa el producto para consumo alimentario. El valor encontrado mediante el análisis del modelo de GAB, indica que la actividad de agua para la muestra de Sargassum se encuentra en torno 0,45, mientras que las muestras Laminaria y Codium presentan valores de 0,5.

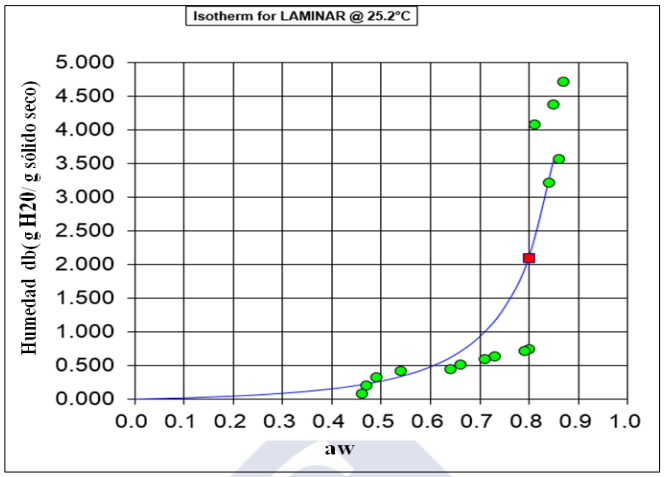


Lám. 3. 2. Isoterma de desorción del alga Sargassum, a_w (25ºC, presión a 1 atm).

[6] *Monocapa*. Cantidad de agua necesaria para formar una capa sobre los grupos altamente polares y accesibles de la materia seca. (Brumovsky,2012).

Tabla 3. 2 Parámetros de ajuste del modelo GAB. Muestra de alga Sargassum.

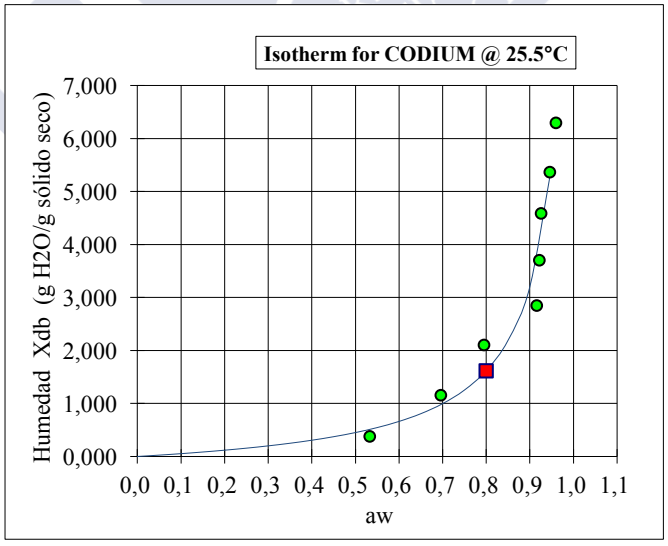
X^* (gH_2O/g sólido)	C	k	R^2
0,35	0,48	0,86	0,89



Lám. 3. 3 Isoterma de desorción del alga Laminar, a_w (25ºC, presión a 1 atm).

Tabla 3. 3 Parámetros de ajuste del modelo GAB. Muestra de alga laminar.

X^* (gH_2O/g sólido)	C	k	R^2
0,46	0,10	1	0,86



Lám. 3. 4 Isoterma de desorción del alga Codium , a_w (25ºC, presión a 1 atm).

Tabla 3. 4 Parámetros de ajuste del modelo GAB. Muestra de alga Codium

X^* (gH_2O/g sólido)	C	k	R^2
0,45	0,46	0,97	0,95

3.5.2 Cinética de secado

Pérdida de masa por secado convencional.

Los ensayos experimentales de secado, fueron realizados a velocidad de aire caliente constante (0.9 m/s) , y a tres diferentes temperaturas de secado (30, 40 y 50 ºC) para cada una de las muestras seleccionadas. Durante los ensayos se midió la humedad inicial de cada muestra (masa de120 g) , siendo de 75.85 % la humedad inicial para la especie Sargassum, 85.3 % de humedad para la especie Laminaria y 74% de humedad inicial para el alga Codium. A lo largo de la deshidratación de la muestra se determina el tiempo que tarda en secar la biomasa hasta alcanzar una humedad final del producto en tono de los 15 a 20 % (humedad en base seca). En cada caso, la curva de secado se elabora mediante el registro de la pérdida de peso de la biomasa a lo largo de la prueba.

En la Tabla 3. 5 se presenta el tiempo de secado de las muestras a distintas temperaturas así como el peso total del sólido seco. Los resultados de los ensayos muestran que la masa y humedad final de las especie de Sargassum, Laminaria y Codium fueron de; 28 g (X_{db}; 17.2 %) , 17.8 g (X_{db}; 16.6 %) y 18.9 g (X_{db}; 14.2 %) respectivamente. La masa total del agua retirada de las muestran fueron de 92 g de Sargassum, 102.2 g de Laminaria, y 101.1 g de Codium..

Tabla 3. 5. Tiempo de secado de las muestras a diferente temperatura.

	Tiempo (minutos)		
Temperatura	*Sargassum*	*Laminaria*	*Codium*
30 ºC	510	490	830
40 ºC	400	360	540
50 ºC	250	240	300
Peso final	28 g	17,5 g	18,9 g

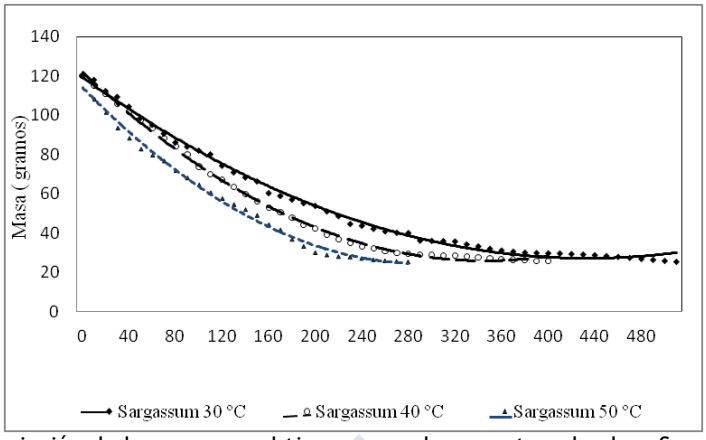
En las láminas 3.5 , 3.6 y 3.7 se presentan gráficamente la pérdida de masa con respecto al tiempo, de las tres muestras analizadas en este trabajo. Como en casos anteriores, las pruebas se realizaron por duplicado con el fin de poder determinar valores medios y obtener la curva patrón característica de cada especie.

En los ensayos realizados sobre las diferentes muestras de biomasa se ha apreciado en la cinética de secado con aire caliente dos periodos de secado:

- Un periodo de velocidad de secado constante gobernado por la evaporación del agua en la superficie del producto. El mecanismo del movimiento del agua en el interior del producto y, por tanto, la estructura de la muestra que se encuentra secada, determina la duración de este periodo. (López, col, 1995).
- Un periodo de velocidad de secado decreciente donde la eliminación del agua es controlada por resistencia interna del material que dificulta el paso de humedad al no existir condiciones de saturación en la superficie, produciendo la eliminación de la humedad interna. (Walter Cova)

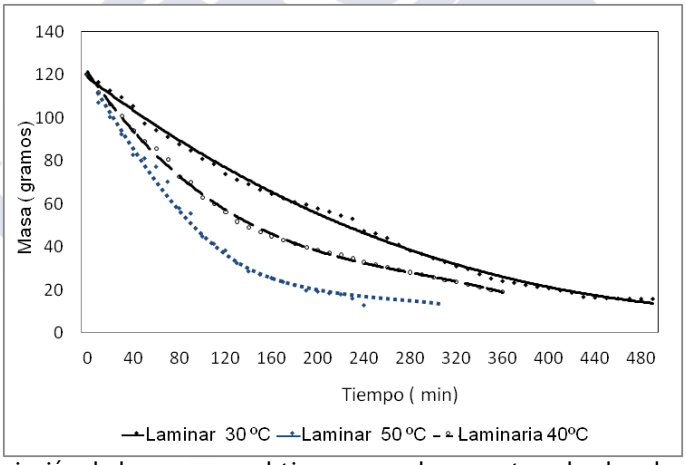
Como se puede apreciar en la lámina 3.5 las curvas de deshidratación del sargassum (división algas pardas) siguen la misma tendencia para las distintas temperaturas de secado, a diferencia de lo que sucede con las otras dos especies estudiadas. El sargassum , por su tipo de estructura tiende a perder agua en su superficie a la misma tasa de evaporación, lo cual se puede apreciar en la curva de cinética de secado T50. A partir de las dos primeras horas de

secado pasa a la etapa de transición donde la pérdida de humedad es lenta hasta llegar a un peso constante.



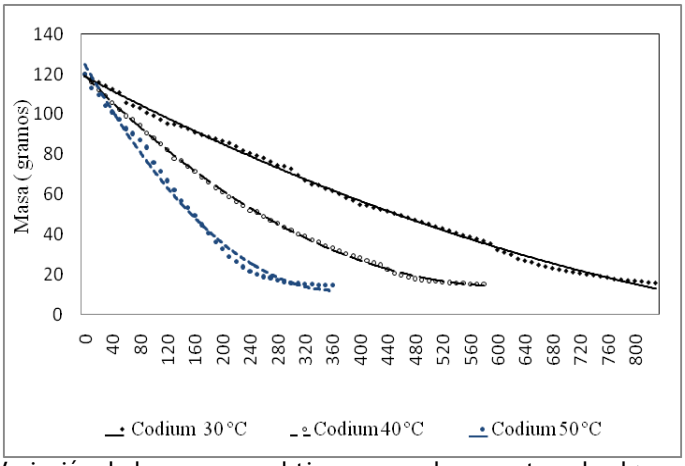
Lám. 3. 5 Variación de la masa con el tiempo para las muestras de algas Sargassum.

En la lámina 3.6 , se presenta la curva de secado del alga laminaria (división algas pardas). En comparación con las otras dos especies analizadas, presenta un menor tiempo de secado debido a su estructura cartilaginosa y su superficie lisa, con un conteniendo de humedad entre 85 a 89 %. Estos tiempos de secado son de 90 minutos en T50, pasando a 160 minutos para T30.



Lám. 3. 6 Variación de la masa con el tiempo para las muestras de algas laminaria.

Concerniente a la especie codium (división algas verdes), la curva de deshidratación empieza a estabilizarse para T50 a partir de los 50 gramos en un tiempo de 160 min. A partir de ese tiempo pasa al periodo de velocidad de secado decreciente, en un proceso de secado lento, debido a su estructura compleja de textura aterciopelada, esponjosa de color verde con alto contenido de clorofila presente en la misma. La fase del segundo periodo de T40 y T30 se da a los 320 min y 560 min. (Lám. 3. 7)



Lám. 3. 7 Variación de la masa con el tiempo para las muestras de alga codium.

Curva de secado.

En este apartado se presenta gráficamente los resultados experimentales obtenidos, a partir de los datos de la curva de la cinética de secado (pérdida de peso de la muestra con respecto al tiempo) y la humedad de equilibrio determinada en el modelo GAB, X^* (g H2O/g s.s). En la siguiente tabla se presenta dichos valores.

Tabla 3. 6 Parámetros Iníciales para determinar las curva secado.

Parámetros	*Sargassum*	*Laminaria*	*Codium*
Muestra Inicial W(g)	120,0	120,0	120,0
Base seca de la muestra Ws (g)	28,0	17,8	18,9
Humedad de equilibrio X^* (g H2O/g s.s) (modelo GAB)	0,35	0,46	0,45
Área de secado (estufa)	0,04	0,04	0,04

La humedad es una de las variables cruciales a la hora de elaborar la curva característica de una muestra. Para ello, a partir de los ensayos realizados y el contenido de humedad en equilibrio determinada en el modelo GAB, se calcula el contenido de humedad libre X de la muestra durante el proceso de secado y la velocidad de secado R_c ; utilizando las ecuaciones mencionadas de capítulo 2.

El contenido de humedad de un sólido puede expresarse en base seca (X_{db}) o en base humedad (X_{wb}).En ambos casos se define como la relación entre la cantidad de agua que mantiene el producto y el peso total del solido seco (Ec. 3.3). Después de establecer las condiciones de secado y la relación de humedad, es posible determinar el contenido de humedad libre para cada intervalo de tiempo (Ec. 3.4). Finalmente, se obtiene la tasa de evaporación del agua a través de la relación de secado R, también llamada velocidad de secado (Ec. 3.5). Cada especie de macroalga tiene una velocidad de extracción de agua por tiempo de secado. Si se excede este valor, las muestras empiezan a sufrir deterioros, por esta razón la velocidad de extracción es imprescindible para determinar el punto óptimo de secado.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \qquad (3.3)$$

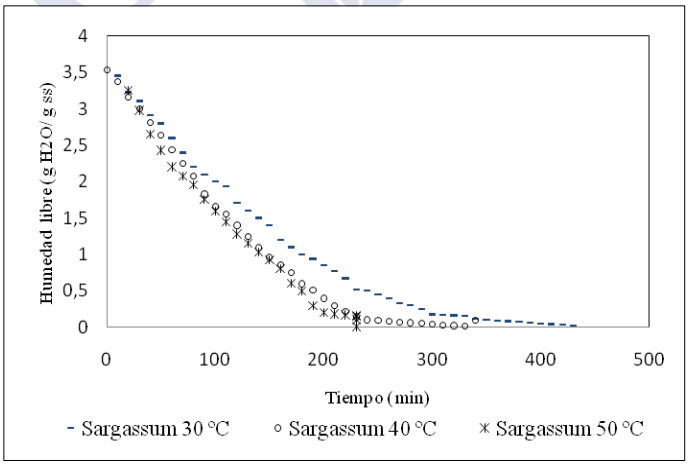
$$X = X_t - X^* \tag{3.4}$$

$$R_c = -\frac{W_s}{A}\left(\frac{\partial X}{\partial t}\right) \tag{3.5}$$

Donde;
$\boldsymbol{X_t}$; Humedad en base seca (g H_2O / g sólido seco).
$\boldsymbol{W}$; Peso del sólido húmedo en gramos totales de agua
$\boldsymbol{W_S}$; Peso del sólido seco en gramos
$\boldsymbol{X}$; contenido de humedad libre en función del tiempo $\boldsymbol{t}$ en horas
$\boldsymbol{X^*}$; contenido de humedad de equilibrio
$\boldsymbol{R}$; Velocidad de secado (g de H_2O/h m^2)
$\boldsymbol{A}$; Área superficial expuesta al secado (m^2)

En las láminas 3.8 , 3.9 y 3.10, se muestran las curvas de secado de las especies estudiadas mediante la medida del contenido de humedad evaporada a través del tiempo de secado. Se observa el efecto de la temperatura sobre el proceso, ya que al aumentar la temperatura de secado disminuye el tiempo de deshidratación de las muestras.

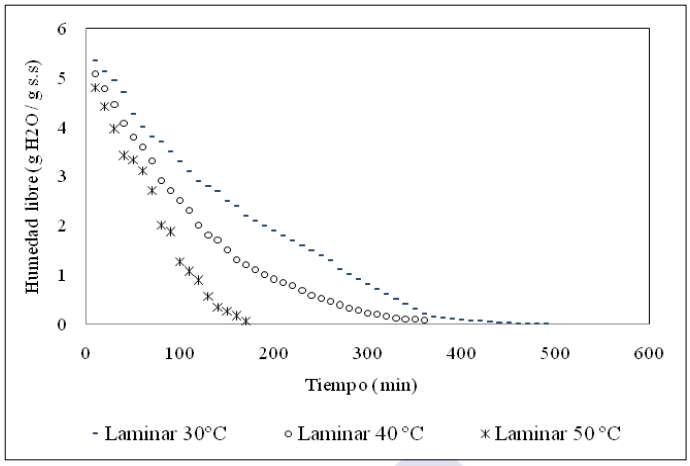
Como se observa en las curvas de secado del alga sargassum, en los primeros minutos la humedad libre del producto es significativa, debido a la rápida pérdida de agua en la superficie. Al trascurrir los 200 min de secado la perdida de agua en las muestras van decreciendo linealmente (humedad final), o dicho de otro modo, existe un relación directa constante para extraer agua del sólido dependiendo del contenido de su humedad. (HectorA. Tinoco, 2010). Como se observa en la gráfica, la temperatura influye en el tiempo de secado (ver Lám. 3.8). Es conveniente indicar, que los ensayos se realizaron hasta los límites de humedad de las muestras.



Lám. *3*. 8 Humedad libre de las muestras del alga Sargassum.

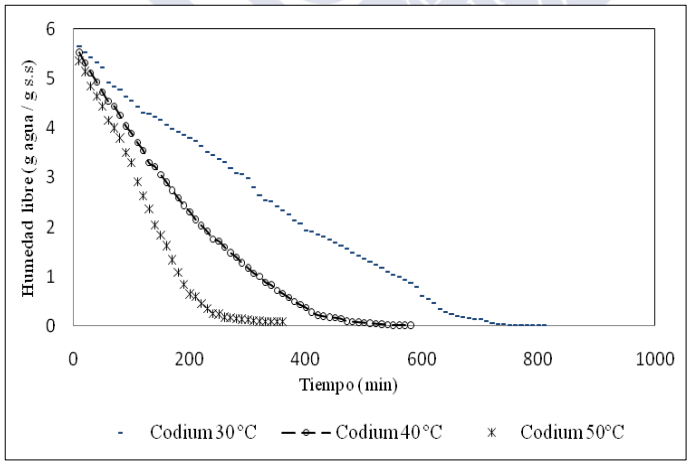
Durante el periodo en el que el proceso de secado ocurre a velocidad decreciente, el mecanismo está controlado por un compromiso ente el movimiento de humedad dentro del material hacia la superficie por difusión y la remoción de humedad de la superficie. En el caso del alga laminar la humedad equilibrio (humedad final) se encuentra en torno de los 0.5

g de agua / g s.s (gramos de sólido seco) y como es de esperar a T50 el tiempo que tarda en alcanzar este valor es de 115 min, en comparación a T40 y T30 (250 min, 320 min).



Lám. 3. 9 Humedad libre de las muestras de alga laminaria.

Por último, en el caso del alga verde (Codium), si analizamos la curva de temperatura de 50 ºC (T50) observamos que el periodo de velocidad contante culmina en 2.5 g H_2O/ g.s.s. Después de este periodo, la adsorción del agua en la biomasa empieza a hacerse lenta (periodo de velocidad decreciente), debido al proceso de la pérdida de agua intracelular que produce la condensación del citoplasma. Es decir, el citoplasma empieza a gelatinizarse[7], impidiendo el paso del agua hacia la superficie. La humedad de equilibrio se obtiene a los 200 min.



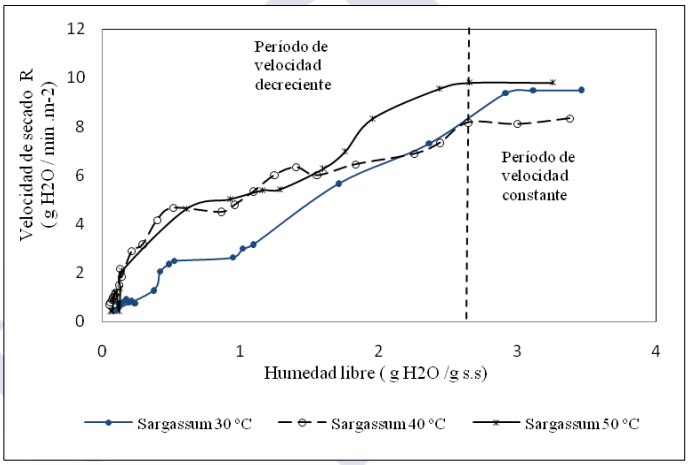
Lám. 3. 10 Humedad libre de las muestras de alga Codium.

A partir de la humedad libre del solido podemos determinar la curva de velocidad de secado de las muestras. Las láminas 3.11 , 3.12 y 3.13, permite observar con claridad el proceso de evaporación del agua, al aumentar la temperatura del aire de secado aumenta la velocidad de secado. Por consiguiente, en función de los resultados obtenidos se deduce que la cinética de secado de la biomasa es dependiente a la temperatura del aire, si bien es cierto

[7] *En los geles*, el agua de la fase masiva se encuentra físicamente atrapada de modo que se ha impedido su flujo macroscópico (Brumovsky, 2012).

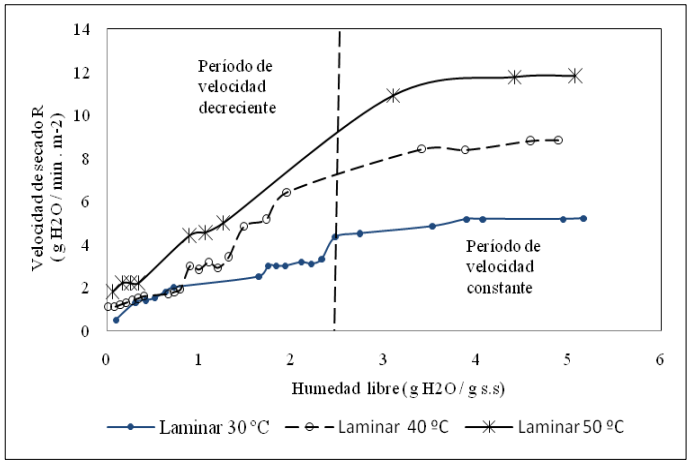
que estas diferencias disminuyen a medida que avanza el proceso. En cada una de las especies estudiadas, se distinguen para las tres temperaturas de trabajo, dos etapas de secado siendo estas; periodo de velocidad creciente y el periodo de velocidad constante. No se observa un periodo de inducción como es característico de otros tipos de productos (ver sección 2.2.4.5) debido a la estructura molecular del alga. Durante última etapa de secado, la más importante del proceso, se produce la migración de la humedad contenida en un alimento siendo este el mecanismo predominante en el secado de la mayoría de los alimentos (A Vega, 2005). Por último, se puede observar como fuera del periodo de velocidad decreciente la perdida de humedad va disminuyendo con el tiempo.

El periodo de velocidad constante en las muestras de alga *sargassum* se da a velocidades de secado de 10 g H_20/ min m^2, 9,8 g H_20/ min m^2 y 8 H_20/ min.m^2 para T50, T40 y T30. Rango de humedad en la que la velocidad de secado varia linealmente con la humedad libre del producto evaporando una cantidad de agua del 26.7%, finalizando en el instante que la humedad libre sea del 2,8 g H_20/ g s.s. A partir de este valor la tasa de evaporación es más lenta hasta alcanzar el ratio final de secado de 0.5 g agua / g s.s. (Lám. 3. 11).



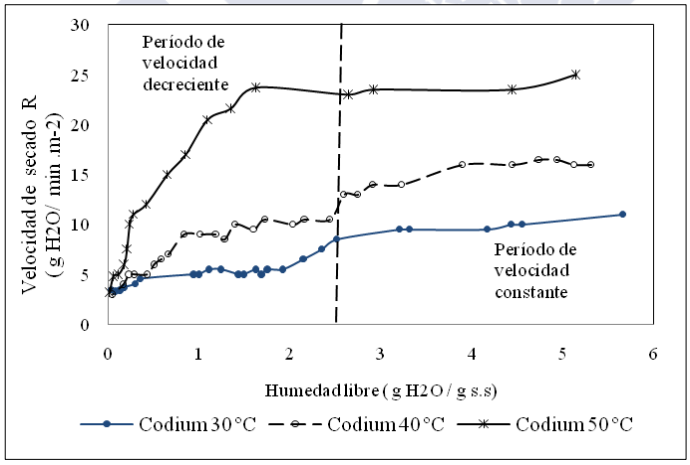
Lám. 3. 11. Curva de velocidad de secado de las muestras de algas Sargassum.

El alga Laminaria, aunque sea de la misma división Phaeophyta (algas pardas) del alga sargassum, presenta una estructura diferente que se traduce en diferentes valores de tiempo y velocidad de secado. La velocidad de secado en el periodo de evaporación constante de esta especie, varía considerablemente con respecto a la temperatura de trabajo siendo de 11, 8 y 4 g H_20/ min m^2 , para T50 , T40 y T30 respectivamente , hasta llegar a un valor de humedad libre de 2.2 g H_20/ g s.s. A partir de esta humedad libre disminuye la tasa de evaporación (periodo de velocidad decreciente) entre un 1.5 al 0.5 % de humedad, finalizando cuando todas las muestras llegan a su tasa de evaporación final de 1 g H_20/ min.m^2. Durante el periodo de velocidad constante se determinó que la cantidad de agua evaporada estuvo en torno de los 30.4 % a T50, 33 % a T 40 y 40 % de la humedad en T30, para una muestra de alga con un contenido de humedad inicial de 85,3 %.



Lám. 3. 12 Curva de velocidad de secado de las muestras de algas Laminarias.

En el caso de la especie Codium, puede observarse en la lámina 3.13 que presenta un mayor periodo de evaporación constante en T50 con un valor de velocidad aproximado de 23, 5 g agua / min m^2 hasta el instante que la humedad libre sea de 1.5 g agua / gs.s. Durante este periodo se determina que se ha evaporado una cantidad de agua del 43.3 % de humedad en la muestra T50 (humedad inicial de la muestra fue del 74 %). Es decir, si la curva de velocidad permanece constante sea más prolongada, se garantiza una mayor pérdida de humedad. Los valores de velocidad constante de las muestras T 40 y T30 se encuentra en torno de los 11 y 6 g agua / min m^2 hasta una humedad libre de 2.5 g agua / gs.s. A partir de estos valores el secado pasa a la etapa de velocidad decreciente donde la tasa de evaporación será más lenta.



Lám. 3. 13 Curva de velocidad de secado de las muestras de algas Codium.

La velocidad de secado durante el periodo de velocidad constante puede ser determinada utilizando las ecuaciones de transferencia de masa y calor. Como la superficie se mantiene en condiciones de saturación y su temperatura es la de bulbo húmedo del aire de secado, si se desprecia la transferencia de calor por conducción y radiación, la velocidad de secado en este periodo se determinaría como:

$$-\frac{dX_w}{dt} = \frac{h\,A\,(T_{a,c} - T_w)}{w} \tag{3.6}$$

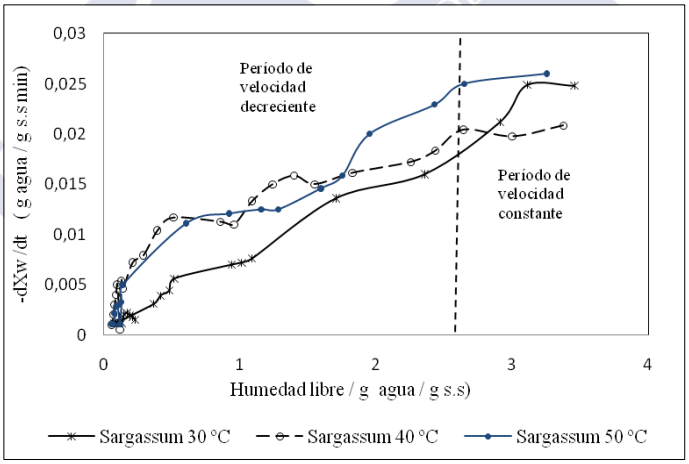
Siendo; -dX/ dt la cantidad de agua eliminada por unidad de tiempo, h el coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2 C) . A, es el área de transferencia (m^2) . $T_{a,c}$ es la temperatura de bulbo seco. T_w es la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado (ºC) y $_w$ es el calor latente de vaporización del agua en la superficie del producto (kJ/ kg agua).

Otra forma de escribir la ecuación 3.6, se muestra en ecuación 3.7, donde se considera directamente la tasa de velocidad de secado de las muestras.

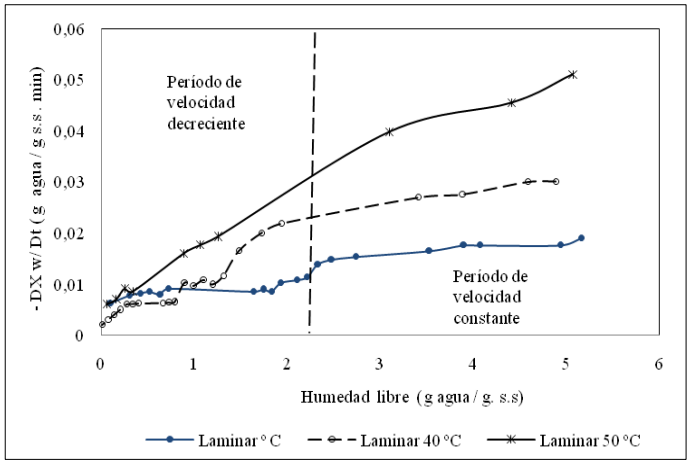
$$Rc = \frac{h\ (T_{a,c} - T_w)}{w} \tag{3.7}$$

De los resultados obtenido de las ensayos realizados para las tres muestras de macroalgas, se determinara que la velocidad de secado optima para esta especie, estaría en torno de los 10,5 g agua / min m^2 o lo que es lo mismo 0,64 kg agua/ h .m^2. El valor R_c , es uno de los principales parámetros necesarios para determinar el flujo de aire y la energía requerida para deshidratar un producto , y de esta manera proceder el diseño del secador o deshidratador.

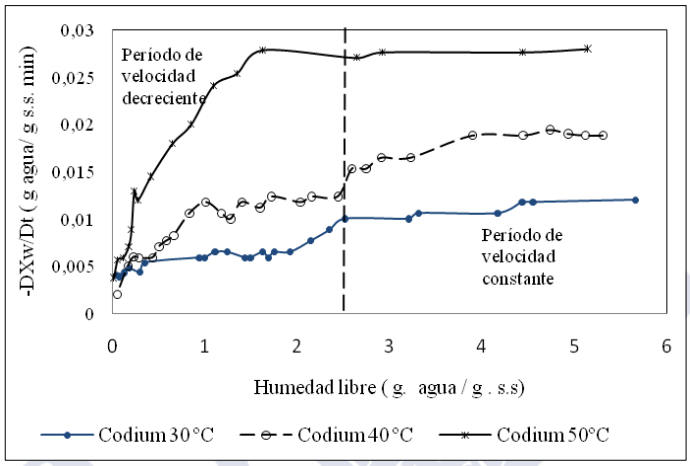
Para finalizar con el análisis, se hace necesario presentar gráficamente la cantidad de agua eliminada en cada una de las muestras antes mencionadas con respecto al tiempo, para temperaturas de secado a 30 ºC , 40ºC y 50 ºC y en los dos periodos de velocidad.



Lám. 3. 14 Cantidad de agua eliminada con respecto al tiempo en las muestras de algas Sargassum.



Lám. 3. 15 Cantidad de agua eliminada con respecto al tiempo en las muestras de algas Laminarias.



Lám. 3. 16 Cantidad de agua eliminada con respecto al tiempo en las muestras de algas Codium.

3.6 CONCLUSIONES.

Se han realizado ensayos experimentales de tres especies de macroalgas, *Sargassum* , *Codium y Laminaria*. Con el fin de estudiar la cinética de secado o perdida de humedad de la biomasa, humedad de equilibrio, velocidad de secado y el tiempo que tarda en deshidratarse se han realizado tres ensayos a diferentes temperatura de operación (30 , 40 y 50 ºC). Estos parámetros son cruciales para el diseño del prototipo experimental. Los principales resultados obtenidos son:

Determinación de la isotermas de desorcion: Las isotermas características de las macroalgas son de forma de tipo III (productos con agentes anti- apelmazantes) según la clasificación de Brunauer. Los análisis del modelo de GAB, nos permiten calcular la actividad de agua para las diferentes muestras. Los valores para el alga *sargassum* se encuentran en torno 0,45, mientras que las muestras *laminarias y codium* presentan una actividad de agua de 0,5.

Determinación de la pérdida de masa: las curvas de deshidratación del *sargassum* muestran una dependencia lineal para distintas temperatura de secado, a diferencia de las otras dos especies. Se determino que la especie laminaria necesita un menor tiempo de

secado, por su estructura cartílagosa y su superficie lisa. En cuanto a la especie *codium,* su tasa de evaporación es menor que la asociada a las algas pardas, debido a su estructura compleja de textura aterciopelada, esponjosa de color verde con alto contenido de clorofila.

Determinación del tiempo de secado: Los mejores resultados de secado se obtuvieron a una temperatura de 50 ºC a un tiempo de secado entre 4 y 5 horas para llegar a una humedad final en el producto del 20 % en base húmeda. A temperaturas inferiores de los 40 ºC el tiempo de secado del producto puede llegar a duplicarse o triplicarse. Por otra parte, durante los ensayos se ha observado una relación directa entre el contenido de humedad de la muestra y su textura, teniendo en cuenta que la temperatura será un factor que limita la velocidad de extracción y el tiempo de secado.

Determinación de la curva de velocidad de secado: La curva de velocidad de secado con aire caliente presenta dos etapas diferenciadas:

- Un periodo de velocidad de secado constante donde el secado asociado al proceso de evaporación del agua en la superficie del producto.
- Un periodo de velocidad de secado decreciente donde la eliminación del agua es controlada por resistencia interna del material.

El periodo de velocidad constante en las muestras de alga *sargassum* se da a velocidades de secado entre 10 g H_20/ min m^2a 8 H_20/ min m^2 para temperaturas entre 50 a 30 ºC y humedad libre del 2,8 g H_20/ g s.s. En el caso del alga laminar en el primer periodo se observa una gran diferencia de la tasa de evaporación con respecto a la temperatura de trabajo siendo de 11 g H_20/ min. m^2 para temperatura de secado de 30 ºC y de 4 g H_20/ min m^2 para temperatura de secado de 50 ºC. Este mismo caso se aprecia en el deshidratado del alga *Codium* , abriendo una diferencia de velocidad de evaporación aproximada de 18 g H_20/ min m^2 entre la temperatura de secado de 30 ºC y 50 ºC.

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

CAPITULO 4.
DIMENSIONAMIENTO, SIMULACIÓN Y AMBITO CONSTRUCCIONAL DEL SECADERO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN.

En el capítulo 2 se indicaron los aspectos teóricos relacionados con la tecnología del secado y la adaptación de las energías renovables como fuente energética en los secaderos. A la vez, se han determinado los métodos existentes de trasmisión de calor y los parámetros más relevantes que influyen en el proceso de deshidratación.

Cuando se requiere diseñar un secador es necesario conocer el mecanismo y la cinética de secado del producto, es decir se debe establecer relaciones cuantitativas entre el tiempo que debe durar el proceso y las condiciones de secado, por este motivo se han determinado la curva de cinética y velocidad de secado de la biomasa macroalgal que fueron presentadas en el capitulo anterior.

Partiendo de estas premisas, en el presente capitulo se desarrolla el diseño y se describen las dimensiones del prototipo hibrido adaptado con energías renovables, para posteriormente ser construido y desarrollar los ensayos de secado con el producto macroalgal.

Mediante el diseño se ha determinado la metodología de cálculo más apropiada para obtener el consumo energético del secadero, a través del flujo de aire de secado, la temperatura de operación, las pérdidas por transferencia de calor, selección de materiales, humedad del aire y del producto, entre otros parámetros importantes a considerarse en el cálculo. Conocido este valor se pretender realizar una distribución de carga entre los diferentes componentes del prototipo de secado.

Posteriormente se analiza, dimensiona y se selecciona los componentes del sistema autónomo fotovoltaico que será la fuente de alimentación del sistema auxiliar del prototipo (resistencias eléctricas). También se dimensiona y selecciona el colector solar siendo uno de los componentes principales del secadero. Para completar con el diseño del prototipo se evalúa y dimensiona el sistema aerotermico.

A la vez, se ha analizado el comportamiento fluido dinámico del diseño del prototipo experimental aplicando programa computacional de simulación a través de la dinámica de fluidos computacional (CFDs) con el objetivo de poder determinar los parámetros principales teóricos como son la temperatura y el flujo de aire, que servirán como método de comparación con los resultados experimentales que se presentaran posteriormente en el siguiente capítulo. Por último, se presentan la etapa construccional del secadero hibrido.

4.2 ENERGÍA SOLAR

4.2.1 Dimensionamiento de la cámara de secado.

Previo al diseño del prototipo experimental es necesario considerar los parámetros significativos que influirán en su funcionamiento. Para ello se establece las principales variables a considerar en el diseño del secador con el objetivo que nos permita obtener un secadero con una eficiencia aceptable y sobre todo un ahorro energético durante el proceso de secado y un producto uniformemente deshidratado.

- Características intrínsecas del producto: espesor, estructura interna, tasa de evaporación, temperatura en la superficie, peso total del producto húmedo, graficas representativa de velocidad de secado, peso seco, conductividad térmica, humedad bulbo seco, coeficiente de transferencia de masa evaporada.
- Condiciones meteorológicas del entorno.
- Recursos energéticos renovables a disposición.
- Aire caliente para el secado: temperatura, humedad del aire caliente, caudal másico, velocidad, humedad del aire saturado, condiciones de flujo (laminar o turbulento), coeficiente de transferencia de calor por convección, calor latente de vaporización, área de bandejas, coeficiente de transferencia de calor por conducción en bandejas.
- Característica física del secadero: forma del secador, longitud, área total, tipo de material, conductividad del material, espesor de paredes, coeficiente de transferencia de calor por convección, radiación y conducción.
- Variables asociadas al funcionamiento térmico: Consumo de energía, tiempo de secado, eficiencia del secado, eficiencia del secador.
- Costo de inversión y operación
- Manipulación y fácil construcción

Entre los inconvenientes que presentan los secaderos solares o híbridos, concierne especialmente en el momento de ser instalados, al necesitar lugares despejados, evitando sombra de árboles o edificaciones para no afectar su funcionamiento impidiendo la recepción de radiación solar.

4.2.1.1 Balance de masa y energía

El diseño inicial propone dos cámaras acopladas entre ellas. Se pretende utilizar materiales metálicos para la construcción de las paredes y piso, así como placas transparentes de plásticos glass y policarbonato utilizadas en la pared frontal y en el techo. Los materiales transparentes permitirán aprovechar la irradiación solar del día como aporte calórico al sistema. La biomasa será colocada en bandejas malladas separadas entre ellas con la finalidad de que el flujo de calor evapore la mayor cantidad de agua en la superficie superior e inferior del producto por medio de la convección y conducción entre aire y la biomasa.

Los parámetros dominantes en el balance entre la masa y la energía en el sistema son el intercambio entre el flujo de gas caliente para el proceso, el producto distribuido en las bandejas y las paredes internas del secador.

Una parte de la energía del aire caliente que fluye por la superficie del producto es acumulada mientras el resto se emplea en evaporar la humedad, teniendo sentido que el balance de masa en el producto húmedo está condicionada en: el calor latente de vaporización a la temperatura de interface, la tasa de evaporación a través del coeficiente de transferencia de masa y al porcentaje de humedad del producto en su etapa final e inicial

El calor latente de vaporización $_w$ del agua pura; representa la cantidad de energía que tiene que absorber la biomasa para vaporizar su humedad, su valor en función de la temperatura, se puede determinar mediante la siguiente expresión,

$$_{\mathrm{w}} = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{M_A}}[6547{,}1 - 4{,}23\ (\mathrm{T} + 273{,}16)] \qquad (4.1)$$

Siendo R la constante de los gases (8314 J/kmol K), M_A el peso molecular del agua (18 kg/kmol), y T la temperatura.

Cuando hablamos de transferencia de energía térmica en el sistema, estamos considerando que el calor se transfiere por mecanismos de conducción, convección y radiación. Es decir, en una pared translucida habrán perdidas de calor por convección interna (gas caliente que llega a la superficie interna de la pared), resistencia por conducción del material, convección de calor del exterior (aire ambiente) y radiación exterior que llega a la superficie (Incropera). A continuación se define los tres conceptos básicos de transmisión de calor antes mencionados:

Resistencia térmica por conducción: La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energética, como resultado de interacciones entre esas partículas.

$$h_k = k\ /e \qquad (4.2)$$

Siendo k el coeficiente de transferencia de calor por conducción, y , e será el espesor del material.

Resistencia térmica por convección: La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido en movimiento, comprendiendo los efectos combinados de la conducción y el movimiento. La transferencia de calor por convección se expresa por la ley de Newton del enfriamiento como la relación entre h el coeficiente de transferencia de calor por convección h por ΔT la diferencia de temperatura y la superficie de contacto A . La variable h, que se puede determinar en un fluido que fluye de manera laminar o turbulento a través de la siguiente expresión;

$$h_o = k\ Nu\ /L \qquad (4.3)$$

El coeficiente de convección h, se encuentra en términos del coeficiente de transferencia de calor k del material, longitud L , y del número de Nusselt (Nu) y este a su vez dependerán del numero de Reynolds (Re) y Prandtl (Pr).

Resistencia térmica por radiación: La radiación es la energía emitida en forma de onda electromagnética (fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas

de los átomos o moléculas. Expresada por la constante de Stefan Boltzmann , σ =5,67 x 10^{-8} W/m^2 K^4 siendo la radiación emitida en una superficie ideal (cuerpo negro), la emisividad de la superficie ε estando en un intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$ y las temperatura de superficie y de los alrededores que en ciertos caso están influenciadas con la temperatura del cielo. $Q_{total} = h_r A_s (T_s - T_\infty)$ o $Q_{total} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{cielo}^4)$. Siendo h_r el coeficiente de trasferencia de calor radiante, expresado como:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_a^2) ((T_s + T_a) \quad (4.4)$$

La temperatura del cielo [8] (T_{cielo}), se determina aplicando la siguiente expresión, $T_{cielo} = 0{,}0552 * T^2_a$

4.2.1.1.1 Metodologías utilizadas para obtención del consumo energético.

Para realizar el cálculo que nos permite obtener la cantidad de energía total necesaria para evaporar un porcentaje aproximado del 60% de contenido de agua del producto (capitulo 3), pueden utilizarse los diferentes métodos propuestos por Geankpplis, Samaneh, Doerner y la FAO , que van desde la manera más simple de cálculo dando un valor aproximado hasta la forma más compleja del análisis. En todo caso, cualquiera que sea el método de selección del usuario es prioritario conocer la curva de secado característica del producto. En lo que sigue se presentan aquellos más representativos:

MÉTODO 1. Ecuación general de la Energía / uso de Carta psicrométrica (Geankoplis, 1998) , (Samaneh Sami, 2011).

Una forma sencilla y aproximada de calcular el calor necesario para deshidratar un producto es utilizar la cartas psicométrica (aire- vapor de agua) representada por un diagrama doble de entrada, en el que se relaciona las propiedades termodinámicas de una mezcla de aire húmedo como son la temperatura, entalpía, humedad relativa y volumen especifico.

$$Q_T = \dot{m}_a * (h_2 - h_1) \quad (4.5)$$

Siendo, Q_T la energía consumida (W), $\dot{m}_a$ el consumo de aire seco ($kg_{aire\ seco}$/ h), h_1 y h_2 son las entalpias del aire al pasar de una temperatura inicial a la temperatura de secado necesaria, es decir la temperatura de bulbo húmedo y seco (kJ/$kg_{aire\ seco}$) obtenidas de la carta psicrométrica (Apéndice A).

El consumo de aire seco $\dot{m}_a$, se expresa en términos de la velocidad total de evaporación V_T (kg_{agua}/h) y las humedades absoluta del aire obtenidas de la carta psicrométrica , H_W y Ha,c (kgagua/kgaire seco) para pasar de la temperatura de bulbo húmedo Tw a la temperatura de bulbo seco Ta,c.

$$\dot{m}_a = \frac{V_T}{H_{a,c} - H_W} \quad (4.6)$$

[8] Temperatura del cielo : (John Duffie, 2006).

Con respecto al valor de la variable de velocidad total de evaporación v_T en una superficie, se puede calcular de dos maneras; La primera ecuación se utiliza aplicando la curva de secado del producto en un tiempo t.

$$v_T = W_o * \left(\frac{X`_{wb1} - X`_{wb2}}{1 - X`_{wb2}}\right) = W_s * (X_{db1} - X_{db2})/t \quad (4.7)$$

Donde, W_o es el peso inicial del solido húmedo (kg), X_{wb} humedad en base húmeda en estado inicial y final (kg $_{agua}$/ kg $_{prod\ húmedo}$). W_s es el peso del solido seco X_{db} humedad en base seca en estado inicial y en estado final (kg $_{agua}$/ kg $_{prod.\ Seco}$).

La segunda ecuación involucra la velocidad del secado R_c , obtenida mediante la ecuación de transferencia de calor por convección entre el aire y la superficie del sólido a la temperatura de interface o aplicando también la ecuación de transferencia de masa.

$$v_T = R_c * A_b * N_b \quad (4.8)$$

Siendo R_c la velocidad de secado (kg/ m^2 h), N_b numero de bandejas, Ab área de bandejas (m^2). h_i es el coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m^2 K) , $_w$ calor latente de evaporación (kJ/kg), $T_{a,c}$ temperatura de bulbo seco (ºC) y T_w temperatura de bulbo húmedo (ºC).

$$R_c = \frac{h_i}{w} (T_{a,c} - T_W) * 3600 \quad (4.9)$$

El coeficiente h_i involucra las variables de velocidad v_a y densidad del aire caliente d_a.

$h_i = 0.0204\ (v_a * d_{a,c} * 3600\ )^{0,8}$ Para velocidades de 0,61 a 7,6 m/s

$h_i = 1{,}17\ (v_a * d_{a,c} * 3600\ )^{0,37}$ Para velocidades de 0,9 a 4,6 m/s (4.10)

El calor latente será igual a $_w = R/M_A\ [6547{,}1 - 4{,}23\ (T_w + 273{,}16)]$, donde R es la constante de los gases 8314 J/kmol K , M_A peso molecular del agua 18 kg/kmol. T_w temperatura de bulbo húmedo ºC.

MÉTODO 2. Análisis de pérdidas y ganancia de calor en la cámara, trasferencia de masa y calor (Doerner, 2009), (A. Zomorodian, 2007).

Los autores establecen que la energía total utilizada para secar una cantidad de masa húmeda, se obtiene a través de la sumatoria de todas perdidas y consumo de energía en forma de calor que necesita la cámara desde su pre-calentamiento, evaporación del agua en la muestra, perdidas de calor por paredes (estructura) hasta la renovación del aire que debe entrar al equipo con una humedad baja para poder elevar rápidamente la temperatura ambiental a la temperatura de operación del secado.

$$Q_T = \sum Q_{1-6} \quad (4.11)$$

Calentamiento inicial del equipo Q_1 (kcal)

$$Q_1 = V_{prod}\, d_{prod}\, X_i C_{p,prod} (T_{a,c} - T_a) \quad (4.12)$$

En lo que se refiere a la ecuación de calor para el calentamiento inicial, Se escribirá en termino del Volumen V_{prod} , densidad d_{prod} de la biomasa, calor especifico del material $C_{p\ prod}$ = 0,265 + 0,001$T_{producto}$ (kcal/kg ºC), X_i humedad inicial del aire , T_{ac} temperatura de calentamiento (ºC) , T_a temperatura del aire inicial (ºC).

La Conductividad térmica de un material definida a través del calor específico C_p es una medida de capacidad de un material para almacenar energía térmica (kJ/kg).

Calor necesario para elevar la temperatura del aire en el interior. Q_2 (kcal).

$$Q_2 = V_{a,c}\, d_{a,c}\, C_{p\ a,c}(T_{a,c} - T_a) \tag{4.13}$$

Donde, $V_{a,c}$ Volumen (m^3) , $d_{a,c}$ densidad (kg/m^3) y $C_{p.\ a,c}$ calor especifico del aire (kcal/kg C).

Calor necesario para evaporación del agua. Q_3 (Kcal).

$$Q_3 = V_{prod.} d_{prod.} (X_i - X_{final})\ _w + 5\ (kcal/kg)\ * V_{prod.} d_{prod.} \tag{4.14}$$

Siendo; X_{final} humedad final del aire (kg agua/kg aire seco), $_w$ calor latente de evaporación (kcal/kg) ,

Calor perdido por estructura Q_4 (kcal).

$$Q_4 = U\, A(T_{a,c} - T_a) \tag{4.15}$$

Donde, U es el coeficiente global de pérdida de calor determinado por los coeficientes de convección h_i,h_e (W/m^2 K), conducción k (W/m K) y radiación h_r (W/m^2 K) calculado como U = 1/ (1/h_i + e/k +1/(h_e+h_r)) . Siendo A el área de la cámara multiplicada por la diferencia del gas a la temperatura de operación $T_{a,c}$ y del aire ambiente del exterior T_a .

Para determinar el coeficiente combinado de convección y radiación en la parte exterior de la cámara aplicaremos la ecuación de Mc Adam, siendo (he+hr) = $h_{ex,\ c,r}$ = 5,7 + 3,8 v_a , donde v_a es la velocidad del aire ambiental.

Calor necesario para calentamiento de la cámara (estructura) Q_5 (kcal).

$$Q_5 = \left[(V * d * C_p)_{policarbonato} + (V * d * C_p)_{acero} + (V * d * C_p)_{aislante} + (V * d * Cp)plasticoglass \Delta T\right. \tag{4.16}$$

La ecuación se encuentra expresada en términos de volumen V (m^3), densidad d (kg/m^3), poder calorífico Cp (kcal/kg ºC) de cada uno de los materiales utilizados en la construcción de la cámara de secado, por la diferencia de temperatura ambiental y la temperatura de aire caliente requerida para el secado.

Calor necesario para compensar la renovación de aire Q_6 (kcal).

$$Q_6 = V_{prod}\, d_{prod} (X_i - X_{final})\, C_{p\ a,c}(T_{a,c} - T_a) \tag{4.17}$$

El aire saturado de humedad es renovado constantemente por un conjunto de ventiladores. Los ventiladores generan un flujo de aire frio encontrándose a la temperatura y humedad ambiental, aquel pasara por un conjunto de resistencia eléctrica, permitiendo elevar la temperatura del aire a las condiciones óptimas del secado.

MÉTODO 3: Consumo específico, FAO.

El estudio realizado por la FAO indica que el consumo energético para un secadero convencional es aproximadamente de 1000 kcal por kg de agua evaporada. Esta cantidad se encuentra representada por la suma de las siguientes energías:

$$Q = Q_{evap.de\ agua} + Q_{perd\ calor\ sensible} + Q_{perd\ calor} + Q_{ren.aire.} \qquad (4.18)$$

Donde: $Q_{evap.de\ agua}$ es el calor necesario o calor mínimo que se requiere para evaporar 1 kg de agua aproximándolo a 600 kcal, $Q_{perd\ calor\ sensible}$ perdida de calor sensible que se va en el aire , $Q_{perd\ calor}$ perdida por conducción , convección y radiación del calor hacia el exterior, $Q_{ren.aire.}$ perdida de calor transportado por el aire (renovación del aire).

El calor de evaporación del agua se expresa en función de el tiempo t_a (horas) que tarda el equipo en calentar, volumen, y densidad del producto a secar, porcentaje de humedad inicial y final de la biomasa húmeda, tiempo de duración del secado t_b, (horas) calor latente de evaporación.

$$Q_{evap.de\ agua} = \left[t_a * V_{prod} * d_{prod}(X_i - X_{final})/t_b\right]_w \qquad (4.19)$$

Las pérdidas por calor sensible $Q_{Perd\ calor\ sensible}$ (kcal), se obtienen a través de las siguientes variables; Volumen V_a (m^3) densidad d_a (kg/m^3) y calor específico $C_{p,a}$ (kcal/kg C) del aire a la temperatura de calentamiento $T_{a,c}$ (C) y la temperatura inicial del aire T_a (C).

$$Q_{Perd\ calor\ sensible} = V_a\, d_a\, C_{p,a}(T_{a,c} - T_a) \qquad (4.20)$$

Las pérdidas por trasferencia de calor $Q_{Perd\ calor}$ (kcal) hacia el exterior, se determina a través del coeficiente global de calor U representando los coeficientes de convección interno h_i y externa h_e (W/m^2 K), la conducción k (W/m K) del material de policarbonato y plástico glass y el coeficiente de radiación h_r (W/m^2 K) siendo U = 1/ ($1/h_i + e/k + 1/(h_e+h_r)$). A será el área de la cámara, ΔT la diferencia de temperatura del aire de entrada y el aire caliente (ºC).

$$Q_{Perd\ calor} = U\, A(T_{a,c} - T_a) \qquad (4.21)$$

Las pérdidas de calor por renovación del aire se determinan a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{ren.aire.} = V_{prod}\, d_{prod}\ C_{p,a}(T_{a,c} - T_a) \qquad (4.22)$$

La cantidad de energía total Q_T se obtendrá multiplicando la energía Q necesaria para evaporar un kilogramo de agua por la masa de agua a evaporar $M_{evap.}$(kg_{agua}) con respecto al tiempo t_b de operación de secado (h). Se aumenta un valor del 15 % por margen de seguridad.

$$Q_T = Q * M_{evap.}/t_b \quad (4.23)$$

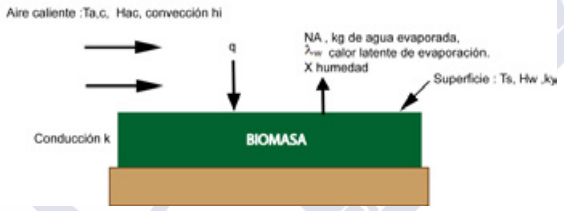
MÉTODO 4: Transferencia de masa y calor (Geankoplis, 1998), (A.O Dissa, 2011).

El autor establece la posibilidad de calcular la energía a partir de la transferencia convectiva de calor de la corriente de gas $T_{a,c}$ (temperatura de calentamiento) a una temperatura en la superficie del producto T_s , menos la transferencia de masa por evaporación del agua. Se ha incrementado un 10 % como margen de seguridad.

$$Q = h_i\, A\,(T_{a,c} - T_s) - M_A N_A\, A_b \quad {}_w N_b + U\, A(T_{a,c} - T_a) \quad (4.24)$$

Siendo, h_i el coeficiente de transferencia de calor (W/m^2 K) ecuación (2.10). A área del secador (m^2), M_A es el peso molecular del agua (18 kg/kmol agua), N_A son los kg de agua evaporada (kg mol H_2O evap/ s.m^2), $_w$ calor latente de vaporización a T_s (kJ/kg H_2O) $_w = R/M_A$ [6547,1 – 4,23 (T_s+273,16)] , R es la constante de los gases 8314 J/kmol K , M_B peso del aire molecular 29 kg/kmol agua, A_b área y N_b número de bandejas.

$$N_A = k_y * \frac{M_B}{M_A} * (H_s - H) = \frac{R_c}{M_A} \quad (kg\ mol/\ s\ m^2) \quad (4.25)$$



Lám. 4.1. Transferencia de masa y calor durante el periodo de velocidad de secado constante

MÉTODO 5: **Análisis del producto**.

El método analiza el flujo de calor del aire que circula sobre el producto, influyendo la convección h_i, conducción k, y la radiación h_r que llegaría sobre este, así como las pérdidas de calor hacia el exterior.

$$Q_T = h_i\, A_b\,(T_{a,c} - T_s) * N_b + h_r A\,(T_r - T_s) + k_{prod} A_b\,(T_{a,c} - T_s) N_b + U\, A(T_{a,c} - T_a) \quad (4.26)$$

Donde; A_b es el área de las bandejas, T_r es temperatura del producto en la interface aire/producto, k_{prod} es la conductividad térmica del alga (W/mK).

La temperatura de la superficie T_s y T_r se determina del balance de masa y calor en la superficie del alga por medio de iteraciones.

$$\frac{(H_{a,c} - H_w)\ {}_w}{C_s} = \left(1 + \frac{U_k}{h_i}\right)(T_{a,c} - T_s) + \frac{h_r}{h_i} * (T_r - T_s) \quad (4.27)$$

El coeficiente de transferencia U_k se calcula a partir del coeficiente de conducción térmico $k_{prod.,}$ propio del alga y el gas que pasa sobre la superficie del materia para evaporar el agua denominado convección interna del gas h_i. Por lo tanto $U_k = 1 / (1/h_i + e_{producto} /k_{prod.})$. La variable C_s (J/kg K) se determina a partir de la humedad de bulbo seco.

$$C_s = (1{,}005 + 1{,}88\, H_{a,c}\,)x10^3 \qquad (4.28)$$

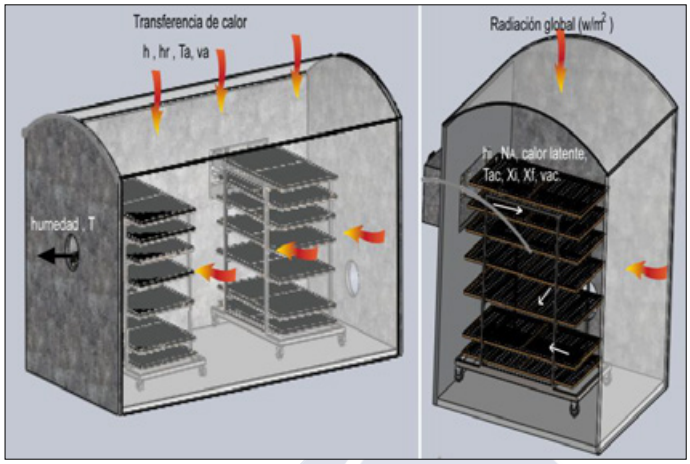
El coeficiente de radiación h_r , está relacionado en termino de la temperatura e interface aire-agua T_r, temperatura superficial del producto T_s, emisividad térmica ε siendo para el policarbonato de 0,88 y el coeficiente de Stefan boltzmann , σ siendo de 5.67 x10^{-8} W/m^2 K.

$$h_r = \varepsilon * \sigma * [(T_r/100)^4 - (T_s/100)^4]/(T_r - T_s) \qquad (4.29)$$

Tabla 4.1. Variables fijadas para el desarrollo del cálculo.

Nombre	Simbología	Valor	Unidades
Área de la cámara	A	2.32	m^2
Área por bandeja	A_b	0.28	m^2
Volumen del producto	V_{prod}	0.028	m^3
Densidad del producto	$d_{prod.}$	357	Kg/m^3
Conductividad térmica del alga	K_{prod}	0,045	W/m K
Peso húmedo	W_o	10	kg
Peso seco	W_s	2,5	kg
Masa de agua evaporada	M_{evap}	7,5	kg H_2O
Humedad inicial del producto	X_i	80	%
Humedad final del producto	X_{final}	20	%
Espesor de la biomasa	e	1 - 0,05	cm
Calor especifico de la biomasa	$C_{p,\ prod}$	0,66	Kcal/kg °C
Temperatura de aire caliente o bulbo seco	$T_{a,c}$	50	°C
Temperatura de bulbo húmedo (inicial)	T_w	22	°C
Temperatura ambiente	T_a	13	°C
Velocidad aire exterior	v_a	1	m/s
Densidad del aire caliente	$d_{a,c}$	1,245	kg/m^3
Velocidad del aire caliente	$v_{a,c}$	1 a 1,2	m/s
Calor especifico aire caliente	$C_{p,\ a,c}$	0.24	kcal/kg °C
Humedad bulbo seco	Ha,c	0.025	$kg_{agua}/kg_{aire\ seco}$
Humedad bulbo húmedo	H w	0.016	$kg_{agua}/kg_{aire\ seco}$
Entalpia bulbo seco	h_1	92	$kJ/kg_{\ aire\ seco}$
Entalpia bulbo húmedo	h_2	65	$kJ/kg_{\ aire\ seco}$
Volumen (policarbonato)	$V_{policarbonato}$	0,02	m^3
Densidad (policarbonato)	$V_{policarbonato}$	1200	kg/m^3
Calor específico (policarbon.)	$C_{p\cdot policarbonato}$	0,1578	kcal/kg K
Conductividad(policarbonato)	$K_{\ policarbonato}$	0,23	W/m K
Espesor (policarbonato)	$e_{\ policarbonato}$	10	mm
Volumen (aislante)	$V_{aislante}$	0,18 96	m^3
Densidad (aislante)	$d_{aislante}$	50	kg/m^3
Calor específico (aislante)	$C_{p\cdot aislante}$	0,246	kcal/kg C
Conductividad (aislante)	$k_{aislante}$	0,03	W/m K
Espesor (aislante)	$e_{aislante}$	25	mm
Volumen (acero)	V_{acero}	0.037	m^3
Densidad (acero)	d_{acero}	7854	kg/m^3
Calor específico (acero)	$C_{p\cdot acero}$	0,104	kcal/kg C
Conductividad (acero)	K_{acero}	60,5	W/m K

Espesor (acero)	e_{acero}	0,8	mm
Densidad (plástico glass)	$d_{plast,\ glass}$	1420	kg/m^3
Volumen (plástico glass)	$V_{plast,\ glass}$	0.01	m^3
Espesor(plástico glass)	$e_{plast,\ glass}$	5	mm
Tiempo de calentamiento	t_a	1	hora
Tiempo de secado	t_b	8	hora



Lám 4.2. Diseño de la cámara de secado. Condiciones de trasferencia de calor y masa.

Una vez presentado los diferentes métodos de análisis y los valores de las variables fijadas para el desarrollo del cálculo, se determina la energía teórica necesaria para nuestro diseño, presentándose dicho resultados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resultados teóricos obtenidos aplicando diferentes metodologías de análisis

Método	Resultados	Energía total por hora de operación.
M1	$_w$ = 2447,7 kJ/kg K h_i = 29,7 W/m^2 K. R_c = 0.64 kg/h m^2 v_t = 3,42 Kg H_2O/h $\dot{m}_a$ = 380,75 kg/h	Q_T = 2855,6 W
M2	Q_1 = 195,28 kcal Q_2 = 21 kcal Q_3 =398,88 kcal $h_{ex,\ c,r}$ = 9,5 W/m^{2}K U = 5.25 W/m^2 K Q_4=388,1 Kcal Q5 =1758,95 Kcal Q6 =53,26 kcal	Q_T=2815,5 W
M3	$Q_{evap\ de\ agua}$= 872,3 kcal. $Q_{perd\ calor\ sensible}$ =21 kcal $Q_{perd,\ calor}$=398,88 kcal $Q_{ren.\ aire}$ =88,76 kcal	Q_T=1728,7 W
M4	N_A = 0,0678 kgmol/sm^2 Ts = 24.9 °C	Q_T= 2407,3 W
M5	Cs = 1035 J/kg K Tr = 45 °C Uk = 17,8 W/m^2 K hr = 6,26 W/m^2 K	Q_T=2828,5 W

El método M1 (Ecuación general) representa el 1% al 15 % más, con respecto a los métodos M2 (98%), M4 (60,5%) y M5 (99%), siendo conveniente utilizar esta metodología de cálculo con el fin de establecer el límite máximo de energía necesaria para deshidratar 10 kg de producto algal, con un contenido de humedad del 80 al 85 %. El método M3 (60.5 %)

establecido por la FAO lo podemos considerar como el mínimo consumo de energía indispensable en el proceso de secado.

4.2.1.1.2 Distribución del flujo de aire.

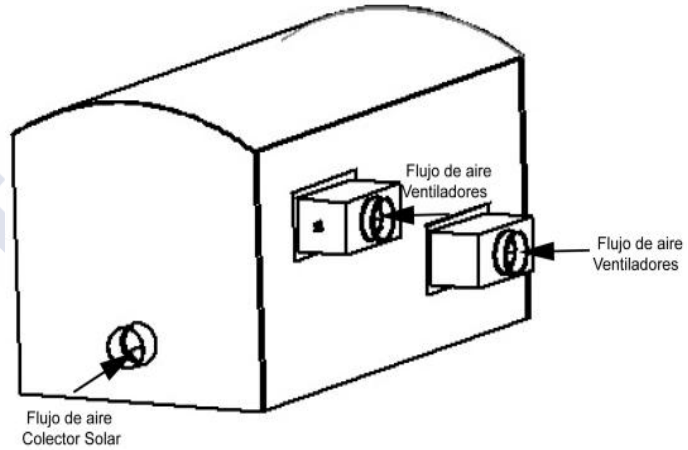
Conocida la cantidad de energía total necesaria para el secado, las temperaturas de operación de la cámara y de saturación, se determina el flujo másico del aire caliente que pasara por las bandejas conteniendo el producto en base húmeda.

$$\dot{m} = Q_T \,/\, C_p * \left(T_{a,c} - T_s\right) = 0.076\ kg/s \tag{4.30}$$

Requiriendo un flujo másico de aire de 0.076 Kg/s equivalente volumétricamente a 255,93 m^3/h. En cada sección de la cámara se colocan conductos de aire con ventiladores de 300 m^3/h regulable para alcanzar el flujo antes indicado.Las variables C_p representa al calor especifico y d_{ac} la densidad del aire caliente 50 ºC

$$v_{entrada\ alconducto} = \dot{m} \,/\, (d_{a,c} * A_{entrada}) = 4\ m/s \tag{4.31}$$

La velocidad de aire de entrada al conducto será de 4 m/s, distribuida en la cámara a una velocidad de **1,1** m/s, por el paso de aéreas menores a mayores.



Lám 4.3. Flujo de aire en la entrada de la cámara de secado

4.2.1.1.3 Tiempo teórico del secado.

Se puede estimar tiempo teórico de secado en los periodos de velocidad constante y de velocidad decreciente. Para el periodo de velocidad constante, utilizando la ecuación (4.24 y 4.25) y sustituyendo el valor de $R_1 = R_c$ indicado en la ecuación (2.9) se obtiene la siguiente expresión.

$$t_1 = \frac{W_s \quad _w(X_i - X_2)}{A_b N_b\ h_i(T_{a,c} - T_s)} = 8.24\ horas \tag{4.32}$$

Siendo; W_s masa seca del producto a este periodo (3 kg) , $_w$ calor latente de evaporación a una temperatura de la superficie (2443,75 kJ/kg), temperatura inicial de la

superficie Ts (21 ºC), humedad inicial Xi (0.8) , humedad en un tiempo t con velocidad constante X2 (0.35), Ab área de las bandejas (0.28 m2) , Nb numero de bandejas utilizadas (10), hi es el coeficiente convectivo definido en la ecuación (4.10) siendo de 29.7 W/m^2 K, T_{ac} temperatura del aire caliente 49 a 50 ºC .

En la siguiente fase determinaremos el valor del tiempo en el periodo de velocidad decreciente, siendo

$$t_2 = \frac{W_s(X_2 - X_{final})}{A * R_{c2}} = 0{,}73 \text{ h} \approx 44 \text{ min} \tag{4.33}$$

Al utilizar la grafica de curva de secado característica de la muestra podemos obtener el periodo de caída más preciso en R_{c2}, utilizando la ecuación (2.11) anteriormente descrita.

$$t_2 = \frac{W_s}{A}\int_{Xfinal}^{X2}\frac{dX}{R_2} = \frac{W_s\,.\,(X_2 - X_{final}\,)}{A.\ (\,R_1 - R_2)}\,.\,ln\frac{R_1}{R_2} = 0.88\ h\ \approx 52\ min \tag{4.34}$$

El tiempo total de operación se calcula sumando los periodos de velocidad de cada etapa de secado, siendo de 8,98 a 9.12 horas, es decir, aproximadamente 9 horas con 8minutos.

4.2.2 Dimensionamiento y selección del colector solar.

Los captadores o colectores solares son dispositivos empleados para aprovechar la energía solar incidente transformándola en otra forma de energía útil, es decir; en energía térmica. Los paneles solares de placa plana pueden utilizar como fluido caloportador agua o aire, que proveen de temperatura menores a los 70 ºC siendo los más económicos. También existen en el mercado otros tipos de captadores solares que operan a mayor temperatura y por ente más costosos que los anteriores. Entre los diferentes tipos de captadores solares para calentamiento de aire pueden ser de placa plana cubierta por uno o dos vidrios.

Para nuestro prototipo experimental se ha planteado seleccionar un colector para aire que cubra el 35 % de energía suministrada al secador, es decir, un colector de capacidad de 1000 W energéticos. Compuesto por una cubierta transparente con espesor entre 0.5 a 0.6 mm para minimizar las pérdidas de convección y radiación del ambiente, internamente lleva una placa absorbente con cubierta selectiva que sirve para interceptar la radiación solar y transfiera el calor por convección y conducción al fluido calo-portador, finalmente deberá llevar una carcasa que aloja los componentes del colector.

4.2.2.1 Flujo de aire del colector

A partir de la ganancia o calor útil $Q_u$necesario, se determina el flujo de aire (kg/s) interno del fluido que ingresara a la cámara de secado que consiste en medir el incremento de temperatura del fluido calo-portador por medio de la temperatura de entrada T_{fe} (K), y a temperatura de salida T_{fs} (K) del fluido. c_p es el calor especifico (kcal /kg ºK o kJ/ kg ºK).

Tabla 4.3. Resultado del flujo de aire del colector.

Nombre	Simbología	Valor	Unidades
Calor Útil	Q_u	1000	W (J/s)
Calor especifico	c_p	1008	kJ/kg K
Temperatura salida	T_{fs}	50	ºC
Temperatura de entrada (análisis interactivo)	T_{fe}	18-24 ºC	ºC
Flujo másico		100 -110	kg/s

Se ha determinado que se necesita un flujo másico de aire aportado por el colector solar entre 100- 110 kg/s, con un incremento de temperatura aproximado de 18 a 25 ºC entre la temperatura de salida del aire caliente (50 ºC) y la temperatura ambiente.

4.2.2.2 Balance de energía.

Conocida la ganancia energética se determinara el área del colector A_c, además del área del conducto de conexión entre colector y cámara de secado, las posbles pérdidas térmicas del colector, la temperatura media $T_{p,m}$ y la velocidad del aire de salida del mismo ($v_{a,c}$).

La ganancia energética Q_u o calor útil (W) se representa a través de la ecuación (4.35) que se determina por medio del balance de flujo de calor que refleja la distribución de energía solar incidente, relacionada con respecto al área del colector A_c (m^2), un factor de ganancia F_R, radiación solar adsorbida por unidad de área de la placa absorbedora (S). Por otro lado, están las pérdidas térmicas hacia el exterior, (conducción, convección y radiación), que son parametrizadas mediante el coeficiente efectivo de transferencia térmica o coeficiente de pérdida global U_L (W/m^2 K). Además de la diferencia de temperaturas de entradas del fluido T_{fe} (K) y temperatura ambiente Ta (K), la cual está definida como:

$$Q_u = A_c \,.F_R \,.[S - U_L \,.(T_{fe} - T_a)] \tag{4.35}$$

Para determinar el factor F_R utilizaremos la expresión 4.36 , que se encuentra expresada en termino de la temperatura media de la placa $T_{p,m}$ y la temperatura ambiental T_a .La temperatura media de la placa es una magnitud difícil de medir, por que las partes del colector se encuentran a distintas temperaturas. Para ello se mide la temperatura a la entrada y a la salida calculando un valor promedio. Al hacer esto, es necesario añadir este coeficiente F_R que corrige esta diferencia de temperatura, calculando utilizando la siguiente expresión.

$$F_R = \frac{\dot{m}(T_{f,s} - T_{f,e})}{A_c(S - U_L(T_{f,e} - T_a)} = \frac{S - U_L(T_{p,m} - T_a)}{S - U_L(T_{f,e} - T_a)} \tag{4.36}$$

El Coeficiente global de perdidas U_L; Se determina calculando las perdidas a través de la cubierta Ut, perdidas por la base o soporte U_b y el coeficiente de perdidas por los bordes U_e.

$$U_L = U_t + U_b + U_e \tag{4.37}$$

Aplicando las ecuaciones de transferencia de calor, podemos determinar las pérdidas térmicas del sistema completo, es decir, las pérdidas de radiación, convección y conducción desde el cielo hasta la superficie de la placa. Ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4.

Para determinar el coeficiente de convección y radiación en el exterior de un colector solar plano con una cubierta transparente, se puede aplicar las siguientes consideraciones:

- Al existir una mínimo de viento, es razonable un coeficiente de convección libre exterior no menor al 5 $W/m^{2o}C$.
- Para colectores placa plana con una área de 0.5 m^2 y presencia de viento, podemos aplicar la siguiente expresión $h = a + b * v$. Siendo, v la velocidad de viento (m/s), los coeficientes a y b tendrán valores de 2.8 y 3 respectivamente.
- Para colectores placas planas con un área > 0.5 m^2, los coeficientes a y b tendrá valores de 5.7 y 3.8.

Para un colector tubular, el flujo de aire perpendicular a un tubo exterior el número de Nusselt (N_u) se encuentra dado por:

$$N_u = 0.4 + 0.54\ Re^{0.52} \quad \text{para } 0.1 < Re < 1000 \text{ flujo laminar}$$
$$N_u = 0.3\ Re^{0.6} \quad \text{para } 1000 < Re < 50000 \text{ flujo turbulento}$$

Si el colector solar es de doble vidrio se debe de calcular el coeficiente de radiación entre las dos placas paralelas:

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2+T_1^2)((T_2+T_1)}{\frac{1}{\varepsilon 1}+\frac{1}{\varepsilon 2}-1} \tag{4.38}$$

Una manera de determinar el factor de perdida U_t , será utilizar la *formula empírica desarrollada por Klein* . Siendo un método de iteración para calcular las temperaturas medias de la placa y del fluido, como, la temperatura de la cubierta (Koyuncu, 2006)

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{C(\ )}{T_{p,m}}\cdot\left(\frac{Tp.m-Ta}{N+f}\right)^e}+\frac{1}{h_{c,ext}}\right]^{-1} + \frac{\sigma.(T_{p,m}+T_a).(T_{p,m}{}^2+T_a{}^2)}{(\varepsilon_p+0.00591N.h_{c,ext})^{-1}+\frac{2N+f-1+0.133.\varepsilon_p}{\varepsilon_c}-N} \tag{4.39}$$

Donde; N, número de cubiertas transparentes (1). , inclinación del panel en grados (33 º). σ es el coeficiente de Stefan Boltzmann siendo de 5.67 $x10^{-8}$ W/m^2 K. ε_c , emitancia de la cubierta (0.88 para el cristal, 0,63 para plástico) , emitancia de la placa ε_p será de 0.95. Ta, temperatura ambiente (16-24 ºC). $T_{p,m}$, temperatura media de la placa. $h_{c,\ ext}$, coeficiente de calor convectivo del exterior. Los valores de e y f se calculan por medio de las siguientes expresiones $e = 0.430\ (1-100/T_{p,m})$, $f = (1+0.089\ h_{c,\ ext} - 0.1166\ h_{c,\ ext} * \varepsilon_p)(1+0.07866\ N)$ y $C(\ ) = 520\ (1-0.000051\ \ ^2)$ para $0º < \ < 70º$.

La radiación solar adsorbida S, se determina a través del factor de transmitancia – absortancia efectivo τα y la intensidad de la radiación denominada la irradiancia solar total G_T (W/m^2).

$$S = (\tau\alpha) * G_T \tag{4.40}$$

La energía incidente (τα) es la reflexión múltiple de la radiación difusa continua y la energía total absorbida por la placa absorbente. La radiación que pasa a través de la cubierta y que llega al absorbente, alguna se refleja hacia la cubierta, sin embargo no toda esta radiación se pierde, ya que una parte se refleja de nuevo hacia el absorbedor.

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \tag{4.41}$$

Siendo τ la transmitancia , ρ la reflexión de la radiación no polarizada y α absortancias que para una placa absorbente el valor aproximado es de 0.9. Para determinar la transmitancia τ se obtiene a partir de la reflexiónρ, el ángulo de incidencia θ_2 relacionado con el índice de refracción por la ley de Snell, N número de cubierta, K coeficiente del material variando entre 0.04 cm^{-1} para cristales de bajo contenido de hierro hasta 0,32 cm^{-1} para casos con alto contenido de Hierro (Javier Más, 2009) y L espesor del colector.

$$\tau = \frac{1-\rho}{1+(2n-1)\rho} * e^{-NKL/cos\theta_2} \tag{4.42}$$

El valor de la reflexión de la radiación no polarizada se obtiene aplicando la ecuación de Fresnel.

$$\rho_d = \frac{1}{2}\left[\frac{sen^2(\theta_2 - \theta_1)}{sen^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{tan^2(\theta_2 + \theta_1)}\right] \tag{4.43}$$

Tabla 4.4. Resultados obtenidos para la selección del colector solar

Nombre	Simbología	Valor	Unidades
Temperatura media de la placa	Tpm	34,93	°C
Coeficiente de pérdida global	UL	10,89	W/m2 C
La energía incidente	(τα)	0.93	
Radiación solar absorbida	S	883,5	W/m2
Factor de ganancia	FR	0.812	
Área del colector	Ac	1,41	m2
Velocidad aire caliente	v a,c	1,57-1,72	m/s

4.2.2.3 Selección del colector solar plano.

A partir de los resultados teóricos obtenidos se procede a seleccionar el colector solar para el diseño del secador hibrido. El colector solar placa plana que se aproxima a nuestros requerimientos será de la casa comercial **Solaventi SV14,** con capacidad energética de 1000 W en condiciones normales (1000 W/m^2, 25°C), estima un aumento de temperatura entre 20 a 30 C, en relación con la temperatura ambiental. El flujo volumétrico se encuentra en torno a los 60 a 110 m^3 / h generado por un ventilador conectado a una célula solar que opera a una intensidad de luz de entre 80 y 95 W/m^2.

4.2.2.4 Posición optima de un panel térmico o fotovoltaico

La Inclinación del panel térmico se ha de calcular de acuerdo a la localización geográfica del lugar, para este caso las pruebas del prototipo experimental se realizarán en la facultad de física de la Universidad Santiago de Compostela, a una latitud ( ) de 42,88^0 N, longitud de -8,56 grados Oeste, a una altitud de 255 metros.

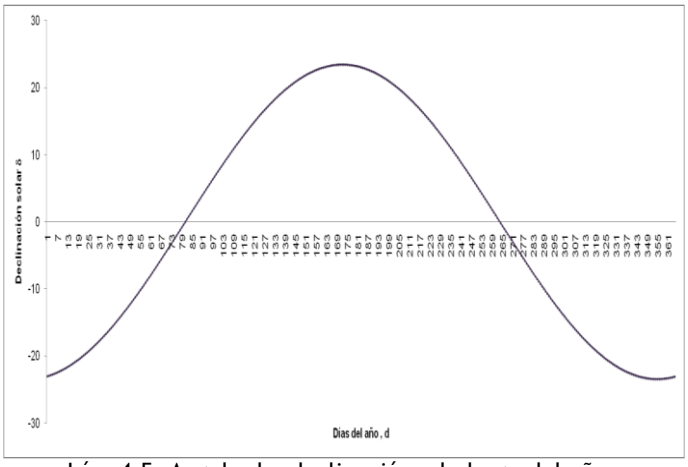
Partiendo de los datos de ubicación, se determina la declinación solar (δ) durante los 365 días del año, el ángulo horario al mediodía solar (momento que el sol aparece en el cenit del cielo τ), el ángulo cenital solar θs, elevación solar (αs) y el ángulo acimutal (γs). Par ello debemos tener claro lo siguientes conceptos y formulas básicas:

Latitud ( ). Angulo que forma la línea del sol con el plano del ecuador en la posición del observador. S ≈ -90 ≤ ≤ 90 ≈ N.

Declinación (δ). Es la posición angular del sol respecto al plano del ecuador en el mediodía solar, el valor del ángulo se suele tomar cada día al mediodía solar. Esto es debido a que el eje de rotación de la Tierra está inclinado a un ángulo de 23°45´ respecto al eje del plano que contiene la órbita que describe alrededor del Sol y de ahí que el valor de la declinación varía entre ±23°45´ a lo largo del año. Cabe señalar que la declinación al Norte del Ecuador se considera positiva debido a la latitud igualmente positiva.

$$\delta = 23.45^0 \, sen\left(360^0 \, \frac{284 + d}{365}\right) \tag{4.44}$$

Siendo, d los días julianos



Lám 4.5. Angulo de declinación a lo largo del año.

Tabla 4.5. Día Julio a partir del primero de Enero

Meses	Días del mes	Días transcurrido	Declinación
Enero	31	0	-23,085911
Febrero	28	31	-17,78227121
Marzo	31	59	-8,670040531
Abril	30	90	3,618541845
Mayo	31	120	14,58699625
Junio	30	151	21,89848302
Julio	31	181	23,18448949
Agosto	31	212	18,17103077
Septiembre	30	243	8,104608732
Octubre	31	273	-3,817824453
Noviembre	30	304	-15,05618303
Diciembre	31	334	-21,96986757

Horas de sol.

Para calcular el número de horas de sol que dura un día del año en un sitio específico, se puede determinar por dos manera; la primera determinando las horas del orto del ocaso. y la segunda , conociendo la latitud y declinación de ese día en particular.

$$t_d = \frac{2}{15} \arccos\left(-tg \quad * tg\,\delta\right) \tag{4.45}$$

Ángulo horario (τ), Comprendido entre el plano meridiano que pasa por un punto considerado y el plano meridiano que pasa por el sol, su valor depende de la hora del día.

Cuando el sol pasa por el punto más alto de su trayectoria (mediodía solar) el ángulo horario es nulo. Se debe de tener en cuenta que una circunferencia completa es de 360 ^{o} y el día tiene 24 hora, siendo la variable t las horas del día $0 \leq t \leq 24$ y a cada hora le corresponderá un ángulo de 15^{o}.

$$\tau = (15\,t - 180\,)^{0} \tag{4.46}$$

Para determinar el ángulo horario τ, es necesario conocer la hora del mediodía solar del lugar donde se realizará la instalación del panel solar. En la tabla 4.6 se muestran las horas del mediodía solar durante el año, para la ciudad de Santiago de Compostela.

Tabla 4.6. Mediodía solar (Santiago de Compostela)

Mes	Medio día t	Duración del día (h)
Enero	13:40	9,00 – 9,58
Febrero	13:45	10,00-11,11
Marzo	13:40	11,13-12,33
Abril	14:33	12,42-13,58
Mayo	14:30	14,00-14,29
Junio	14:34	15,00-15,14
Julio	14:37	15,13-14,30
Agosto	14:35	14,23-13,18
Septiembre	14:30	13,00-11,49
Octubre	13:50	11,45-10,22
Noviembre	13:20	10,22- 9,23
Diciembre	13:30	9,20-9,08

Fuente: Meteogalicia

Ángulo cenital (θs): Es el ángulo comprendido entre la vertical sobre un punto y la línea del sol.

$$\cos\ _{s} = \cos\delta\cos\quad\cos\quad + \operatorname{sen}\delta\operatorname{sen} \tag{4.47}$$

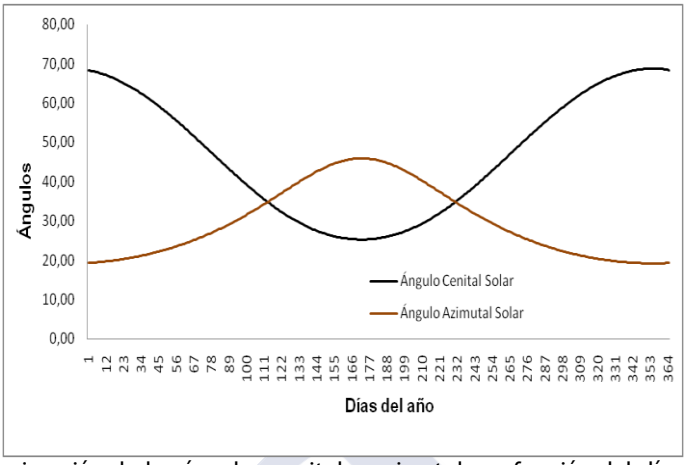
Ángulo acimutal solar o Azimut (γs): Es el ángulo formado por la posición aparente del Sol en el cielo sobre el plano horizontal del observador.

$$sen\gamma_s = \frac{\cos\delta\ sen\ \tau}{\cos\alpha_s} = \frac{\cos\delta\ sen\ \tau}{sen\ \theta_s} \tag{4.48}$$

Ángulo de elevación o altitud solar (αs): Es el ángulo comprendido entre la posición del sol y su proyección sobre el plano horizontal. En la ecuación 4.49 se presenta la expresión para determinara dicho ángulo de elevación en función del ángulo cenital, además en la

lámina 4.6 se presenta gráficamente el comportamiento del ambos ángulos con respecto a los 365 días del año.

$$sen\ \alpha_s = \cos\theta_s \tag{4.49}$$



Lám 4.6. Aproximación de los ángulos cenital y acimutal en función del día del año.

Geometría de la radiación solar sobre una superficie inclinada

Para aprovechar la radiación solar a lo largo del año, los paneles fotovoltaico se deben orientar con respecto a dos ángulos; la pendiente o inclinación (β) de la superficie con respecto a la horizontal y el ángulo acimutal (γ) que corresponde a la normal de la superficie respecto del ecuador del observador. Los paneles serán orientados con vista al Sur si nos encontramos en el hemisferio Norte y hacia el Norte los que se encuentran en el hemisferio Sur, en el caso de encontrase en el Ecuador se recomienda colocarlos horizontalmente con vista al cielo.

Para optimizar el máximo rendimiento de los paneles será necesario determinar el ángulo de óptimo de inclinación de los mismos:

Angulo de incidencia θ : Angulo entre la dirección de la radiación directa sobre la superficie de la placa y la normal a dicha superficie. Para una placa en posición horizontal, coincide con el ángulo cenital solar (θ =θs)

$$cos\theta = sen\ \theta s\ .sen\beta\ .\cos(\gamma s - \gamma) + cos\theta s\ .\cos\beta \tag{4.50}$$

También se puede determinar este valor en función de los parámetros astronómicos y geográficos

.

$$cos\theta = sen\ \delta\ .sen\ .\cos\beta - sen\delta\cos\ .sen\beta.cos\ \gamma + cos\delta\ .\cos\ .\cos\beta.\cos\tau + cos\delta.sen\ .sen\beta.cos\gamma.cos\tau + cos\delta.sen\beta.sen\gamma.sen\tau \tag{4.51}$$

Angulo de inclinación o Pendiente : Angulo entre el plano de la superficie de la placa y la horizontal, o entre la normal a la superficie y la vertical. 0º ≤ ≤180º cuando < 90º vista al cielo, >90º vista al suelo. Asimismo ha de considerarse que + para el hemisferio norte y - hemisferio Sur.

Cuando se trata de una placa con orientación fija la pendiente será;
Hemisferio Norte = - δ- θ ,
Hemisferio Sur: = - + δ + θ. (4.52)

Elevación de placa α : Angulo formado por la normal a la superficie de la placa y el plano horizontal.

$$\alpha = 90^{o} - \quad (4.53)$$

Angulo acimutal de la placa γ : Ángulo formado entre el plano vertical que contiene la normal a la superficie de la placa con el plano vertical del meridiano local. También, se establece como el ángulo entre la proyección vertical de la normal a la superficie con la dirección Sur. Para una incidencia optima γ = γs y = θs. En caso de placas instaladas en el hemisferio norte inclinadas con orientación hacia el sur, para optimizar su rendimiento se aconseja que γ =0.

Determinación de la radiación solar. Para determinar la orientación e inclinación del colector solar es necesario conocer los valores de la radiación solar directa y difusa promedios sobre la superficie horizontal, además del albedo del suelo, para poder estimar la radiación global máxima sobre la superficie inclinada.

Tabla 4.7. Parámetros de radiación solar promedios y albedo en una superficie horizontal para la localidad de Santiago de Compostela (kWh/m^2 día).

Meses	Albedo	Radiación directa	Radiación difusa	Humedad
Enero	0,07	0,583	0,813	78,9
Febrero	0,06	0,889	1,384	75,9
Marzo	0,06	1,531	1,762	68,3
Abril	0,09	2,111	2,453	66,7
Mayo	0,1	2,486	2,638	62,4
Junio	0,1	3,095	2,621	57,8
Julio	0,1	2,864	2,865	57,8
Agosto	0,09	2,987	2,415	61,3
Septiembre	0,08	2,391	1,844	63,9
Octubre	0,06	1,100	1,633	71,5
Noviembre	0,06	0,743	0,894	77,1
Diciembre	0,06	0,567	0,754	79,1

Fuente: Meteogalicia

La radiación total o global incidente en una superficie se determina sumando la cantidad de radiación directa y difusa, generalmente estas radiaciones se miden sobre la superficie horizontal, pero al evaluar una superficie inclinada se introduce un factor geométrico de corrección angular R_b.

Por lo tanto para determinar la radiación solar total, directa y difusa se utilizara las siguientes ecuaciones:

$$G_T = G_{b,T} + G_{d,T} \tag{4.54}$$

Donde G_T será la radiación total o global, $G_{b,T}$ es el total de la radiación solar directa que llega a la superficie y, $G_{d,T}$ sería la radiación solar difusa total.

$$G_{b,T} = G_b \,.\, R_b \tag{4.55}$$

Siendo G_b , radiación directa, Rb el factor de corrección.

$$G_{d,T} = G_d \left(\frac{1+cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d).\rho_g \,.\left(\frac{1-cos\beta}{2}\right) \tag{4.56}$$

Donde; G_d es la radiación difusa, ρ_g es la reflexibilidad o albedo del suelo y es el ángulo de la pendiente de la superficie de la placa.

El factor de corrección geométrico de la superficie se determina a través de; la latitud , declinaciónδ, ángulo horario y de la pendiente de la superficie .

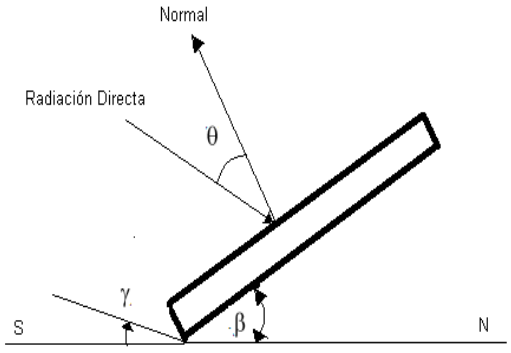
Ecuación utilizada para el hemisferio Norte.

$$R_b = \frac{\cos(\ -\beta).cos\delta\,.cos\tau + sen(\ -\beta).sen\delta}{cos\ .cos\delta.cos\tau + sen\ .sen\delta} \tag{4.57}$$

Ecuación utilizada para el hemisferio Sur

$$R_b = \frac{\cos(\ +\beta).cos\delta\,.cos\tau + sen(\ +\beta).sen\delta}{cos\ .cos\delta.cos\tau + sen\ .sen\delta} \tag{4.58}$$

Si se realiza el cálculo para el mediodía entonces el ángulo horario =0, por lo que el actor de corrección estaría solo en función de la latitud , declinación δ y de la pendiente .

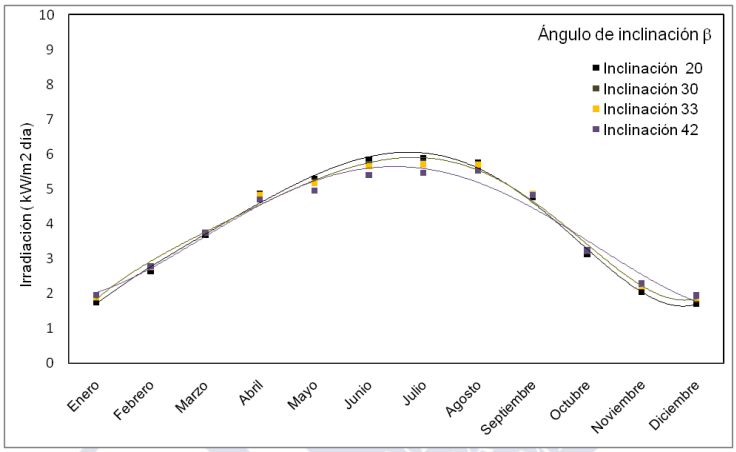


Lám 4.7. Ángulos para una superficie inclinada.

El ángulo óptimo de inclinación del colector será aquel que optimiza la menor radiación solar sobre la superficie inclinada durante todo el año. Calculando con inclinaciones de 20^0, 30^0, 33^0, 42^0. Dando como resultado que la mejor opción es una inclinación fija en la posición entre 30º a 33^0 variando muy poco la incidencia de luz solar durante el año, como se puede apreciar en la siguiente tabla y lámina (4.8).

Tabla 4.8. Radiación solar mensual (Kw h/m^2 día) para distintos ángulos de inclinación de una placa solar.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
=20	1,74	2,64	3,69	4,85	5,29	5,85	5,88	5,75	4,76	3,12	2,05	1,70
=30	1,86	2,74	3,76	4,84	5,21	5,72	5,76	5,72	4,86	3,22	2,18	1,84
=33	1,89	2,76	3,77	4,82	5,16	5,66	5,71	5,69	4,86	3,23	2,22	1,87
=42	1,95	2,78	3,74	4,69	4,96	5,40	5,47	5,53	4,82	3,24	2,28	1,94



Lám 4.8. Análisis del ángulo de inclinación para una placa inclinada

4.2.3 Dimensionamiento y selección del sistema autónomo fotovoltaico.

Suele reconocerse que la electricidad es un importante elemento del desarrollo socioeconómico de un país , no como fin en sí misma, sino a través de la demanda de los servicios que permite ofrecer, como la iluminación de una ciudad, preparación de alimentos, hasta usos para insumos menores. En general, el aumento de la demanda de energía tanto en cantidad como en calidad, está directamente relacionado con el desarrollo económico y social. (FAO, 2010).

En todo proceso productivo el secado requiere de una gran cantidad de energía eléctrica que al final encarece el costo del producto deshidratado. Aun al tratarse de pequeños productores (comuneros/ sector rural), se busca mecanismos de reducción de costos energéticos y calidad de producto. Por esta razón, en este trabajo contempla el estudio del suministro de energía eléctrica a partir de la energía fotovoltaica como adaptación complementaria al prototipo experimental de secado, constituyendo un hecho diferencial del prototipo en la parte técnica y económica para tratar de disminuir costo del proceso y en ciertos casos cubrir carencias del suministro eléctrico.

Además, el adelanto de la tecnología fotovoltaica y la disminución de sus precios están creando nuevas oportunidades y expectativas para otras aplicaciones, con mayores repercusiones y más sostenibles para el desarrollo rural. La flexibilidad de su aplicación representa una oportunidad para la adaptación de tecnológica a equipos de secado y a otros fines.

Para determinar la capacidad y el diseño del sistema de generación eléctrica abastecida por Paneles solares se basa en dos aspectos básicos, como son:

- Análisis de demanda-consumo de electricidad del prototipo experimental.
- Información de recursos solar existente en la zona de estudio.

Con esta información se procede a determinar los parámetros básicos para la selección apropiada del sistema fotovoltaico como son el ángulo óptimo de inclinación, la potencia del generador fotovoltaico, capacidad de la batería, diámetros de cables, capacidad del inversor y selección de los reguladores de carga.

4.2.3.1 Determinación del consumo eléctrico.

Para el análisis y dimensionamiento del sistema fotovoltaico, se comienza con la estimación de la energía consumida en todo el sistema (cámaras de secado), para ello se realizara una listado de los diversos aparatos conectados al sistema, el número de horas de uso diario y el voltaje nominal de operación de cada uno.

Para determinar el consumo total diario (C_t), se tomara en cuenta un margen de seguridad (E_b) del 10 % correspondiente a pérdidas de conexión, cableado, consumos previstos, además un 90% de eficiencia del inversor (E_i) que es la relación de la energía que se aporta al inversor y la realmente disponible para el consumo (Duffie, 1986) .Siendo el total de consumo diario:

$$C_t = \frac{(100-E_b)}{E_i} * C_1 \tag{4.59}$$

En las siguientes tablas se muestran el consumo eléctrico de equipos y fuentes de calor utilizados para generar aire caliente en el secador (sistemas estables durante el año), el análisis se realiza para un día critico (bajas radiación solar) asumiendo que el sistema auxiliar trabajara 5 horas continuas. El equipo experimental llevara un sistema de control que no permitirá sobrepasar la temperatura deseada dentro de la cámara de secado, cortando el suministro eléctrico de las fuentes y dejando funcionando solo los ventiladores.

Tabla 4.9. Consumo eléctrico de la cámara de secado

Descripción	N :Cantidad	P: Potencia (W)	H: horas días/funcionamiento	C: Consumo wh/día N*P*H
Resistencias eléctricas	2	800	5	8.000
Ventiladores	2	25	7	350
TOTAL C1 (Wh/día)				8.350
C_t : Consumo Total Diario (Wh/día) considerando de perdidas				9.185

4.2.3.2 Recurso solar y posición optima del panel Fotovoltaico.

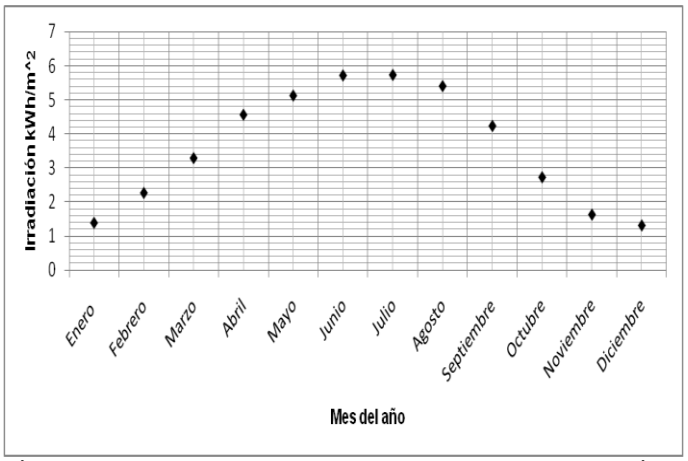
El prototipo experimental será instalado en las instalaciones de la Universidad de Santiago de Compostela Al lado de la estación meteorológica perteneciente a Meteogalicia -Santiago EOAS-, encontrándose ubicada geográficamente a una latitud ( ) de $42,88^0$ N , longitud de -8,56 grados Oeste , a una altitud de 255 metros.

El clima de la ciudad de Santiago de Compostela, durante los años 2012-2013 ha presentado temperaturas mínimas entre -1,46 a -1,24 ºC, temperaturas máximas de 35,66 a 38,23 ºC, temperaturas promedio entre 8,06 a 19,43 ºC dependiendo del mes del año, siendo los meses con más calor Julio , agosto y septiembre. La precipitación de la zona oscila entre 7 L/m^2 a 463,8L/m^2 por mes, siendo el periodo de mas lluvias entre los meses de octubre a Marzo.



Lám 4.9. Ubicación del área de instalación del prototipo experimental

Para determinar el tamaño del arreglo o matriz de paneles y/o la potencia pico de la instalación, es necesario conocer los valores de la radiación media mensual en horas de sol pico de la zona sobre la superficie horizontal y poder estimar los valores sobre superficies inclinadas teniendo en cuenta la radiación solar disponible.



Lám 4.10. Irradiación solar global promedio entre los años 2005-2013. Estación Santiago EOAS

Un parámetro importante es la orientación del sistema fotovoltaico así que como la pendiente de la placa, que tendrá una orientación fija hacia el Sur por encontrarnos en el Hemisferio Norte. Por lo cual se hace necesario determinar la geometría de la radiación solar terrestre a partir de la latitud ( ) del lugar y el ángulo horario calculado para el medio día, para obtener la declinación δ , ángulo acimutal solar γ_s y ángulo cenital θ_s, variables dispensables para determinar la orientación e inclinación de una placa solar a través del ángulo incidente θ y la pendiente de la misma. Las formulas utilizadas fueron estudiadas en la sección 4.2.2.4 de este capítulo.

El ángulo de inclinación del panel fotovoltaico respecto de la horizontal, β, tendrá una estructura sin seguimiento solar, por lo que vendrá determinado por aquel valor que optimice la generación fotovoltaica respecto del consumo. Para un seguimiento diaria la inclinación al sur oscila en un banda de β = - δ, siendo β ∈ (- 23,45 º , + 23,45 º) a lo largo del año, en cambio para una media optima será igual a la latitud (Duffie, 1980) .

Si se quiere favorecer el funcionamiento del sistema solo en verano entonces β = I I - 23,45 º, es decir el ángulo de inclinación de la placa estaría alrededor de 19,43º, y si se quiere colocar en invierno β = I I - (-23,45 º) siendo entonces el ángulo de 66.33 º, para los equinoccio de primavera y otoño la declinación δ = 0, entonces β = . (John Duffie, 2006).

Por otra parte, el IDAE, instituto para la diversificación y el ahorro de Energía, recomienda como orientar los paneles según el uso que se le vaya a dar (verano, invierno o todo el año), para conseguir captar la máxima energía.

Tabla 4.10. Pendiente optima del panel para un periodo de diseño, recomendada por IDAE.

Periodo de diseño	opt.
Julio	-20º
Diciembre	+10º
Anual	-10 º

El ángulo óptimo de inclinación del sistema fotovoltaico se determina como aquel que se obtiene la mayor radiación en el peor mes del año (en relación con el consumo para cada mes), siendo necesario conocer la radiación solar directa, difusa y albedo del lugar, dichos valores fueron obtenidos de la base de datos de *Meteogalicia*.



Lám 4.11. Paneles fotovoltaicos.

Se valoro la pendiente ( ) para varias inclinaciones de 20^0, 30^0, y 33^0, además de 42 º. Dando como resultado que la mejor opción es una inclinación fija en la posición de 33^0 siendo la más adecuada para todo el año y en especial para captar el sol de invierno. Los resultados se muestran en la tabla 4.8 antes mencionada.

A continuación se muestran los resultados de la relación del consumo del sistema con respecto a la radiación solar mensual para una inclinación de placa de 33 grados.

Tabla 4.11. Consumo del campo de panel.

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Gt (Wh/día m^2)	1,89	2,76	3,77	4,82	5,16	5,66	5,71	5,69	4,86	3,23	2,22	1,87
C_t (Wh/día)				9185	9185	9185	9185	9185	9185			
D =Gt/Rd (m^2 10^{-3})				1905,6	1780,2	1622,8	1608,6	1614,2	1889,9			

4.2.3.3 Dimensionamiento de los complementos del sistema aislado a la red.

4.2.3.3.1 Generadores fotovoltaicos

Con respecto al cálculo del número de paneles del campo de captación habitualmente se emplea la relación $D = C_t/G_t$ (m^2 10^{-3}) correspondiente al mes más desfavorable de año. Sin embargo para nuestro calculo se empleada el valor de la relación obtenida para el mes de abril, que corresponde al valor más bajo dentro del periodo de recolección y secado de la biomasa algal . Hecha la observación anterior se procede a dimensionar el campo de captación conociendo la característica técnica del panel ya seleccionado:

- Potencia del panel fotovoltaico, será de 280 W. También puede ser representada como W_p, siendo la máxima potencia que puede suministrar un panel a 1000W/m^2 a condiciones estándar de pruebas (STC por sus siglas en inglés) y se define por el punto de la curva I-V consiguiendo un valor máximo.
- Intensidad en cortocircuito del panel (I_{sc} o I_{cc}) = 8,33 A, es la que se produce a tensión cero.
- Tensión de circuito abierto (V_{ca} ,V_{oc}) del panel = 44,8 V , es la tensión máxima que puede dar el panel . Es decir es la tensión que hay cuando no se conecta ninguna carga.
- Área de panel (A_{panel}) = 1,94 m^2, con dimensiones de 1956 mm x 992 mm x 50mm.

El rendimiento o eficiencia de los paneles vendrá determinada por la relación entre los vatios pico y el área del panel con respecto a una irradiación estándar que se considere a 1000 W/m^2 a 25°C que incide normal al panel. Generalmente en paneles policristalinos el rendimiento no sobrepasa el 15 % en los modelos comerciales.

$$= \frac{P_{max}/A_{panel}}{1000\ W/m^2} \qquad (4.60)$$

De toda la radiación solar que llega al panel, éste sólo aprovecha lo que marca su rendimiento. Por tanto, para obtener los metros cuadrados de paneles (S) necesarios se determina a través de la relación de la energía consumida (D) y la eficiencia, multiplicado por una factor de 1,1 que se aplica para compensar posibles pérdidas (López A, 2010).

$$S\,(m^2) = 1{,}1\ x\ D/ \tag{4.61}$$

En este factor global de pérdidas están contempladas las pérdidas por conexionado y dispersión de parámetros, las pérdidas debidas al punto de trabajo del sistema, que en general no coincide con el punto de máxima potencia de los paneles. Contempla también la disminución de potencia entre la nominal y la real de los módulos. En este punto hay que recordar que la potencia pico nominal depende fuertemente de los fabricantes.

Finalmente, para determinar el número de paneles que requiere el campo de captación se obtiene entre la relación de la superficie del campo de captación con respecto al área del panel o generador fotovoltaico.

$$N_{panel} = S\ /\ A_{panel} \tag{4.62}$$

Tabla 4.12. Resultados del campo de Captación (Paneles fotovoltaicos).

Margen de seguridad	1.1
D (m^2 10^{-3})	1905,6
Potencia del panel Pmax (W)	280
Area del panel Apanel (m^2)	1,94
Rendimiento	14,4 %
Área total de captación S (m^2)	14,6
Numero de paneles N_{panel}	8
Potencia total(instalación) P_t (W)	2240

4.2.3.3.2 Sistema de acumulación

El dimensionamiento del conjunto de baterías se determina en función de:

- *Consumo total diario* C_t de la instalación, siendo de 9.185 Wh/día.
- *Tensión de la batería V*, la instalación costara de baterías de Plomo-ácido de 12 V, siendo la más utilizada en el mercado y de bajo costo.
- *Número de días de autonomía (* $D_{autonomía}$*),* que corresponden al tiempo que podrá funcionar la instalación sin recibir energía, como mínimo se considera 3 días de autonomía.
- *Profundidad de descarga máxima (*P_d*),* es la capacidad que se puede descargar respecto a la nominal, Para los casos más habituales puede tomarse este valor como de un 70%.
- *Capacidad nominal* $C_{nominal}$ *(Ah);* es la capacidad de energía que se obtiene en una descarga . La capacidad suele depender del tiempo de descarga en horas de la batería, que suelen ser 10 , 20 o 100 horas (C_{10} ,C_{20}, C_{100}) (Miquel Casa, 2012) .

Para las baterías solares plomo-ácido las relaciones entre las capacidades a distintos regímenes de descarga son aproximadamente C_{100}/C_{10}=1,5 y C_{100}/C_{20}=1,25 (López-Agüera , 2010).

El consumo diario en Ah/día de una instalación estaría dado por la relación del consumo total C_t (Wh/día) y la tensión de trabajo de la instalación (V).

$$L_d = C_t / V \tag{4.63}$$

La capacidad de acumulación (C100), se obtiene del consumo diario Ld en Ah/días de la batería, el número de días de autonomía ($D_{autonomía}$) y la profundidad de descarga máxima P_d pues no toda la energía almacenada se puede utilizar sin dañar seriamente a la batería y un factor 110% se aplica para compensar posibles pérdidas.

$$C_{100}\ (\text{Ah}) = 110 * L_d * D_{autonom\ a} / P_d \tag{4.64}$$

El número de baterías N_{bat}, se calcula a través del consumo diario L_d y la capacidad nominal de la batería, en este caso se utilizara baterías de 130 Ah.

Tabla 4.13 .Cuadro de resultados del conjunto de Baterías

Ld ;consumo diario en Ah/día	765,4
$D_{autonomía}$;Días de autonomía (días)	3
Pd; Profundidad de descarga (%)	70
V; Tensión de la batería	12
Margen de seguridad	110
C100 (Ah), capacidad de acumulación	3608,3
N_{bat} Numero de baterías	8
V Tensión de trabajo de la instalación	24

4.2.3.3.3 Calculo de la intensidad del servicio y selección de cables.

El cableado ha de dimensionarse adecuadamente con el objeto de minimizar las caídas de tensión en la instalación. Para ello es necesario seleccionar el tipo de cable (tipo de aislamiento, resistencia intemperie, entre otros) su longitud y su sección. Se ha de procurar minimizar las longitudes de los cables entre los distintos elementos que componen la instalación como son los paneles solares, baterías, inversor, regulador.

La sección de los conductores se calcula en función de la longitud de los cables y de la corriente que circula por ellos. Se recomiendan los valores especificados a continuación que son comunes para este tipo de instalación:

- Caídas de tensión máxima (ΔV) entre generador y regulador/inversor: 3%
- Caídas de tensión máxima (ΔV) entre regulador y batería: 1,5%
- Caídas de tensión máxima (ΔV) entre inversor y batería: 1%
- Caídas de tensión máxima (ΔV) entre regulador e inversor: 1%

- Caídas de tensión máxima (ΔV) entre inversor/regulador y cargas: 3%

El estudio realizado por José Alba, 2010, determina los criterios que se deberán seguir durante una instalación fotovoltaica, considerando las Normas UNE/AENOR, y las instrucciones del RBT , que establece la UNE-204060-7-712 para Sistemas de alimentación solar fotovoltaica (PV); AENOR EA 0038:2008 Cables eléctricos de utilización en circuitos de sistemas fotovoltaicos. UNE 20.460.-3, -5-523, IEC 60287, cables expuestos a radiación solar. UNE-EN 500085-1 y 500086-1, cables de seguridad aumentada, UNE 21.123, 4,5, ó UNE 21100

El tipo de cable es necesario calcular las intensidades de la corriente por cada tramo de conexión de los componentes. El cable que conectara los paneles hasta el regulador se calcula a partir de la intensidad de cortocircuito (I_{sc}) de todas las secciones de los módulos, asumiendo un factor del 25 % más por futuras perdidas. El tramo del regulador a la batería se determina con la máxima intensidad que puede proporcional los paneles, es decir, la intensidad pico (I_{mp}), multiplicado por el número de paneles (N) y el rendimiento del regulador ($_{regulador}$) que en su defecto es el 90 %. La intensidad del cable de conexión desde las baterías hasta la entrada del inversor debe ser la máxima potencia (P_t) por que absorberá toda la carga prevista en el lado de alterna, considerando el rendimiento del inversor/cargador ($_{Inversor}$) y la tensión de la batería (V). La intensidad de la sección del convertidor hasta el cuadro de protección para el consumo, será la potencia máxima P_t, partida por la potencia de un modulo (P_{max}) por el Cosθ.

Tabla 4.14. Ecuaciones Empleadas

Secciones	Ecuaciones
I_1 Panel – Regulador	$I_1 = I_{sc} * N$
I_2 Regulador-Batería	$I_2 = I_{mp} * N *$ $_{regulador}$
I_3 Batería - Inversor	$I_2 = \frac{P_t}{_{inversor} * V}$
I_4 Inversor - Consumo	$I_2 = \frac{P_t}{P_{max} * Cos\theta}$

Fuente: (Alba, 2010)

El diámetro del cable por cada sección se determina a partir de la longitud (L) en metros, la intensidad (I) en amperios , la caída de tensión máxima (ΔV) , conductividad (γ_{cond}) según el tipo de canalización conductor utilizado (Cobre , aluminio) y el cosθ siendo 1 cuando se trata de corriente continua o alterna monofásica.

$$S\,(mm^2) = (2 * L * I * cos\theta) \,/\, (\gamma_{cond} * \Delta V) \qquad (4.65)$$

Tabla 4.15. Valores de conductividad (γ_{cond}) de los cables con respecto a la temperatura de operación

Material	20 °C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
Cu	56	54	52	50	48	47	45
Al	35	34	32	31	30	29	28

Fuente : (Alba, 2010)

Si se trabaja con conductores de cobre puede aplicarse la siguiente fórmula:

$$S\ (mm^2) = (L * I)\ /\ (56 * V * \Delta V) \tag{4.66}$$

Donde:
S ; sección mínima del cable en mm^2.
L ; longitud del cable (sólo ida), en metros.
I = intensidad máxima, en amperios.
V = tensión de trabajo, en voltios.
ΔV = caída de tensión.

Tabla 4.16 . Resultados del cálculo de cables por secciones

		Intensidad (A)	Sección del cable (mm^2)	Diámetro de cable
Panel – Regulador	Isc =8,3 A N = 8 L = 20 m Voc = 12 V ΔV3% = 0.36 γcond = 50 Cosθ = 1	I_1 = 66,4 A	S1 = 147,5 mm^2 ≈ 150 mm^2	D1 = 13,8 mm, siendo D1 = 20 mm, que lo dividiremos en dos ramas con cables de D = 10 mm.
Regulador-Batería	Imp =7.95 A N = 8 regulador =0.9 L =1,5 m V = 12 V ΔV1.5% =0,18 γcond = 50	I_1 = 57,24 A	S2 = 19,04 mm^2 ≈ 20 mm^2	D2 = 5,1 mm ≈ D2 = 6 mm
Batería - Inversor	Pt =2240 W inversor =0,9 L = 1 V = 12 V ΔV1% =0.12 γcond = 50	I_1= 207,4 A	S3 = 69 mm^2 ≈ 70 mm^2	D3 = 9.44 mm ≈ D3 = 10 mm
Inversor - Consumo	Pt =2240W Pmax= 280 W Cosθ = 1 L = 30 V = 230 Vca ΔV3% =6.9 γcond = 50	$I_4 = 8$ A	S4 = 1.39 mm^2 ≈ 6 mm^2	D4 = 2.76 mm ≈ D4 = 6 mm

Concerniente a las baterías, la conexión puede ser en serie, paralelo o mixta, para ello es necesario seleccionar adecuadamente el tamaño del cable para que pueda soportar la carga esperada durante el servicio. Si se realiza una mala conexión pueden provocar que el rendimiento sea bajo y que las terminales se dañen, se fundan o se quemen.

Es preferible que todos los cables utilizados en los grupos de baterías conectadas en serie-paralelo, sean de la misma longitud. En todo caso, la casa comercial indica al usuario el tamaño de cable adecuado para la instalación de los acumuladores. Para el funcionamiento del sistema autónomo se requiere 8 baterías de 130 Ah, en la Tabla 4.17 se indica el diámetro del cable y la intensidad que la casa comercial recomienda utilizar (Baterias trojan) siendo aconsejable para nuestra intensidad un tamaño de cable número 2 (5 mm de diámetro).

Tabla 4.17. Corriente máxima de soporte del cable para baterías marca Trojan

Tamaño del cable	Amperaje
14	25
12	30
10	40
8	55
6	75
4	95
2	130
1	150

Fuente: Manual del usuario de las baterías Trojan

Con respecto a la selección de los reguladores e Inversor/acumulador, conociendo la potencia, tensión e intensidad del panel es necesario colocar 4 reguladores de 12/24 V con una intensidad de 10 A y dos inversores de 2000 W con una tensión de 24 V.

El esquema de la instalación del sistema fotovoltaico y equipos auxiliares se presenta en el apéndice C.

4.2.4 Eficiencia teórica del sistema

A partir del balance general de masa y energía nos permite estimar la eficiencia del secador, la eficiencia del proceso de secado para eliminar agua del producto y la aportación del colector solar al sistema. El funcionamiento de la cámara de secado no solo se debe medir por el consumo de energía que se ocupa en el proceso, sino también se debe de relacionar este consumo con la cantidad correspondiente de agua evaporada, de ahí la necesidad de definir un elemento que sirva de término de comparación entre diferentes secadores. (López Vidaña, 2011).

De los diferentes diseños de forma y fuente de alimentación en los sistemas de secado, se puede indicar la eficiencia de trabajo de unos de ellos. (A. Fudholi, 2010),

- Secadores verticales a gas, aproximadamente es del 79 %
- Secador vertical combinación de gas - electricidad, en torno del 68 %,
- Secador horizontal de gas, aproximadamente es del 76 %
- Secador de horizontal gas – electricidad, en torno al 70 %
- Secador de tornillo, aproximadamente del 25 % al 62 %
- Secador solar indirecto circulación forzada, alrededor del 20 % al 50 %
- Secador solar directos, alrededor del 10% al 30 %
- Secador combinado solar - gas, aproximadamente alcanza el 60 al 70%
- Secador combinado solar – quemador de biomasa en torno al 40%
- Secador combinado solar – eléctrico, alrededor del 31 %.
- Secador con geotermia, puede asegurar del 26 al 32,3 % de su carga térmica anual.
- Secador combinado solar-fotovoltaica , eficiencia media del 44 % al 80 %
- Secado solar con bomba de calor 75 al 86 % (eficiencia entre el evaporador y el colector de aire).

4.2.4.1 Eficiencia del secador.

A partir de la ecuación 2.12 se calcula a eficiencia teórica del secador hibrido, considerando cada uno de las fuentes que lo abastecerán para conseguir la energía total de operación del equipo.

$$= \frac{Q_T}{H_T * A + \dot{m}_{colector} * C_{pcolector} * \Delta T + P_{resistencia} + P_{ventiladores}} = 0{,}59 \text{ a } 0{,}71 \quad (4.67)$$

Donde , Q_T la energía total suministrada, H_T la radiación horario incidente sobre la superficie, cuyos valores son mostrados en los resultados de la Tabla 4.11, calculando la eficiencia a partir de la radiación media mensual para el peor mes del año, $H_T = 1{,}87 \times 10^3$ $(Wh/m^2/día)/$ t (hora de sol en el día) es decir a 600 W/m^2, A es la superficie de captación del secador (m^2) más la energía aportada por el colector solar determinada por el flujo másico $\dot{m}$ = 0,030 Kg/s , calor especifico Cp =1008 kJ/kg K y la diferencia de temperatura entre la energía de salida $T_{s,colect}$ menos la entrada $T_{e,\ colec.}$de aire al colector, a esto se suma la potencia de las resistencias $P_{resistencia}$ (W) y los ventiladores $P_{ventiladores}$ (W). La eficiencia teórica esta en torno de 59 % a 71 % analizada para los distintos resultados ($M_{1\text{-}5}$) de Q_T , una media aproximada será del 62 %.

4.2.4.2 Eficiencia en la eliminación del agua de la biomasa.

Es necesario eliminar la mayor cantidad de agua en el producto en un tiempo establecido hasta llegar a una humedad del 20 % para evitar pérdidas de las propiedades físicas químicas del mismo, parámetro que es establecido durante el diseño del equipo, para calcular la eficiencia de deshidratación del producto se ha utilizado la siguiente ecuación.

$$= \frac{(W_o - W_s)}{d_{a,c} * \dot{m}_a * t * (H_{a,c} - H_w)} = 0{,}58 \quad (4.68)$$

La eficiencia teórica del secado de la biomasa será aproximadamente del 58 %. Determinado a través del peso inicial del producto húmedo (W_o) siendo 10 kg, con una humedad del 80 %. La deshidratación del producto culminaría con un peso final de producto seco (W_s) de 2.5 Kg con humedades en torno del 15 al 20 %. La densidad del aire caliente (d_{ac}) a 50 ºC será de 1,077 kg/m^3 y un flujo de aire (m_{ac}) de 215 m^3/h . Por otro lado, t es el tiempo de secado, Hac y Hw son las humedades de bulbo seco y bulbo húmedo respectivamente (kg_{agua}/kg_{aire}).

4.2.4.3 Eficiencia del colector solar.

La eficiencia de un colector solar plano es una de las variables importantes a controlar durante el diseño del mismo, al ser una medida de verificación del rendimiento del panel térmico, relacionada a la ganancia por unidad de superficie sobre la intensidad de radiación solar que incide en ella durante un cierto periodo de tiempo.

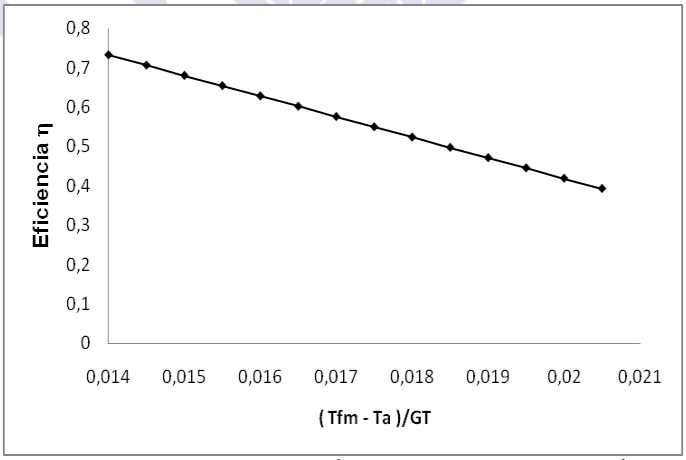
Los valores comunes para calentadores de placa plana en convección natural se encuentra entre el 40 a 60 % (Montero, 2005). Para colectores con convección forzada el rendimiento es superior al 60 %.

La expresión utilizada para la determinación del rendimiento del colector, se describe a continuación;

$$= \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía recibida}} = \frac{\dot{m}_a * C_{pa} *(T_{fs}-T_{fe})}{I_T * A_{colector}} = 0{,}73 \quad (4.69)$$

Donde, $\dot{m}_a$ es el caudal másico de aire de 0,030 Kg/s, C_{pa} el calor especifico del aire de 1008 J/kg ºC, Tfs (ºC), temperatura de salida del fluido (aire) del colector 50 ºC, T_{fe} la temperatura de entrada del fluido en el colector a 22 ºC. I_T es la radiación total incidente sobre la superficie inclinada del colector =33 º (W/m^2) analizado para 1000 W , finalmente $A_{colector}$ es la superficie del captación del colector solar de aire plano siendo de 1,39 m^2.

La curva característica de un colector placa plana se encuentra referenciado a la eficiencia versus el balance energético que representa el comportamiento del captador en función del rendimiento y las variables de temperatura de $(T_{fm} - T_a)/G_T$ para un colector de aire , donde T_{fm} es la temperatura media del colector y T_a la temperatura ambiente, para sistemas de captación de agua que lleva una recirculación del fluido debe de esperarse que la variables estén en termino de la temperatura de entrada del fluido siendo $(T_{fe} - T_a)/G_T$. Como la curva es decreciente, se reduce que el rendimiento aumenta cuando la temperatura del fluido y la ambiente se aproximan, así como cuando aumenta la intensidad de la radiación.



Lám 4.12: Eficiencia teórica calculada para una radiación de 1000 W, flujo volumétrico de 110m^3/h: Curva característica del rendimiento de un colector plano de aire.

Por otro lado, la eficiencia del colector se determinara a través de las siguientes ecuaciones , denominada ecuación de Bliss:

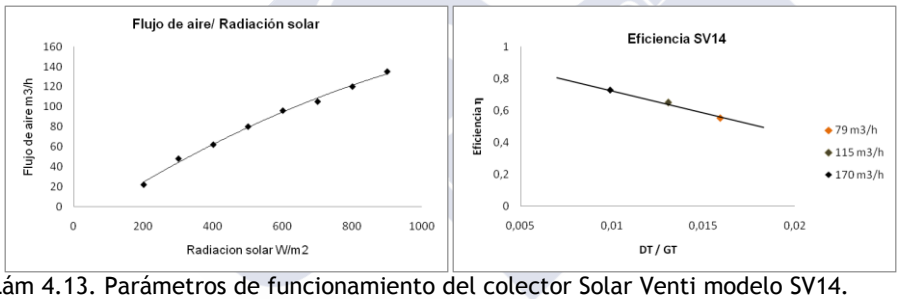
$$\eta = \frac{\text{calor aprovechado}}{\text{Calor solar}} = \frac{Q_u}{G_T\, Ac} = F_R\,.(\,\alpha\,) - F_R\,.\,U_L\,.\frac{(T_{fm}-T_a)}{G_T} \quad (4.70)$$

$$\eta = a - b\frac{(T_{fm} - T_a)}{G_T} \quad \text{Donde, } a = F_R\,.(\alpha) \text{ y } b = F_R\,.U_L \tag{4.71}$$

Siendo F_R (α) el factor de transmitancia – absortancia efectivo, F_RU_L factor de pérdidas, los valores típicos de estos factores en los colectores placa plana son:

- Captador sin caja, sin aislamiento y sin cubiertas, generalmente de plástico se encuentra en torno de $0,85 < F_R\,\tau\alpha < 0,90$ y $16 < F_RU_L < 20$ (W/ºC cm^2).
- Captadores con caja, aislamiento y una cubierta transparente esta alrededor de $0,75 < F_R\,\tau\alpha < 0,85$ y $7 < F_R\,U_C < 9$ (W/ºC cm^2).
- Captadores con caja, aislamiento, una cubierta transparente y superficie absorbente selectiva se encuentran entre $0,75 < F_R\,\tau\alpha < 0,85$ y $5 < F_RU_C < 6$ (W/ºC cm^2).
- Captadores con caja, aislamiento y dos cubiertas transparentes están en orden de $0,7 < F_R\,\tau\alpha < 0,8$ y $4 < F_R\,U_C < 6$ (W/ºC cm^2).

Tal como se ha indicado en la sección 4.2.2.3, a partir del flujo y la energía requerida se ha seleccionada un colector placa plana de aire del mercado nacional, para ser adaptado y regulado a nuestras necesidades para abastecer al sistema de secado. La curva de eficiencia del colector la facilita el fabricante en este caso es Solar Venti, modelo SV14, con temperatura de subida aproximada de 21-32 ºC a 1000 W/m^2, flujo entre 60-140 m^3/h.



Lám 4.13. Parámetros de funcionamiento del colector Solar Venti modelo SV14.
Fuente: Catalogo Solar Venti.

Un factor importante a considerar en el diseño es el flujo de aire, siendo la eficiencia del colector mayor cuanto mayor es el caudal de aire. Esto es debido a que al aumentar el caudal disminuye la temperatura en el interior del panel y por lo tanto las pérdidas también disminuyen es decir a menor pérdida mayor eficiencia.

4.3 AEROTERMIA (GEOINTERCAMBIO DE CALOR).

El calor, almacenado a poca profundidad en suelo, rocas y aguas subterráneas se denomina energía geotérmica somera o de poca profundidad, geointercambio, energía geotérmica de baja intensidad o de baja entalpia, geotermia solar, entre otras denominaciones. (Guillermo Lllopis).

El principio básico de la energía geotérmica es aprovechar la capacidad que tiene la tierra para acumular el calor procedente del sol, manteniendo una temperatura prácticamente constante a lo largo del año. Cuando hablamos de geotermia de poca profundidad o de muy baja entalpía (temperaturas inferiores a 30 ºC) se entiende a profundidad del suelo hasta 1,5 metros e intercambiador horizontal.

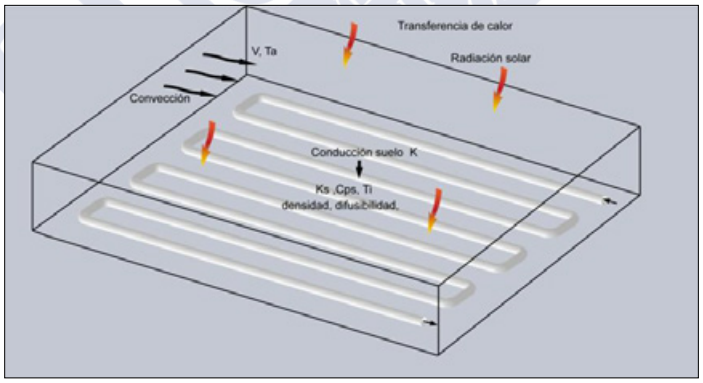
En este estudio, la aerotermia se aplica utilizando tuberías enterradas a poca profundidad, donde el fluido caloportador será el aire, y por convección con el suelo se producirá un intercambio de calor con el fluido. La aplicación de este tipo de energía no depende directamente de la radiación solar ni del viento, por lo tanto depende solamente de las características intrínseca del subsuelo como son la permeabilidad, gradiente del suelo, conductividad térmica, que en todo caso son constantes.

Es importante mencionar, que el sistema no llevará adaptado una bomba de calor geotérmica (es un dispositivo eléctrico que cede y absorbe calor del terreno), directamente se aprovechará el intercambio de calor aire – suelo.

El intercambiador enterrado será colocado de manera horizontal, siendo una forma sencilla y barata al no necesitar mucha profundidad de suelo, aunque es necesario disponer de una mayor superficie de terreno (m^2).

Para poder dimensionar una sonda geotérmica o intercambiador es necesario conocer previamente:

- Conductividad térmica del terreno (W/m ºC).
- Humedad natural del suelo.
- Permeabilidad (m/s).
- Presencia o ausencia de agua subterránea.
- Tipo de instalación: para nuestro caso será un intercambiador horizontal.
- Capacidad térmica volumétrica (J/m^3 K).



Lám 4.14 : Esquema de un intercambiador horizontal

4.3.1 Características del suelo

El prototipo del intercambiador enterrado fue colocado en el campus Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral en las instalaciones del CDTS de la FMCP (ubicado en la región costa, ciudad de Guayaquil, Ecuador).Clima con temperatura ambiente variado, entre 20 y 33 grados centígrados, siendo los meses más fríos Julio a Agosto, y los meses más calurosos Marzo - abril coincidiendo con la época de lluvias.

El estudio realizado por Matute Redrován en el año 2009, en el área del suelo de las instalaciones de la FIMCP, indica que geológicamente el terreno está constituido por estratos rocosos de la formación Cayo, predominando las micro-brechas y areniscas de grano grueso,

estratos de lutitas. Teniendo las siguientes propiedades geomecánicas en promedio ponderado de:

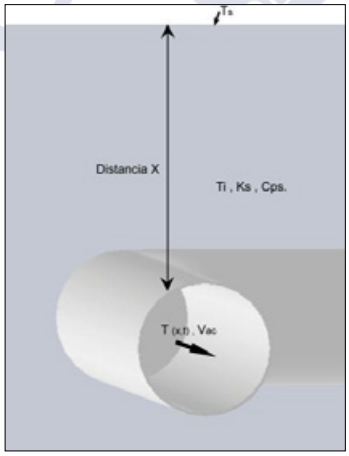
- Peso volumétrico seco: promedio ponderado 2 Ton / m^3.
- Peso volumétrico saturado: promedio ponderado 2.2 Ton / m^3.
- Cohesión: promedio ponderado 60 Ton / m^2.
- Angulo de fricción interna: promedio ponderado 29^o.
- En condiciones naturales, el macizo rocoso de esta caracterización tiene un espesor de meteorización que fluctúa entre 0.3 y 1.0 metros de espesor, dando como resultado en las capas superficiales, suelos arcillosos – limo arenosos, y en algunos sectores, arcillas finas bien plásticas y expansivas (exp. ≥ 10 Ton / m^2).

En general la mayor parte de la zona posee areniscas, limonitas, lutitas silicificadas, Chert, areniscas de grano medio a fino estratificadas y resistentes. Es decir el proyecto es implantado en un suelo de características arcillosas, parte del banco de arcilla negra del sector.

Para un suelo arcilloso–limoso y permeable tiene una conductividad térmica (K_s) entre 1,1 a 3,5 W/m K, estimado un valor típico de 2,2 W/m K. La capacidad térmica volumétrica se encuentra en torno de 2,1 a 2,4 MJ/m^3 K.

4.3.1.1 Análisis del perfil de temperatura del suelo.

Antes de empezar con el diseño del intercambiador de calor es necesario analizar la distancia o profundidad óptima de colocación del serpentín, determinando el incremento de la temperatura media en el fluido en un periodo de 24 horas de operación del sistema. Para ello se debe tener una breve medición del perfil de temperatura del suelo para conocer las temperaturas máximas y temperatura de la superficie del terreno.



Lám 4.15. Distancia del tubo desde la superficie del suelo.

Para calcular el flujo de energía en forma de calor (W /m^2). Se determina a partir del gradiente geotérmico por conductividad térmica del suelo. Siendo la variación de la temperatura en función de la profundidad en ºC / m (tiene un valor medio de 3,3 C cada 100 metros). La conductividad es la propiedad característica de cada material que indica la capacidad de conducir calor W/m C (Guillermo Lllopis).

La ecuación (4.72) se utiliza para determinar la transferencia de calor transitorio cerca de la superficie o para aproximar la respuesta de un sólido finito, cuando la temperatura del interior del solido no es afectada por los cambios en la superficie.

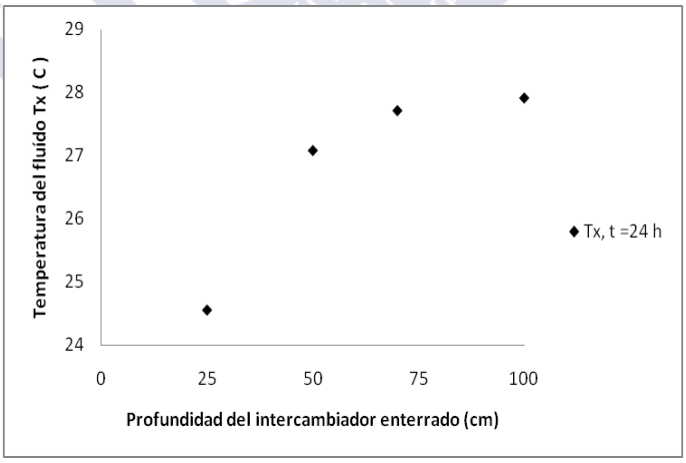
La distribución de temperatura del suelo se expresa en función de la temperatura del fluido en la tubería $T_{(x,t)}$, temperatura de la superficie T_s , temperatura interior del suelo T_i, erf es la función gaussiona del error establecida en termino de la distancia X, tiempo t y de la difusibilidad térmica α_s $\cong x / (4\ \alpha_s\ t)^{1/2}$; (Incropera, 2007)

$$\frac{T-T_s}{T_i-T_s} = (2/\pi^{1/2}) \int_0 \exp(-u^2)du \equiv erf \tag{4.72}$$

La ecuación anterior quedara expresada a partir de las condiciones superficiales, es decir para una temperatura superficial constante T (0, t) = T_s ;

$$\frac{T_{(x,t)}-T_s}{T_i-T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s * t}}\right) \tag{4.73}$$

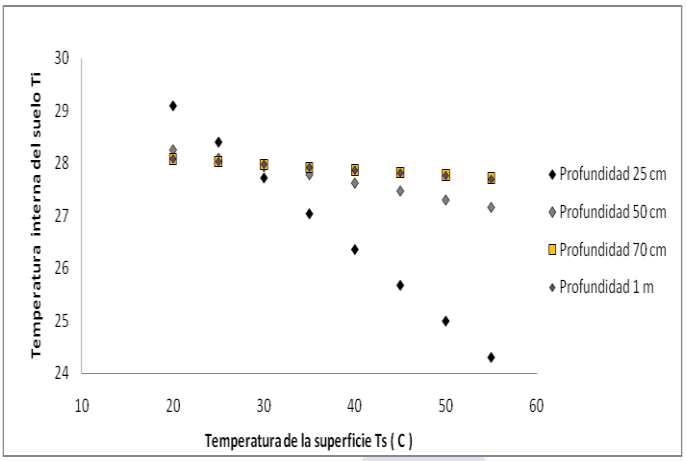
A partir de la ecuación (4.73) ,asumiendo que T_s es aproximadamente 20 ºC (mínima temperatura registrada en el área del terreno) , conociendo las propiedades térmicas del suelo, como la conductividad térmica K_s (2,2 W/m K) , densidad ρ_s (2500 Kg/m^3), calor especifico Cp_s (1840 J/kg K) y la difusibilidad térmica del suelo $\alpha_s = K_s/(Cp_s * \rho_s)$ (5.83x 10^{-7} m^2/s) se determinar la temperatura aproximada del fluido $T_{(x,t)}$ en un tiempo de 24 horas para diferentes distancias X (cm).



Lám 4.16. Temperatura del fluido Tx durante 24 horas, para una temperatura de suelo Ts constante de 20 ºC

Como se puede apreciar en la lámina 4.16, a 25 cm la temperatura T_x es aproximado de 24,56 C, con un incremento de 4.56 ºC más con respecto a T_s, es decir a distancia muy cercanas de la superficie el incremento de la temperatura del fluido caloportador tendrá un comportamiento muy variable al depender del tiempo y la radiación solar que influirá en ella. No obstante, a distancias superiores de 70 cm con respecto a la superficie del suelo la temperatura se estabiliza a 27,9 ºC, habiendo una mejor transferencia de calor por conducción del suelo y el fluido.

Posteriormente se pretende analizar la estabilidad del suelo T_i, a diferentes profundidad manteniendo constante la temperatura del fluido $T_{(x,t)}$ de 28 ºC , a 24 horas de operación del sistema.



Lám 4.17. Estabilidad de la temperatura del suelo Ti analizado a distintas profundidades.

La lámina 4.17, se muestra el comportamiento del perfil de temperatura del suelo al encontrase en contacto con un sólido, y a la vez, como esto influye en la pérdida de energía o intercambio de calor entre ambos medio para mantener la temperatura interna del fluido a 28 ºC. El caso más evidente se produce a menor profundidad donde el tubo o intercambiador enterrado al estar más cercano a la superficie, la radiación que incide sobre el suelo calentara la superficie del suelo arcilloso, rocoso aumentando la temperatura del mismo, y a la vez este calor es distribuido al suelo y cedido al fluido caloportador para tratar de mantener una temperatura casi estable, haciendo que la temperatura interna del suelo disminuya. A partir de distancias de 70 cm hay un mejor intercambio de calor entre ambos medios, aproximándose a la estabilización del sistema.

4.3.2 Dimensionamiento del intercambiador enterrado.

La sonda o tubería seleccionada para el dimensionamiento del intercambiador será de materia de PVC, por su bajo consto, fácil acoplamiento y sobre todo tiene una amplia existencia en el mercado internacional.

La longitud del intercambiador y la velocidad de flujo se determina a través del balance de energía (ley de conservación de la energía), donde la rapidez de transferencia total del flujo de calor por convección será igual a la rapidez a la que aumenta la energía térmica interna del fluido que se mueve con un flujo constante más la rapidez neta a la que se realiza un trabajo al mover el fluido (Incropera, 2007) , expresada en;

$$q_{conv} = E_{interna} \tag{4.74}$$

$$q_{conv} = \dot{m}\, c_p \Delta T \tag{4.75}$$

Donde $\dot{m}$ flujo de calor, ΔT la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del fluido caloportador , c_p el calor especifico.

Siendo, q_{conv} la transferencia total del tubo, expresada en términos de la h coeficiente de convección de transferencia de calor, el área longitudinal del tubo A y la temperatura media que varía en término de T_x (temperatura del fluido), encontrándose relacionada a la temperatura del terreno T_i, temperatura entrada T_{fe} y salida del fluido T_{fs}.

$$q_{conv} = h\ A\ \Delta T_{ml} \tag{4.76}$$

La ecuación de balance de energía quedaría expresada como;

$$h\ (\pi\ DL\ )\ \Delta T_m = \dot{m}\ c_p(T_{fs} - T_{fe}) \tag{4.77}$$

Una aproximación de ΔT_m se calcula como $T_i - (T_{fs} - T_{fe})/2$, para un Ti, suelo > $T_{fluído}$ .Para determinar la transferencia total de calor de la tubería afectada por la disminución de temperatura durante el día por el intercambio de calor del suelo y el flujo de aire, se recomienda trabajar con una temperatura media logarítmica ΔT_{ml} .

$$\Delta T_{ml} = [(T_i - T_{fs}) - (T_i - T_{fe})]/\ ln[(T_i - T_{fs})/(T_i - T_{fe})] \tag{4.78}$$

El flujo a través del tubo ṁ , se determina a partir de la densidad del fluido ρ_f , área trasversal del tubo $Ac = \pi D^2/4$ y la velocidad media del aire Vm. La velocidad varía sobre la sección transversal, por lo que se trabaja con velocidad medias al tratarse de flujos internos.

$$\dot{m} = \rho_f * A_c * V_m \tag{4.79}$$

Para determinar el valor de h (convección), es necesario conocer el tipo de flujo dentro de la tubería siendo laminar o turbulento, para ello se determina el número de Reynolds (número adimensional que determina el comportamiento de los fluidos newtonianos), en función de flujo ṁ y viscosidad del fluido μ_f.

$$R_{eD} = \frac{4\,\dot{m}}{\pi * D * \mu_f} \tag{4.80}$$

Para Re ≤2300, se considera como flujo lamina, siendo el número de Nussel (N_u) aproximadamente de 4,36 , por lo tanto h = (N_u * k /D) = (4,36 * k /D) , si el flujo es turbulento Nussel será determinado a través del numero de Reynolds y Prandtl, $N_u = 0.023\ R_e^{4/5}\ P_r^{1/3}$.

Tabla 4.18. Propiedades térmicas de entrada.

Propiedades térmicas	Tubo de PVC (t)	Suelo (s)	Aire (f) (iteración de propiedades)
Calor especifico cp	1000-1500 J/kg K	1840 J/kg K	1008 J/kg K
Conductividad térmica k	0,12-0,25 W/m K	2,2 W/m K	26,3 x10^{-3} W/m K
Temperatura máxima Tmax ,Tfs	50-75 °C	Iteración	iteración
Temperatura mínima Tmin, Ti ,Tfe	-30 °C	27.5 °C	23.5 °C
Densidad ρ	1,37 a 1,42 Kg/dm^3	2500 Kg/ m^3	1,1614 Kg/ m^3
Difusibilidad αf , αs		5,83 x10-7 m^2/s	22,5 x10-6 m^2/s
Viscosidad µf			184,6 x10-7 Ns/m^2
Prandtl			0.707

Fuente: Propiedades de tubo de PVC, Catalogo de Plastigama . Incropera.

El cálculo de cada variable se realiza por medio de una serie de iteraciones para dimensionar el intercambiador, hasta obtener una diferencia mínima de gradiente de temperatura entre 4 a 5 grados más, con respecto a la temperatura del aire de entrada. Para el dimensionamiento de la tubería se ha considerado las pérdidas de energía ($h_{perd\ carga}$), generadas por pérdidas de cargas por fricción $h_{perd.\ fricción}$ a lo largo de la tubería por rugosidad y las cargas menores $h_{perd\ menores}$ que se produce cuando el fluido cambia de dirección o de sección es decir , son las pérdidas producidas por codos, reducción de diámetro de tuberías, válvulas , entre otras.

Se determina la perdida de carga por fricción, utilizando las ecuación de Darcy Weisbach, considerada como una de las formulas más exacta que incluye el coeficiente de fricción de la tubería. Se podría aplicar la ecuación de Veronesse-Datei empleada solo para tuberías de PVC, con Reynolds R_e entre $4x10^4$ a 10^6, para nuestro caso el R_e es inferior a estos valores. Cabe mencionar a diferentes autores como Manning , Hazeng William, Scobey y Scimeni , que han desarrollado ecuaciones apropiadas para obtener las pérdidas de cargas de una tubería aplicadas en caso de sistemas de canalización , para agua que fluye a temperatura ordinales, tubería de fibra cemento, tubería de aluminio, tuberías de aceros, entre otros condiciones que el usuario debería utilizarlas de acuerdo a la situación.

La ecuación de Darcy Weisbach expresada en función del caudal Q (m^3/s), depende del coeficiente de fricción f (adimensional), diámetro interno de la tubería D_i (m) y la longitud de la tubería L (m).

$$h_{perd\ fricción} = 0.0826 * f * L * (Q^2/D^5) \quad (4.81)$$

El coeficiente de fricción f, se obtiene a través del diagrama de Moody validos para fluidos incomprensibles (Apéndice D) desarrollado a través de la ecuación de Colebrook-White para calcular las pérdidas de tuberías, con un margen de error menor al 5 % en sus valores. En el diagrama intervienen el número de Reynolds (Re) y el coeficiente de rugosidad relativo de la pared de la tubería $\varepsilon r = \varepsilon/Di$ como parámetros diferenciador, además es válida para todo tipo de flujos y rugosidades.

Tabla 4.19 . ε Rugosidad absoluta de la tubería

Material	ε (mm)
Plástico PVC	0,0015
Tubo estirado de acero	0,0024
Tubo de latón o cobre	0,0015
Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Revestimiento de cemento	0,0024
Hierro galvanizado	0.06-0,24

Las pérdidas de carga menores o singulares $h_{\text{perd menores}}$, se expresa en termino de la constante adimensional de coeficiente de resistencia $K_{p,c}$ que dependen de los accesorios del diseño como los codos que conectan a las tuberías, la velocidad de circulación del aire (m/s) y la aceleración de gravedad (m/s^2).

$$h_{perd,menores} = \sum K_{p,c} V^2/(2 * g) \tag{4.81}$$

Tabla 4.20. Valores de Coeficiente de resistencia $K_{p,c}$ en pérdidas singulares (constante adimensional)

Coeficiente de perdida para Codos : Diámetro nominal , in (pulgadas)								
	Roscado				Acoplado			
	½¨	1 ¨	2 ¨	4¨	1¨	2¨	4¨	8¨
45° normal	0,39	0,32	0,30	0,29				
45° Suave					0,21	0,20	0,19	0,16
90° Normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26
90° Suave	1,0	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,30	0,25
180° Normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30	0,25
180° Suave					0,40	0,30	0,21	0,15

Fuente: (White, 2003)

A través de las múltiples iteraciones se ha llegado a dimensionar el intercambiador enterrado a través del geointercambio con el suelo – aire, obteniendo como resultados lo siguiente:

Tabla 4.21. Dimensionamiento del intercambiador enterrado

Material de la sonda	Tubería de PVC
Longitud	43.5 m
Longitud por paso	10.43 m
Numero de pasos	4
Diámetro externo de tubería Dext	110 mm
Diámetro interior de tubería Di	104, mm
Espesor de la tubería	2.7 mm
Profundidad del pozo	70 cm
Área ocupada	38.5 m2
Distancia entre tubería de entrada y salida	3,1 metros

Velocidad fluido Vf	2.5 m/s
Flujo másico	0.025 Kg/s
Caudal Q	0.0215 m3/s
Reynolds Re	1,65 x104
Coeficiente Kp,c	0,30
Rugosidad ε	0,0015 mm
h perd. fricción	1,23 m
$h_{perd,menores}$	0,47 m

En el apéndice E se detalla las dimensiones específicas del intercambiador enterrado que será construido y adaptado al equipo de secado.

4.4 MODELAMIENTO DINÁMICO DE FLUJO EN EL SECADOR HIBRIDO

Para el análisis fluido dinámico y termodinámico del equipo de secado de manera tridimensional, se ha utilizado el programa computacional "Flow Simulation de SolidWorks""; el cual, nos permite identificar por medio de la simulación posibles defectos del diseño de forma, además nos ayuda a conocer el comportamiento del material estructural, la circulación del flujo del aire y las temperaturas que alcanzara el prototipo.

En esta etapa se ha analizado la cámara de secado al vacío dependiendo solamente de la radiación solar que incide sobre el material transparente de la cámara y el colector solar. Posteriormente se analiza en conjunto todos los complementos del prototipo hibrido, es decir, el funcionamiento de los ventiladores, las fuentes de energías (resistencia) y colector. Finalmente se repité el mismo análisis añadiendo un cuerpo negro dentro de la cámara (plancha negra).

Por medio de la simulación obtendremos los primeros resultados teóricos del comportamiento del flujo de aire caliente, temperatura, velocidad, humedad, entre otros parámetros a considerar dentro de la cámara de secado, que serán utilizados como punto de comparación con los resultados obtenidos experimentalmente, con la finalidad de validar la fiabilidad del programa.

4.4.1 Fundamentos teóricos del CFDs[9]

La aplicación computacional se enmarca en el entorno del programa Solidwoks, que permite construir sólidos paramétricos en 3D, cada pieza que conforma el secador debe de ser dibujada por separado con las dimensiones específicas (extensión .SLDPRT) para posteriormente realizar el ensamblaje del conjunto total (extensión .SLDASM). Una vez obtenido el modelo tridimensional se plantea la utilización de la herramienta basada en la aplicación de la dinámica de fluidos por computadora CFD, como es el Flow Simulation.

[9] CFDs : Computational Fluid Dynamics.

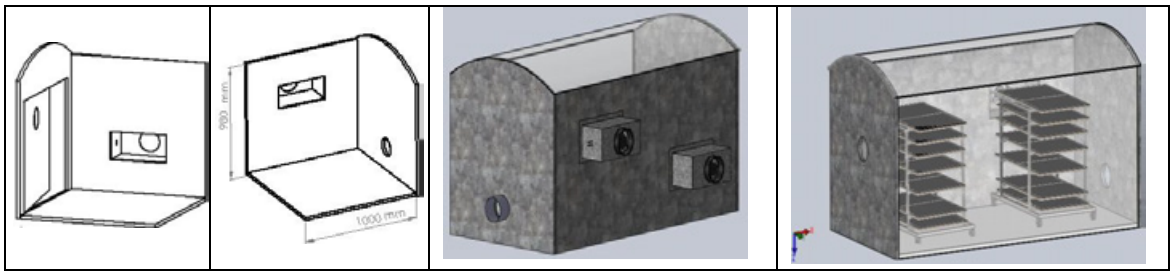
En modo general, el manual de la herramienta Flow Simulation (2010) indica la capacidad física del programa para analizar el estudio del flujo en un fluido y los fenómenos de transferencia de calor que intervienen. Para un mayor estudio en el anexo G se indica el funcionamiento del programa y la manera que el mismo resuelve el proceso de simulación.

Las condiciones incluidas en el programa son las siguientes:

- Flujos externos e internos de un fluido
- Convección libre , forzada, y mixtos
- Fluido en estado de equilibrio y dependiente con el tiempo.
- Flujos de gas subsónicos, transónicas y supersónicas
- Fluidos con capas límite, incluidos los efectos de rugosidad de la pared
- Fluido laminar y turbulento
- Multi-especies de líquidos y sólidos de varios componentes
- Conducción de calor en el líquido, medios sólidos y porosos con / sin transferencia de calor conjugada y / o resistencia al calor de contacto entre sólidos y / o transferencia de radiación de calor entre sólidos opacos (algunos sólidos puede considerarse transparente para la radiación), y / o el volumen (o de calor de superficie).
- Varios tipos de conductividad térmica en medio sólido, isotrópico, es decir, unidireccional, biaxial / axisimétrica y ortotrópico
- Flujos de líquidos laminar no newtonianos inelásticos (disponibilidad de 5 modelos de líquidos viscosos no newtonianos).
- Líquidos compresible
- Flujo de gas compresibles e incomprensible
- Gases ideales
- Dos fases (líquido + partículas) como un movimiento de partículas esféricas de líquidos (gotitas) o esféricas partículas sólidas en un campo de flujo en estado estacionario
- Radiación de transferencia de calor entre sólidos, cuya superficie emisividad se especifica, además predecir la transferencia simultánea de calor en medios sólidos y líquidos.
- Analiza varios tipos de conductividad térmica en un medio sólido, es decir, isotrópico, unidireccional, biaxial / axisimétrica y ortotrópica.
- Humedad relativa de los gases y mezclas de estos
- Cavitación en flujo de agua incompresible.
- Condiciones de contorno periódica.

4.4.2 Simulación de la Cámara de secado

Partiendo de la geometría, es decir del ensamblaje del secador, se genera en SolidWorks FlowSimulation la simulación del comportamiento térmico y de fluido del sistema de control seleccionado, con la finalidad de conocer resultados teóricos de velocidad, temperatura del sólido y temperatura interna del aire a medida que el fluido circula por el sistema. El plano estructural se encuentra disponible en el anexo E.



Lám 4.18. Geometría de los Modelos de cámara de secada analizada (modelo tipo domo)

El dominio computacional de cálculo está diseñado como un paralelepípedo que envuelve el modelo con planos ortogonales a los ejes del SolidWorks cartesiano del modelo de sistema de coordenadas globales.

4.4.2.1 Preparación de la simulación

Para inicializar flow simulation en la barra de herramienta se selecciona el comando Wizard, donde se establecen las condiciones generales del modelo térmico y fluido dinámico (Diego Pineda, 2010) . En la siguiente tabla se presenta la secuencia de ventanas que permitirán un desarrollo adecuado del proyecto.

Tabla 4.22. Ventanas generadas en el Wizard para la ejecución del proyecto

Ventana	Descripción	Pasos seguidos para simulación
Configu-ración del proyecto	Se inicia con la creación del proyecto, asigna el nombre del mismo.	*Crear nuevo Nombre* *Siguiente (next)*
Sistema de unidades	En esta ventana se selecciona la unidad de trabajo en forma general (sistema internacional de unidades SI, sistema inglés FPS e IPS, cegesimal de unidades CGS, sistema anglosajón USA), además que se puede especificar las unidades de cada parámetro o variables analizadas en el proyecto.	*Sistema de unidades* SI Velocidad m/s Masa kg Longitud m Temperatura K *Siguiente (Next)*
Tipo de análisis	Existen dos tipos de análisis : Interno en caso que se requiera solo conocer el comportamiento del fluido dentro de un sistema y Externo cuando se trata de analizar el fluido que pasa por ejemplo a los lados de una hélice. Da la opción para seleccionar características físicas si existe conducción de calor del sólido, radiación ambiental y radiación solar donde el programa cuenta con una base de datos de las principales ciudades. Al no encontrarse el sitio de análisis del proyecto se ingresan la dirección e intensidad de la radiación (Se deberá observar el eje de coordenadas del dibujo). Además permite asignar variables con dependencia con el tiempo, gravedad y rotación.	*Interno* Excluir cavidades sin condiciones de flujo Condición de calor en el sólido. *Radiación* Radiación ambiente. Temperatura ambiente: 20 C. Radiación solar /dirección e intensidad , X=0 , Y=-1, Z=1 Depende del tiempo Tiempo de análisis (s) *Siguiente (Next).*

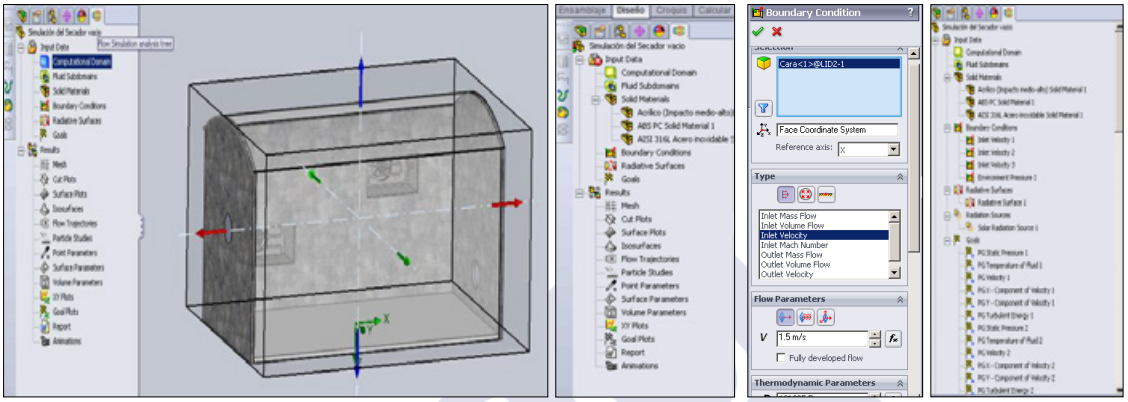
Predeterminación del fluido de trabajo	En esta ventana seleccionamos el tipo de fluido de trabajo a partir de una base de datos que contienen diversidad de gases, líquidos, líquidos no newtonianos, comprensibles, gases ideales y vapor. Finalmente se ingresa las características del fluido.	*Gases* Aire *Tipo de fluido :* Laminar y turbulento Humedad *Siguiente (Next)*
Predeterminación del material del sólido	Podemos encontrar una base de datos con una serie de materiales. Adicionalmente se encuentra la opción para seleccionar los materiales previamente creados en el modelo del sólido. En este caso se seleccionaría el material predominante del diseño. Cabe indicar que el material es seleccionado a partir del material designado previamente a cada pieza ensamblada en el solidworks.	*Definición*: Solido del modelo. Policarbonato Acero Siguiente (Next)
Condición de la pared	En este apartado se indica las condiciones del estado de las paredes del modelo, así como darles propiedades de temperatura, rugosidad, entre otras.	*Condiciones térmica de la pared externa:* Coeficiente de transferencia de calor: 9.5 w/m2 K *Temperatura externa del fluido:* 293.3 K. Defecto de la pared de la *superficie radiativa:* pared absorbente. Defecto Superficie *radiativa de la pared exterior*: superficie no radiativa. Porosidad: micrómetro *Siguiente (Next)*
Condición inicial	Referido a las condiciones de los parámetros termodinámicos iniciales como son: presión, temperatura, densidad dirección de la velocidad del fluido (x, y, z). Se pueden definir los parámetros de turbulencia con respecto a una longitud específica por medio del ingreso de tabla de datos.	Presión : 101325 Pa Temperatura : 20 C Velocidad en dirección X: 1 m/s. *Siguiente (Next)*
Resultados y resolución geométrica	Corresponde a geometría y resolución y el tamaño de la malla. En un rango de resolución de malla de 1 a 8.	*Grado de refinamiento*: 3 *Finalizar (Finish)*

Una vez finalizada la configuración del proyecto el Solidworks Flow Simulation establece el dominio computacional (*computational Domain*) en forma automática con opción a expansión o viceversa dependiendo del requerimiento del análisis realizado por el usuario basado en la información inicial del modelo. El programa genera un archivo denominado estudio térmico visualizado en el icono de Flow Simulation analysis tree.

Para el pre procesamiento se ingresa las condiciones iniciales identificando tipo de material (*solid material*) de cada pared del sólido seleccionando si son opacos o transparentes , se identifican las condiciones de fronteras (*Boundary conditions*) seleccionando las caras

que representaran las entradas (inlet) y salida (outlet) del fluido en el modelo ,se introduce los valores de velocidad, temperatura, presión y humedad. Se puede indicar un valor constante o ingresar una tabla de datos.

Se ingresara superficies radiantes (*radiative surface*),seleccionando la pared de cuerpos negro que emitirán radiación . En el comando radiation sources (radiación solar directa o difusa) se ingresa la base de datos de la radiación solar del día y la temperatura ambiente variante en el tiempo. Finalmente para almacenar los resultados de las diferentes variables y parámetros es necesario activar las metas llamados *goals*.



Lám 4.19. Visualización de la pantalla del Flow Simulation analysis tree

Tabla 4.23. Condiciones de fronteras, tipos de materiales y parámetros iniciales establecidos para la simulación del diseño del modelo completo.

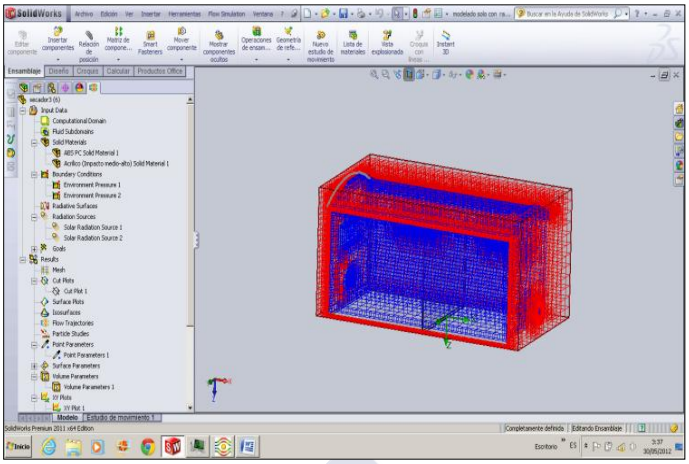
Parámetros	Modelo tipo domo
Condiciones de frontera	Dos entradas: aire caliente por uso de energía eléctrica. Velocidad: tabla de datos temperatura ambiente. Humedad: Ingreso de tabla de datos Una entrada: aire caliente proveniente del colector solar. Velocidad y temperatura: tabla de datos generada de las mediciones del equipo solar. Una Salida: presión atmosférica a temperatura ambiente, ingreso de base de datos.
Materiales	Pared de acero galvanizado. Adiabática Pared de policarbonato de 10 mm de espesor. Pared transparente. Cubierta de vidrio plástico. Pared transparente.
Radiación solar	Cara lateral de policarbonato y cubierta. Ingreso de base de datos. Datos obtenidos de la estación meteorológica de Meteogalicia.
Fuente de calor (heat sources)	Fuente de calor (Vs heat generation rate) : resistencias 800 W.

La inicialización del proceso de simulación se realiza mediante la ejecución del comando *Run*, activando una nueva pantalla "'Solver "' que permite visualizar los resultados del proceso de cálculo e interacción en función de las variables, parámetros y condiciones seleccionadas en el pre procesamiento.

4.4.2.2 Malla o Rejilla de Simulación (grid).

El programa genera la malla del sólido en forma automática, si el usuario lo requiere puede ser cambiado en forma manual. La malla de la simulación para el dominio computacional es rectangular en todo el dominio de cálculo del sólido.

En la siguiente figura, se puede observar un ejemplo del mallado que realiza el programa sobre la geometría del sólido de manera general.

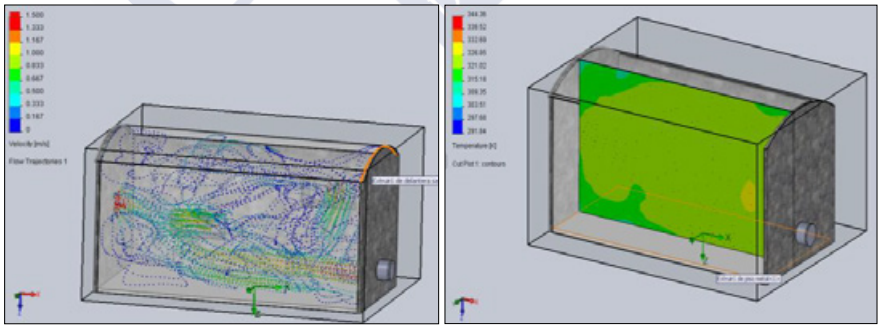


Lám 4.20. Malla 3D automática del modelo geométrico de la cámara de secado.

4.4.2.3 Solución del modelo

Flow Simulation resuelve las ecuaciones de gobierno con el método volumen finito sobre una malla computacional espacialmente rectangular diseñada en el sistema de coordenadas cartesianas con los planos ortogonales a sus ejes y refinada localmente en la interface del medio. Las variables físicas se almacenan en los centros de las celdas de la malla. (SolidWorks, 2010).

La visualización de la salida del modelo del Flow simulation finaliza con la ejecución del solvers, y con la ayuda del comando *Results* se pueden visualizar la temperatura, velocidad del aire, radiación, entre otros variables.



Lám 4.21. Salida del modelo: a) Velocidad de aire (m/s). b) Temperatura del fluido de la cámara de secado del modelo tipo.

4.4.2.4 Resultados de la simulación.

La simulación se realizo para varias condiciones utilizando un cuerpo negro (absorbe energía solar y la emite en forma de calor) y sin placa absorbente. Se realizaron pruebas ingresando solo radiación solar y además con el sistema completo, fijando a una temperatura ambiente de 18 ºC. Los resultados obtenidos se basan en la selección de 8 puntos de medición dentro de la cámara, en las entradas y salidas del flujo. A través de la simulación podemos observar el comportamiento del flujo de aire caliente para el secado, lo cual nos

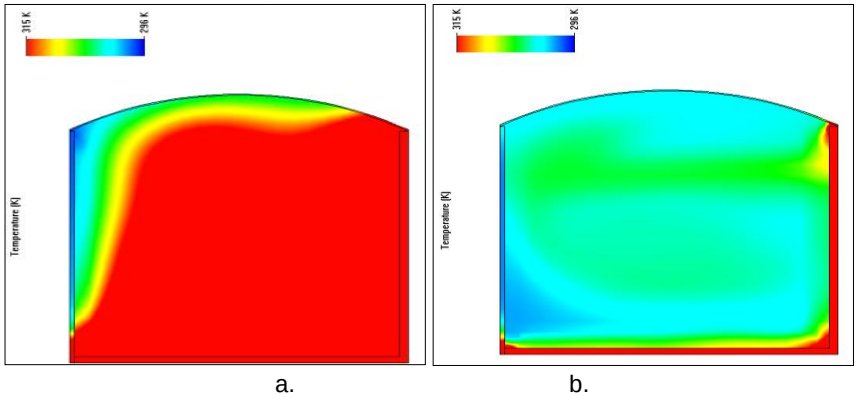
permitirá realizar la valoración de los puntos críticos del modelo, que influyen en el funcionamiento apropiado del mismo. Es necesario que el flujo de aire que pasa por la bandejas sea uniforme, a la temperatura requerida para la deshidratación del producto, con el fin de sacar la mayor cantidad de humedad presente y no exista pérdidas o deterioros de las propiedades físico química del producto.

En la siguiente tabla se indican los valores de salida del modelo obtenidos de la simulación para una temperatura de ambiente de 25 ºC, y una irradiación de 500 W/m^2.

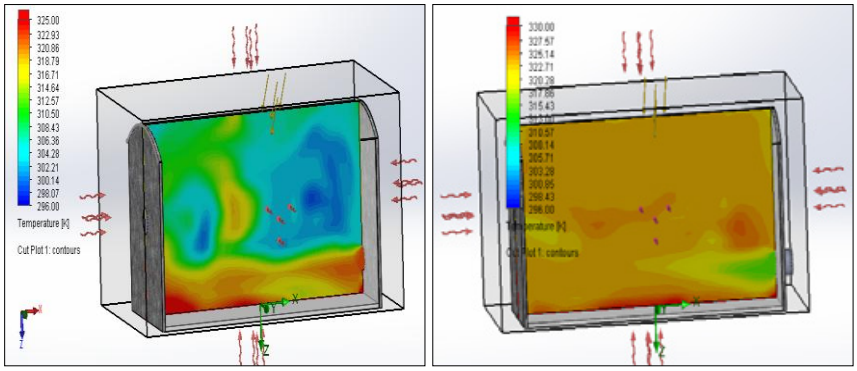
Tabla 4.24. Resultados teórico de la cámara al vacio simulado en SolidWorks Flow Simulation.

Parámetros	Modelo 1. Comportamiento efecto invernadero	Modelo 2. Solar y entrada de aire	Modelo 3. Radiación solar y colector	Modelo 4. Completo
Temperatura media del fluido (ºC)	47,25	30,03	36,51	48,48
Temperatura mínima del fluido (ºC)	42,11	25,41	26,99	30,15
Temperatura del sólido (Suelo) (ºC)	57-73	34,38- 43,16	41-46,66	53,15
Velocidades máximas (m/s)	0,005	2,55	3,64	3,11
Velocidades medias (m/s)	0,0008	0,18	0,24	0,26
Flujo de calor (W/m2)	0,16	16,13	15,54	124,5

Como se puede apreciar el modelo alcanza la temperatura deseada solo aprovechando el efecto invernadero a una radiación de 500 W/m^2 para una temperatura ambiente de 25 ºC, significando que a menor radiación es necesario un sistema de apoyo y en especial al hacer recircular una fuente de aire (secador indirecto) para lograr un secado uniforme, reduciendo el valor entre un 36% a 22 % menos para la misma condición, al funcionar ventiladores y colector solar. En caso de adaptar fuentes de calor por conducción y equipos térmicos el sistema el incremento de temperatura será aproximadamente de 23,48 ºC. Con lo antes expuesto, podemos decir que a mayores radiaciones el secador mantendrá un buen funcionamiento de operación.



a. b.



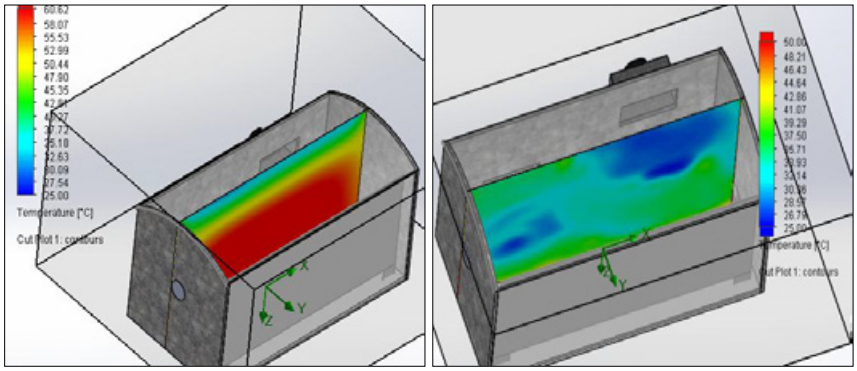
c. d.

Lám 4.22. Simulación del funcionamiento teórico del secador. a) Efecto invernadero b) Adaptación de una corriente de aire 1.4 m/s c) Adaptación de un colector solar y sistemas de aire d) Funcionamiento de sistema eléctrico y componente térmico.

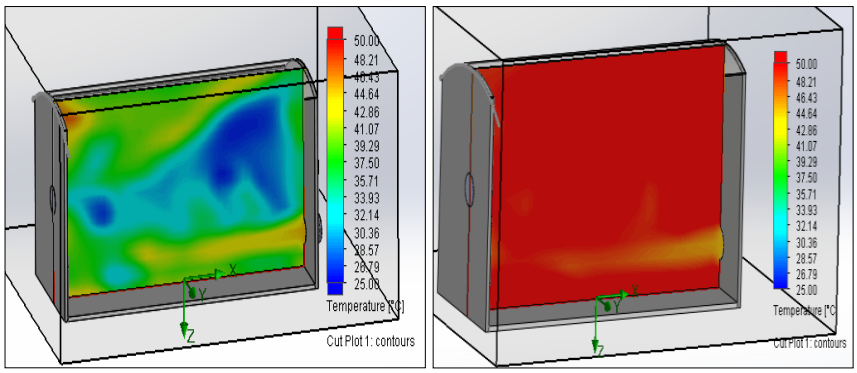
Tabla 4.25. Resultados teórico de la cámara en vacio simulado en SolidWorks Flow Simulation adaptando una placa negra lateral.

Parámetros	Modelo 1. Comportamiento efecto invernadero (Placa negra)	Modelo 2. Entrada de aire (Placa negra)	Modelo 3. Radiación solar y colector (Placa negra)	Modelo 4. Completo (Placa negra)
Temperatura media del fluido (ºC)	55.8	33.48	35.64	51.16
Temperatura mínima del fluido (ºC)	25	26.14	28.66	36.9
Temperatura sólido (Placa negra) (ºC)	52.1	54.41	57.21	62.53
Velocidades máximas (m/s)	0.005	2.47	3.77	4.19
Velocidades medias (m/s)	0.0001	0.18	0.18	0.25
Flujo de calor (W/m^2)	0.06	17.6	16.44	9.6
Transferencia de calor (W)	1.88	460.77	421.6	246.1

Comparando resultados entre la Tabla 4.24 y 4.25, la placa captadora permitirá una uniformidad de la temperatura en la cámara así mismo un incremento de la misma entre 8.32 a 2.68 ºC más en relación de no utilizar ningún cuerpo negro.



a. **b.**



c. **d.**

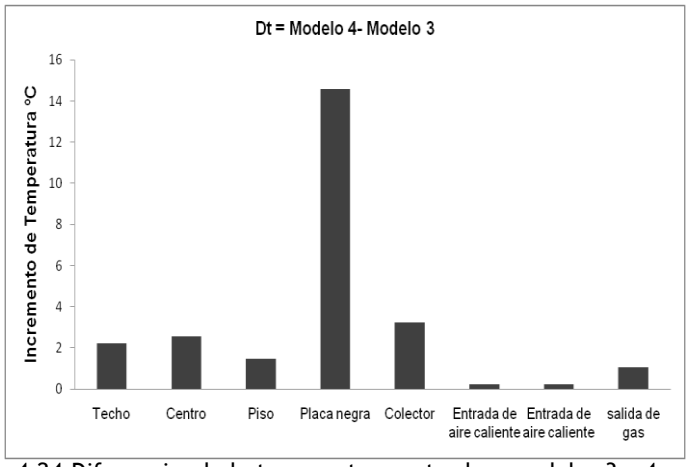
Lám 4.23. Simulación del funcionamiento teórico del secador adaptando un cuerpo negro. a) efecto invernadero b) adaptación de una corriente de aire 1.4 m/s c) adaptación de un colector solar y sistemas de aire d) funcionamiento de sistema eléctrico y componente térmico.

A continuación se establece con más claridad la variación de temperatura dentro de la cámara para varios puntos de análisis establecidos en el *goals (*SolidWorks Flow Simulation), en condición de 500 W/m^2, 25 ºC.

Tabla 4.26. Variación de temperatura interna de la cámara al vacio en 8 puntos.

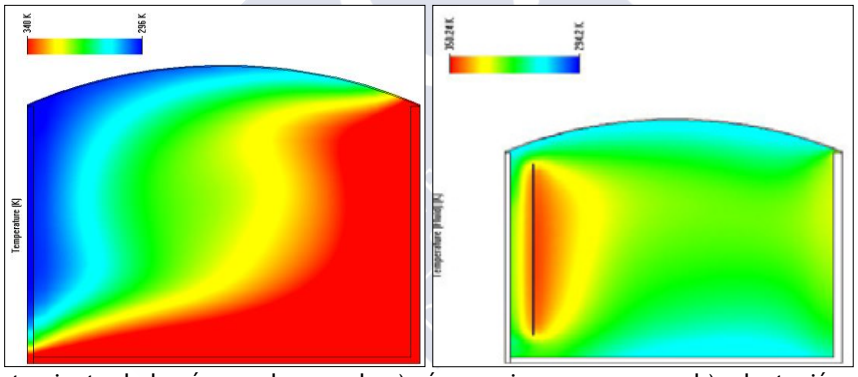
	Modelo con radiación y entrada de aire				Modelo Completo			
	Modelo 1. Cámara al vacio		Modelo 2. Superficie negra		Modelo 3. Cámara al vacio		Modelo 4. Superficie negra	
Puntos de análisis	Temp. (K)	Velocidad (m/s)	Temp. (K)	Velocidad (m/s)	Temp (K)	Velocidad (m/s)	Temp. (K)	Velocidad (m/s)
Punto 1: a 10 cm del techo	28.82	0.17	29.7	0.15	48.7	0.17	50.9	0.29
Punto 2 :a 50 cm de la cámara	30.49	0.16	33.58	0.46	48.14	0.22	50.74	0.31
Punto 3: Piso	34.38	0.12	38.31	0.31	50.32	0.20	51.73	0.24
Punto 4 : Pared transparente / Plancha negra	28.31	0.16	54.41	0.17	47.95	0.19	62.53	0.29
Punto 5 : entrada de aire colector	----	------	------	-----	42.29	1.42	45.51	1.41
Punto 6: entrada de aire	29.52	1.02	28.612	0.62	49.75	0.9	49.96	0.97
Punto 7: entrada de aire	27.34	1.027	28.41	0.66	49.75	0.9	49.96	0.98
Punto 8: salida	28.87	1.55	31.88	2.47	48	2.68	49.08	4.19

Realizando un breve análisis entre los modelos 3 y 4 se observa casi una estabilidad en los modelos de manera general tanto en temperatura como velocidad de flujo de aire caliente. Con una tendencia aproximada entre el techo y centro de 0.16 ºC (modelo 4) y 0,53 ºC (modelo 3), entre el centro y piso 1,05 ºC (modelo 4) y 2,15 (modelo 3). Es así, que al realizar una comparación entre ambos modelo se puede notar que la placa negra permite un incremento de temperatura de 1,57 a 2,57 ºC de diferencia en el punto 1, punto 2 y punto3 con respecto al modelo 3.



Lám 4.24.Diferencia de la temperatura entre los modelos 3 y 4.

Para una mejor visualización, en la lámina 4.25 se ilustra por medio de la simulación como afecta un cuerpo negro dentro de un secador solar, que en cierto caso muestra una mejor distribuirá de temperatura en la cámara, no obstante habría que considerarse la estabilidad de la misma a un largo periodo a través de mediciones realizadas en laboratorios y pruebas de campo. Estudio que se analiza en el siguiente capítulo.



Lám 4.25. Comportamiento de la cámara de secado a) cámara sin cuerpo negro. b) adaptación de una placa

Como puede observarse en las diferentes simulaciones, el mejor funcionamiento del diseño se obtiene aplicando una placa captadora dentro de la cámara.

4.4.3 Simulación del sistema de aerotermia.

Para el ensamblaje del diseño y modelamiento se sigue el mismo procedimiento del apartado 4.4.2, utilizando el programa SolidWorks con aplicación a Flow Simulation".

- Elaboración de la geometría por piezas y ensambladas con vista 3D.
- Inicialización del flow simulation; se establecen las condiciones generales del modelo térmico y fluido dinámico, se ingresan las condiciones iniciales y de fronteras como las temperatura ambiental, temperatura del suelo, porosidad, capacidad calorífica, material y radiación solar. La simulación del modelo se lo realiza en estado transiente.

En la etapa de simulación se modela el intercambiador enterrado como resultado oportuno de anticipar los valores aproximado de temperaturas del perfil del suelo,

temperatura de salida de aire caliente y velocidad del fluido caloportador del sistema. Los resultados previos obtenidos serian las condiciones o parámetros entrada del flujo de aire caliente que se utilizaría en la cámara de secado.

Cabe indicar que las propiedades termodinámicas utilizadas en el modelo del intercambiador de calor corresponden a un suelo de de características arcillosas con bajo contenido de agua. Conductividad térmica (K_s) entre 1,1 a 3,5 W/m K, estimado un valor típico de 2,2 W/m K y calor especifico C_p de 1840 J/kg K.

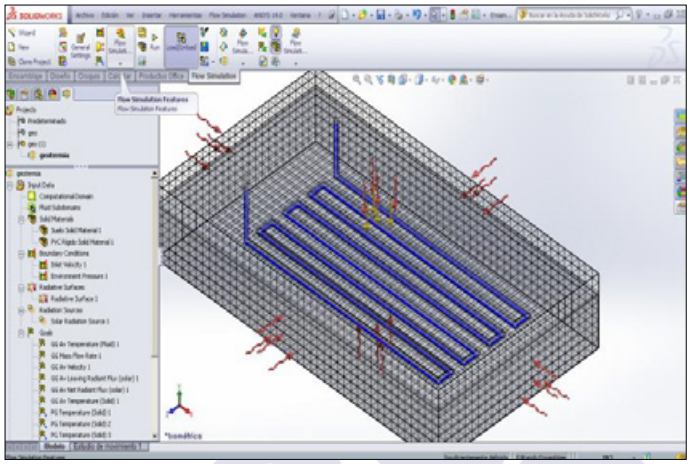
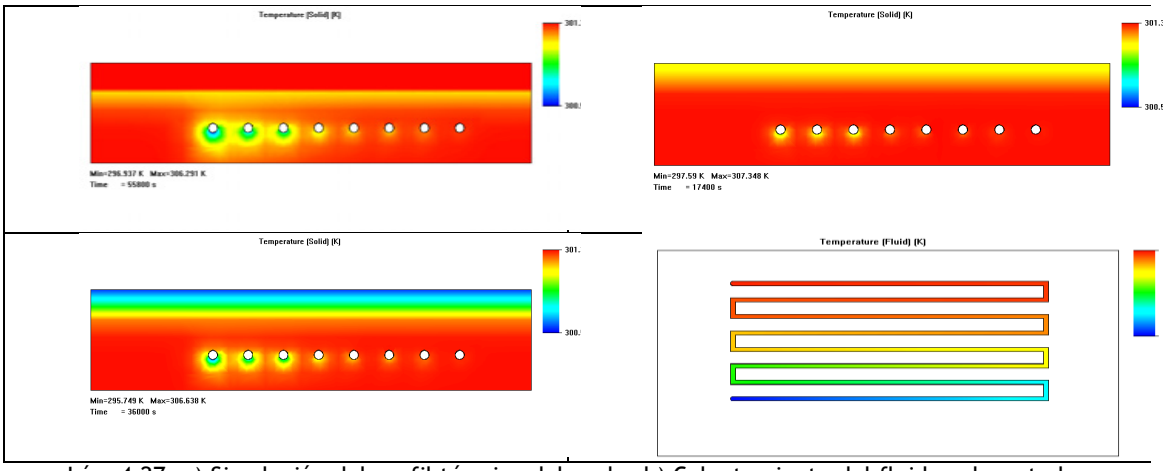


Figura 4.26. Malla en 3D del modelado; región de frontera y condiciones iniciales del captador

4.4.3.1 Resultados de la simulación del modelo fluido dinámico

El proceso de la simulación implica conocer principalmente las condiciones iniciales que se encontrara el diseño, es así que se parte de una base de datos de las condiciones climáticas (irradiación, temperatura ambiente) de un día cualquiera de la localidad donde será puesto el prototipo enterrado a una profundidad de 70 cm (Lám 4.16), de igual forma se ingresan los parámetros utilizados en el análisis teórico explicados en la sección 2.3.1.1, con la finalidad de realizar una comparación entre resultados teóricos y simulados.

La lámina 4.27 se muestra el comportamiento de la temperatura del fluido de aire caliente que pasa por el intercambiador, con una velocidades promedio de entre 1,7 a 2 m/s con respecto al tiempo de calentamiento del fluido y el suelo, para un periodo transiente.



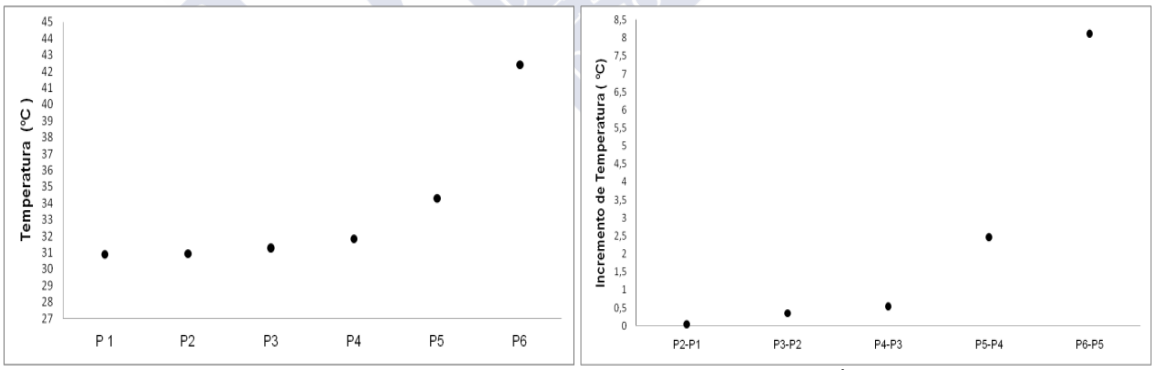
Lám 4.27. a) Simulación del perfil térmico del suelo. b) Calentamiento del fluido caloportador

En la siguiente tabla 4.27, se muestran los resultados del perfil del suelo obtenidos de la simulación para un tiempo trasciende de 12 horas, irradiación entre 200 a 600 W/m^2 y temperatura ambiente 26 ºC.

Tabla 4.27. Resultados del perfil de temperatura del suelo en los primeros 70 cm (SolidWorks Flow Simulation)

Perfil del suelo	Temperatura (°C)
P 1. Superficie del tubo	30.90
P 2. Distancia 10 cm del tubo	30.94
P 3: Distancia 20 cm del tubo	31.29
P 4 : Distancia 30 cm del tubo	31.83
P 5 : Distancia 40 cm del tubo	34.29
P 6: Superficie del terreno. (Distancia a 70 cm del tubo).	42.41

Analizando los resultados entre la temperatura teórica obtenida de la Lámina 4.17 siendo de 27.9 ºC, y los resultados de la simulación habría una diferencia de temperatura de 3.04 ºC mas en la superficie del tubo, cabe indicar que las ecuaciones utilizadas para el cálculo teórico no consideran la irradiación solar del día, solo la temperatura de la superficie. Por lo tanto, el resultado de la simulación debe ser evaluado con los resultados obtenidos del proceso de medición en el experimento de campo. Es así que, el valor teórico deberá asimilarse en condiciones donde la radiación es minina o nula (noche) para poder comparar la estabilidad del sistema.



a. b.

Lám 4.28. Perfil del suelo durante el día. a) Temperatura promedia b) diferencia de temperatura por cada 10 cm de distancia entre punto de medición.

Finalmente el modelo establece que la temperatura del fluido de salida del intercambiador es de 29.43 ºC con velocidad entre 1.88 a 2.39 m/s. Mientras que la temperatura del fluido teórico obtenida fue de 28 ºC para una velocidad de 1.7 m/s, abriendo una diferencia de temperatura de 1.43 ºC más.

4.5 PROTOTIPO EXPERIMENTAL

Se ha realizado el diseño del prototipo experimental de fácil armado por piezas, ensamblaje, funcionamiento y operabilidad; con el fin de poder ser replicable en otros lugares, y de ser posible utilizar materiales de la zona.

El secador está formado por dos módulos acoplados entre sí, con un volumen de 1.32 m^3 cada uno. El diseño tiene la finalidad de un continuo crecimiento longitudinal, al poderse unir varios módulos entre sí, permitiendo al usuario aumentar la cantidad de producto a deshidratar a corto plazo.

El secador fue elaborado, en un 80%, con materiales metálicos aislados internamente con lana de vidrio, utilizado para algunas paredes y piso. Para el ingreso de la radiación solar se han utilizado materiales transparentes para la cubierta y una pared que se colacara en dirección máxima de la irradiación solar para favorecer el efecto invernadero.

4.5.1 Cámara de secado

La mayor parte de la estructura del prototipo como son las paredes, acoples y caja de ventilación, que soportaran calentamiento térmico; se utiliza acero galvanizados de 0,08 mm. Para evitar pérdidas térmicas, las paredes son 1,5 cm de espesor aisladas con lana de vidrio de 2 cm.

Un porcentaje de la energía térmica es aportado por la radiación solar, para ello se requiere aprovechar la mayor parte de irradiación que ingrese a la cámara, por lo que se ha considerado utilizar materiales transparentes, delgado, que soporte condiciones climáticas, no tenga cambios buscos de color, bajo peso, buena resistencias mecánica y de ser posibles soporte de impactos. Para ello se ha utilizado como cubierta o techo de las cámaras, *plástico glass* o también denominado stryroglass (plástico reforzado con vidrio) de 2,5 mm de espesor y en la pared una plancha de policarbonato alveolar de 10 mm, son placas traslucidas con estructura multipared.

La biomasa será colocada en carros transportadores construidos de perfiles metálicos para estanterías (espesor 2.5 cm), cada carro aloja 6 bandejas espaciada entre 8 a 12 cm entre ellas con la finalidad de mantener una circulación de aire casi uniforme para el secado del producto. Las bandejas son malladas con hilo de red y marco de madera, con dimensiones de 42 x 70 x 1 cm.

En el interior de la cámara se utiliza una superficie selectiva oscura colocada una en el piso y otra paralela con una distancia 10 cm de la plancha de policarbonato, que cumplen la función de un cuerpo negro.

El aire saturado de humedad saldrá por un conducto de 15 cm de diámetro hacia el ambiente, es necesario indicar que el aire húmedo no es recuperado porque se requiere diseñar un intercambiador de calor o ductos con filtros de humedad, y, tal como se ha indicado anteriormente el equipo tiene la tendencia de crecer por lo que no es asequible, solo se puede adaptar si el sistema se diseña para una carga fija.

En la lamina 4.29 , se muestra parte de la construcción de la cámara de secado.



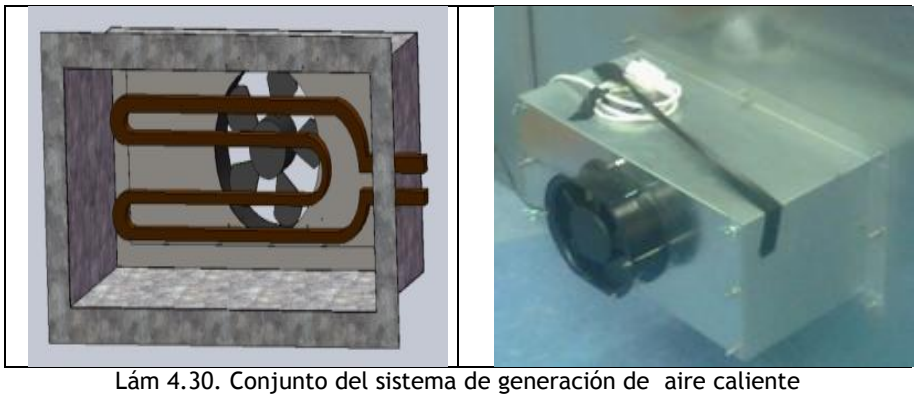
Lám 4.29. Construcción, ensamblaje del prototipo experimental.

4.5.1.1 Equipos complementarios

El equipo experimental requiere 2855,6 W por hora de energía para su funcionalidad, lo que será cubierto gran parte de la potencia necesaria por energía eléctrica, abastecida por un conjunto de paneles fotovoltaicos que permitirán el funcionamiento de resistencias eléctricas y ventiladores. Para completar, se abastece el prototipo con energía térmica proveniente de un colector solar de aire.

Sistema de calentamiento eléctrico

Las cajas de soporte del sistema de calentamiento son elaboradas de acero galvanizados de 0.08 mm, con dimensiones de 40 x 22 x 15 cm. Cada ducto lleva una resistencia eléctrica de 800 W y un ventilador axial (diámetro 151 mm) de 36 W, modelo SUNON tensión 210- 240 Vac, amperaje mínimo 110 mA y máximo 240 mA, 50/60 Hz , velocidad del ventilador 2950 rpm de 180 CFM.



Lám 4.30. Conjunto del sistema de generación de aire caliente

El sistema de aire caliente es controlado por medio de un control automático basado en un termostato de doble canal (T2S+2C DIGIT) con sonda superficial autoadhesiva que controlada la temperatura dentro de cámara apagando las resistencias eléctricas al sobrepasar los 54 0C, y encenderlas al detectar temperatura inferior de 50 0C. Asimismo el flujo de aire es regulado por dos potenciómetros.



Lám 4.31. Sistema de control: a) Termostato de doble canal y fusibles. b) Potenciómetro

Sistema fotovoltaico autónomo

A partir del dimensionamiento del sistema de generación eléctrica del apartado 4.2.3 se procedió a seleccionar los componentes idóneos para la instalación del mismo, detallándose a continuación.

- Paneles fotovoltaicos policristalino, marca Suntech ,modelo STP280 -24/Vd, potencia 280 W, corriente 7.95 A, Voltaje 35.2 V.
- Batería ácido plomo ,12 V/130 Ah, Marca trojan 30-XHS, conectados serie/paralelo; 3 conjunto en paralelo y 2 series
- Regulador de carga: marca Steca Solar Charge Controller, Solarix PRS 1010 ,12/24 V, 10 A
- Inversor cargador aislado de 1200 VA, Marca Victron Multiplus C24/1200/25
- Cables flexibles para conexión en paneles, inversores y reguladores de 10 mm y 6mm de diámetro. Cables especiales para baterías de 6 mm.
- Sistema de protección térmicos, marca Schneider electric, C60H-DC, de 16 A y 10 A.
- Medidor de consumo de potencia: ABBOD 1365, 230V /50 Hz.


Panel fotovoltaico



Regular


Baterías



Inversor/ cargador

Lám 4.32. Componentes del sistema aislado para generación eléctrica.

Colector solar térmico

El abastecimiento de energía térmica del prototipo se basa en el uso de un colector solar, para este caso se ha seleccionado del mercado nacional un equipo con buen rendimiento, adaptándolo a nuestras necesidades. Cuyas características son; marca solarVenti SV14 , caudal de 120 m^3/horas, dimensión de 197,4x 70,4x 5,5 cm, potencia equivalente de 1000 W, a pleno sol la temperatura del aire inyectado se eleva aproximadamente 30 a 35 grados centígrados en relación con la temperatura exterior. Internamente el panel cuenta con una celular solar fotovoltaica que alimenta un ventilador de 12 V que está conectada a mediante un tubo flexible a un difusor de aire y a un interruptor. Para controlar temperaturas de 50 °C dentro de la cámara se ha regulado la velocidad del colector la temperatura de la misma, adaptando una batería y un termostato para evitar temperaturas mayores a 55 ºC o por debajo de 30 ºC.


Lám 4.33. Colector solar

4.5.2 Construcción del intercambiador enterrado.

La constriccion de un segundo prototipo de secado se realizo en el Campus Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, lateral a la estación de trabajo del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable en la FIMCP (coordenadas 2° 8'36.28"S, 79°57'55.10"O). El prototipo demostrativo nos permita evaluar la aplicación de estos sistemas de aerogeotermia de baja entalpia como mecanismo de soporte de energía para un secador.

El ***captador horizontal*** enterrado, consiste en una sonda de intercambio de calor con el subsuelo construido con 55 m de tubería de PVC de diámetro de 110 mm, formando un intercambiador de calor tipo serpentín. El intercambiador se encuentra enterrado homogéneamente en el subsuelo a una profundidad aproximada a 70 cm, ocupando un área de 21 m^2. La instalación actuará como un sistema auxiliar de pre-calentamiento del aire ambiental, antes de que ingrese a la cámara de secado. La distancia entre en la tubería de entrada y salida de aire es de 3,5 metros.

El aire que ingresa dentro del serpentín es de flujo forzado generado a través de un blower modelo 5Y202 size 3", capacidad de 1000 pie/min, voltaje 110 V, 4 A, Rpm 3000/3600.



Lám 4.34. Etapa construcción del intercambiador horizontal para aerogeotermia.

4.5.3 Colector solar adaptado para aerotermia.

Las paredes del colector fueron construidas con acero inoxidable 430N4 de 0.40MM , internamente es aislado con lana de vidrio de 10 cm de espesor. En la superficie del colector se ha colocado una placa de acero comercial de 3 mm, cubierta con pintura anticorrosiva color negro (cuerpo negro), posteriormente es colocada una plancha de policarbonato alveolar traslucida de 10 mm, por donde el fluido caloportador (aire) pasa internamente por las secciones de la plancha de policarbonato conectada a una tubería de 2 pulgadas, que transportara el fluido a la cámara. La cubierta del colector es de vidrio transparente con bajo contenido de hierro de 3mm espesor.



Lám 4.35. Prototipo experimental de secado aprovechando la energía proveniente de la aerotermia

4.6 CONCLUSIONES

Se han desarrollado varias metodologías de cálculo y simulación del modelo fluido dinámico para seleccionar el diseño del secador más adecuado para el secado de macroalgas. En paralelo se ha realizado los cálculos del aporte energético necesario en el proceso de secado.

Selección del diseño del prototipo experimental y cálculo energético. El diseño del secador es de tipo gabinete de forma dómica. El prototipo está compuesto por dos cámaras de secado acopladas entre ellas, de fácil armado y desarmado. El 70% del prototipo es construido de materiales metales, con paredes aisladas térmicamente y el 30 % se encuentra construido con materiales transparentes que soportan cambios térmicos por la variación de temperatura y condiciones climáticas que estarán expuestos. El cálculo energético realizado muestra que se necesita una cantidad de energía de 2855,6 Wh, para deshidratar 10 kg de algas frescas y así eliminar la mayor cantidad de agua posible en el producto. De las cinco metodológica analizadas se muestra que el método de la Ecuación general de la Energía y uso de Carta psicrométrica permite establecer el límite máximo de energía de consumo para el proceso de secado.

Selección de los complementos del sistema. Se ha selecciona un colector de placa plana que alimentara un 34,48 % (1000 Wh) de la energía consumida en el proceso de secado. Una cámara de secado tipo invernadero que cubrirá el 20 % de la energía en días nublados (radiación solar menor a 300 W/m^2, lluvias) , no obstante, en climas con días despejados la cámara por efecto invernadero deberá asumir la cantidad restante de energía (65.52 %). En casos de la primera hipótesis (días nublados) antes mencionada, el prototipo se provee de un sistema auxiliar compuesto de resistencias eléctricas alimentado de paneles fotovoltaicos que alimentara el 45.52 % del secado. Además, el diseño también provee de la utilización de la energía aerotermica proveniente de un intercambiador enterrado que nos permitirá mantener una temperatura de aire constante en la entrada del colector solar, mejorando de esta manera la eficiencia del colector.

La Inclinación del panel térmico y fotovoltaico se ha calculado de acuerdo a la localización geográfica del lugar, siendo el ángulo óptimo de inclinación de 33^0 para todo el año.

Estimación de la profundidad y temperatura del intercambiado enterrado: El sondeo realizado antes de la instalación del intercambiador horizontal, ha permitido determinar las temperaturas del perfil del suelo y la distancia de estabilización de la temperatura. A partir de estos datos se ha calculado matemáticamente para un suelo de características arcillosas que a distancias superiores de 70 cm con respecto a la superficie del suelo la temperatura del aire se incrementa entre 4.56 ºC a 5 ºC más con respecto a la temperatura ambiental.

Estimación del tiempo teórico y velocidades de aire: Se ha determinado el tiempo teórico de secado del producto en los periodos de velocidad constante y de velocidad decreciente es aproximadamente de 9 horas. Para secado del producto se ha calculado un flujo de aire caliente de 0.076 Kg/s a una velocidad de 1.1 m/s.

Estimación de la eficiencia teórica del prototipo y del secado. Se obtiene una eficiencia teórica del prototipo experimental del 59 al 71 % y una eficiencia de secado del 59 %. La eficiencia de un colector solar plano es una de las variables importantes a controlar durante el diseño siendo del 73 %.

Estimación del comportamiento fluido dinámico del modelo utilizando CFDs : El análisis y síntesis del diseño de un secador hibrido usando mecánica de fluidos y transferencia de calor, fue realizada con el fin de describir su dinámica y predecir y mejorar el funcionamiento del prototipo experimental. Al realizar la comparación entre el modelo del secador hibrido sin placa captadora y con placa se ha determinado que la placa negra permitirá un incremento de temperatura de 1.57 a 2.57 ºC en el secador.

CAPITULO 5.
PRUEBA EXPERIMENTAL EN LA CAMARA DE SECADO.

5.1 INTRODUCCIÓN.

Las pruebas experimentales realizadas con el prototipo de secado corresponden a una de las etapas más importante y necesaria en el desarrollo de este trabajo, debido que a través de la misma podremos identificar parámetros de operación, variables de interés y condiciones que influyen en el funcionamiento.

En esta sección se describe la metodología empleada a lo largo de las pruebas, los equipos experimentales que se han utilizado y los procedimientos fundamentales en el registro de información de las variables internas y externas de la cámara de secado y cada uno de los componentes del sistema hibrido, evaluando la resistividad térmica del secadero en vacío (sin carga de biomasa) en diferentes condiciones.

Es indispensable para el registro de los datos elaborar una metodología de trabajo para llevar un control sistemático de las pruebas experimentales. Esto permitirá detectar errores en el registro de información que deberá ser controlado, para no afectar la credibilidad y veracidad de los resultados. El registro de información se lleva a cabo a través de un protocolo de medición el cual consiste en tablas o matrices que incluyen las principales variables.

Las primeras pruebas experimentales fueron realizadas bajo condiciones controladas, es decir; en un laboratorio a temperatura ambiental constante con irradiación artificial producida por medio de lámparas halógenas colocadas a diferentes distancias de la cámara de secado. El objetivo de esta prueba radica en estudiar cada una de las variables por separado que influirá en el funcionamiento del prototipo como son: temperatura de la cámara, flujo de aire caliente, tiempo de estabilidad, homogeneidad del sistema, consumo de energía, entre otros. Cabe agregar, que se replica el procedimiento antes mencionado en condiciones ambientales, donde las condiciones de irradiación, humedad y temperaturas ambientales son variables. Con las consideraciones anteriores, podemos realizar un barrido de información para comparar el desempeño de funcionamiento, y al mismo tiempo determinar la eficiencia energética del secador y así como su capacidad de operación.

Finalmente, se realiza la validación del modelo computacional tridimensional de flujo dinámico (CFDs) desarrollado para el prototipo a partir de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

5.2 PROTOCOLO DE MEDICIÓN.

El protocolo de medición es un procedimiento estandarizado, elaborado para el registro continuo de información a lo largo de las diferentes pruebas experimentales. Los parámetros y variables registradas serán útiles para la comparación del consumo energético y desarrollo de la curva de operación del secadero. El formato elaborado consta de tres plantillas que

permite el registro de información de cada componente del secadero hibrido como son: colector solar, cámara de secado, y resistencias eléctricas.[10].

Los principales parámetros medidos en el sistema son:

- Temperatura del aire caliente
- Temperatura del aire ambiente.
- Temperatura en la pared del secador y en la placa negra.
- Velocidad de aire aportada por el sistema de ventilación
- Flujo del aire caliente o de secado que circula por el conjunto de bandejas.
- Flujo de alimentación aportado por el colector solar.
- Humedades en la entrada y salida de aire caliente
- Humedad del aire ambiente.
- Tiempo.
- Irradiación solar
- Consumo de energía

De estos parámetros la temperatura y la humedad son las variables más importantes a controlar durante el secado de biomasa e incluso cuando solo se trate de valorar el secadero en vacío; evaluando la capacidad de calentamiento y el rendimiento térmico de la cámara de secado. Por lo general, es necesario medir en diferentes puntos de la cámara de secado para obtener un registro de información lo más completo posible.

5.2.1 Instrumentación.

Los instrumentos de medición utilizados en los ensayos fueron previamente calibrados, por el Laboratorio de Caracterización Energética y Meteorológica (LACEM), entre los que figuran los sensores de temperatura y radiación global. A continuación se detallan los instrumentos y equipos utilizados para el registro de datos.

Sensores de Temperaturas.

Para el registro de temperaturas internas en la cámara de secado se han instalado termopares tipo K, conectadas a un sistema de adquisición de datos Data logger marca "Pico Technology", modelo TC-08, adaptado para ocho canales, con una precisión máxima de temperatura ± 0,2 %. Cada termopar calibrado tiene un error del ± 5%, con un tiempo de respuesta de 0,1 s y un rango de máxima y mínima temperatura detectada de 250 a -50 C. El sensor consta de un cable termopar de 3 m de longitud, terminando en un conector macho de termopar.

Las termocuplas o termopares

Son sensores de temperatura eléctricos conformados por dos alambres de distinto material unidos en un extremo, al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura.

[10] Ver *Apéndice E* – Protocolo de medición

Sensor de temperatura y humedad relativa del aire.

La humdad interna de la cámara y externa ambiental, se mide mediante un registrador de datos RH/ Temperatura y punto de rocío "Lascar EL-USB-2", con rango entre 0 a 100 % RH. Temperatura soporte -35 a 80 ºC. Precisión máxima de medición de temperatura ± 2 C, precisión máxima de medición de humedad ± 3 % HR.

Medidor de velocidad de aire.

La velocidad del aire se mide con un equipo digital "Testo 404-V1", Termo anemómetro de hilo caliente, que es un sensor de flujo de aire y temperatura. El instrumento puede ser utilizado en sitios donde el rango de temperatura se encuentra entre -20 a 70 C, con una precisión máxima de ±0.5 °C. Resolución 0.1 C. Rango de velocidad; 0 a 10 m/s, ± (0.1 m/s + 5% of mv) (0 to +2 m/s). Resolución 0.01 m/s.

Medidor de radiación global.

La Irradiación se mide con un pirómetro global, marca "Kipp Zone", modelo CMP-3, que ira conectado a un múltimetro digital (mV). El equipo calibrado cumple con un grado de fiabilidad del 95,5 %. Sensibilidad: 5 – 20 μV/W/m²

Los piranómetros son instrumentos que miden la irradiancia "global", con simetría hemisférica, la radiación recibida es absorbida por una superficie negra, que calienta un conjunto de termopares produciendo una tensión que es proporcional a la irradiancia. (Fernández, 2003)

El método de calibración realizado por el LACEM se da a través de la comparación con un piranómetro patrón tomado como referencia las recomendaciones y exigencias de la norma ISO 9847 "Solar energy- calibration of field pyranometer by comparison to a reference pyranometer".

Sistema de control y cuadro eléctrico

El control de temperatura en la cámara de secado se realiza por medio de un control automático basado en un termostato de doble canal (T2S+2C DIGIT) con sonda superficial autoadhesiva, apagando el conjunto de resistencias eléctricas al sobrepasar los 54 ^{0}C y activándose una vez que la temperatura baje los 49 ºC. Es decir, el termostato es un dispositivo que conectado a una fuente de calor que regula la temperatura de manera automática. Se pueden programar dos valores de disparo para crear una función de histéresis, si la temperatura alcanza uno de los valores predeterminados, subiendo por encima del valor de disparo superior TH (alta temperatura) o bajando hasta el valor de disparo inferior TL (baja temperatura).

El flujo de aire generando por los ventiladores axiales es regulado por dos potenciómetros.

En el cuadro de control eléctricos se encuentran las protecciones térmicas, marca Schneider electric, C60H-DC, de 16 A y 10 A y medidores de consumo de potencia ABBOD 1365, 230V /50 Hz

5.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

5.3.1 Punto de medición y frecuencia

El prototipo hibrido está formado por la cámara de secado en donde se encuentran los carros porta bandejas, a su vez cuenta con un colector solar de placa plana, el sistema de aporte energético y un ducto de salida del aire.

Durante los ensayos realizados se han instalados sensores para controlar y registrar los principales parámetros y variables anteriormente mencionados, que se pueden observar en la Lámina 6.1 y son los siguientes:

- Temperaturas del aire caliente de la cámara: Los termopares se encuentran ubicados en 11 puntos localizados de arriba a abajo; (2) a 10 cm del techo, (2) en el centro de la cámara a 50 cm, (2) a 5 cm del piso, (1) en la pared de policarbonato o en la placa negra a 50 cm del centro, (1) en la entrada del aire caliente proveniente del colector a 7.5 cm del ducto,(2) en la entrada de aire caliente del conjunto de resistencias y (1) en el ducto de salida del aire saturado hacia el exterior.

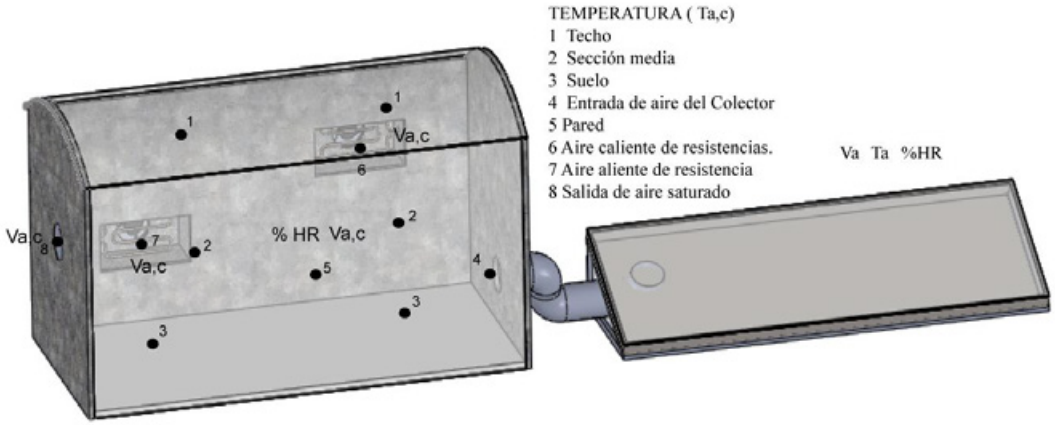
- Humedad del fluido: Los registradores de datos USB son instalados en la sección media de la cámara. La muestra de los datos es registrada automáticamente cada 5 min.

- Velocidad del aire: El Termo anemómetro es ubicado en diferentes posiciones como son la sección media de la cámara, el conducto de salida de aire al exterior, las entradas de flujo de aire caliente proveniente del sistema de resistencias eléctricas y del colector.

Registro de Variables Externas.

- Durante las pruebas controladas, la temperatura y humedad ambiental son registrados por un medidor USB instalado a una distancia de 2 metros de la cámara.
- Durante las pruebas en condiciones ambientales, las variables de temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento y horas de sol; se obtuvieron de la base de datos de la estación meteorológica Santiago Eoas perteneciente a Meteogalicia.

En la lámina 5.1 se muestra la ubicación de los sensores de temperatura (ºC) en el interior de la cámara de secado, colector solar y sistemas auxiliares, así como la velocidad del aire caliente Va,c (m/s), humedad % HR , y los parámetros registrado en condiciones ambientales.



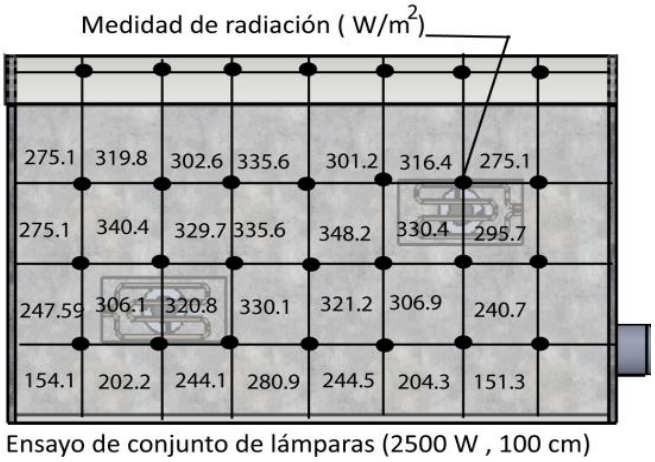
Lám. 5. 1. Esquema de ubicación de los sensores de medición

En los ensayos de laboratorio, se ha tratado de optimizar la ubicación espacial de las lámparas con el fin de lograr una distribución homogénea de la irradiación incidente sobre la pared de la cámara y el colector, utilizando lámparas de iguales características técnicas. Debido a esto se logra que la temperatura del aire caliente sea casi uniforme en el interior de la cámara.

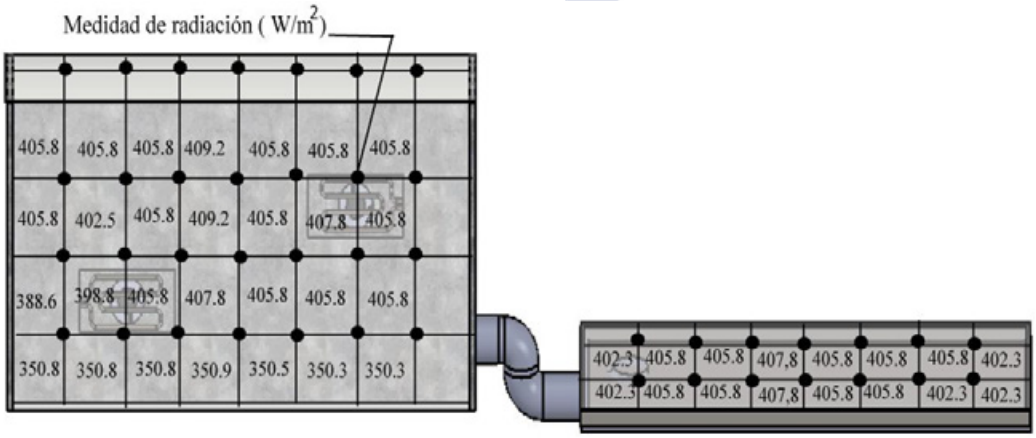
Con referencia a lo explicado anteriormente se muestran los resultados obtenidos en dos ensayos en condiciones controladas.

Primero, en la lámina 5.2, se muestra un ensayo de convección natural, utilizando 5 lámparas de 500 W localizadas a un metro de distancia de la cámara, para la distribución parcial de la luz se ha realizado una malla cuadrada (25 x 25 cm, cada sección), evitando de esta manera la concentración de la radiación en una sola área. En este caso no todos los nodos de las esquinas así como de la parte inferior de la malla presentan el mismo valor de irradiación con respecto a los valores centrales (diferencia entre 50 a 65 W/m^2), debido a las condiciones creadas para esta prueba se asemejan a las horas próximas al ocaso. La radiación promedio que incide en la pared es de 286,9 W/m^2.

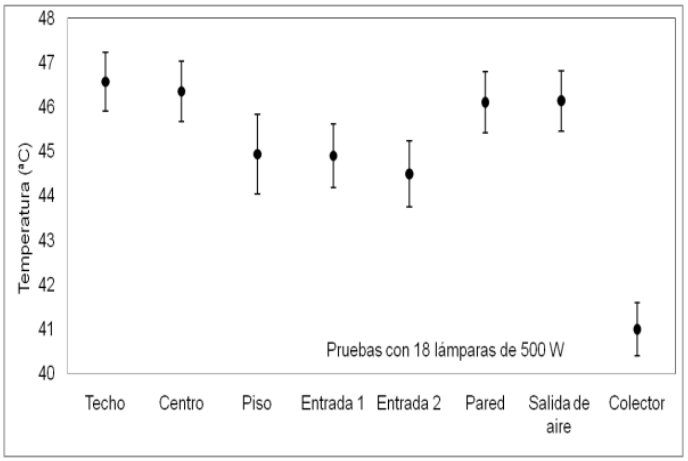
Segundo, en la lámina 5.3,muestra el ensayo del secadero solar mixto (calentamiento del aire en el colector y radiación solar directa a la cámara), utilizando 18 lámparas de 500 W en total, alcanza una irradiación de 405 W/m^2 sobre las paredes del secadero y colector. Registrándose una temperatura ambiente de laboratorio de 26 ºC, la temperatura promedio de la cámara es de 45,5 ºC y del aire caliente de salida del colector de 41 ºC, aportando al secadero 15º C más con respecto a la temperatura ambiental. La diferencia de temperatura interna en la cámara entre los puntos registrados oscila entre 1.2 a 0.2 ºC.



Lám. 5. 2. Ensayo realizado para condiciones controladas utilizando 2500 W de potencia de lámparas a 100 cm de distancia a la cámara.



Lám. 5. 3.Ensayo realizado para una radiación solar de 405 W/m^2, que incide sobre la pared y techo de la cámara y colector solar.



Lám. 5. **4.**Ensayo realizado para una radiación solar de 405 W/m^2: Temperatura interna registrada en distintos puntos de muestreo.

5.3.2 Metodología.

El estudio empieza evaluando el prototipo experimental sin carga, con la finalidad de analizar la estabilidad y respuesta de calentamiento en diferentes condiciones de operación. En concreto, se han realizado ensayos estudiando la influencia de los diferentes parámetros que afectan el proceso de secado, además de permitir mejorar el diseño. En todas las pruebas se ha evaluado los siguientes parámetros internos: temperatura de calentamiento del aire (ºC), contenido de humedad (%), velocidad del fluido caliente (m/s), tiempo de calentamiento de la cámara (min), temperatura de la pared (ºC).

A la par se registraron las variables externas: temperatura (ºC), humedad relativa y velocidad (m/s) del aire ambiente (%) , radiación global en la superficie de la placa (W/m^2).

Las pruebas experimentales se realizaron en dos etapas de trabajo: primero, en condiciones controladas en un laboratorio; segundo, en condiciones ambientales para ello las variables climáticas se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana al lugar.

El procedimiento utilizado en cada una de las etapas de experimentación se describe a continuación:

Condiciones controladas en el laboratorio

- Primer ensayo: Tiene como objetivo evaluar la respuesta térmica de la cámara de secado en función la irradiación creando un efecto invernadero. Por convección natural, el aire se desplaza por la variación de su densidad, provocada por la diferencia de temperaturas en las distintas partes de la cámara. Para dicho ensayo se han utilizado lámparas halógenas de 500 W, realizando configuraciones de 2500 W, 2000 W, 1500 W, 1000 W y 500 W, a distancias de 1 metro, 75 cm y 50 cm Se procede a medir la irradiación que llega a la superficie de las placas transparentes, para ello se plantea necesario realizar una malla cuadrada de 25 cm de distancia por cada punto. Tal como se ha indicado anteriormente, fue conveniente adecuar las luminarias para obtener una irradiación homogénea en toda la placa. Durante el ensayo las variables son registradas cada 10 min durante 5 horas de operación de la cámara y después de haber apagado las luminarias (etapa de enfriamiento).

- Segundo ensayo: Consiste en determinar el tiempo de estabilización y uniformidad de la temperatura del sistema. Pasando un flujo de aire (convección forzada) mediante la utilización de un sistema de ventilación, a la vez que se experimenta con la irradiación generada por el arreglo y espaciamiento de las lámparas que fue seleccionada por medio de la primera prueba. Es decir que la irradiación que llega a la superficie de las placas transparentes era de 500 W/m^2, 400 W/m^2 ,300 W/m^2 y 200 W/m^2. En este caso también se busca mantener una homogeneidad en la pared y techo El procedimiento se repite adaptando una placa metálica [11]negra dentro de la cámara del secador.

[11] Durante el estudio se denominara a la placa metálica de color negra como placa captadora o adsorbente solar.

- Tercer ensayo: Comprende la evaluación de la aportación y el consumo energético de las resistencias eléctricas al proceso de secado. Para ello, se analiza el tiempo de estabilidad de la cámara, temperatura de calentamiento e influencia de la velocidad del aire al sistema, siendo posible variar el flujo de aire mediante un regulador de velocidad. De la premisa anterior, se realiza la calibración del flujo de aire en distintas velocidades; alta >3 m/s, media entre 1.5 a 2 m/s y baja > 1.5 m/s.

- Cuarto ensayo: Consiste en evaluar la operación en conjunto de los ventiladores y las resistencias eléctricas (sistema auxiliar), generando un flujo de aire caliente hacia el interior de la cámara, en adición a la irradiación incidente a la pared de 500 W/m^2, 400 W/m^2, 300 W/m^2 y 200 W/m^2 respectivamente, producida por medio de las lámparas. Con este ensayo se pretende analizar la estabilidad del sistema e incremento de temperatura, consumo, suministro de energía eléctrica durante un tiempo de 8 horas de operación, registrado los datos cada diez minutos. El procedimiento se repite adaptando una placa colectora dentro de la cámara.

- Quinto ensayo: Se evalúa el aporte del colector al sistema de secado. Para ello, es necesario realizar pruebas experimentales en condiciones ambientales estudiando el funcionamiento y respuesta del colector a diferentes condiciones climáticas. Los parámetros a medir en este ensayo son: temperatura de salida del aire caliente, flujo de aire, temperatura ambiente e irradiación que llega sobre la superficie del colector: Se registran datos cada 10 min durante 4 horas en días despejados y parcialmente nublado. Seguidamente se realizaron pruebas en condiciones controladas de laboratorio evaluando los parámetros ya descriptos. Finalmente, se procede a regular el sistema de aire del colector solar a las condiciones requeridas para el secado

- Sexto ensayo: Se procede a poner en funcionamiento el secador y demás equipos auxiliares (modo hibrido), utilizando la misma metodología de evaluación. Se repite el procedimiento adaptando planchas negras en la cámara. Este ensayo nos permitirá obtener como resultado la curva de funcionamiento del secador, ganancia y eficiencia del mismo.

Cabe indicar que las pruebas son realizadas por triplicado para identificar la posible presencia de errores sistemáticas en el proceso de medición.

Condiciones ambientales

El prototipo experimental es ubicado en un terreno plano de espacio abierto donde no existan obstáculos que puedan generar sombras. El objetivo de las pruebas es evaluar el potencial, capacidad, eficiencia térmica de la cámara y su respuesta a las condiciones ambientales. La parte experimental se dividen en dos etapas y son realizadas durante 7 meses del año, con el fin de recolectar información en diferentes condiciones climáticas en días de cielo despejados, cielo cubierto, intervalos nubosos, además de lluvias, ráfagas de vientos, bajas y altas temperaturas ambientales.

- ***Primera prueba***: Se analiza el funcionamiento del secador en modo activo (convección forzada) y en modo pasivo (convección natural). Se registran las variables principales como: temperatura dentro de la cámara, temperatura de salida del colector y temperatura ambiental. Así como la humedad en el sistema e irradiación global que llega a las placas trasparentes durante un tiempo de operación de 8 horas. La radiación global incidente se obtiene a través del portal electrónico de Meteogalicia12 a nivel local. El mismo procedimiento se realiza adaptando una placa captadora.

- ***Segunda Prueba:*** Se procede a evaluar el funcionamiento del prototipo hibrido, a través de registro de temperatura y humedad dentro y fuera de la cámara, así como la irradiación global, velocidad de viento y otros factores externos que influyen indirectamente sobre el prototipo. Asimismo el conjunto de resistencia eléctrica (aporte energético suplementario) y ventiladores son alimentado por un generador fotovoltaico. En el sistema fotovoltaico se registran todos los parámetros relevantes, en particular: consumo eléctrico, voltaje y corriente Posteriormente se adapta una placa negra y se procede nuevamente con las mediciones.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.4.1 Evaluación del secadero solar en condiciones controladas.

Las variables que influyen en el proceso de secado se hacen difíciles de controlar en un medio con clima variado, por lo que es necesario realizar los ensayos en un laboratorio en condiciones muy controladas. Con el fin de analizar la influencia de cada una de las variables por separado, que pudiera conllevar a cambios significativos en el diseño. A partir de la información obtenida por cada ensayo se establecen parámetros que permitirán conocer la respuesta térmica de la cámara y su capacidad de secado. Realizando las pruebas por triplicado se puede detectar errores de calibración de los instrumentos, cambio de sensores, lámparas quemadas o baja potencia, puerta de la cámara abierta, entre otras condiciones que pudiera afectar el experimento.

En todo caso, lo más importante será evaluar la cámara de secado en varias etapas:

- Tiempo de estabilización de la temperatura
- Funcionamiento de la cámara de secado por convección natural a irradiaciones bajas y medias.
- Funcionamiento de la cámara de secado con flujo forzado (convección forzada por sistemas de ventilación) y variación de la radiación directa.

5.4.1.1 Secador con circulación natural e irradiación directa.

Para estudiar el efecto que tendrá la radiación solar que incide en la cámara de secado, se realizaron medidas de temperaturas para distintas irradiaciones. Para ello, se varió la potencia de las lámparas y la ubicaciones en tres posiciones 1 m, 0.75m y 0.5 m (distancia

[12] http://www.meteogalicia.es/web/index.action

correspondiente desde la pared a las luminarias). Durante intervalos de 4 horas y con registro de medidas cada 10 minutos.

En la tabla 5.1 se muestra la irradiación promedia medida en la superficie de la pared, es decir, en la tabla se muestra las irradiaciones equivalentes medidas entre la irradiación del foco y la distancia siendo la "radiación útil". La máxima irradiación es de 499.48 W/m^2 para una distancia de 0.5m a 2500 W de potencia. Utilizando la mínima potencia de lámparas obtendremos irradiaciones menores de 100 W/m^2 que representaría a un cielo completamente nublado.

Tabla 5. 1 **Pruebas controladas: Irradiación (W/m2) equivalentes medidas en la superficie de la pared.**

Potencia de Lámparas/ Ubicación	2500 W	2000 W	1500 W	1000 W	500 W
1.0 m	286,98	271.76	208.56	144.01	80.88
0.75 m	327.52	354.19	267.88	177.01	84.20
0.50 m	499.48	435.72	272.22	232.41	----

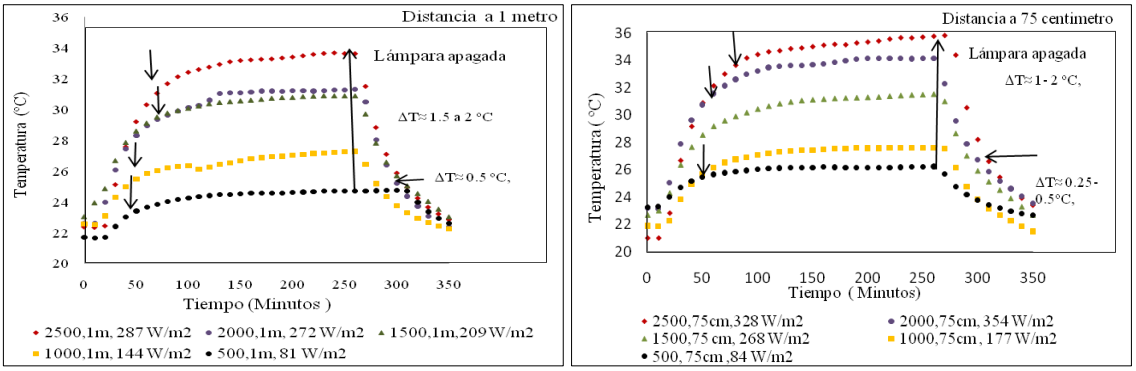
Sobre las base de las consideraciones anteriores es necesario indicar que durante todo el análisis, cuando hablamos de irradiaciones, se trata de "irradiaciones útil".

Las láminas 5.5 y 5.6 muestran la evolución temporal de la temperatura interna y el tiempo de estabilidad térmica de la cámara obtenida de los múltiples ensayos realizados, para un medio en circulación natural (efecto invernadero). Se observa que las máximas temperaturas oscilan en torno de los 36 y 38 ºC, que corresponde a la curva de 500 W. Para valores por debajo de la curva de 100W, el calentamiento de la temperatura del aire es mínimo, comparado con la temperatura ambiente de 20 ºC.

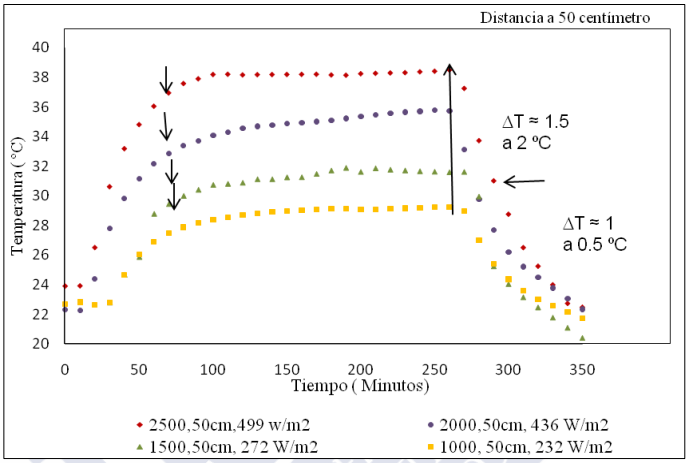
Por otra parte, durante periodo enfriamiento de la cámara se puede estimar perdidas menores por convección y conducción de 0.74 $W/m^2.°K$ [13] , equivalente en energía a 23.7 W cuando la temperatura es superior a los 32 ºC. Además se puede apreciar un descenso en la temperatura interior de la cámara de 1 a 2 ºC cada 10 minutos en la primera hora. Posteriormente se observan un lento decrecimiento de la temperatura interior en un valor medio de 0,25 °C cada 10 minutos hasta llegar a decrecer lentamente la curva de pérdida de temperatura en 0.25 ºC.

Con estas pruebas se comprobó la buena resistencia térmica de los materiales utilizados en la estructura de la cámara de secado (paredes, techo, piso, aislamientos), espesor de paredes metálicas, policarbonatos y plástico glass[14].

[13] Referencia, ecuación de la sección 4.2.1.1
[14] Plástico glass; es un panel plástico reforzado con vidrio

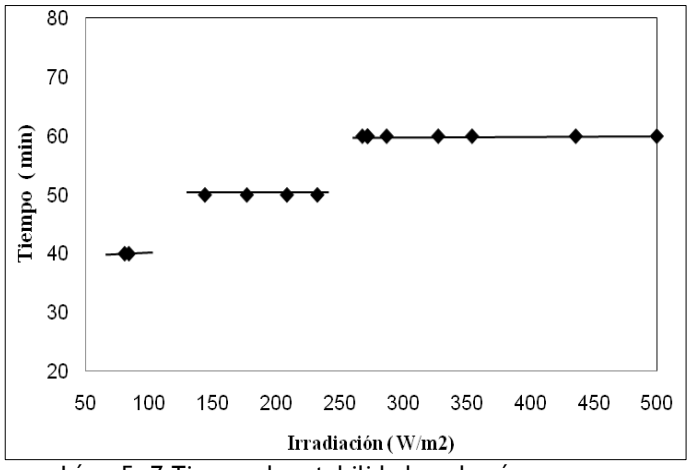


Lám. 5. 5.Temperatura promedia alcanzada en la cámara de secado (convección natural) para radiaciones de 80 W/m2 a 3.28 W/m2.



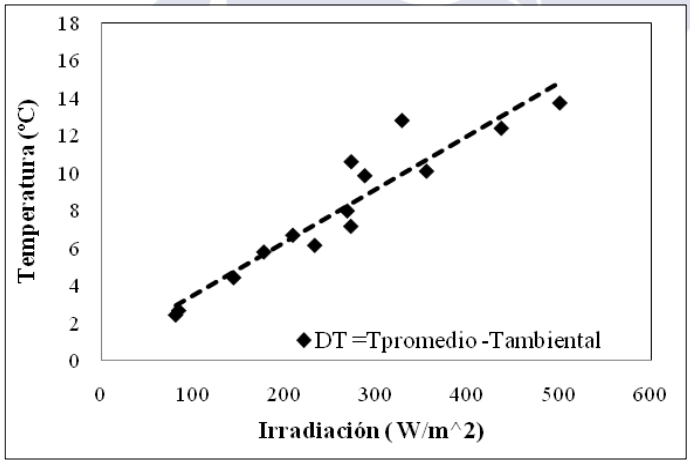
Lám. 5. 6.Temperatura promedia alcanzada en la cámara de secado (convección natural) para radiaciones de232 W/m^2 a 499.48 W/m^2

Un parámetro importante es el tiempo de estabilización, definido como el tiempo necesario para que la cámara muestre una temperatura constante en su interior, y que tiene que ver con el punto de equilibrio asociado a la transferencia de energía en forma de calor mediante convección, radiación y conducción cuando la cámara se somete a irradiación. La lámina 5.7 muestra el comportamiento del tiempo de estabilización. Para irradiaciones menores de 150 W/m^2, muestra valores de 40 minutos, con una ganancia entre 2 a 4º C de temperatura interna con respecto a la temperatura ambiental, y una ganancia energética de 21.48 Wh. Para irradiaciones entre 250 W/m^2 y 499 W/m^2, la cámara tardará 20 minutos más en calentar el volumen de aire, al estar en circulación natural el aire se desplaza por la variación de su densidad, provocada por las diferentes temperaturas en las distintas partes de la cámara. El calor ganado será de 70.38 Wh.



Lám. 5. 7.Tiempo de estabilidad en la cámara.

En la lámina 5.8, se muestra la curva de incremento de diferencias de temperaturas obtenida en los ensayos realizados en condiciones controladas a una temperatura ambiental de 20 ºC. Dentro de la cámara se logra un incremento entre 8 ºC a 12 ºC con irradiaciones entre 200 W/m^2 y 400 W/m^2 (condiciones de un cielo nublado). Por otra parte producto a la tendencia lineal que presentan los datos se estimara un incremento de temperatura superior a 18 º C con respecto a la temperatura ambiental con irradiaciones superiores a los 500 W/m^2.



Lám. 5. 8.Influencia la radiación solar incidente sobre la cámara relacionada al incremento de temperatura interna.

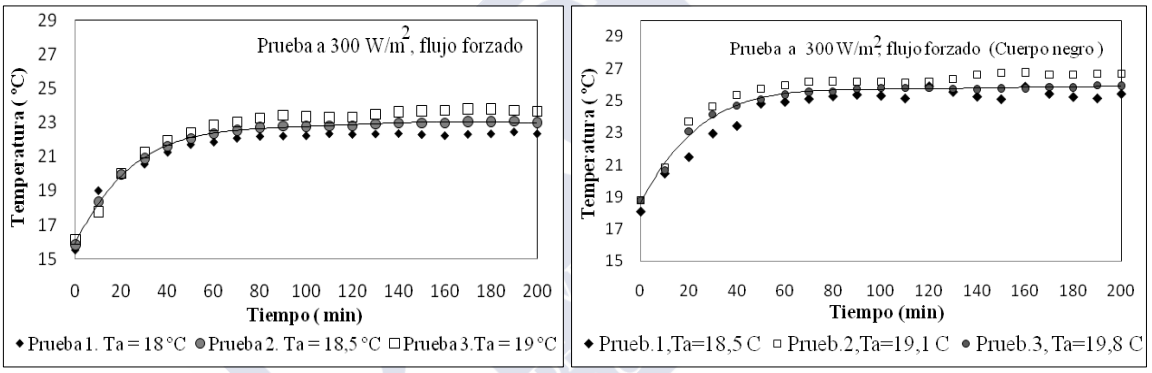
5.4.1.2 Secador con circulación forzada e irradiación directa.

El secadero ha sido diseñado para trabajar principalmente en modo hibrido (cámara de secado, colector solar y sistema auxiliar alimentado por una fuente de energía eléctrica). Sin embargo, se hace necesario evaluar el sistema en modo indirecto, haciendo circular un flujo de aire continuo (velocidad ≤ 1 m/s) sin calentamiento previo (renovación de aire) y radiación directa sobre las placas transparentes de la cámara. Determinando la ganancia de temperatura y velocidad del aire que pasara por el conjunto de bandejas. Este ensayo es necesario producto a las características del material a secar, siendo un producto con alto grado de humedad, factible a quemarse si la radiación incide directamente sobre el producto o se alcanza temperaturas elevadas en el interior de la cámara. Adicionalmente se

ha incorporado placas metálicas pintadas de negro para aumentar la absorción de calor, permitiendo transferir el calor por convección y conducción al fluido caloportador (aire) aumentando su temperatura. Las placas son colocadas en el piso y parte lateral de la pared transparente.

Para comprobar los resultados obtenidos en los ensayos realizados para las 4 distintas radiaciones (200 W/m^2, 300 W/m^2, 400 W/m^2 y 500 W/m^2) se han efectuado mediciones por triplicado. En lo que sigue, se consideran dos modelos: modelo (a) estándar y modelo (b) con placas captadoras añadidas.

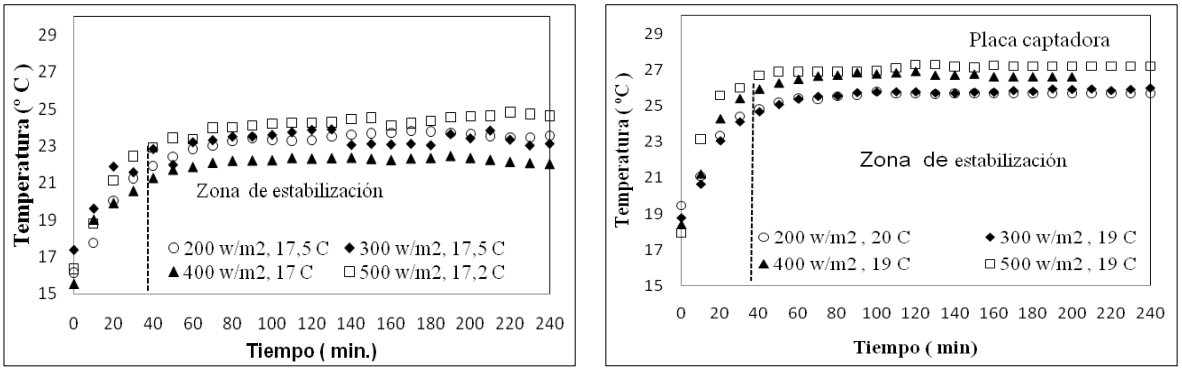
Para ello, se muestra en la lámina 5.9, dos ejemplos de ensayos realizados para irradiación de 300 W/m^2, en convección forzada en vació y temperatura ambiente de laboratorio entorno de los 18ºC. Se observa que las curvas tanto para el grafico a y b presentan la misma tendencia, con un coeficiente de correlación aproximado del 0,99, si bien, tomo era de esperar, la temperatura interna es mayor en el ensayo con placas captadoras. (Se entiende por coeficiente de correlación como el grado de intensidad de la posible relación de un ajuste lineal, logarítmico o exponencial con las variables, siendo $0 \leq R^2 \leq 1$).



a) b)

Lám. 5. 9.Curva de tendencia de la temperatura interna de la cámara. a) Sin Placas Negras b) Con Placas Negras

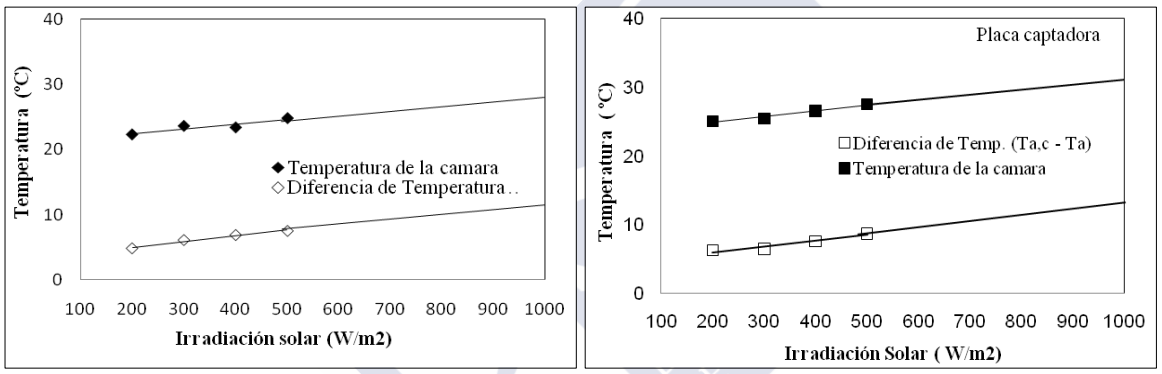
En la lámina 5.10, se muestra la influencia de la irradiación en la temperatura interna de la cámara de secado, durante un periodo de 4 horas de operación con y sin placa captadora. Se consigue para los dos modelos, que la temperatura del flujo de aire que ingresa se estabilice en un lapso de 40 min. El modelo (a) muestra un incremento de temperatura alrededor del 5 a 7 ºC, con respecto a la temperatura ambiental (17 ºC), En referencia al modelo (b), el incremento de temperatura se encuentra en torno de los 5.6 a 8.3 ºC, con respecto a la ambiental (19 a 20 ºC). En este caso la comparación entre los modelo arroja mejores resultados cuando se utiliza placas negras a bajas irradiaciones, consiguiendo en la cámara un incremento de temperatura de 2.2 ºC a mayores con respecto a los ensayo realizado sin placas captadoras.



a) b)

Lám. 5. 10.Variación de temperatura en la cámara para diferentes irradiaciones (W/m2). a) sin placa metálicas, b) adaptación de placas negras

En la lámina 5.11, se observa las curvas temperatura interna y su diferencia con la temperatura ambiente. En el ensayo realizado con circulación natural, las temperaturas obtenidas en convección forzada son inferiores, siendo este efecto producto de la renovación del aire.

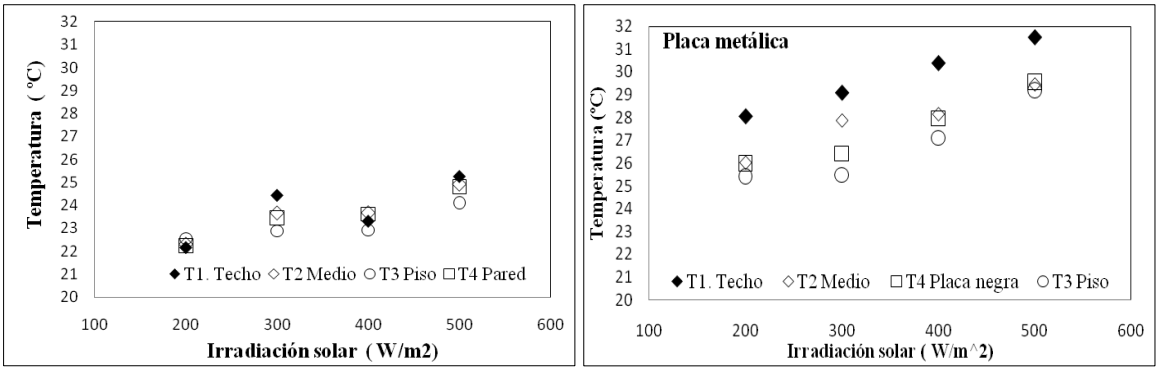


a) b)

Lám. 5. 11.Temperatura promedia e incremento de temperatura de dos modelo estudiados con flujo de aire. a) Cámara de secado sin placas negras. b) Adaptación de placas negras,

En el proceso de secado no solo es conveniente controlar la temperatura y velocidad del aire, si no, mantener una uniformidad del flujo caliente que pasa sobre el producto, en lo que sigue se muestra algunos comportamientos característicos.

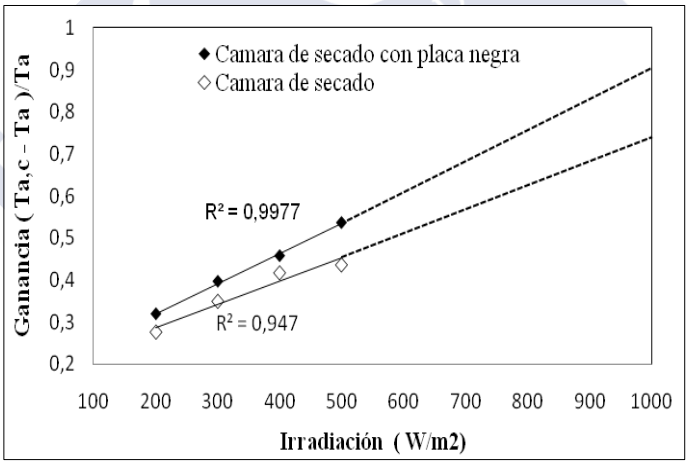
Así, la lámina 5.12 muestra los valores de la temperatura promedio en varios puntos de la cámara (techo, centro, piso, pared) a diferentes irradiaciones. En el modelo (a) (sin placa captadora) la diferencia de temperatura entre los puntos medidos oscila en un valor medio de 1°C, mientras en el modelo (b) dicha diferencia sobrepasa los 2°C. A partir de este análisis podemos deducir que el modelo (a) tiene una mejor uniformidad con respecto al modelo (b).



a) b)

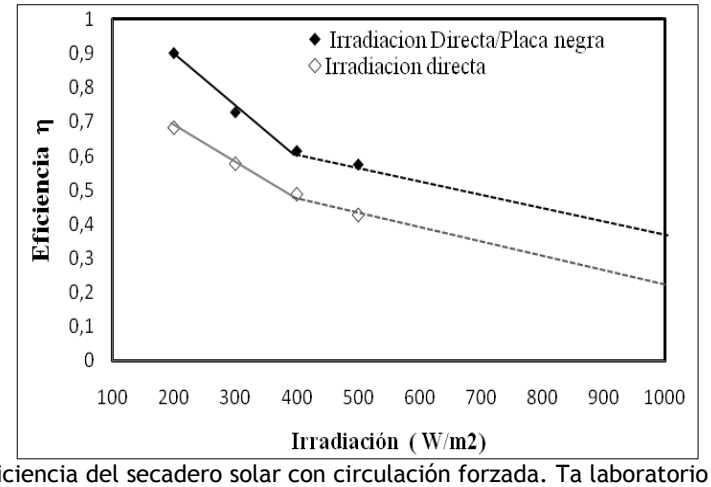
Lám. 5. 12.Uniformidad de temperatura en la cámara de secado, sensores ubicados en 4 secciones (8 puntos de medición).

El funcionamiento del sistema aplicando un flujo forzado y radiación directa, se determina a través de la ganancia y eficiencia, en especial esta última, siendo un parámetro fundamental en el estudio del diseño del secadero. En la lámina 5.13, se presenta, las curvas de comparación de ganancia entre los dos modelos estudiados junto con la variación de la irradiación (W/m^2). Se puede apreciar entre los modelos una diferencia aproximada de 0.04 para irradiaciones menores a 400 W/m^2, a medida que la radiación aumenta la diferencia sería menor. A partir de lo expuesto, se ha estimado que para un día con irradiación de 1000 W/m^2, la ganancia del modelo a y b, será aproximadamente de 0.69 y a 0.72 respectivamente.



Lám. 5. 13.Ganancia promedia del sistema con circulación forzada con respecto a la irradiación.

La evaluación de la eficiencia de la cámara de secado en ambos modelo se determina a través de la ecuación 4.66, que, como se vio, depende de la temperatura ambiental, flujo másico de aire, temperatura interna y radiación solar incidente sobre la cámara. En la lámina 5.14, se muestran los valores calculados de eficiencia del secadero. El rendimiento oscila aproximadamente entre 48 % y 70 % para la cámara en vacio sin placas negras, y entre 52 % y 90 % adaptando placas negras dentro de la cámara. La presencia de las placas negras permite mejorar la eficiencia del secador a un 20 % más, a bajas radiaciones (menores a 500 W/m^2). De igual forma a altas radiaciones la eficiencia varía un 12 % entre ambos modelos.



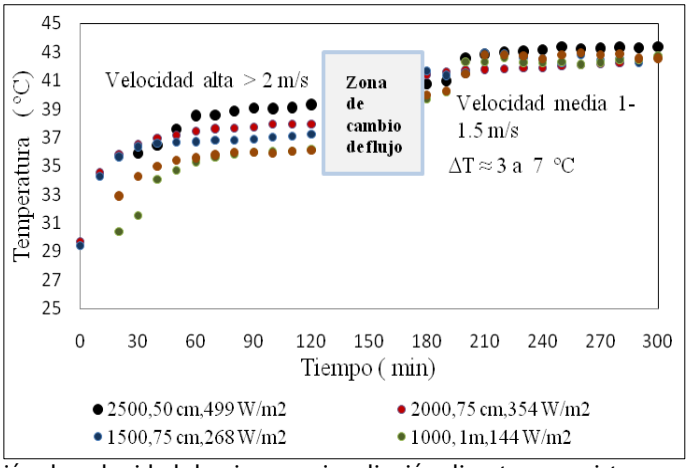
Lám. 5. 14. Eficiencia del secadero solar con circulación forzada. Ta laboratorio 17-20 ºC.

5.4.2 Evaluación del secador híbrido en condiciones controladas

El secadero hibrido está formado por varios componentes como son: cámara de secado, un colector solar de placa plana y fuentes de calor (resistencias eléctricas) que servirán como sistema auxiliar en caso de que la cámara no alcance la temperatura deseada en el proceso de secado. Antes de poner en funcionamiento el sistema completo, se ha analizado previamente cada uno de sus componentes en especial el colector solar y el sistema de resistencias que alimentaran a la cámara con aire caliente. Según se ha visto, el flujo de aire adecuado para mantener la temperatura de operación del secadero es un aspecto crítico para la optimización del sistema.

El flujo de aire de entrada es generado por ventiladores axiales de tipo helicoidal de 36 W de potencia, 2950 rpm y caudal de 180 CFM. El equipo es controlado con reguladores de velocidad, de manera, que el flujo de aire se pueda analizar para diferentes valores. Seleccionando la velocidad de aire que mejor se adapta al diseño

La lámina 5.15 se muestra los resultados más representativos de los ensayos realizados en la cámara en vacio a distintas irradiaciones controladas con flujo variante. Como se observa en las curvas a velocidades mayores de 2 m/s se logra una temperatura interna menor en comparación a la temperatura lograda con velocidades entre 1 a 1.5 m/s. La variación de flujo se refleja con una diferencia de temperatura que oscila entre 3 a 7 ºC Al mismo tiempo se aprecia que a bajas velocidades se obtiene una mejor estabilización de la temperatura interna de la cámara.



Lám. 5. 15. Comparación de velocidad de aire con irradiación directa para sistema con flujo forzado.

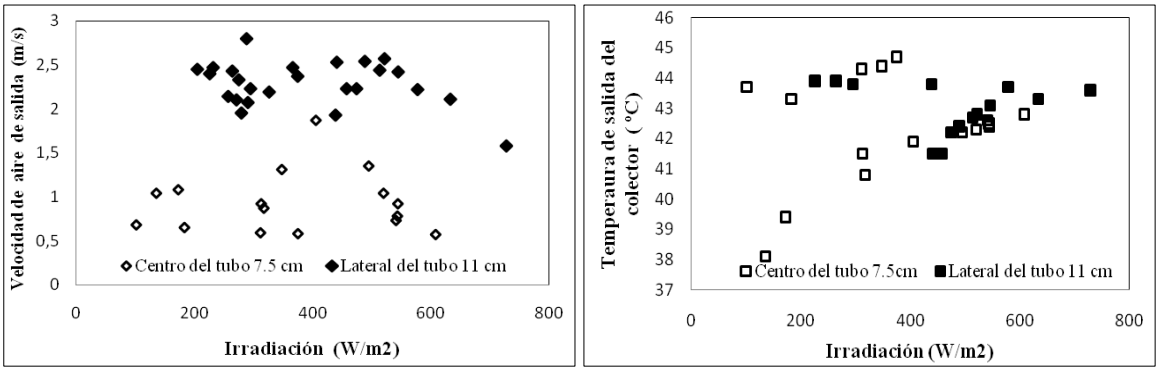
Dado que, la respuesta de un colector solar es el componente más estudiado en las investigaciones de secadores solares, en el presente trabajo no se ha profundizado en su comportamiento, si bien como se mostrará seguidamente, se han realizado los ensayos experimentales necesarios para asegurar un adecuado conocimiento del sistema. En particular, la relación entre la radiación incidente sobre el captador solar, temperatura ambiente y la velocidad de flujo de aire producido por un extractor de aire, adaptado al equipo.

El colector solar seleccionado para el secadero, tiene adaptado un pequeño panel fotovoltaico (ubicado internamente en la cámara del captador) conectado al extractor. La velocidad angular del extractor (RPM) se encuentra en función de la corriente producida por el panel fotovoltaico y esta a su vez de la irradiación incidente sobre este. Siendo así, que a menor irradiación solar el extractor no funciona y a mayor irradiación solar la velocidad de aire es muy alta. Por tanto, se ha adaptado el sistema a una velocidad constante con sensor de temperatura para controlar el aire caliente o frio que ingresa a la cámara, apagando el extractor cuando la temperatura se encuentra abajo de los 35 ºC o sobre los 55 ºC.

Para regular el flujo de aire del extractor, se han realizado varias pruebas en condiciones ambientales midiendo parámetros de temperatura y velocidad del aire caliente en el centro y lateral del tubo de conexión del equipo. Permitiéndonos evaluar el mejor caudal posible del captador para aprovechar en mayor rango la radiación solar que incide sobre ella, e incrementar en lo posible la temperatura del aire de salida.

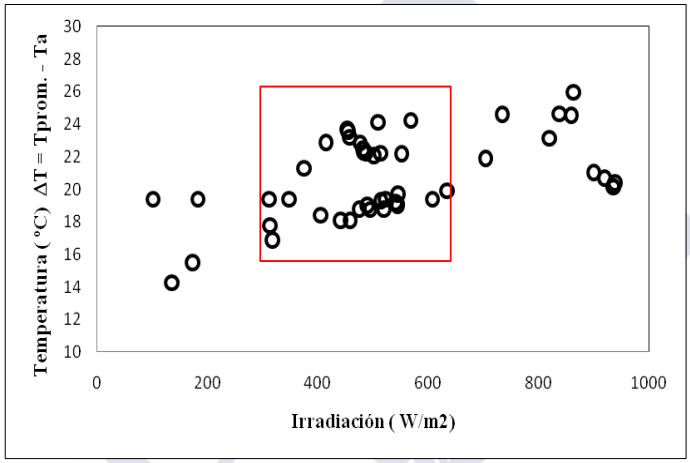
La lámina 5.16 , muestra la influencia de la radiación solar en la velocidad del aire y en la temperatura de salida del colector solar, para un día con un intervalo nublado y temperatura ambiente de 17 a 23 ºC. A irradiaciones menores de 200 W/m2, se observa que la velocidad de aire es menor 1 m/s, mientras que a mayores radiaciones se obtiene velocidades superior a 2 m/s, lo cual sería una velocidad excesiva para nuestro secadero. Un aumento del flujo másico en el sistema disminuiría la eficiencia del secador. Por otro lado, en el centro del tubo se han registrado velocidades menores de 1.5 m/s para rangos de irradiación entre 300 a 600 W/m^2, con una temperatura de salida de aire de 42.5 ºC, consiguiendo un incremento promedio de temperatura aproximado de 20 ºC respecto a la temperatura ambiente (ver recuadro de la Lám. 5.17). En los ensayos realizados en días con intervalos nubosos, no se logro determinar con precisión el incremento de temperatura a

irradiaciones muy bajas, por lo que se hace necesario realizar este estudio bajo condiciones controladas.



a. b.

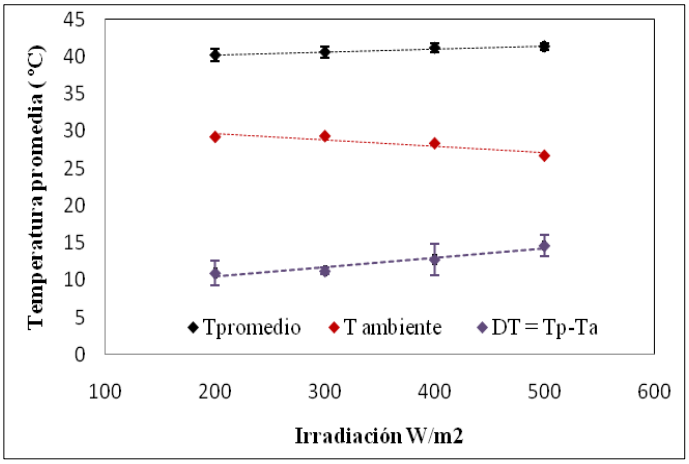
Lám. 5. 16. a) Velocidad de aire en la salida del colector solar b) Temperatura de salida del colector solar, en condiciones ambientales para días con intervalos nublados. Temperatura ambiente 17 a 23 °C.



Lám. 5. 17. Incremento de temperatura del colector solar, en condiciones ambientales para días con intervalos nublados. En el recuadro el rango de funcionamiento en laboratorio.

De los resultados obtenidos en los ensayos en condiciones ambientales se ha seleccionado la velocidad de aire que mejor se adapta al sistema, siendo de 1.5 m/s. A partir de este valor, se realizan nuevamente varios ensayos en condiciones controladas, variando la irradiación que incide sobre el colector y manteniendo el flujo de aire constante.

En la lámina 5.18, se presenta la influencia de la radiación solar en la temperatura de salida del captador con una temperatura de entrada de aire (Temperatura del laboratorio) de 28 ºC a 30 ºC. El incremento de temperatura esta en torno de los 7 a 10 ºC con irradiaciones menores de 200 W/m^2, este incremento puede alcanzar una media de 16 ºC con irradiaciones entre 300 a 500 W/m^2.

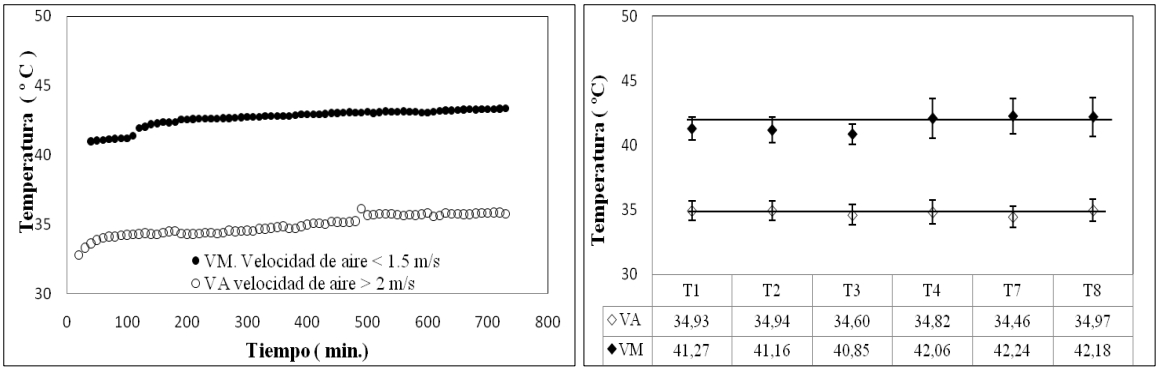


Lám. 5. 18. Pruebas controladas del colector solar a diferentes radiaciones y velocidades constantes de 1.5 m/s.

Comparando los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el colector, se aprecia una diferencia de temperatura aproximadamente de 5 ºC, entre los valores en condiciones ambientales y los valores en condiciones controladas para una misma irradiación. La diferencia observada no resulta significativa pudiendo estar relacionada con la rápida variación de irradiación en exterior particularmente en días nublados.

Para completar el estudio del flujo de aire adecuado y óptimo para el proceso de secado, se analiza el comportamiento de la fuente de calor térmica proveniente de dos resistencias eléctricas (800 W cada una) haciendo pasar un flujo de aire entre ellas para ser calentado. El fluido caliente es controlado por reguladores y termostatos. Es necesario controlar el paso del flujo de aire por motivo que a velocidad muy alta (VA) el fluido tendrá menos tiempo para calentarse al pasar por el componente térmico y a velocidades muy bajas solo se calentara una sección de la cámara. Por tanto, se calibra el sistema a una velocidad adecuada que permita llegar a la temperatura de diseño, además de obtener una mejora en la distribución de temperatura interna de la cámara de secado Para valorar las condiciones de la cámara se ha empleado termopares que localizados en los lugares predefinidos.

Como se puede observar en la lámina 5.19 a, se han realizado ensayos a velocidades mayores de 2 m/s (VA) y menores a 1.5 m/s (VM), lo que nos muestra un incremento de temperatura de 7,75 ºC a VM con respecto VA. Se observa una buena distribución de temperatura para ambos casos. En la lámina 5.19 b, se observa que la desviación estándar de la temperatura del aire caliente en distintos puntos de muestreo en el interior de la cámara no sobrepasa los 0.20°C. Por lo tanto, podemos afirmar que utilizando fuentes de calor (resistencia) como equipos de apoyo nos ayudara a mantener una temperatura estable en el sistema.

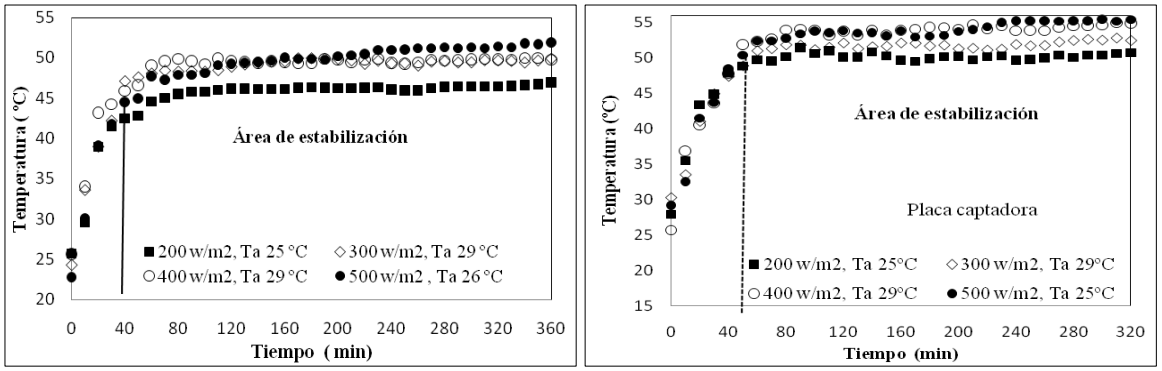


a) b)

Lám. 5. 19. Comparación de velocidad de aire adaptando fuentes de calor (resistencias). a) velocidad de aire, b) distribución de la temperatura interna de la cámara.

Evaluados los diferentes rangos de velocidad en cada componente del secador hibrido, se ha seleccionado la velocidad más adecuada para el correcto funcionamiento del secadero, siendo de 1.5 m/s la velocidad de salida de aire del colector solar con pérdidas del 5% por tubería, y 1,4 m/s la velocidad de aire para los ventiladores.

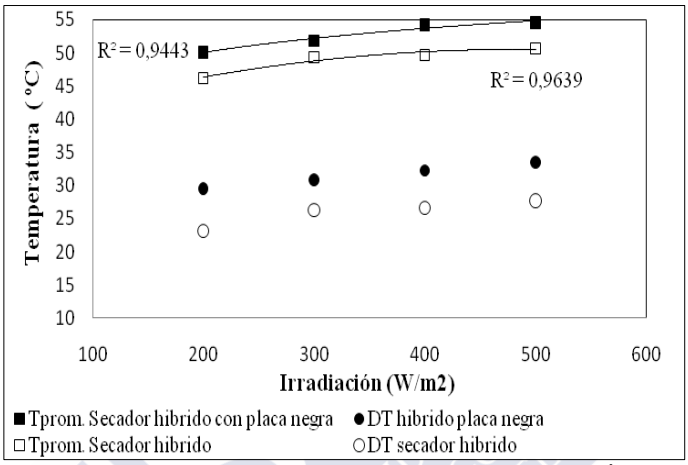
Así, en la lámina 5.20 se muestran los valores obtenidos de la temperatura promedio alcanzada en la cámara para los dos modelos estudiados. Estabilizándose para ambos casos a los 40 min de operación del equipo (máxima temperatura). Como se aprecia en el modelo a., la máxima temperatura alcanzada en la cámara fue de 50 ^{0}C a 500 W/m^2, y un consumo energético de 1000 W por hora de operación. En el caso de bajas irradiaciones (200 W/m^2) la máxima temperatura en la cámara será de 46 ºC, como resultado del conjunto de resistencias (45ºC) y del colector solar (41ºC). Por ejemplo, como se ha estudiado en la lámina 5.18, el incremento de temperatura del colector para baja irradiación es aproximadamente de 10 ^{0}C de aportación con respecto a la temperatura ambiente, por ende, a una temperatura ambiente de 15 ^{0}C, la máxima temperatura de salida del colector será entre 24 a 25 ºC, enfriando la cámara en vez de ser una aportación de calor al sistema. En estos casos el colector no deberá entrar en funcionamiento. Se han colocado termostatos de doble canal en el prototipo que nos permitan censar la temperatura del colector y de las resistencias. Para el primer caso se programa temperaturas en rangos de 35 a 55 ^{0}C. En el segundo caso se apaga el sistema cuando se registra la temperatura superior a 55 ^{0}C (localizada en el centro de la cámara) y enciende el sistema cuando la temperatura es inferior a 49 ^{0}C.



a) b)

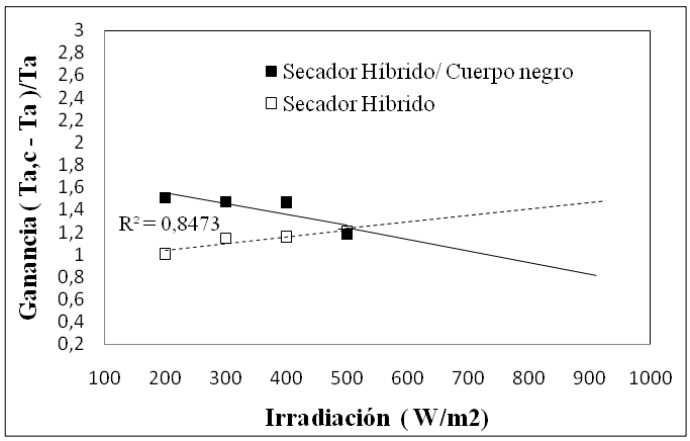
Lám. 5. 20. Sistema hibrido; temperatura de operación de la cámara a distintas radiaciones a) sin placas negras. b) Adaptación de placa negra.

Hasta este momento, se ha mostrado la temperatura en el interior de la cámara. Sin embargo, resulta de particular interés analizar el incremento de temperatura del secadero (se presenta en la Lám. 5.21). En el modelo b, la placa captadora o placa absorbente permitirá elevar la temperatura interna a 50 ^{0}C a partir de los 250 W/ m^2, con un incremento de 20 ^{0}C con respecto a la temperatura del laboratorio (25 a 29 ºC). De igual manera, se observa que la placa captadora metálica utilizada para bajas irradiaciones permitirá mejorar el sistema aumentando 5 ^{0}C más su temperatura. La curva experimental para ambos casos muestra un coeficiente de correlación en orden de 0.94 y 0.96. Se indica el coeficiente de correlación lineal como una forma de mide el grado de relación de la posible relación entre las variables.



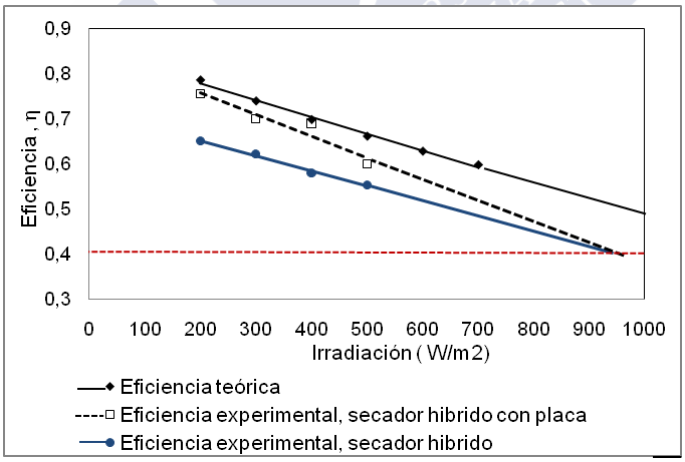
Lám. 5. 21. Sistema hibrido; Incremento de temperatura interna de la cámara, Ta a 25 ºC.

Por último, vamos a centrarnos en las ganancias obtenidas, donde la ganancia viene definida como la diferencia entre la temperatura en el interior de la cámara y la temperatura ambiental. La comparación de la ganancia entre los modelos a y b se presenta en la lámina 5.22 . Obteniendo una ganancia entre 1 a 1.3 en el modelo a., para irradiaciones menores de 500 W/ m^2. Se estima que la ganancia estaría en torno de los 1.8 para una irradiación máxima de 1000 W/ m^2 (día soleado). En el modelo (b) presenta a un comportamiento contrario al modelo a, estimando una ganancia superior de 1.3 a irradiaciones menores de 500 W/m^2, y una menor ganancia a medida que incrementa el aporte de la radiación en el prototipo experimental. Esto se debe a que la placa negra cumple la función de captar el calor y trasmitirlo por convección al aire, este efecto se observa a bajas irradiaciones (ver lamina 5.19) permitiendo que el prototipo alcance la temperatura de diseño .La diferencia de ganancia entre los modelos fue de 0.6 a 0.1. El punto de intersección entre ambos modelo es a 1.3 a 500 W/ m^2.



Lám. 5.22. Ganancia del sistema híbrido Ta = 20-25 °C.

Sobre la base de los resultados anteriores se procedió a estimar la eficiencia experimental, definida como el cociente entre la energía útil y la energía total de entrada en el secador, y su posterior comparación con la eficiencia teórica. En la lámina 5.23, se muestran los resultados para ambos modelos. Se puede observar que colocando una placa negra en el sistema se consigue un aumento del 5 al 10 % en la eficiencia con respecto al modelo a. (sin placa captadora). Adicionalmente se presenta el buen acuerdo entre la eficiencia teórica y experimental para los modelo a y b, siendo los valores de la eficiencia teórica superior entre 0.5 a 5 %, con respecto al modelo experimental hibrido con placa captadora. En ambos casos, los resultados experimentales mantienen la misma tendencia de lo determinado teóricamente.



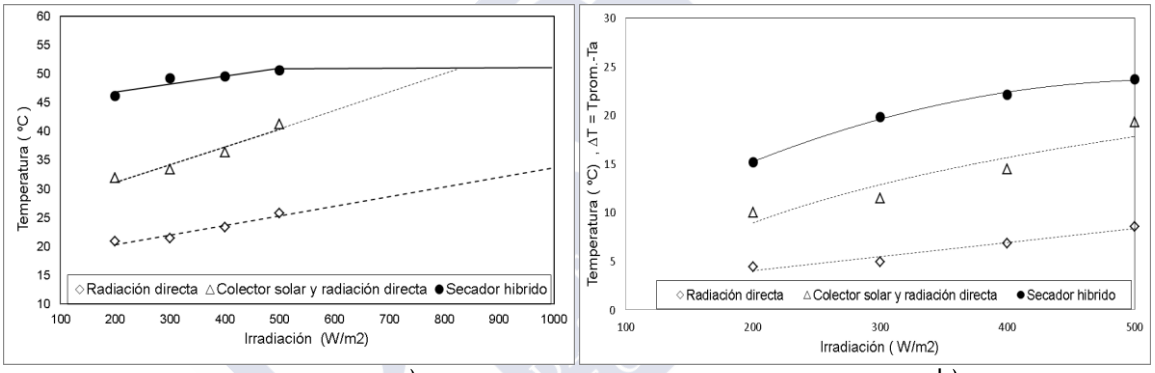
Lám. 5. 23. Comparación de la eficiencia teórica y eficiencia experimental del sistema híbrido. Condiciones de laboratorio Ta entre 20- 25 °C.

Para finalizar el análisis de los ensayos realizados en condiciones controladas, se comparan cada etapa de funcionamiento del sistema, es decir; cámara en vacio con flujo forzado y radiación directa, abastecimiento de calor utilizando un colector solar, y funcionamiento de las resistencias eléctricas como complemento auxiliar del secador hibrido.

En las láminas 5.24 y 5.25 se muestran los resultados de aportación de temperatura de cada componente del prototipo, obtenido de los ensayos realizados en la cámara en vacio sin

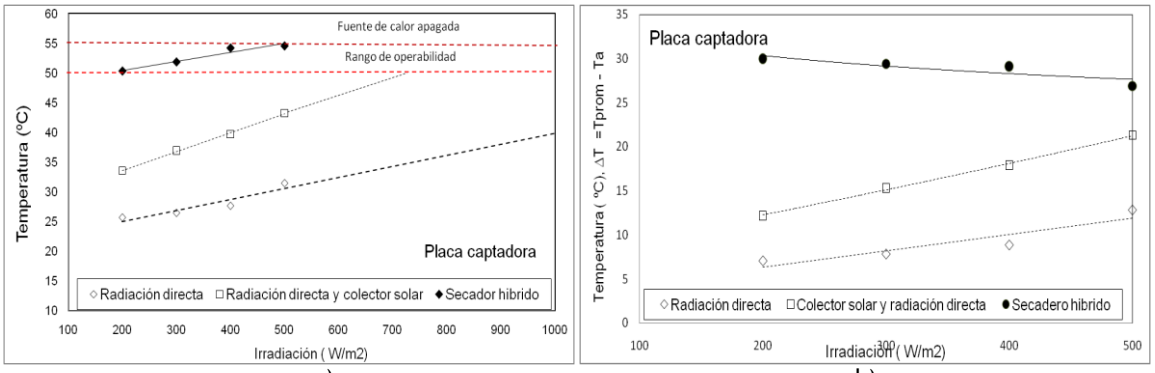
un sistema de captador interno y con placas absorbentes color negras. Observando, para ambos casos que el sistema utilizando un panel térmico placa plana no llegaría a los 50 ºC de temperatura de diseño a irradiaciones menores de 500 W/m^2, la temperatura máxima obtenida será en torno de los 35 a 45 ºC. Por tanto, es necesario añadir calor por medio de una fuente auxiliar. A partir de los 350 W/m^2 el prototipo hibrido alcanzara la temperatura de diseño. La fuente de calor contribuye al aumento de temperatura entre 10 ºC a 15 ºC más referente al consumo de energía eléctrica, las resistencias consumen un total 1600 Wha irradiaciones menores a 400 W/m^2 Por ejemplo para 6 horas de pruebas experimentales a una temperatura de laboratorio de 25 ºC, en irradiación de 400 W/m^2 y 500 W/m^2, el consumo energético fue de 1050 W y 933.33 W por hora, respectivamente.

En el caso del secador hibrido con placas captadoras, se observa que la fuente de calor auxiliar cumple su cometido, aportando 18 ºC más al sistema cuando la irradiación es muy baja, Cabe indicar, que los ensayos fueron realizados a una temperatura ambiental de laboratorio entre 18 a 25 ºC, por lo tanto, a una baja temperatura ambiental la aportación de calor de la fuente eléctrica debe ser mayor. A medida que la radiación solar aumente el abastecimiento por resistencias al secadero será mínima o nula.



a) b)

Lám. 5. 24. Comparación de los ensayos realizados en la cámara en vació (Ta de 18 a 25 ºC). a) Temperatura interna de la cámara, b) incremento de temperatura.

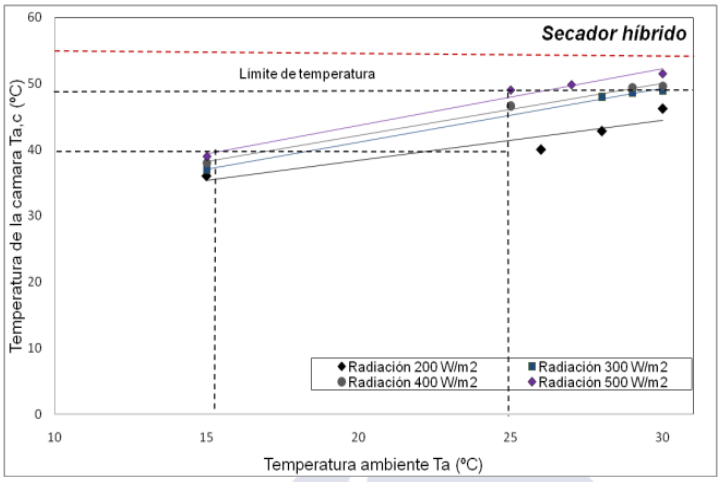


a) b)

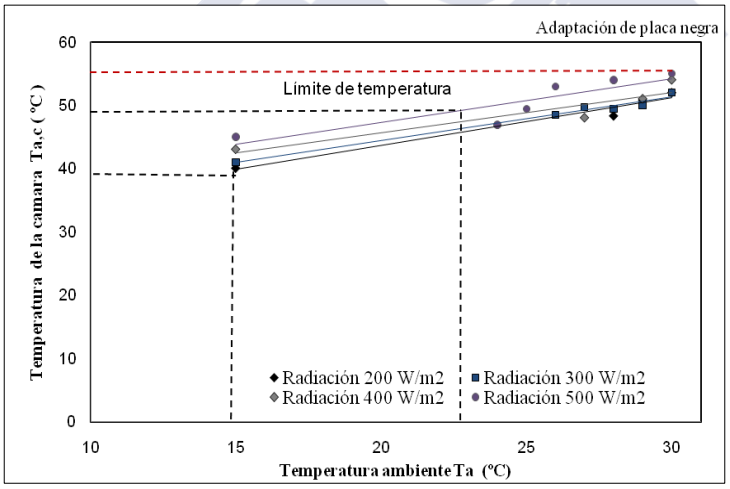
Lám. 5. 25. Comparación de los ensayos realizados en la cámara en vació adaptando una placa captadora (Ta de 18 a 25 ºC). a) Temperatura interna de la cámara, b) incremento de temperatura.

En las láminas 5.26 y 5.27, se presentan las curvas de operación del sistema hibrido en vació para un rango de irradiación de 200 a 500 W/m^2. Como se puede observar a muy bajas temperaturas el prototipo experimental no alcanzaría la temperatura de diseño.

De los ensayos realizados, se determina que a partir de 15 ºC de temperatura ambiente el prototipo alcanzaría temperaturas internas mínimas de 45 ºC de operación para irradiaciones de 400 W/m^2, siendo una temperatura idónea para el producto macro-algal[15]. Las curvas de operación tienen un coeficiente de correlación lineal aproximado de 0,87 a 0,99. Se esperar, que el modelo b, presente mejores resultados de temperatura internas.



Lám. 5. 26. Curva de operación del sistema hibrido sin cuerpo negro.



Lám. 5. 27. Curva de operación del sistema hibrido adaptando una placa de captación.

A continuación se realiza un análisis estadístico de los registros de temperatura obtenidos en las diferentes pruebas, con el fin de tener una referencia del comportamiento térmico del prototipo más detallado.

Se ha calculado la media y la desviación estándar[16] a partir de la distribución normal del conjunto de datos de cada prueba realizada por triplicado. A partir de la desviación estándar se determinaron los rangos de incertidumbre de las variables que se estaban controlando.

[15] Varias investigaciones, recomiendan temperaturas de deshidratación para macroalgas menores de 60 ºC . (P. Lodeiro, 2005), (M. Palomino. F. Estrada, 2010)

[16] Los conceptos y ecuaciones utilizadas en el análisis de la media y la desviación estándar son obtenido de los textos de estadística básica aplicada.(Martínez,2012)

En la Tabla 5.2 y 5.3 se muestran la media y la desviación estándar de la temperatura interna obtenida de los múltiples ensayos realizados entre 200 a 500 W/m^2.

Tabla 5.2. Media y Desviaciones estándar de la temperatura interna en la cámara de secado sin placas captadoras.

	Radiación directa con flujo forzado		Resistencias		Sistema hibrido	
W/m^2	$\bar{T}$	σ	$\bar{T}$	σ	$\bar{T}$	σ
200	22,16	0,29	39,30	0,80	46,15	0,98
300	23,31	0,51	41,99	1,31	49,29	0,95
400	24,09	0,6	45,52	2,57	49,62	0,50
500	24,44	0,56	47,23	0,53	50,67	0,30

Tabla 5.3. Media y Desviaciones estándar de la temperatura interna en la cámara de secado con placas captadoras.

	Radiación directa con flujo forzado.		Resistencias		Sistema hibrido	
W/m^2	$\bar{T}$	σ	$\bar{T}$	σ	$\bar{T}$	σ
200	23,60	0,33	45,78	1,02	50,10	1,07
300	24,43	1,03	47,94	1,66	51,85	0,82
400	25,68	0,76	47,27	1,12	53,22	0,95
500	27,06	0,18	49,48	2,27	54,58	0,98

A partir de los resultados obtenidos se puede apreciar que existe una mayor incertidumbre en la medición de la temperatura interna de la cámara de secado cuando entra en operación las resistencias eléctricas. Esto sucede por la dificultad al tratar de controlar la velocidad del aire que pasa por la fuente de calor.

5.4.3 Evaluación de la cámara de secado térmica en condiciones ambientales.

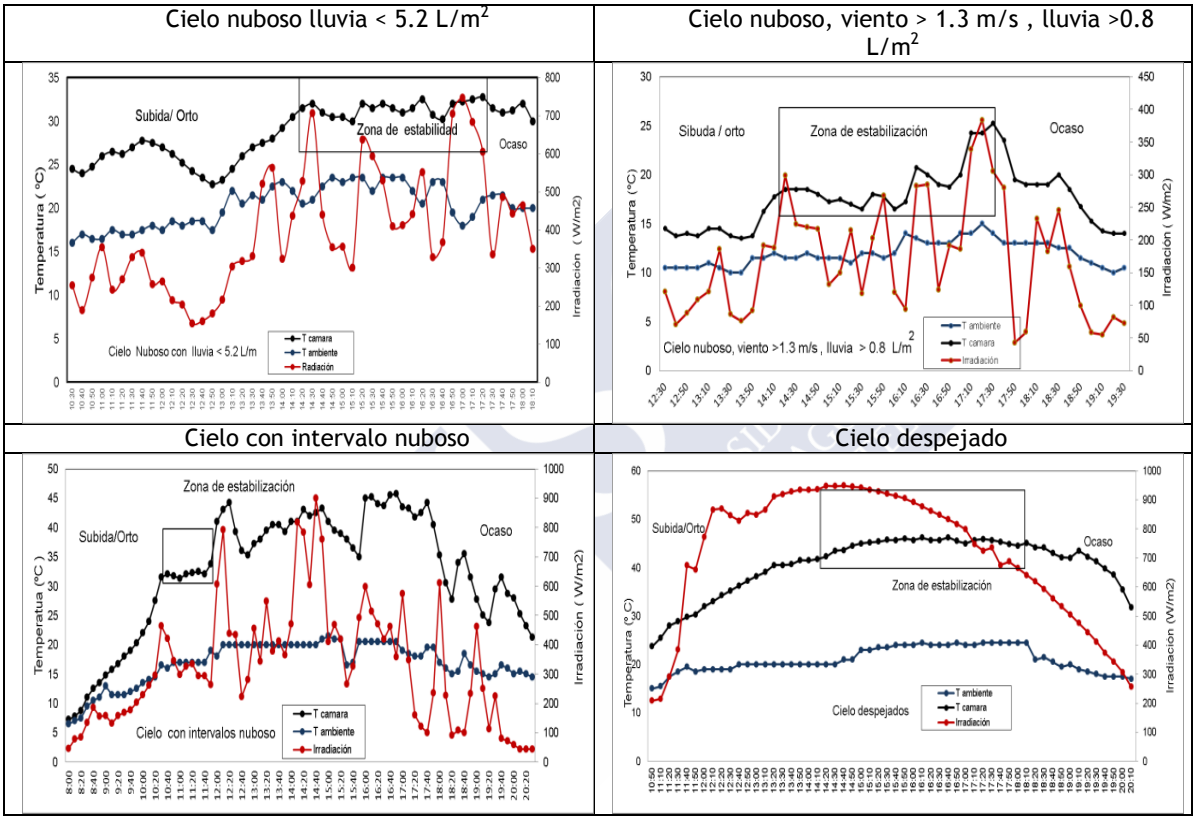
La etapa de evaluación del prototipo experimental y de cada uno de sus componentes, así como del secador hibrido, se han desarrollando durante un periodo de 8 meses en total, para estudiar las condiciones climáticas que influirá en el secador.

Los primeros ensayos se realizan solamente en la cámara de secado, definiendo para el análisis el secador solar con ingreso de flujo continuo de aire (secador solar indirecto). En el análisis se evalúa la radiación solar incidente y su influencia en el calentamiento del aire interno, aporte de calor, la temperatura ambiente, velocidad del aire, humedad, lluvias, entre otras condiciones climáticas de interés.

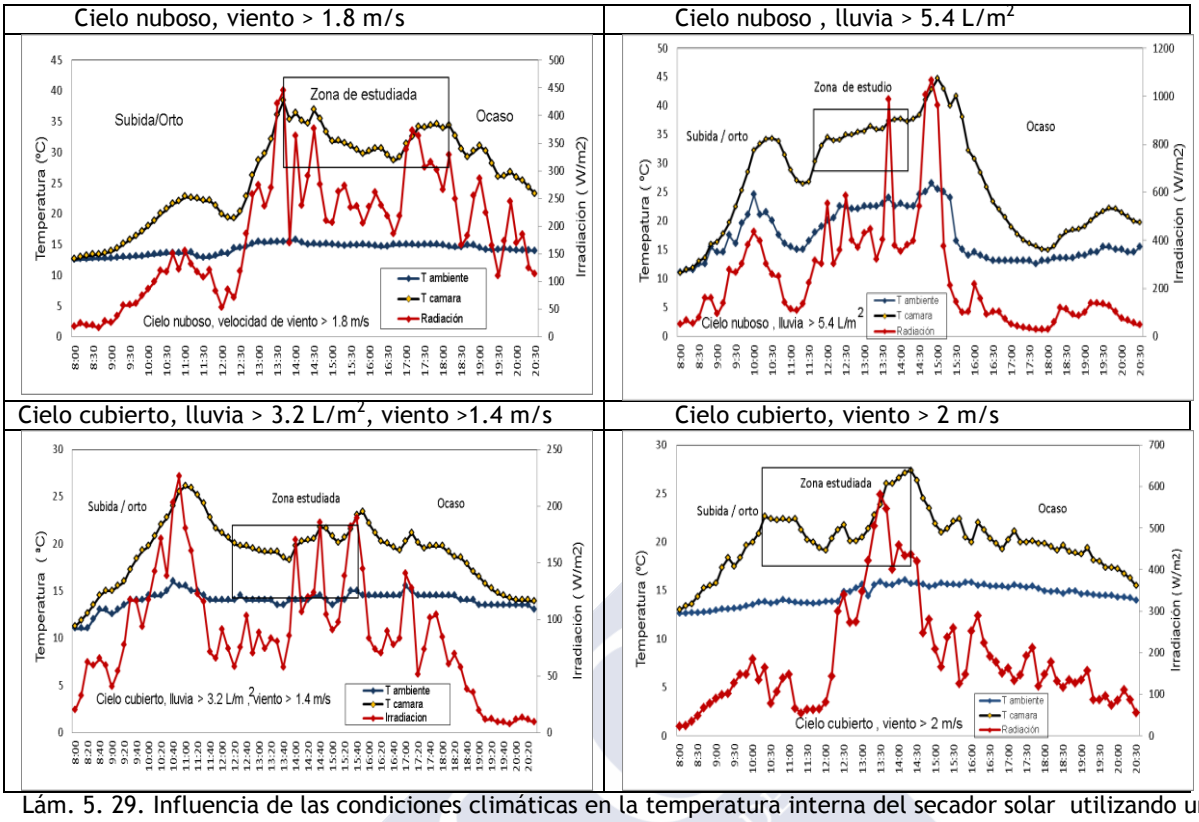
A manera de ejemplo en las láminas 5.28 y 5.29 se muestran cómo influyen las condiciones climáticas a la temperatura interna de un secador solar con aire de circulación; en días malos (lluvias y cielo completamente nublado), días regulares (parcialmente nublados) y días buenos (cielo despejado), registrado temperatura ambiente entre 11 a 18 ºC.

En la láminas 5.28, se analiza la cámara de secado sin un medio de disipación de calor, se observa que en días muy malos, el máximo incremento de temperatura interna de la cámara alcanza 11 ºC. La respuesta de la cámara frente a la variación de la radiación solar se produce con un retraso de 10 min, con pérdida y ganancia de temperatura menor a 1 ºC.

En la lámina 5.28 , se observa los resultados del comportamiento de la cámara cuando se utiliza una placa metálica en su interior. En días muy malos (nubosos y poco irradiados) el máximo incremento de temperara alcanzado fue de 15 ºC. De lo contrario, en días con irradiaciones superiores a los 600 W/m^2 para ambos casos, el incremento de temperatura es superior a 20 ºC con respecto a la temperatura ambiente. La cámara alcanza la temperatura de diseño (50 ºC) cuando la temperatura ambiente es superior a los 18 ºC.



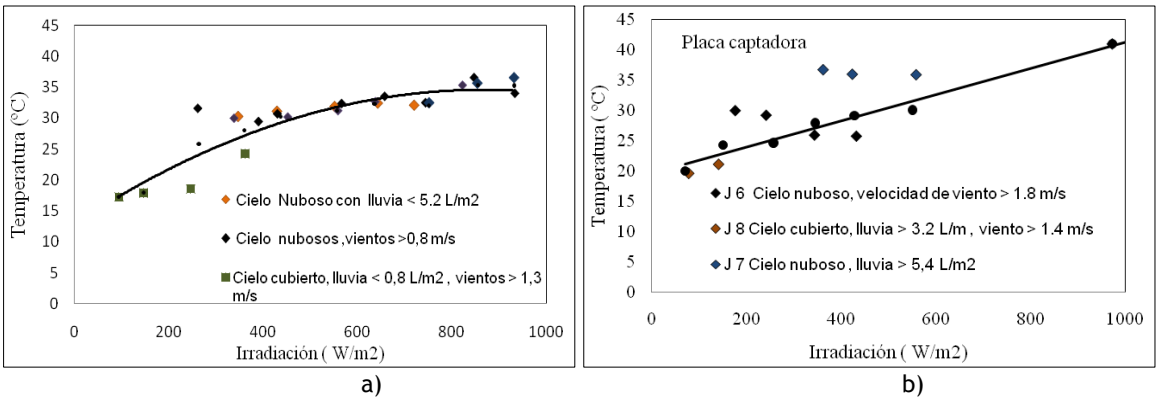
Lám. 5. 28. Influencia de las condiciones climáticas a la temperatura interna del secador solar.



Lám. 5. 29. Influencia de las condiciones climáticas en la temperatura interna del secador solar utilizando una placa captadora (placa negra).

En el marco de las observaciones anteriores, se presenta a continuación la curva de funcionamiento del secador solar indirecto en los modelo a y b, representado a través de la temperatura interna de la cámara y la variación de la radiación solar incidente (Lám. 5.30). Como se observa para temperatura ambiental inferior a 15 ºC y radiación solar superiores a los 500 W/m^2, la máxima temperatura alcanzada en el secador solar será de 35 ºC en el modelo a., y de 40 ºC para el modelo b. Por lo que es necesario adaptar otra fuente de energía que compense la temperatura de diseño, para mantener la cinética del secado homogénea en el producto.

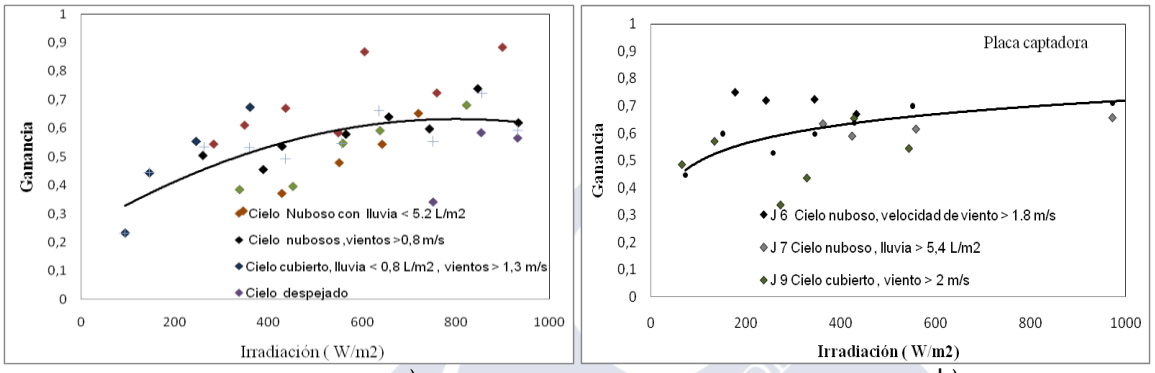
A partir de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales, se determina la energía útil de la cámara de secado utilizando la ecuación 5.34 del capítulo 5, siendo de 144 a 356 W para el modelo a., y de 225 a 425 W para el modelo b.



a) b)

Lám. 5. 30. Temperatura interna del secador solar con flujo forzado a) sin placa, b) placa absorbente.

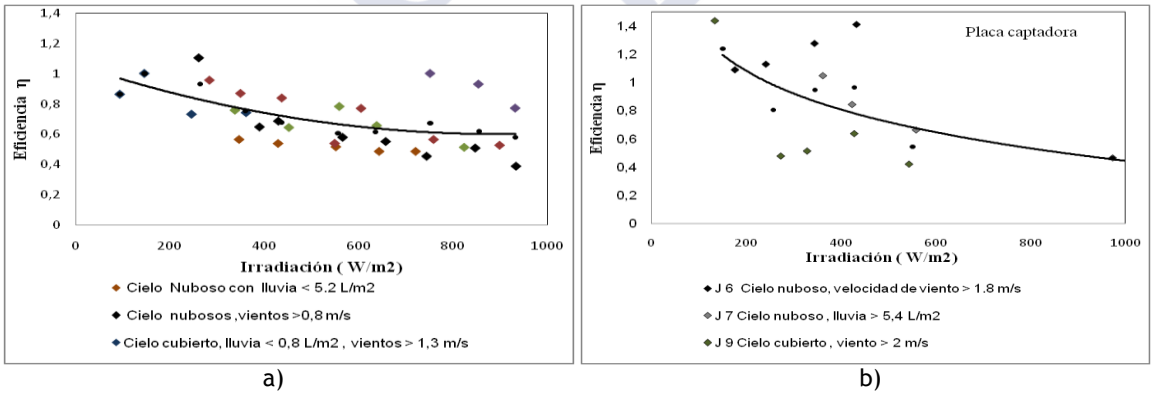
En la lámina 5.31, se presenta la ganancia del secador solar indirecto para ambos modelo. La ganancia del modelo a, estará influenciada directamente por la radiación solar que incide sobre las placas transparente (policarbonato y plásticos glass), siendo evidente que a menor radiación menor ganancia, a medida que la radiación aumenta la ganancia se incrementará hasta un valor de equilibrio entre el medio interior y exterior de la cámara, es decir, al llegar al punto máximo de calentamiento de la cámara la radiación solar y el aire de renovación influirá mesuradamente en el sistema. En el modelo (b) la situación es diferente ya que la placa absorbente negra dentro de la cámara de secado produce aumento visible de la transferencia de calor, dando lugar a una mayor eficiencia térmica cuando el flujo de aire circula sobre la placa. Este efecto, se ve claramente cuando las irradiaciones son bajas, permitiendo ganancias mayores que 1 tal como se aprecia en la lámina.



a) b)

Lám. 5. 31. Ganancia de la temperatura del secador solar indirecto.

En todos los análisis realizados, se determina la eficiencia del secador solar a través de la energía útil del secador solar durante un periodo de tiempo sobre la energía solar incidente en el mismo periodo y la potencia del ventilador. En la lámina 5.32, se muestra la eficiencia de la cámara en la zona de estabilidad obtenida de una muestra de 5 días.



a) b)

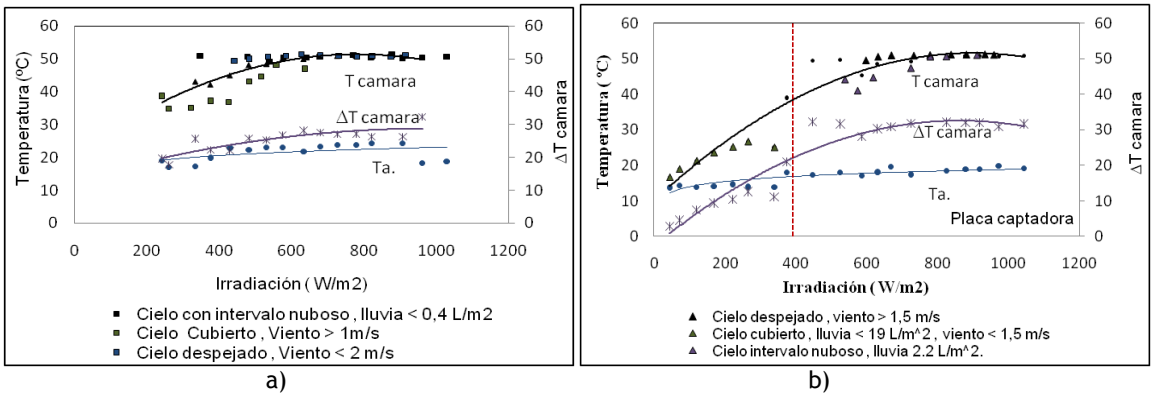
Lám. 5.32. Eficiencia del secador solar indirecto.

5.4.4 Evaluación del secadero solar con el colector solar placa plana (Secador mixto)

En el presente apartado se analiza la influencia del colector solar en la cámara de secado en condiciones reales en el exterior. Las pruebas se realizaron en los meses de Julio y Agosto. Como se ha indicado previamente en este trabajo, el prototipo experimental fue situado en el Campus Sur de la Universidad de Santiago de Compostela, Galicia - España, localizada en el hemisferio Norte, por tanto el colector solar sea colocado con orientado al Sur e inclinado a un ángulo de 20 º respecto al plano horizontal, siendo el ángulo óptimo en los meses antes citado. Los ensayos experimentales fueron realizados de acuerdo con la metodología aplicada en modo controlado en el interior del laboratorio y utilizando el mismo prototipo.

Para el estudio se analizó los intervalos de estabilización del secadero solar, especialmente en los intervalos de irradiación solar global de 200 a 1000 W/m^2, la temperatura de entrada del aire en el captador (Te) fue temperatura ambiente en un rango 13 ºC a 23ºC y una velocidad media del aire circundante de 1.5 m/s.

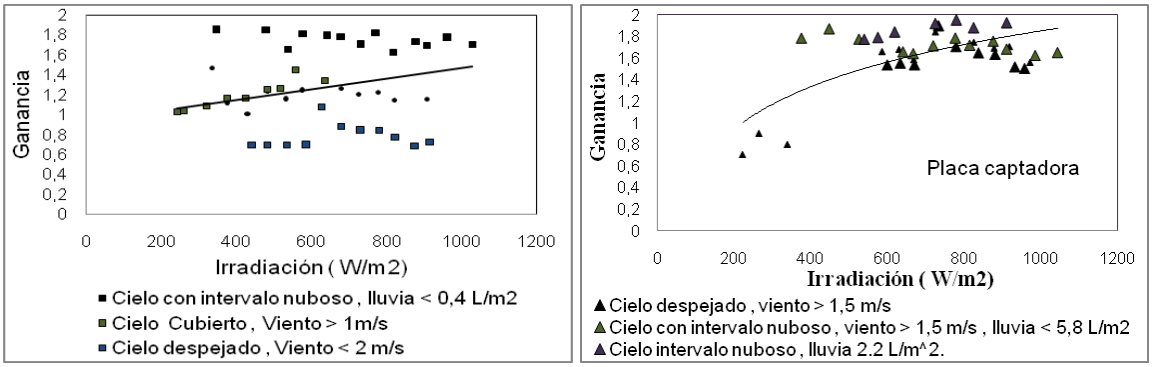
La primera hipótesis que vamos a argumentar, siempre a partir de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales, es que la temperatura ambiente afecta drásticamente el funcionamiento de un secador solar. A manera de ejemplo comparando ambos modelos a 400 W/m^2, el modelo a, con una Ta de 23 ºC obtiene un incremento de temperatura (ΔT) de 22 ºC y una temperatura interna de 45 ºC . En el modelo b, a una Ta de 17 º C el diferencial de temperatura (ΔT) será aproximadamente de 23 ºC, con una temperatura interna (Ta,c) de 40 ºC . En la lámina 5.33, se muestra la curva logarítmica representativa del incremento de la temperatura interna de la cámara con respecto a la radiación solar para los casos estudiados. Como se observa el secador solar llega a la temperatura de diseño a partir de los 500 W/m^2, $T_a \approx 23$ ºC (modelo a) y 560 W/m, Ta ≈19 ºC (modelo b). Esto es, que, a muy baja temperatura ambiental (5 a 10 ºC) y con irradiación superior a 600 W/m^2 un secadero con colector solar y aire de renovación, no funcionará para su fin, quedando la alternativa de utilizarse como invernadero. Efecto contrario seria, que el secadero no cumpla su función cuando hay muy poca radiación solar a una temperatura y humedad relativa ambiente de Ta >25 ºC, RH 50 %. El coeficiente de correlación lineal para los modelos estuvo en orden de 0.88 y 0.94 respectivamente.



a) b)

Lám. 5.33 Temperatura interna de la cámara de secado adaptada con un colector solar a) sin placa absorbente, Ta de 17 a 23 ºC, b) con placa captadora, Ta de 13 a 19 ºC.

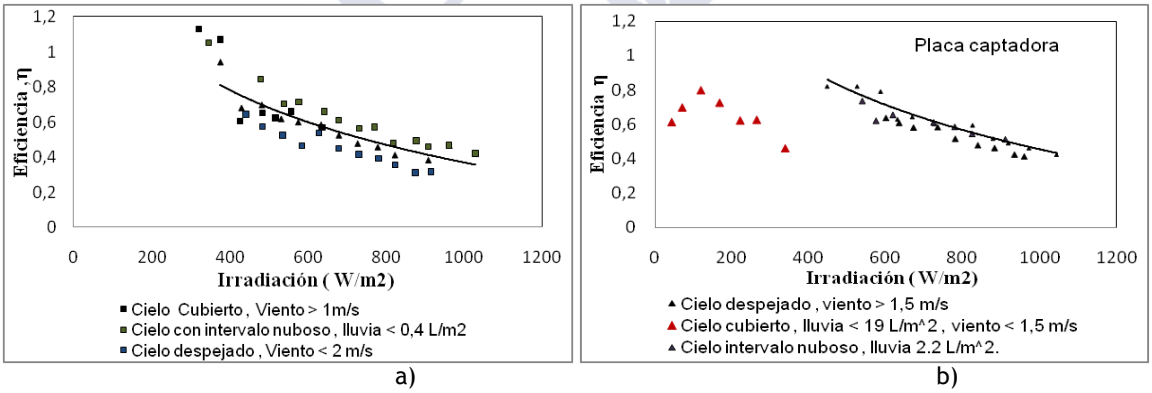
En la presente lámina 5.34, se presenta la ganancia de temperatura para ambos modelos, como era de esperar los modelos presenta buenos resultados a irradiaciones superiores a 300 W/m^2, con ganancias mayores a 1.



a) b)

Lám. 5.34 Ganancia del secador con un colector solar a) son placa absorbente, Ta de 17 a 23 ºC b) placa metálica negra Ta de 13 a 19 ºC.

Mediante el balance energético del sistema se determino que la energía térmica experimental del secadero solar mixto (ecuación, 4.34) varía entre 1300 W y 1769.3 W cuando se trabaja en un rango de radiación solar de 400 W/m^2 a 1000 W/m^2 respectivamente. A partir, de los valores de energía útil se determina la eficiencia del sistema a través de la energía solar incidente del colector por el área de captación y la potencia de los ventiladores (ecuación. 4.66). Para obtener un resultado significativo, el rendimiento se calcula para todo un día de funcionamiento. En la lámina 5.33, se muestras dichos resultados. Notar que, el modelo (b) presenta valores de eficiencia semejantes al modelo (a) a temperaturas ambiente 4^0C menores. Es interesante estudiar el buen comportamiento del citado modelo (b) a irradiaciones particularmente bajas (ver triángulos rojos en la lámina).



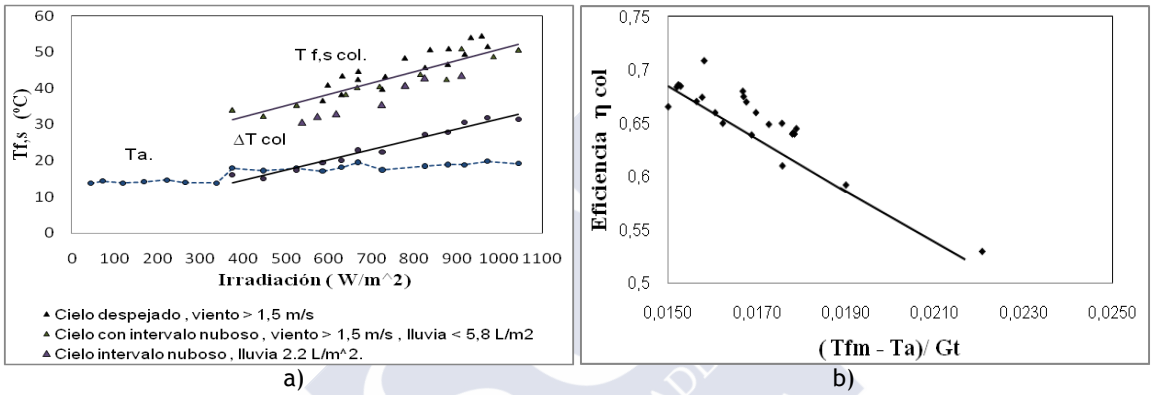
a) b)

Lám. 5. 35. Eficiencia del secador mixto en condiciones climáticas al aire libre a) Sin placa captadora, Ta de 17 a 23 ºC , b) Con Placa captadora, Ta de 13 a 19 ºC.

Como se explicó anteriormente, en un colector o captador solar de aire los parámetros de mayor importancia son, la temperatura de salida del fluido y la eficiencia. En la lámina 5.36, se presenta los resultados de la variación en la temperatura de salida del colector con respecto a la radiación solar incidente a una velocidad constante de 1.5 m/s. La energía útil estimada oscila entre 510 W a 931 W (ec. 4.68)

La eficiencia del captador solar estará en función de los parámetros operativos del equipo. En el capítulo 4 se indicó la expresión 4.69 para determinar el valor de eficiencia y en lámina 4.12 se presento la curva teórica característica del colector, con rendimientos en torno 73 %.

Se muestran en la lámina 5.36 b, la curva experimental del rendimiento del colector obtenida de los resultados de los ensayos realizados en condiciones ambientales. La curva fue obtenida en función del rendimiento $_{col}$ y las variables de radiación solar, temperaturas media y ambiental $(T_{fm}-T_a)/G_t$. Se obtuvieron eficiencias en el rango de 52-69 %, para una inclinación de 20º, con un porcentaje de error del 5.4 % con respecto al rendimiento teórico.



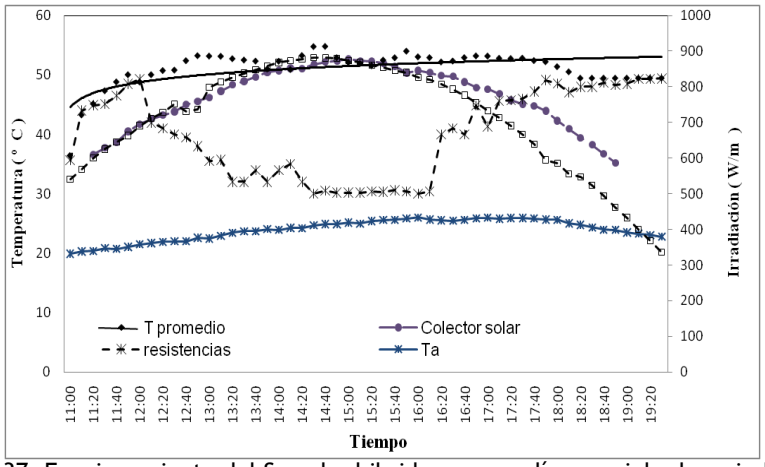
a) b)

Lám. 5.36. Colector solar a) temperatura de salida de aire caliente, b) Rendimiento del captador solar plano Ta 17 a 22 ºC.

5.4.5 Evaluación del Secador hibrido en condiciones ambientales.

Conocido la eficiencia, ganancia y el calor útil en forma de energía que aporta cada una de los componentes que forman parte del secador hibrido, se pretende analizar el funcionamiento de todo el sistema, para ello en la lámina 5.37 se expone un ejemplo de la operatividad del secadero en un día despejado con una media de temperatura ambiente de 22 ºC, humedad relativa de 55 %, velocidad del viento menor de 1 m/s y radiación solar entre 300 a 900 W/m^2. Se observa que el sistema auxiliar (conjunto de resistencias) funciona en la primera hora de operación del equipo hasta alcanzar la temperatura de diseño (50 ºC), a partir de las 4,5 horas operación, las resistencias operan en cortos lapsos de tiempo para mantener la temperatura de la cámara. Asimismo, cuando la radiación solar se encuentra entre 700 a 900 W/m^2 el secador será alimentado por el colector solar. A medida que la radiación desciende el sistema auxiliar entra en funcionamiento con el fin de mantener la temperatura interna constante.

Con referencia a lo anterior, el consumo de energía eléctrica derivado del funcionamiento de las resistencias fue de 5.9 kW/día. (En operación continua las resistencias consumirán un total 13.2kW/día).

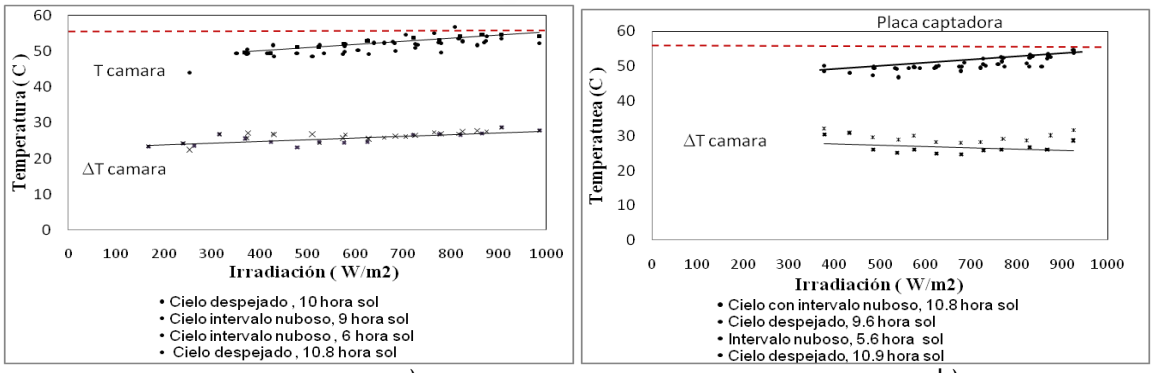


Lám. 5. 37. Funcionamiento del Secador hibrido para un día con cielo despejado.



Lám. 5. 38. Prototipo experimental; secador híbrido

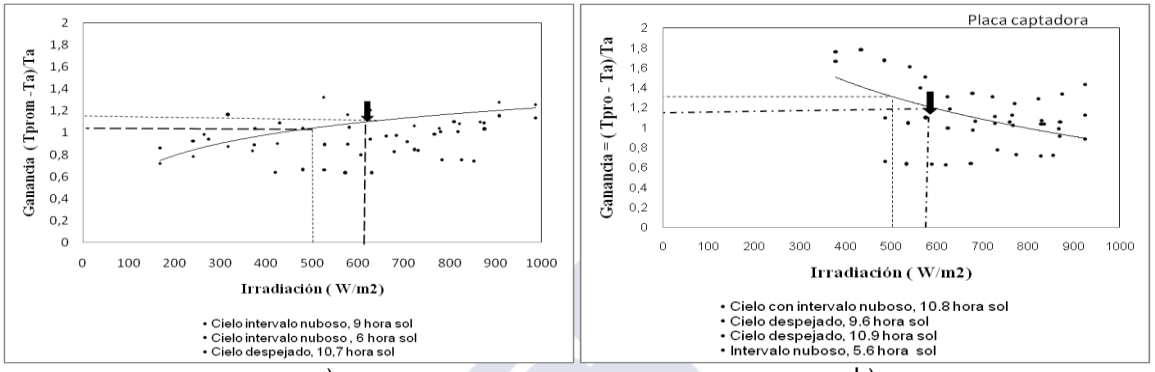
De igual forma, se analizó la zona de estabilidad de la cámara en cada día de medición, con la finalidad de conocer la influencia de la radiación solar en el secadero y en el incremento de temperatura. Tal como se observa para ambos modelos a partir de 400 W/m^2 el sistema alcanza la temperatura de operación (Ver Lám. 5.39). La energía útil estimada fue de 3000 W para el sistema.



a) b)

Lám. 5. 39. Secador hibrido: Temperatura de la cámara de secado. a) modelo sin placa, Ta de 22 a 28 ºC, b) modelo con placa, Ta 18 a 25 ºC.

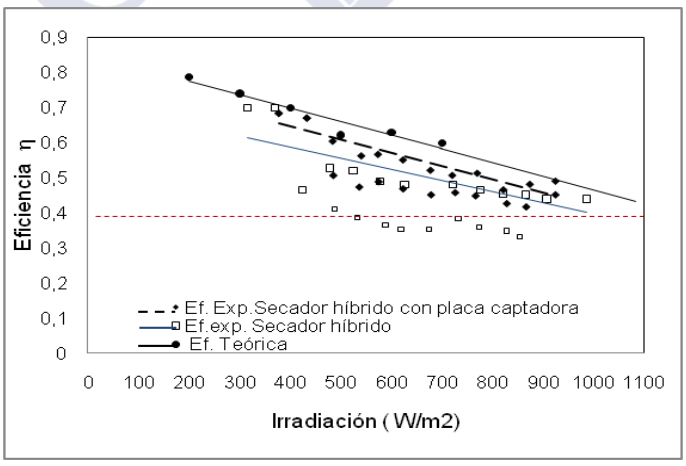
En la lámina 5.40 se muestra la ganancia del secador hibrido para los dos modelos estudiados. Como se puede apreciar, el punto de intersección entre los modelos es aproximadamente 600 W/m^2 con una ganancia de 1.19. Los resultados obtenidos muestran un buen acuerdo con los ensayos realizados en condiciones controladas en laboratorio (Lám. 5.40) . La diferencia en el punto de intersección es de 100 W/m^2, debido, como fue explicado anteriormente, al cambio instantáneo de la radiación incidente, en las condiciones ambientales.



a) b)

Lám. 5. 40. Ganancia del secador hibrido a) sin placa captadora Ta de 22 a 28 ºC, b) placa captadora Ta 18 a 25 ºC.

En cuanto a la eficiencia experimental del secadero en condiciones ambientales se determina, como el caso anterior, mediante el cociente entre la energía útil y la energía total de entrada en el secadero. En este caso, la energía total es la suma de la energía suministrada por el colector solar, potencia de ventiladores, resistencias eléctricas, además de la radiación horaria incidente sobre la superficie por el área de captación. Como se observa en la lámina 5.41, la eficiencia experimental del secador hibrido con placa captadora será un 2 al 5 % mayor con respecto al modelo sin placa.



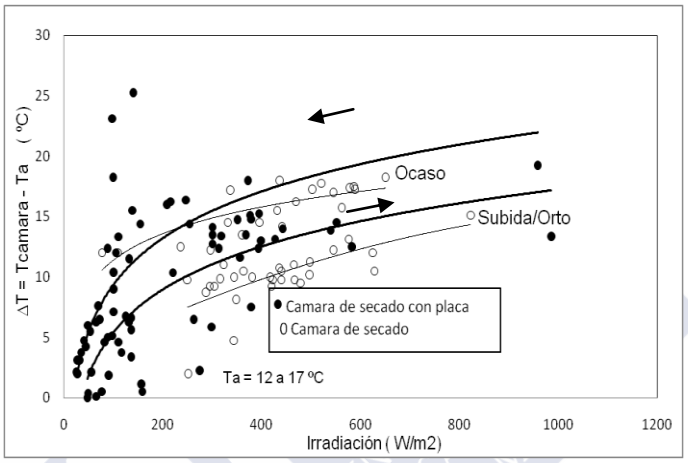
Lám. 5. 41. Eficiencia del secador hibrido a condiciones climáticas al aire libre.

Funcionamiento de la placa negra en el sistema

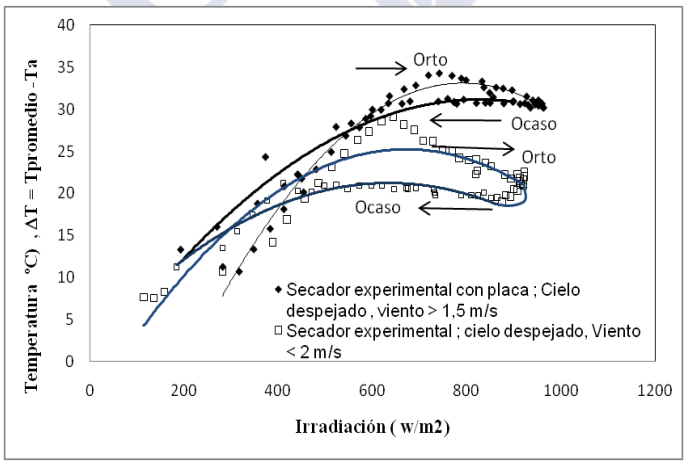
Durante el desarrollo del capítulo se han venido presentando dos modelos. Como se ha visto, la placa captadora nos permite tanto un mejor intercambio de calor con el aire a baja irradiaciones como evitar cambios bruscos de temperatura en los intervalos de descenso de la

irradiación o cuando algún componente del sistema deje de funcionar por cortos intervalos de tiempo. Sobre la base de las consideraciones anteriores se presentan tres ejemplos del comportamiento de la temperatura interna del fluido caliente cuando se emplea la placa captadora en el secador hibrido.

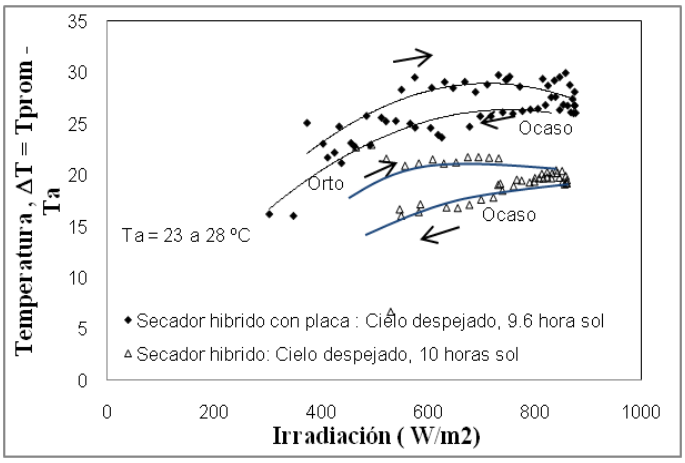
En la lámina 5.42, podemos observar la etapa de enfriamiento de la cámara. En este caso, la placa captadora (modelo (b)) contribuye a lograr un descenso más lento de la temperatura interna en comparación al modelo (a) . Cabe decir que después de dos horas de enfriamiento el modelo (b) registra valores de temperatura superiores entre 3°C y 4°C que el modelo (a). El mismo efecto se puede visualizar en las láminas 5.43 y 5.44, habiendo una diferencia de temperatura entre 10 y 6 ºC tanto en el secador mixto (cámara, colector) como en el secador hibrido. En otras palabras, la placa captadora aumenta la resistencia térmica del sistema.



Lám. 5. 42 Influencia de la placa captadora en la cámara de secado con convección forzado.



Lám. 5. 43. Influencia de la placa captadora en el secadero solar mixto con colector solar



Lám. 5. 44.Influencia de la placa captadora en el Secador hibrido.

5.4.6 Consumo de energía suministrado por el Sistema Fotovoltaico

En el capitulo anterior se ha expuesto que el 45.52 % del suministro de energía eléctrica del secador hibrido será suministrado por un conjunto de resistencias eléctricas (sistema auxiliar) que permitirá aportar calor a la cámara de secado cuando no llegue a la temperatura de operación máxima por factores climáticos. Con el fin de diseñar un sistema sostenible y autónomo de secado, se plantea una alimentación por medio de energías no convencionales. En este caso, se ha instalado un sistema fotovoltaico aislado para generar, almacenar y utilizar energía eléctrica cuando sea necesario. La instalación fotovoltaica propuesta nos permitirá satisfacer la demanda energética del sistema eléctrico de 1650 Wp en total, comprendiendo dos conjuntos de resistencias y ventiladores de 825 W cada uno.

Para aprovechar la máxima radiación solar a lo largo del año, de un panel fotovoltaico, es necesario calcular el ángulo de inclinación (β) de la superficie con relación a la horizontal y el ángulo acimutal (γ) que corresponde a la normal de la superficie respecto del ecuador del observador. En la tabla 4.11 y en la lámina 4.11 del capítulo 4, se exponen dichos resultados siendo está pendiente fija ( ) de 33^0 para todo el año para poder captar la mayor radiación solar en los meses de inviernos.

El cálculo del sistema fotovoltaico para esta instalación es de 8 paneles fotovoltaicos de 280 Wp, 8 baterías de 130 Ah ($C20^{17}$) y 12 V, 4 regulares y 2 inversores. (Ver tabla 4.13 y 4.14).

Los ensayos experimentales se realizaron en los meses de verano (hemisferio Norte), por tanto, se ha calculado nuevamente el ángulo de inclinación más favorable entre los meses de julio y agosto para captar la mayor incidencia de radiación solar sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos, siendo la inclinación de 20 º orientados hacia el sur. Para cubrir la demanda energética del secador hibrido en estos meses en particular, la instalación del sistema fotovoltaico aislado estuvo compuesta por: 4 paneles fotovoltaicos de 280W, 6 baterías de 12 V, 2 reguladores 12/24 V de 10 A, 1 inversor 24 V de 2000 W.

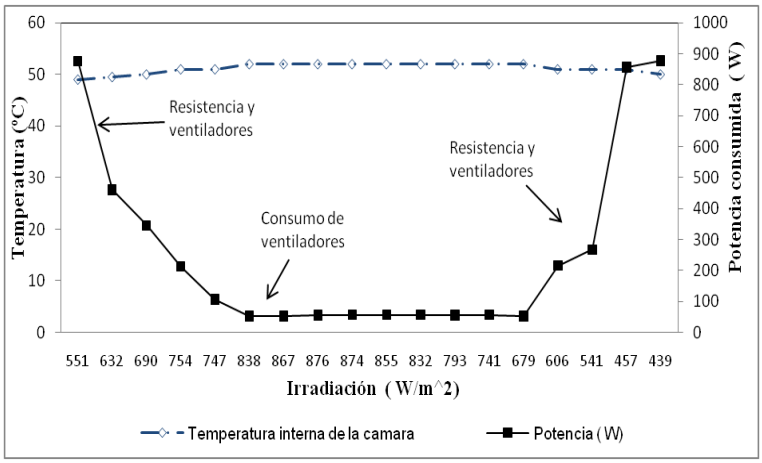
[17] Capacidad de una batería (C): se define como la capacidad de electricidad contenida en la batería y que aprovecha para entregar corriente a una carga durante un cierto tiempo. C20; significa 20 horas de operación hasta su descarga final.

De los diversas pruebas experimentales realizadas en el secador hibrido en la tabla 5.4, se muestran a modo de ejemplo el consumo energético del sistema auxiliar en días malos (nubosos), buenos (despajados) e intermedios (intervalos con nubosidad). Como se puede observar en días con cielo despejados el consumo energético del sistema auxiliar es minino, funcionando el secadero gran parte del tiempo solo con la aportación de la radiación solar. No obstante, se hace evidente el uso constante de la fuente eléctrica en días muy malos (nublados y de baja irradiación) con radiación solar menor a 350 W/m^2 y temperatura ambiente menores de 19 ºC, logrando ahorrar 2.4 kW día de consumo energético.

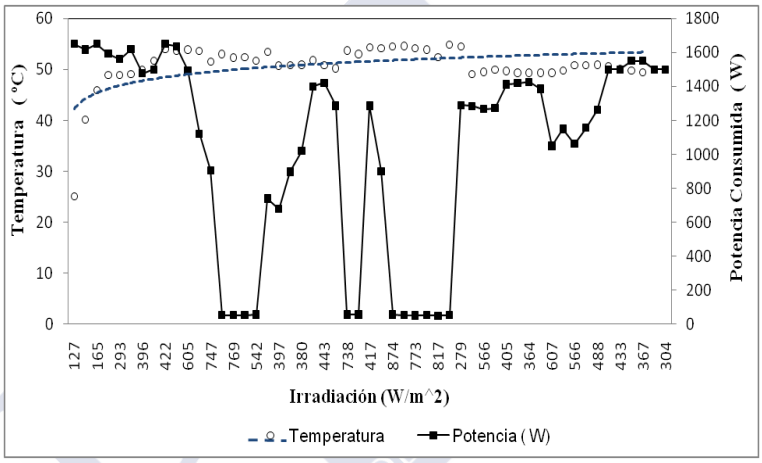
Tabla 5. 4 Consumo de energía eléctrica del sistema auxiliar (resistencias eléctricas)

Condiciones climáticas	Consumo de resistencias Kw/h	Funcionamiento (horas)	Consumo total (Kw/día)	Ahorro de energía (Kw/ día)
Cielo intervalo nuboso, Vientos> 2 m/s.Ta = 22 ºC	1	8	8	5,2
Cielo intervalo nuboso, Ta = 21 ºC	1,06	8	8,48	4.72
Cielo despejado, Ta = 25 ºC	0,8	8	6,4	6.8
Cielo cubierto, velocidad de viento > 2 m/s, Ta = 19ºC	1,4	8	11,2	2
Cielo nuboso. Ta = 20 ºC	1	8	8	5,2
Cielo intervalo nuboso. Ta = 28 ºC	0,4	8	3,2	10
Cielo despejado. Ta = 29,5 ºC	0,33	8	2,64	10,56
Cielo despejado Ta = 26 ºC	0,6	8	4,8	8,8
Cielo intervalo nuboso. Ta = 29 ºC	0,38	8	3,04	10,16
Cielo intervalo nuboso Ta = 26 ºC	0,8	8	6,4	6.8
Cielo despejado Ta = 26 ºC	0,5	8	4	9,2
Cielo despejado Ta = 25 ºC	0,5	8	4	9,2

En las láminas 5.45 y 5.46 se muestran la potencia consumida por el conjunto de resistencia para dos días diferentes; cielo despejado y cielo con intervalo nuboso. En la lámina 5.45 se muestra que, en días muy buenos el máximo consumo eléctrico utilizado para el calentamiento de la cámara será de 900 W, trabajando el conjunto de resistencia auxiliar a la mitad de su capacidad. La mayor parte del tiempo las resistencias estarán apagadas, funcionando solo el sistema de renovación de aire continuo (ventiladores de 50 W). En la lámina 5.46, se muestra un día mayoritariamente con baja irradiación solar, lo que genera que las resistencia estén encendidas por mayores intervalos de tiempo, llegando a utilizar toda su potencia (1600 W) para mantener el aire caliente de la cámara a una temperatura de 50 ºC.



Lám. 5. 45.Funcionamiento de las resistencias eléctricas para un día despejado, Ta de 25 °C. Humedad relativa de 60 %



Lám. 5. 46.Funcionamiento de las resistencias eléctricas para un día con cielo con intervalo nuboso, Ta de 22 °C. Humedad relativa de 66 %.

5.4.7 Validación entre valores del ensayo experimental y simulado del modelo.

Para completar el estudio del secador hibrido se desarrolla el cálculo de error para la validación de los valores obtenido del modelo simulado (capitulo 4, tabla 4.26), con respecto a los valores obtenidos en las pruebas controladas.

La simulación del modelo se realizo en el programa computacional SolidWorks Flow Simulation que utiliza el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) que permite la simulación de un fluido y su transferencia de calor , basándose en aproximaciones numéricas de las ecuaciones diferenciales más habituales, permitiendo obtener aproximaciones numéricas e integrar una solución en el tiempo, de aquellas variables que rigen en el sistema.

La validación de los resultados de las simulaciones se realizo mediante la estimación de los parámetros estadísticos: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE en sus siglas en ingles) y el error medio (MBE en sus siglas en ingles) llamado también sesgo, que se evalúan respectivamente con las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{T_{m,i}-T_{ex,i}}{T_{ex,i}}\right)^2} \quad (6.3)$$

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{T_{m,i}-T_{ex,i}}{T_{ex,i}} \quad (6.4)$$

Donde:
$T_{m,i}$; Temperatura del modelo
$T_{ex\,i}$; Temperatura experimental
n; Tamaño de la muestra

El parámetro RMSE muestra las variaciones de los errores residuales entre los valores medidos y los estimados. El MBE es un indicador de sobre o subestimación por parte del modelo con respecto a los valores medidos. Valores positivos de MBE indican sobreestimación y negativos, subestimación

Los valores RMSE y MBE, se han calculado utilizando las temperaturas internas de la cámara de secado para medidas experimentalmente y las calculadas en las simulaciones para los 8 puntos de muestreo establecidos en la sección 5.3.1. Los valores estimados se presentan en la tabla 5.5.

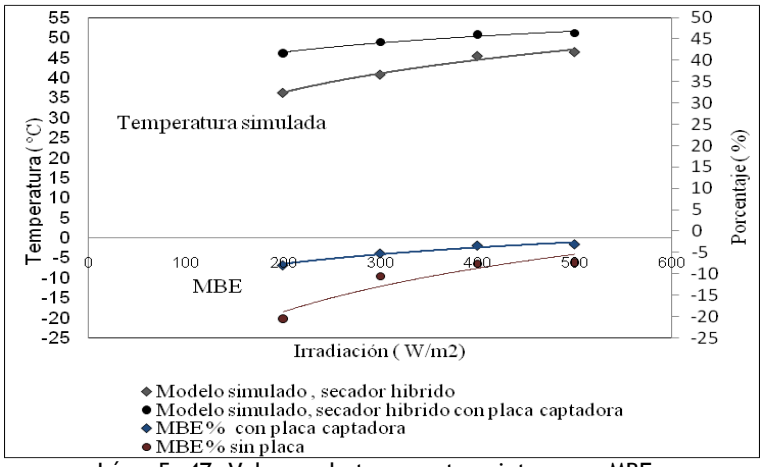
Tabla 5.5: Valores RMSE y MBE (%) del secador hibrido

	Secador híbrido con placa		Secador hibrido	
I (W/m^2)	RMSE (%)	MBE (%)	RMSE (%)	MBE (%)
200	7,57	-7,95	21,28	-20,55
300	5,95	-5,20	14,39	-10,57
400	5,12	-3,37	12,44	-7,68
500	4,57	-3,08	11,28	-7,30

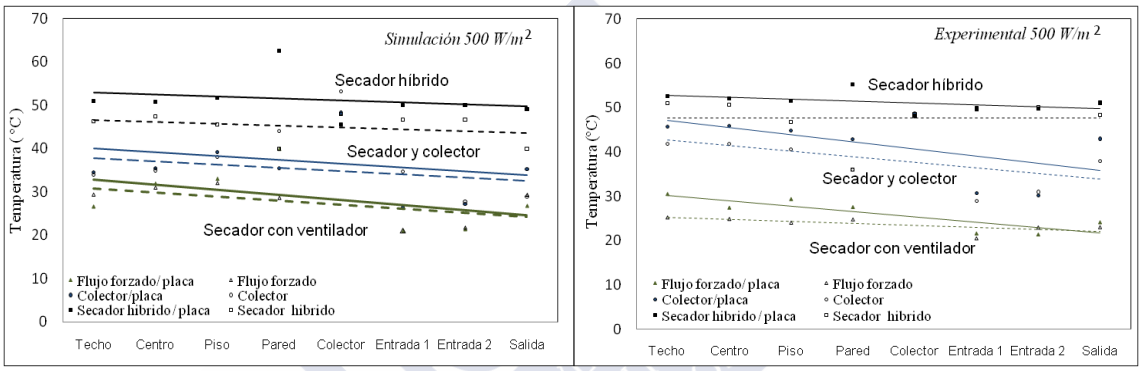
Los RMSE obtenidos al comparar los valores medidos con simulados, varían entre un 4,57 % y 7,57% en el secador hibrido con placa y entre 11,28% y 21,28% para el secador hibrido. En ambos modelos el mejor valor de RMSE ocurre a una irradiación de 500W/m^2 y el peor valor ocurre a 200 W/m^2. Así también los valores MBE muestran que el modelo CFD tiende a subestimar (valores negativos) los valores reales.

Finalmente los valores obtenidos para los parámetros estadísticos decrecen a medida que aumenta la irradiación incidente lámina 5.47, lo que significa que el modelo CFD puede estimar con mejores resultados el comportamiento experimental de la temperatura interna de la cámara a irradiaciones altas

En términos de la temperatura interna del secador hibrido con y sin placas absorbente, el modelo CDF subestimó los valores de temperatura promedio en 3.73 ºC y 8 ºC a 200 W/m^2 respectivamente En igual forma a 500 W/m^2 el modelo CDF subestima los valores en 0.3 ºC y 2.6°C.



Lám. 5. 47. Valores de temperatura interna y MBE.



a) b)

Lám. 5. 48.Comparación de resultados para 500 W/m^2 a 25 ºC a) modelo simulado, b) modelo experimental

A manera de ejemplo se hace una comparación a 500 W/m^2 entre los resultados obtenidos del modelo simulado y los valores obtenidos en los ensayos experimentales. En la lámina 5.48 se muestran los valores de la temperatura interna de la cámara registrada en los 8 puntos de medición. Al comparar los valores de temperaturas experimentales con los obtenidos mediante el modelo CFD, para el secador hibrido observamos que existen una concordancia entre ellos, alcanzando temperaturas máximas aproximadas de 48 ºC a 55 ºC. En el caso del secador con flujo forzado habría una diferencia de 1 a 2 ºC más, con respecto a los valores obtenidos experimentalmente. Respecto a los ensayos experimentales realizados en el secador mixto (cámara y colector) se observa una diferencia de temperatura interna de 6 a 2 ºC más en relación con el modelo CFD. En general, la curva de tendencia de temperatura de los modelos CFD se asemeja mucho a los experimentales

5.5 PRUEBA EXPERIMENTAL DE UN SECADOR MIXTO UTILIZANDO ENERGÍA AEROTERMIA.

En la sección anterior se ha analizado a diferentes condiciones, la aportación de calor de cada uno de los componentes térmicos y sistemas auxiliares eléctricos que forman parte del secador hibrido.

En esta sección se realiza el estudio de los resultados experimentales, obtenidos en los ensayos realizados a un secador mixto construido bajo el mismo diseño descripto, pero que utiliza como fuente complementaria el recurso de la energía geotermia somera de muy baja

entalpía, (aerotermia).El segundo prototipo experimental fue construido y evaluado en la Escuela Superior Politécnica del Litoral en la ciudad de Guayaquil-Ecuador,

Como se explicó en el capítulo 3, la aerotermia se relaciona con la capacidad del suelo para intercambiar o transmitir calor con la atmósfera, por diversos procesos, como la conducción, la convección, la radiación, la evaporación y la condensación de agua. La caracterización del comportamiento del flujo de calor resultante en el suelo se realiza mediante la evaluación del régimen térmico del suelo. Se considera que la parte del suelo situada a 50 cm o más de profundidad solo se ve afectada por los cambios estacionales de temperatura ambiental, pero no por los cambios a lo largo del día, por consiguiente para establecer el régimen de temperatura del suelo se emplea los valores de la temperatura a una profundidad de 50 cm como referencia. Finalmente, la distribución de la temperatura con la profundidad se conoce como el perfil térmico del suelo.

En nuestro caso, el empleo de la aerotermia se fundamenta en un sistema de intercambio de calor subterráneo, que tiene como función extraer el calor que se encuentra almacenado en el suelo.

El funcionamiento del sistema de aerotermia se basa en la circulación de un flujo de aire por el intercambiador calor enterrado a 70 cm de la superficie del suelo, lo que produce un aumento en la temperatura del fluido de trabajo aprovechando la capacidad calorífica o capacidad del suelo para almacenar calor.

Posteriormente, el fluido de trabajo ingresa al colector solar que intercepta la radiación solar global permitiendo elevar mucho más su temperatura, finalmente el aire caliente ingresa a la cámara de secado.

Los elementos que forman parte del segundo prototipo experimental se muestran en la lámina 5.49.



Lám. 5. 49. Prototipo experimental: Secador mixto conectado con energía aerotermia.

5.5.1 Instrumentación.

Para el registro de datos se utilizaron los siguientes equipos de medición:

Sensores de temperatura: Se utilizaron t termopares tipo K que permiten captar con mejor precisión los valores de temperatura para determinar la eficiencia del sistema. Teniendo un ± 0,2 % de precisión, con un error del ± 5%, tiempo de respuesta 0,1 s y un rango de máxima y mínima temperatura detectada de 250 a -50 C. Los sensores de temperatura utilizados para cada ensayo fueron previamente calibrados, por el laboratorio de caracterización energética y meteorológica (LACEM),

Piranometro de radiación global; Es un instrumento meteorológico diseñado para medir la irradiación en la superficie del plano. El instrumento funciona a través de un termopar unida a una placa negra que al calentarse producto de la radiación del sol, se produce una pequeña tensión de voltaje, lo cual, se puede conectar a cualquier equipo de adquisición de datos.

Se ha utilizado un pirómetro global, modelo CMP-11, que ira conectado a un multímetro digital (mV) , con un intervalos de medida entre 0 – 2000 W/m² , Sensibilidad de 7 – 14 μV/W/m² y rango espectral de 0,31 - 2,8 μm

Medidor de velocidad de aire; Se ha utilizado un termo anemómetro de hilo caliente, equipo digital Testo 404-V1.

Sistema de adquisición de datos: Se ha utilizado un registrador de datos o Data logger[18] con un rango de medición de temperatura de -270 a +1820 ° C. El sistema de adquisición de datos está conectado a un ordenador portátil dónde se hace el registro de información.

5.5.2 Metodología

Se ha evaluado el funcionamiento del secador y el sistema aerotermico. Para ello, se ha realizado los ensayos experimental se han divido en dos partes; la primera, consiste en caracterizar las temperaturas del perfil del suelo y evaluar la temperatura del fluido a la salida del intercambiador de calor. En segundo lugar, se analiza la aportación de calor de cada uno de los complementos del prototipo como son; intercambiador, colector solar y cámara de secado.

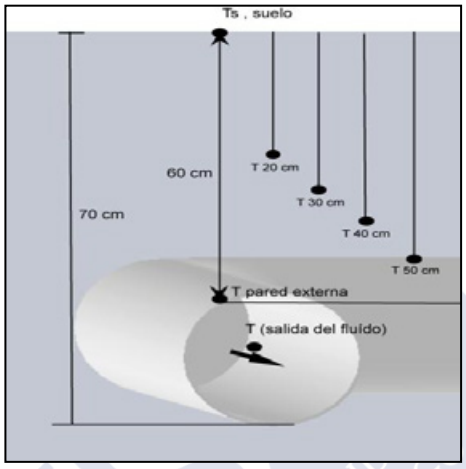
Durante las pruebas experimentales se ha medido los siguientes parámetros: temperatura de entrada y salida del intercambiador enterrado $T_{e,\ aereotermia.}$, $T_{s,aerotermia}$ (ºC) , humedad relativa (%) y temperatura ambiente (ºC), temperatura de entrada y salida del colector solar $T_{e,\ col}$, $T_{s,\ col}$ (ºC), velocidad del fluido caliente (m/s) en la salida del intercambiador y en la cámara de secado, tiempo de calentamiento de la cámara (s), radiación global en la superficie del suelo, colector y cámara de secado (W/m^2).

El procedimiento utilizado en cada una de las etapas de experimentación se describe a continuación:

[18] marca Pico Technology, modelo TC-08 de 8 canales para registro de temperatura (termopar con conector mini térmico estándar).

Sistema de Aerotermia.

Una vez instalado el intercambiador a una profundidad de 70 cm desde la superficie del suelo, se procede a colocar sondas o termopar a diferentes profundidades, tal como se observa en la lámina 5.50. Las temperaturas son registradas automáticamente por el sistema de adquisición de datos. Las mediciones de irradiación solar son obtenidas de la base de datos de la estación meteorológica de la ESPOL, instalada en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencia de la Producción, encontrándose a menos de 1 Km de nuestro prototipo experimental. Los datos experimentales se midieron durante 24 horas en un intervalo de diez minutos.



Lám. 5. 50.Perfil de temperatura en la superficie del suelo.

Secador adaptado con energía aerotermica.

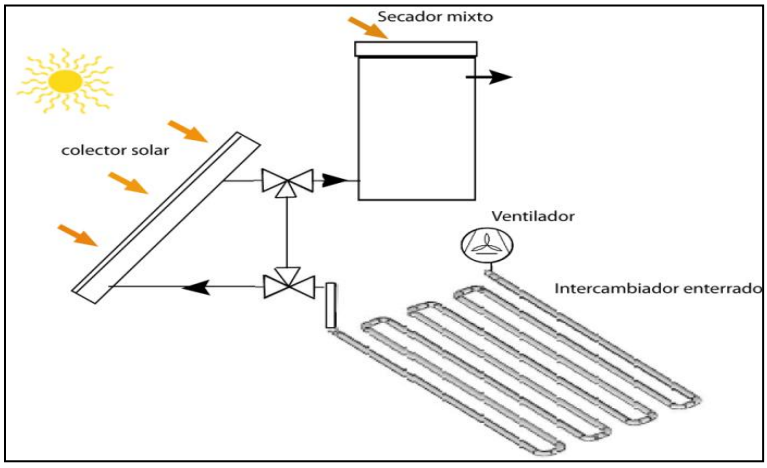
Con el fin de evaluar el comportamiento del prototipo experimental (cámara de secado, sistema geotérmico y colector) se ha realizado un exhaustivo trabajo de campo durante el cual se ha obtenido resultados claros del funcionamiento del sistema, registrando cada 10 minutos las siguientes variables principales:

- Temperatura del aire caliente: sondas instaladas en la salida del intercambiador, entrada y salida del aire del colector solar y en la cámara de secado (techo y en medio de la cámara). Los termopares se encuentran conectados a un sistema de adquisición de datos.

- Velocidad del aire: medición realizada en el ducto de salida de aire del intercambiador y en el ducto de entrada de aire a la cámara de secado (salida del colector)

- Temperatura y humedad relativa del aire: medidor USB ubicado cerca de la entrada de aire al intercambiador.

- Radiación global: Los datos son obtenidos de la estación meteorológica de la ESPOL.

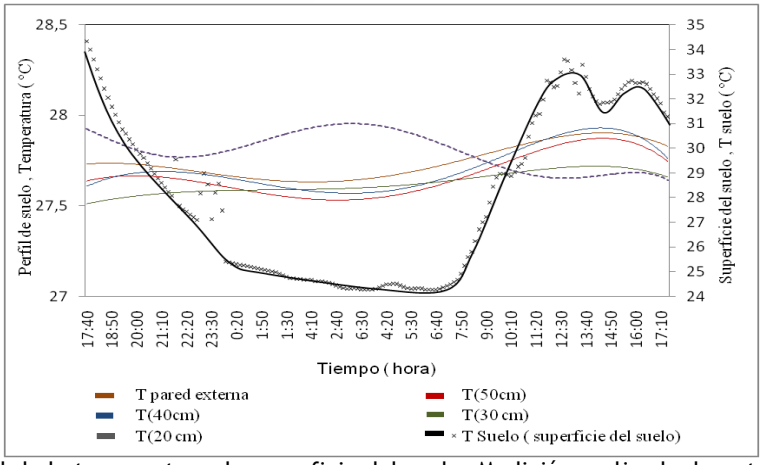


Lám. 5. 51.Esquema unifilar del sistema de aerotermia conectado al secado.

5.5.3 Resultados experimentales

Prueba 1: Sistema de Aerotermia:

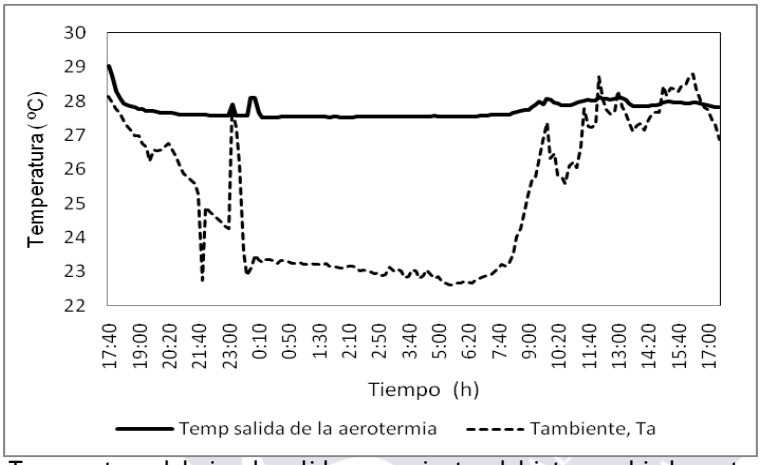
En la lámina 5.52 presenta un ejemplo de la variación diurna y respuesta térmica del suelo medido a distintas profundidades hasta la pared del intercambiador de calor a lo largo de un día con temperatura ambiental entre 22 a 24 ºC. Se observa que en los primeros centímetros superficiales (menores a 20 cm) existe una variación apreciable de la temperatura; Sin embargo, conforme descendemos en profundidad, se observa como las fluctuaciones de la temperatura del suelo se reducen paulatinamente. Además la temperatura del suelo presenta una tendencia o comportamiento sinusoidal, así como que su amplitud decrece en función de la profundidad a excepción de la temperatura superficial. Adicionalmente se observa que las temperaturas por debajo de los 20 cm de profundidad se mantienen relativamente estables con valores superiores a la temperatura superficial durante la noche.



Lám. 5. 52. Perfil de la temperatura de superficie del suelo. Medición realizada durante 24 horas.

Adicionalmente, analizando los valores de temperaturas en el suelo en periodo de 23:00 a 06:00 se puede observar que los puntos T (50), T(40) y T(30) presentan valores mayores temperaturas que la registrada en la superficie. La diferencia de temperaturas se mantiene relativamente constante en todos los puntos con un valor entre 3.5 a 4 ºC respectivamente.

A continuación podemos observar en la lámina 5.53 como el sistema de aerotermia proporciona una gran estabilidad a la temperatura de salida del fluido calorportador a lo largo del día. Cabe agregar que la temperatura de entrada corresponde a la ambiental. La velocidad de entrada del aire al intercambio de calor enterrado fue de 1.7 a 2 m/s durante la prueba.

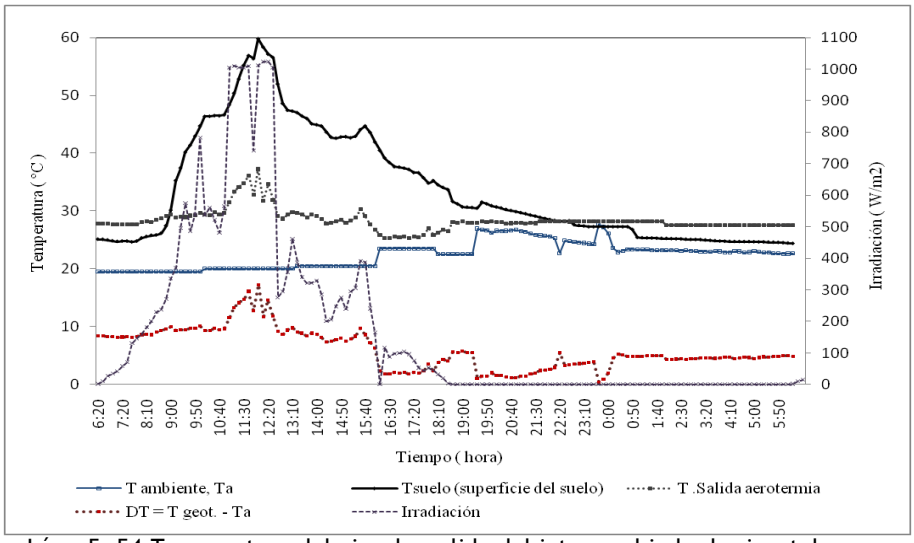


Lám. 5. 53 Temperatura del aire de salida proveniente del intercambiador enterrado.

Parte 2: Secador Mixto

Los ensayos experimentales del funcionamiento del secador se realizaron en un periodo de 12 horas de operación, comprendido desde la 6:00 de la mañana hasta las 18:00, registrando velocidad de aire en la salida de intercambiador de 1.7 m/s y velocidad de aire interna en la cámara de 0.85 m/s.

En primer lugar en la lámina 5.54 se presentan la temperatura del aire de salida del intercambiador de calor enterrado, la temperatura ambiente y la radiación solar, registrada cada 10 minutos durante 24 horas para otro día de ensayo. Obteniendo como resultado que durante el día el incremento de temperatura del fluido caloportador estuvo entorno de los 10 a 14 ºC y en la noche fue de 5 ºC más en referencia a la temperatura ambiente.

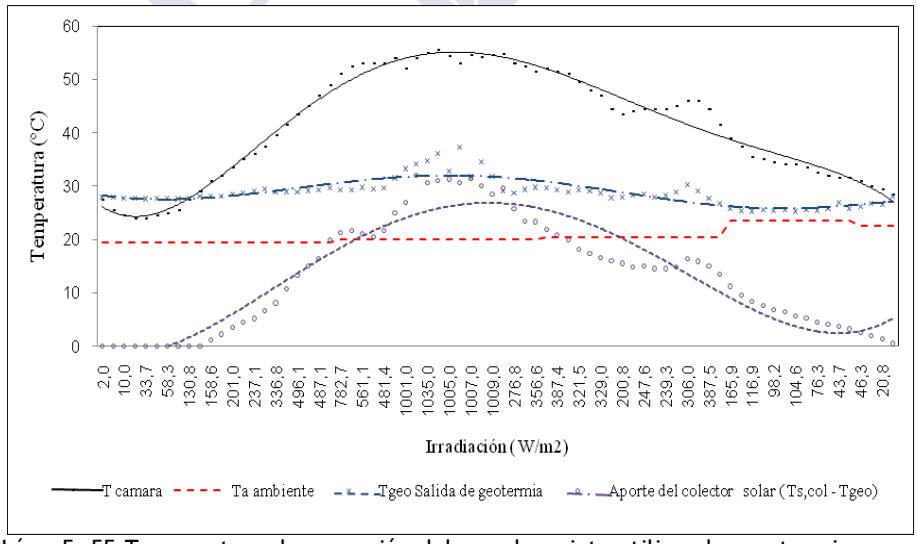


Lám. 5. 54.Temperatura del aire de salida del intercambiador horizontal.

Seguidamente, en la lámina 5.55 se muestra la temperatura de la cámara de secado y la ganancia térmica del colector en función de la irradiación. .Por otra parte se puede observar que la temperatura de salida de la aerotermia se mantiene estable y no depende de la irradiación. Cabe mencionar que define como ganancia térmica la diferencia entre la temperatura de salida del colector y la temperatura del mismo (temperatura de salida del sistema aerotermia)

El principal resultado a notar es como en las horas de baja irradiación, el aporte energético dependerá principalmente del sistema aerotermico. Sin embargo, en las horas de mayor irradiación el factor dominante será el colector solar. El tiempo de estabilización del sistema a la temperatura de funcionamiento (50º C) fue de 50 minutos a partir de las 10 a.m.

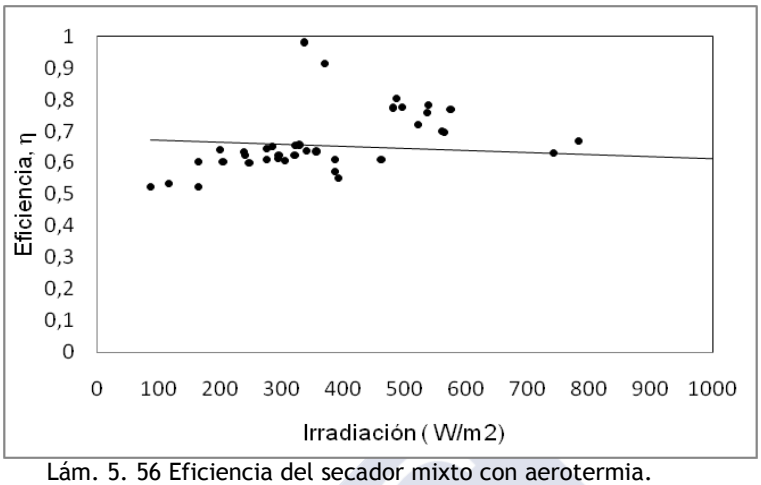
.



Lám. 5. 55.Temperatura de operación del secador mixto utilizando aerotermia.

Finalmente se determina eficiencia del secador mixto con aerotermia por medio de la relación del calor útil de la cámara de secado partido por la suma de energía producto de la radiación incidente en la cámara, el colector solar y del intercambiador.

En la lámina 5.56, se presenta la influencia de la radiación solar relacionada con la eficiencia del secador, como se puede apreciar en los resultados, el prototipo muestra una eficiencia entorno del 60 %.



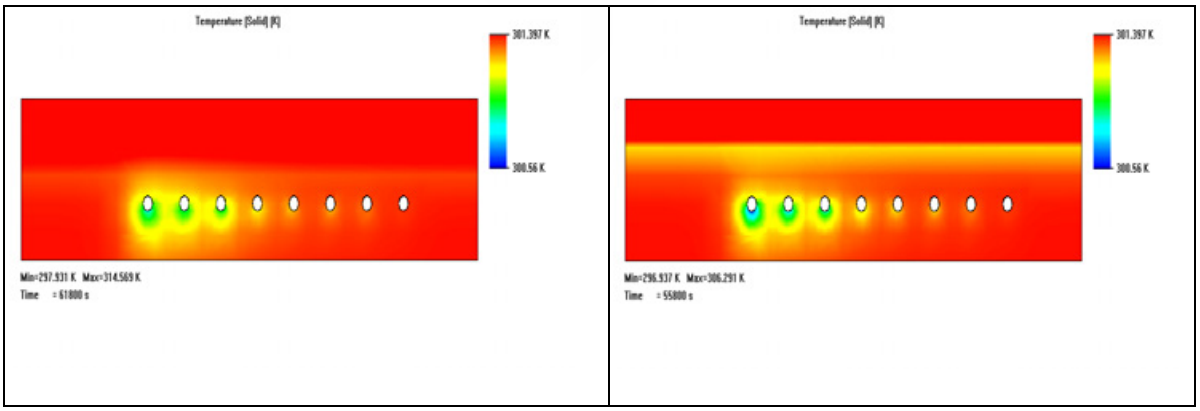
Lám. 5. 56 Eficiencia del secador mixto con aerotermia.

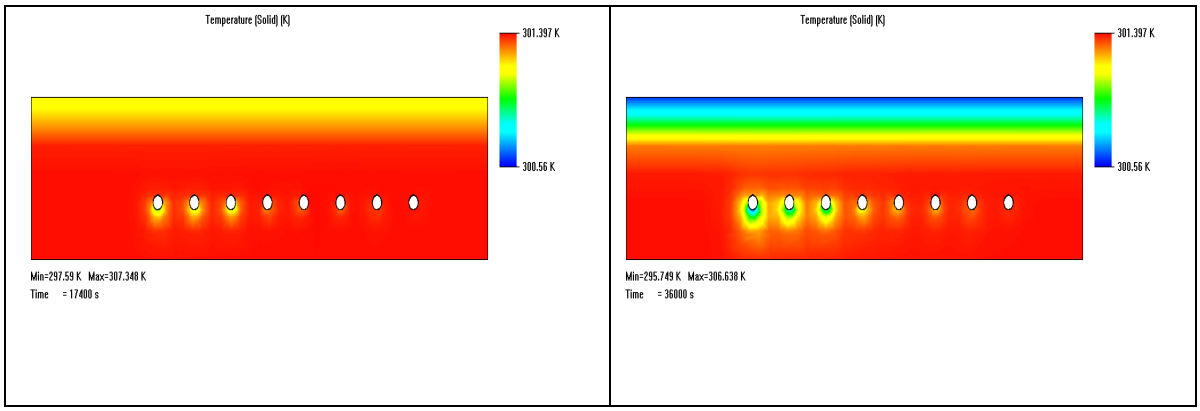
5.5.4 Comparación de resultados entre el modelo simulado y el experimental

Como ya se ha indicado en la sección anterior la aportación del sistema de aerotermia es lograr la estabilización de la temperatura del fluido de trabajo, considera como una variable fundamental en el diseño del secador.

Por este motivo se procede se ha realizado una simulación por medio de un modelo CDF del comportamiento del sistema aerotermia empleando *Flow Simulation*.

La lámina 5.57 muestra los resultados gráficos de la simulación utilizando como condiciones de entrada los datos registrados en la Prueba 1 y las propiedades termodinámicas del suelo descripta en el capítulo 4.





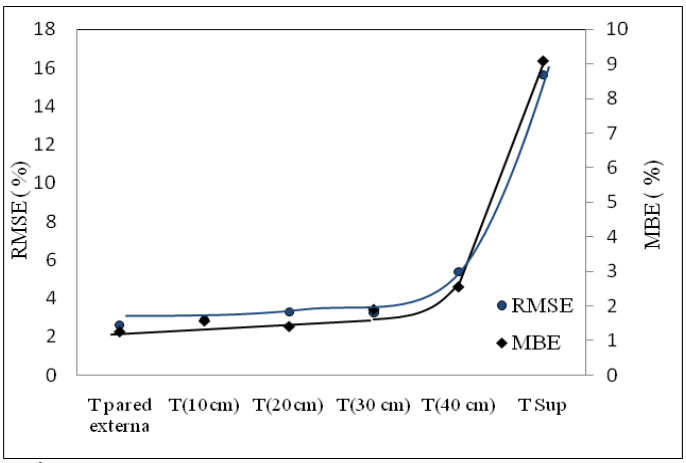
Lám. 5. 57. Simulación del calentamiento del subsuelo con el tiempo.

Para la validación del modelo CDF se procedió a calcular los parámetros estadísticos sesgo, RMSE% y MBE%. En la Tabla 5.6 se observa como el modelo CFD tiende a sobreestimar la de temperatura en todos los niveles del perfil del suelo con un valor medio 0.5 ºC, a excepción de la temperatura de la superficie que la sobreestima en un valor de 1.5ºC, siendo esta ultima influenciada por la radiación solar.

Tabla 5.6 RMSE y MBE (%), de la temperatura de perfil del suelo

	T pared	T (10 cm)	T (20 cm)	T (30 cm)	T (40cm)	T superficie	T fluido
Experimental	27,84	27,77	27,84	27,73	27,88	27,81	27,82
Modelo	28,20	28,21	28,24	28,27	28,60	29,40	28,05
Sesgo	0,36	0,44	0,39	0,54	0,74	1,591	0,227
RMSE %	1,79	2,12	2,07	2,51	5,14	15,54	0,83
MBE %	1,50	1,81	1,75	2,16	2,74	9,27	0,82

En relación con la temperatura del fluido se obtiene un sesgo de 0.227 con valores de RMSE % y MBE% relativamente bajos. Asimismo, en la lámina 5.58 se puede apreciarse como los valores de RMSE% y MBE% tiende a ser constante a partir de los 30cm de profundidad.



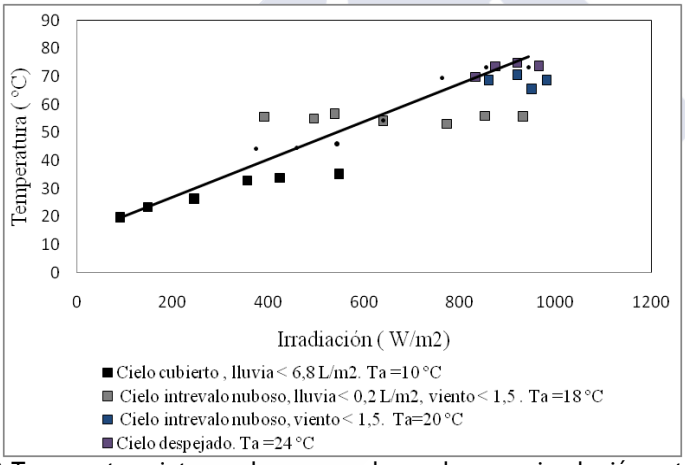
Lám. 5. 58. Promedio RMSE y MBE del perfil de suelo.

Tras el estudio comparativo se observa en la práctica se estiman errores RMSE% y MBE% bajos, lo que demuestra la capacidad que tiene el modelo CDF a replicar el comportamiento de la temperatura del suelo a profundidad mayores de los 30 cm. Además de estimar con un grado de error bajo la temperatura de salida del fluido caloportador

5.6 CAPACIDAD TECNOLÓGICA EN EL USO DE ALTERNATIVAS DE ENERGÍAS RENOVABLES

El funcionamiento de un secadero solar por convección natural presenta muchos inconvenientes, siendo el más importante, en no poder controlar la temperatura máxima que puede llegar en días con alta irradiación solar, superando la temperatura recomendable para deshidratación de la biomasa. Sin embargo, en días con nubosidad o lluvia, no llegaría a la temperatura de operación, y por tanto, el secado del producto dura varios días.

En la lámina 5.59 , se muestra la influencia de la radiación solar en la temperatura interna de la cámara de secado. Siendo evidente en la lámina, que en días despejados el secador alcanza temperatura sobre los 70 ºC siendo recomendable para el secado de ciertos productos, no obstante esta temperatura no es recomendable para la deshidratación del tipo de biomasa que estudiaremos en el siguiente capítulo.



Lám. 5. 59.Temperatura interna de un secadero solar con circulación natural.

Por lo anteriormente señalado, algunos diseños de secaderos solares fueron mejorados para controlar el aire de secado, adaptando un flujo de aire y sistemas complementarios como son los colectores solares u otro tipo de fuente energética.

En los secadores mixtos integrados por un colector solar y cámara de secado. El principal inconveniente, se encuentra en la fluctuación de la temperatura del aire precalentado, que provoca dificultades para mantener las condiciones constantes de la cámara. Como ya se ha comentado reiteradamente en este trabajo, con respecto a la influencia de las condiciones climáticas de la zona, no obstante estos sistemas logran mejorar la uniformidad del aire dentro de la cámara e incluso incrementar el calor útil necesario para la deshidratación de un producto.

En referencia a los secadores híbridos, estos fueron desarrollados para controlar las condiciones del aire durante todo el tiempo de secado e independientes de sol especialmente por la noche cuando no es posible utilizar la energía solar. Estando en capacidad de usar

fuentes alternativas como la estufas de biomasa, sistemas eléctricos, quemadores de gas, entre otros (B.M.A. Amer, 2009). Con esta premisa, y analizando los resultados obtenidos de los ensayos, se ha visto en primer lugar que el prototipo experimental permite lograr una velocidad de secado uniforme. Además el empleo de sistemas auxiliares y complementarios permiten reducir el tiempo de secado de un producto, garantizando posteriormente una mejor calidad del producto seco.

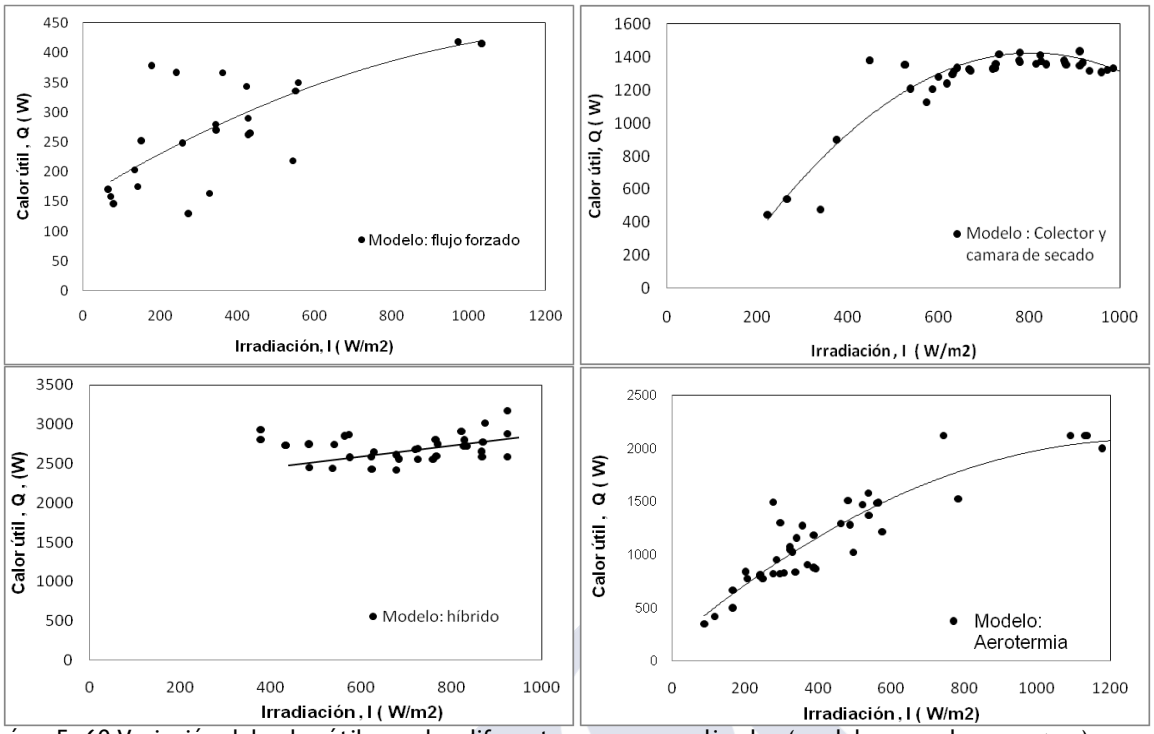
Respecto a nuestro último modelo analizado, siendo este, el secadero sostenible con aportación energética mixto solar y aerotermia, muestra buenos resultados en lo particular por la uniformidad que logra en la temperatura interna en la cámara de secado. El aire precalentado por el sistema de aerotermia permite una aportación estable de calor al colector solar (sección 5.5.3).

En la Tabla 5.7 se muestran la valoración de la eficiencia, aporte de energía, temperatura alcanzada y tiempo de estabilización del sistema en los modelos estudiados en vacio. Como se aprecia, los mejores resultados se obtienen en el modo de funcionamiento hibrido, seguido del modelo mixto con aerotermia. En ambos modelos se aprecia una mejora cuantitativa de la eficiencia y calor útil. Además, podemos observar que implementando al prototipo una circulación de aire continua con bajas velocidades (0.75 m/s) se consigue una mejora del sistema con respecto al modelo en modo pasivo.

Tabla 5.7 Comparación de tecnologías de secado utilizando energías renovables

Descripción	Temperatura máxima (ºC)	Q útil (W)	Eficiencia (%)	Tiempo de estabilidad.
Secador solar con circulación natural	80	131 a 524,5	10 al 60	60 min
Secador solar con flujo forzado	41.2	229,7 a 425	20 al 70	50 min
Secador solar mixto (colector solar)	50.8	512 a 1400	30 al 70	40 min
Secador hibrido	52	2888	50 al 90	40 min
Secador mixto con aerotermia	52	362 a 2200	60 al 66	40 min

En la lámina 5.60 se muestra los resultados del calor útil ganado en los diferentes modelos de los secaderos sostenibles. Se observa claramente que la mayor ganancia de calor en la cámara de secado se logra en sistemas híbridos.



Lám. 5. 60 Variación del calor útil para los diferentes ensayos realizados (modelos con placas negras).

5.7 CONCLUSIONES

Se han realizado ensayos experimentales en cada uno de los compontes del prototipo y del secador hibrido sin carga, tanto en condiciones controladas como en condiciones ambientales. Con el fin de estudiar el funcionamiento, capacidad térmica, ganancia y eficiencia del secador.

Las conclusiones obtenidas son:

Optimización de la velocidad del aire, temperatura y tiempo de estabilización.

Evaluados los diferentes rangos de velocidad del aire en cada componente del secador hibrido se determino que el flujo del aire tuvo efectos significativos sobre la temperatura y tiempo de estabilización del sistema, a velocidades mayores a 2 m/s se logra una temperatura interna menor de 3 a 7 ºC en comparación a utilizar una velocidades de aire de 1 a 1.5 m/s. Por lo tanto que a bajas velocidades se obtiene una mejor estabilización de la temperatura interna de la cámara. Por otro lado se muestra en los ensayos realizados en condiciones controladas y en condiciones ambientales reales, se consigue la temperatura de diseño (50 ºC) a partir de irradiaciones de 500 W/m^2, una vez alcanzado este valor el sistema auxiliar dejara de funcionar.

La temperatura ambiente será otro de los factores que afecta drásticamente el funcionamiento de un secador solar. Al analizar la cámara de secado sin un medio de disipación de calor, se observa que en días muy malos, el máximo incremento de temperatura interna de la cámara alcanzada fue 11 ºC, perdiendo o ganancia 1 ºC de temperatura en referencia de la variación de la radiación solar por cada 10 min. Por lo que se justifica haber adaptar otra fuente de energía que compense la temperatura de diseño, para mantener la cinética del secado constante de un producto.

Se ha determinado que para un secador solar por efecto invernadero la máxima temperatura alcanzada puede ser 80 ºC para irradiaciones superiores a 700 W/m^2, no instante en días con irradiaciones inferiores a 400 W/m^2 se logra un incremento entre 8 ºC a 12 ºC con respecto a la temperatura ambiente. Para un secador mixto el incremento de temperatura a bajas irradiaciones varía entre 10 a 15 ºC y altas irradiaciones a 30 ºC en los observo este moldeo una buena uniformidad del flujo caliente que circula dentro de la cámara. Notándose que al utilizar una fuente de calor (resistencia) como equipos de apoyo nos ayudara a mantener una temperatura estable en el sistema para ambos modelos con placa y sin placa, es decir, a partir de 400 W/m^2 el sistema alcanza la temperatura de operación.

En el caso de adaptar un sistema geotérmico horizontal de baja entalpia en el prototipo se determina que en las horas de baja irradiación, el aporte energético dependerá principalmente del sistema aerotermico. Sin embargo, en las horas de mayor irradiación el factor dominante será el colector solar.

El tiempo de estabilidad del prototipo experimental fue de 40 min para el secador solar-fotovoltaico, solar mixto y solar aerotermico. Como es de esperar en un secador solar funcionando solo como efecto invernadero el tiempo de estabilidad de la cámara es mayor. Por otra parte a través se ha comprobado la buena resistencia térmica de los materiales utilizados en la estructura de la cámara de secado.

Estimación de la ganancia del prototipo: Los mejores resultados de ganancia se muestran en secador hibrido siendo superior a 1.3, mostrando resultados similares entre los ensayos realizados en condiciones controladas y en condiciones climáticas ambientales reales. El secador mixto presenta una ganancia de 1 para ambos modelos analizados (con placa y sin placa) obteniéndose buenos resultados a irradiaciones superiores a 300 W/m^2. Igualmente se determino la ganancia del prototipo funcionando solo como un secador solar siendo de 0.69 a 0.72. En esta caso el comportamiento de ambos modelos fue diferente por motivo que la placa absorbente negra dentro de la cámara de secado produce un aumento visible de la transferencia de calor, dando lugar a una mayor eficiencia térmica cuando el flujo de aire circula sobre la placa, este efecto, se ve claramente cuando las irradiaciones son bajas.

Optimización de la velocidad del aire y eficiencia del colector solar. La comparación de resultados obtenidos en ensayos mostró mejores resultados a una velocidad constante de 1.5 m/s en el colector solar. La eficiencias del colector solar fue de 52 a 69 %, para una inclinación de 20º, con un porcentaje de error del 5.4 % con respecto al rendimiento teórico.

Un colector de placa plana con una sola pasada de aire es menos eficiente a irradiaciones menores de los 350 W/m^2, por otra parte, la eficiencia térmica del colector se vio afectada principalmente a bajas temperaturas ambientes.

Estimación de la eficiencia de secador: De los ensayos realizados en los modelos se dio que los mejores resultados se obtienen en el modo de funcionamiento hibrido con una eficiencia del 50 % y 90 %, seguido del modelo mixto con aerotermia con el 60 %. En ambos modelos se aprecia una mejora cuantitativa de la eficiencia y calor útil y adaptando una placa captadora al sistema. Además, podemos observar que implementando al prototipo una circulación de aire continua con bajas velocidades (0.75 m/s) se consigue una mejora del

sistema con respecto al modelo en modo pasivo. Por otra parte, se ha determinado que la eficiencia del secador solar con colector fue del 30 al 70 % siendo superior a lo indicado en textos bibliográficos para estos tipos de secaderos siendo alrededor del 20 % al 50 %.

El efecto de la placa captadora en el sistema. Podemos indicar que colocando una la placa captadora en el sistema nos permite un mejor intercambio de calor con el aire a baja irradiaciones y también evita cambios bruscos de temperatura en los intervalos de descenso de la irradiación o cuando algún componente del sistema deje de funcionar por cortos intervalos de tiempo. En los ensayos del prototipo experimental se observó un acaro resultado que al colocar una placa captadora en la cámara se consigue un aumento del 5 al 10 % en la eficiencia con respecto al modelo sin placa.

Estimación de la temperatura del terreno y del fluido caloportador en el intercambiador enterrado (aerotermia). A partir del perfil de temperatura del suelo se registraron temperaturas estables a 70 cm de profundidad, con un incremento 5 ºC más en referencia a la temperatura ambiente en la noche, mientras que en el día el incremento de temperatura del fluido caloportador fue de 10 a 14 ºC. La temperatura del suelo presenta una tendencia o comportamiento sinusoidal, así como que su amplitud decrece en función de la profundidad a excepción de la temperatura superficial. Adicionalmente se determina que temperaturas por debajo de los 20 cm de profundidad se mantienen relativamente estables con valores superiores a la temperatura superficial durante la noche. Concluyendo de esta manera que el sistema de aerotermia proporciona una gran estabilidad a la temperatura de salida del fluido caloportador a lo largo del día.

Estimación de la energía suministrada por el sistema fotovoltaico. La instalación fotovoltaica propuesto nos permitió satisfacer la demanda energética del sistema eléctrico de 1650 Wp en total, comprendiendo dos conjuntos de resistencias y ventiladores de 825 W cada uno. El consumo energético del sistema auxiliar en días con cielo despejado el consumo energético del sistema auxiliar será minino, funcionando el secadero gran parte del tiempo solo con la aportación de la radiación solar. No obstante, se hace evidente el uso constante de la fuente eléctrica en días muy malos, por otra parte se logra un ahorro energético en el consumo eléctrico entre 10 a 2.4 kW.día.

Validación del ensayo experimental y simulado del prototipo: Mediante la estimación de los parámetros estadísticos RMSE y MBE, se ha obtenido comparando los modelos sin placa y con placa captadora , que , para ambos modelo el mejor valor de RMSE ocurre a una irradiación de 500W/m2 y el peor valor ocurre a 200 W/m2. Así también los valores MBE muestran que el modelo CFD tiende a subestimar los valores reales al simular el prototipo con irradiaciones inferiores de 500 W/m^2. Pero al analizarse con la irradiación incidente mayor al valor antes indicado el modelo CFD estima con mejores resultados el comportamiento experimental de la temperatura interna de la cámara a altas irradiaciones

CAPITULO 6.
RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SECADOR HIBRIDO EN LA FASE DE SECADO DE LA BIOMASA ALGAL

6.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se expusieron los resultados experimentales del funcionamiento del prototipo experimental en vacío. Por un lado se indicaron los inconvenientes y beneficio del secador por cada uno de los componentes, y por otro, se obtuvieron conclusiones sobre la influencia de los diferentes parámetros externos e internos sobre el equipo experimental.

En el capítulo 4 se valoró la cinética de secado de las algas marinas. Determinando la curva de velocidad de secado característica de las muestras, las pérdidas de humedad y el tiempo máximo que deberá deshidratarse la muestra para evitar daños colaterales en el producto.

A partir de las premisas anteriores, el objetivo de este capítulo es evaluar el funcionamiento de prototipo experimental, por medio de la deshidratación de la biomasa algal. La función principal de un secadero es, reducir el contenido de humedad de un producto, mediante la aportación de una cantidad adecuada de calor, disminuyendo relevantemente la humedad del aire caliente e incrementando su capacidad de arrastre de humedad.

En esta sección se presentan los resultados y análisis experimental de la cinética de secado realizada en la macroalga, además del funcionamiento y eficiencia experimental del prototipo durante la etapa de deshidratación.

En primer lugar se describen la metodología utilizada para la recolección y análisis de datos, seguido de la descripción de los equipos experimentales que se han utilizado para el desarrollo del trabajo, así como la metodología o procedimiento para evaluar la cinética de secado de la biomasa y el prototipo experimental.

Finalmente, se presenta los resultados experimentales del funcionamiento del secador hibrido para deshidratar una carga máxima de 13 kg de biomasa húmeda, desarrollados en condiciones controladas de laboratorio y en condiciones climáticas al aire libre. En los ensayos se determinan; cinética de secado de la biomasa, tiempo de secado, tipo y adecuación de bandejas, temperatura y humedad interna de la cámara, consumo de energía y eficiencia del secado y del secadero.

Las muestras de algas de Galicia utilizadas para llevar a cabo este estudio fueron en parte recolectadas en la costa de A Coruña y en parte suministradas por la productora gallega; ALGAMAR, localizada en Redondela , Pontevedra , España. Recolectadas en la costa de la Rias Baixas de Galicia y fueron recogidas en las fechas óptimas para cada especie.

6.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se evaluará la cinética de secado óptima para el producto algar, utilizando un secadero hibrido. Los parámetros dominantes para un secado uniforme son; el espesor de la biomasa colocada en las bandejas, el tipo de bandeja, o mejor, las dimensiones de la rejilla y el tipo de material. Igualmente es de interés el control de la tasa de evaporación de la humedad superficial de la muestra. En esta misma direción, dado que se plantea un secado sostenible, también se tendrá en cuenta el consumo energético como parámetro de mérito.

En relación con la biomasa estudiada; las macroalgas de las especies *Laminaria ochroleuca* , *Undatia pinnatífida* fueron recolectadas en las Rías Baixas y proporcionadas frescas por el productor. Por otra parte las especies *Himanthalia elongata* y *Sargassum* fueron recogidas frescas en la costa de La Coruña (ver Tabla 6.1). Todas las pruebas experimentales se realizaron durante el año 2013. El contenido en humedad inicial en base húmeda de cada muestra, fue entre 77 y el 80 %.

Tabla 6. 1 Sitios de recolección de la macroalga.

Especie	Nombre común	Lugar de recolección
Undaria pinnatífida	Wakame	Rias Baixas
Laminaria ochroleuca	Kombu	Rias Baixas
Himanthalia elongata	Espagueti de mar	La Coruña
Sargassum		La Coruña

El objetivo de los múltiples ensayos que se mostrarán a continuación, es determinar el tiempo y la velocidad de secado de la biomasa, eficiencia del secado, eficiencia del secadero, energía consumida en el proceso de secado. Durante las pruebas desarrolladas en el proceso de secado de la biomasa algal se ha analizado el funcionamiento del secadero inicialmente en condiciones de laboratorio, para posteriormente realizar la comparación en condiciones climáticas ambientales.

En el procedimiento experimental es necesario llevar un control de distintos parámetros de mediciones dentro de la cámara de secado, para ello se ha hecho uso del protocolo de medición [19]el cual contempla los siguientes parámetros;

- Humedad del aire caliente a la entrada
- Humedad de aire caliente dentro de la cámara
- Humedad del producto (cada bandeja)
- Humedad de aire en la salida
- Temperatura del aire caliente proveniente del colector solar
- Temperatura del sistema de aportación eléctrico (sistema auxiliar)
- Temperatura interna de la cámara
- Temperatura producto (cada bandeja)
- Temperatura de salida de aire
- Velocidad de aire a la entrada
- Velocidad de aire que circula por las bandejas
- Velocidad de aire a la salida

[19] Protocolo de medición ; anexo E

Para asegurar la fiabilidad de los resultados, los equipos e instrumentos de medición utilizados fueron descritos en capítulos precedentes.

A la par , se registraron las variables climáticas del lugar como son ; temperatura(ºC), humedad relativa (%) , radiación solar (W/m^2), velocidad de viento (m/s) y horas de sol; dichos datos fueron obtenidos de la base de datos de la estación meteorológica Santiago Eoas perteneciente a Meteogalicia.

6.2.1 Operación de secado y evaluación del prototipo experimental en condiciones controladas o de laboratorio.

Previo a evaluar el secador hibrido en condiciones climáticas, ha sido necesario determinar el espaciamiento óptimo del conjunto de bandejas para asegurar en lo posible un secado homogéneo del producto por cada bandeja. Al mismo tiempo, se analiza el funcionamiento del secadero a cuatros diferentes irradiaciones producidas por un conjunto de lámparas halógenas (ver capítulo 5 para detalles).

El procedimiento experimental utilizado para evaluar los parámetros y factores que influyen en el proceso de secado se describe a continuación.

Selección de bandejas.

Para el ensayo se utilizaron tres bandejas de dimensiones de 70 x 40 cm, construidos de diferentes materiales:

- Una bandeja metálica elaborada con acero inoxidable para productos alimenticios.
- Una bandeja elaborada con marcos de maderas y lana de nailon (mallado de 3 cm)
- Una bandeja elaborada con marcos de madera y rejillas plásticas. (1mm).

Durante las pruebas, las bandejas con biomasa son colocadas en el carro porta bandejas a una distancia de 8 cm cada una, para probar la uniformidad de la tasa de evaporación entre el flujo de calor y la muestra a secar. El control de la pérdida de peso se realizó en intervalos de 10 min, utilizando una balanza de precisión digital conectada a un sistema de adquisición de datos. Finalmente se mide el peso en base seca, la humedad y la actividad de agua de las tres muestras. Los ensayos son repetidos dos veces cambiando la posición entre las bandejas con el fin de obtener los mejores resultados posibles a través de la variación temporal de la humedad en relación al tipo de bandeja utilizada.

Distribución de las bandejas en el carro porta bandejas.

Una vez seleccionado el tipo de bandeja, se procede a llenar cada una con 628 g de biomasa esparcida adecuadamente sobre su superficie. Posteriormente las bandejas llenas son colocadas en los carros porta bandejas distribuidas a diferentes distancias entre ellas. Los ensayos son repetidos en varias ocasiones cambiando la configuración entre las bandejas hasta encontrar la mejor distribución que garantice un secado casi estable en todas las muestras deshidratadas. Para la pruebas se utilizaron 14 bandejas y dos carros porta bandejas. Cabe agregar que durante el secado el control de la pérdida de peso se realizó cada hora.

Masa y espesor óptimo de la muestra:

En los ensayos se analizaron tres muestras con diferentes espesores de 0.5, 1.0 y 1.5 cm. Partiendo del mismo procedimiento anterior, el alga es esparcida sobre la superficie de las bandejas, controlando el espesor de la muestra con un calibrador con display digital (calibre pie de rey, con una resolución de 0.01 mm). Durante las pruebas se mide el peso inicial y final, así como la humedad en base seca y el espesor final de las muestras.

A partir de los valores obtenidos de los ensayos experimentales se determinaron la variación temporal de humedad con respecto al tiempo de secado y la influencia del espesor del producto en la velocidad de secado.

Funcionamiento de la cámara de secado.

Una vez colocado los carros porta bandejas con macroalgas en la cámara de secado (peso por bandejas 624.8 g), se procedió a evaluar el funcionamiento del prototipo experimental y monitorización de las principales variables o parámetros de mérito que influyen en el proceso de secado como son; temperaturas de secado y de la muestra (º C), humedad en la cámara (%), pérdida de peso (g), y energía consumida durante el secado de la biomasa (J/h). A la vez se registraron variables externas del laboratorio como; temperatura (º C), humedad relativa (%), radiación global en la superficie de la placa (W/m^2).

El procedimiento de operación del secador hibrido y puntos de muestreo, siguen el mismo principio metodológico explicando anteriormente en la sección 5.3.2, donde se evaluó el secadero en vacío.

Las pruebas experimentales se realizaron con irradiación incidente de 500 W/m^2, 400 W/m^2, 300 W/m^2 y 200 W/m^2, producida por medio de un conjunto de lámparas. El sistema funciona en modo híbrido (colector solar, resistencias eléctricas y ventilador). Con este ensayo se pretende analizar la estabilidad de la cámara de secado, la energía consumida durante el secado de la biomasa (J/h) , energía suministrada por los componente de fuente de calor del secador hibrido y la eficiencia del secado. Se hace conveniente indicar que el registro de la información se realizó cada 10 minutos durante el periodo que dura el proceso de secado (entre 6 y 8,5 horas).

6.2.2 Evaluación del prototipo experimental en condiciones climáticas libres.

Culminadas las pruebas del secadero en vacío (resultados del capítulo 5), se procede a evaluar el comportamiento del prototipo experimental a tres diferentes cargas de biomasa siendo de 6,30 kg, 10 kg y 13,3 kg, divididas en cada caso en 10 bandejas. La parte experimental se divide en tres etapas de análisis: El primer ensayo consistió en realizar la comparación del proceso de secado del alga, al exponerse directamente al sol (secado natural) y al ser deshidratada con un secadero solar. La segunda prueba consiste en utilizando el secador solar mixto (cámara y colector solar). El último ensayo se evalúa la deshidratación de la biomasa en el secador hibrido. El objetivo de las pruebas es evaluar la capacidad de secado, la eficiencia térmica del sistema, la eficiencia del secado, el consumo de energía y la respuesta a las condiciones ambientales.

El primer ensayo realizado en condiciones ambientales, se desarrolla comparando el tiempo de secado de dos bandejas de 1000 g de alga, siendo deshidratada una de ellas por secado natural donde el productos se exponen directamente a la radiación solar encontrándose esparcida sobre una bandeja. Al mismo tiempo una segunda muestra es secada dentro del secador solar. Durante el ensayo se determina el tiempo de secado, la humedad del producto final y la actividad de agua, así como las características físicas que puedan dañar el producto, como un exceso de temperatura o un exceso de humedad ambiental.

El análisis se ha desarrollado esencialmente como medida comparativa de la eficiencia del prototipo del secadero solar diseñado.

Se conoce que el secado directo al sol, es uno de los procesos más utilizados en países en vías de desarrollo para el secado de productos especialmente agrícolas. Aunque es un proceso de muy bajo costo, tiene limitaciones en términos del producto que nos encontramos analizando en este trabajo, al ser una biomasa que fácilmente se puede deteriorar al exponerse por largos periodos directamente al sol, siendo este uno de los factores que influyen en el proceso de secado natural al exponer el producto directamente a la variación climatológica, dificultando el control del proceso.

El segundo ensayo; consiste en analizar el funcionamiento del secador solar mixto durante el proceso de secado a tres distintas cargas de biomasa (6,3 kg, 10 kg y 13,3kg). En el ensayo se determina el tiempo de secado, influencia de la humedad y la masa en el secado además de la energía consumida y eficiencia del secado. Durante las pruebas experimentales se registran las variables principales como: temperatura dentro de la cámara, temperatura de salida del colector, velocidad del aire y temperatura ambiental. La radiación global incidente se obtiene a través del portal electrónico de Meteogalicia[20] a nivel local. El mismo procedimiento se realiza adaptando una placa captadora.

Como tercer ensayo; se procede a evaluar el secado de la biomasa utilizando el secador hibrido para las tres diferentes cargas. Durante los ensayos se han registrado varios parámetros esenciales los mismos que fueron indicados anteriormente en la metodología de evaluación del prototipo, para poder determinar la variación temporal de humedad, la curva de cinética de secado de la biomasa a una temperatura de deshidratación de 50 ºC, energía consumida para el secado de la muestra, energía producida y la eficiencia experimental del secado. Adicionalmente, se registra el consumo de energía eléctrica de las resistencias que se encuentran conectadas al sistema fotovoltaico, y que abastece al secador durante el proceso de secado.

Finalmente, se adapta una placa negra a la cámara de secado y se procede nuevamente con las mediciones.

[20] http://www.meteogalicia.es/web/index.action

6.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Como ya se ha señalado en capítulos precedentes, el prototipo experimental consta de un colector solar, una cámara de secado tipo domo con dimensiones de 1.36 x 2 x 1 m, en ella se ha dispuesto dos carros porta bandejas con capacidad de 14 bandejas de 70 x 40 cm, soportando cada carro una carga máxima de biomasa húmeda entre de 7 a 9 kg . Este diseño nos permite controlar de manera fácil el proceso de secado, partiendo desde el ingreso de la carga y descarga del producto, colocación de los instrumentos y equipos de registro de datos sin dificultad en el interior de la cámara, para obtener valores confiables que nos permitan determinar la cinética de secado del producto y la eficiencia del secado.

6.3.1 Análisis de tipo de bandejas y distribución apropiada en los carros porta bandejas

A continuación se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizadas. En particular, el análisis de la cinética de secado, los ratios de humedad y la velocidad de secado respecto al tiempo de operación, variables fundamentales para valorar el diseño de la bandeja y distancia apropiada entre bandejas para optimizar el secado de la biomasa.

Tal como se ha indicado inicialmente, se pretende valorar tres diseños de bandejas de dimensiones de 70 x 40 cm. Se han seleccionado dos bandejas perforadas una de rejilla de 1 mm, otra de malla de 3cm y una bandeja no perforada construida de metal. El peso de las bandejas es de; 221.72 g (rejilla 1 cm), 216.81 (malla de 3 cm) y 1336.49 g (metálica).

Los ensayos fueron realizados para una cantidad estándar de producto húmedo de 1000 g por bandeja, tiempo de secado de 8 horas, humedad inicial del 85 %, velocidad de aire de secado entre 0.75 a 0.9 m/s m y temperatura de la cámara a 50 ºC. Para los ensayos se han utilizado macroalgas de especie laminar.



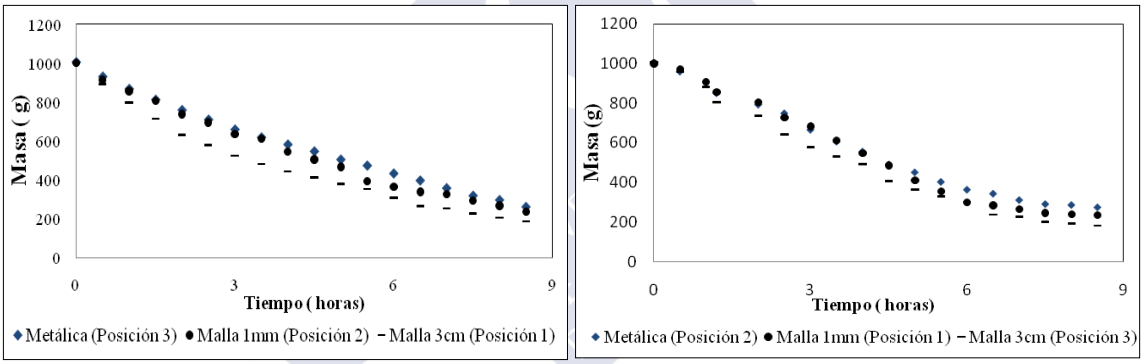
Lám 6. 1. Pruebas experimentales y selección de bandejas

En la Tabla 6. **2** se presenta el contenido de humedad en base húmeda (X_{wb}) y la masa final deshidratada (W_s), para las diferentes bandejas estudiadas. Como se aprecia, la bandeja elaborada con una distribución de malla de 3 cm, presenta mejores resultadas para el secado de la biomasa durante los ensayos realizados, permitiendo este modelo una mejor interacción por convección de calor entre el aire caliente y el producto a secar.

Tabla 6. 2 Porcentaje de humedad, masa final de tres muestras deshidratada en diferentes diseños de bandejas

Bandejas	Ensayo 1			Ensayo 2		
	Posición	Masa final (g)	% humedad final	Posición	Masa final (g)	% humedad final
Metálica	3	243,00	42,72	2	273,8	44,79
Malla de 1 cm	2	235,50	35,81	1	235,10	35,67
Malla de 3 cm	1	187,19	19,25	3	182,00	16,94

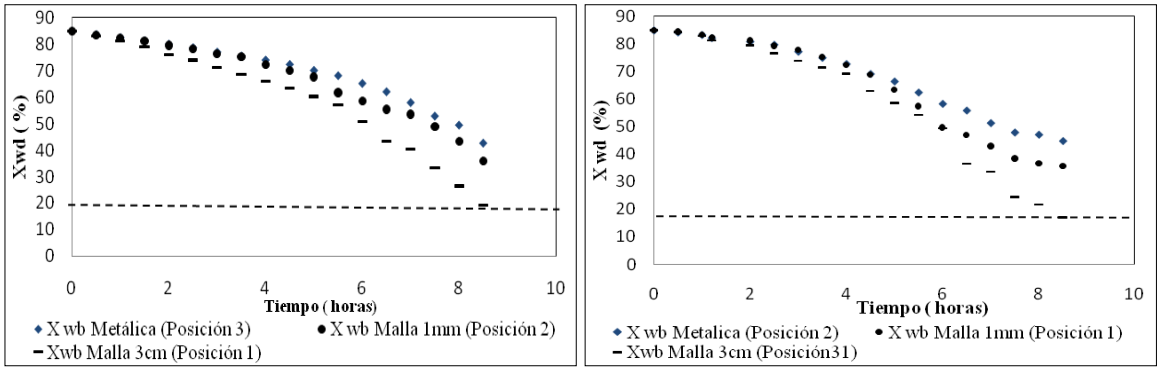
En la lámina 3.2, se muestra los resultados de la variación o pérdida de peso de la biomasa para un periodo de secado de 8 horas. Para los dos ensayos realizados, se finalizó la prueba de secado cuando se obtuvo un contenido de humedad final del producto entre el 20 al 15 % en base húmeda, siendo esta la condición ideal para su almacenamiento (ver capítulo 4). Como es de esperar, la curva de secado de la biomasa presente en la bandeja con malla de 3 cm, en el periodo de velocidades constante presenta una mayor tasa de evaporación de agua (pérdida de masa) con respecto a las otras dos muestras colocadas en la bandeja metálica y con rejilla de 1 mm, observándose que estas últimas presentan la misma tendencia de decrecimiento lineal.



Lám 6. 2 Variación del peso con respecto al tiempo.

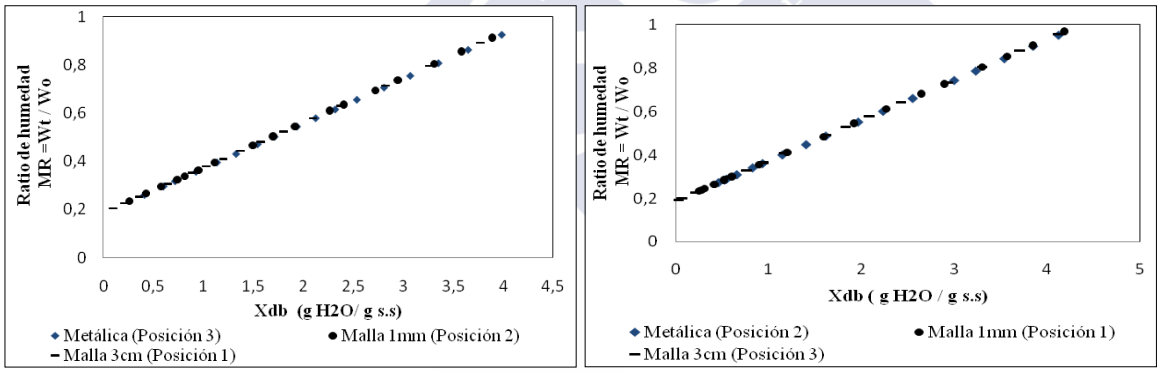
Para el análisis de los resultados se han utilizado las expresiones presentadas en el capítulo 4. En particular el porcentaje de contenido en humedad en base humeda de la muestra[21] y el ratio de humedad determinada a través de la relación de la masa en cada instante de secado con respecto a la su masa humedad inicial[22]. En la lámina 6.3, se observa la humedad final alcanzada en las tres muestras durante un periodo de 8 horas de secado siendo de 42.7 a 44.8 % de humedad de agua contenida utilizando una bandeja metálica de acero inoxidable, 35.61 a 35.81 % de humedad de agua contenida utilizando una bandeja con rejillas de 1mm de distancia, y entre 16.94 a 19.25 % de humedad final utilizando una bandeja elaborada con mallas de nylon de 3 cm de distancia.

[21] $X_{wd} = (W_o - W_s)/ W_s$
[22] $M_R = M_t / M_o$



Lám 6. 3 Variación temporal de la humedad en relación al tipo de bandeja utilizada

La lámina 6.4 muestra el ratio de humedad, MR, frente a la humedad en base humedad (g H_2O/ g s.s.) de la biomasa algal de la especie laminar. Como se observa, para un contenido de humedad final del 19 al 16 %, el ratio de humedad MR en base seca es de 0.26, 0.23 y 0.19 para cada una de las muestras, mostrando pendientes similares al presentar el mismo contenido de humedad inicial. Por lo tanto se puede indicar en esta primera parte, que el tipo de bandeja utilizada también influiría en el tiempo de secado del producto, por la interacción entre la transferencia de calor y masa del aire caliente, y el arrastre de humedad de la superficie del alga (mayor área de transmisión de calor).



Lám 6. 4 Ratios de humedad frente al contenido de humedad en base seca.

Después de seleccionar el diseño de la bandeja más adecuada para secar macroalgas, se procede a evaluar la distribución o espaciamiento entre bandejas en los carros porta bandejas. El objetivo es conseguir una tasa de evaporación casi estable en cada una de las muestras. En la Tabla 6.3 se presenta los resultados obtenidos en cuatros ensayos realizados, a diferentes distancias entre bandejas, con una velocidad de aire caliente entre 0.62 a 0.91 m/s, temperatura de 50 ºC, peso de 625 g de algas por cada bandeja y con un contenido inicial de agua del 80.57 %.

En principio, bandejas colocadas muy cercanas entre sí deben dificultar el paso de aire caliente, mientras que bandejas muy espaciadas deben propiciar un exceso de deshidratación. A la vista de los resultados de la Tabla 6.3, el mejor compromiso se logra con el espaciado del ensayo 4 que muestran una mayor uniformidad de la muestra total.

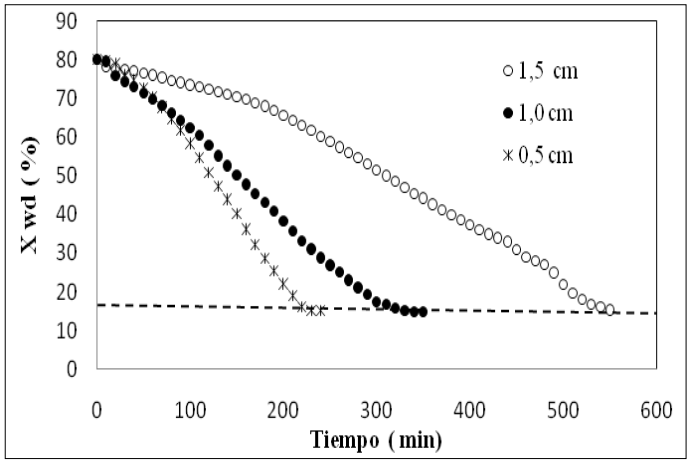
Tabla 6. 3 Análisis de la distancia entre bandejas.

Posición de bandejas	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4	
Izquierda	Distancias	Masa (g)	Distancias	Masa (g)	Distancias	Masa (g)	Distancias	Masa (g)
I1	0	106,96	5	116,98	0	110,10	0	104,82
I2	10	168,92	7	139,56	10	165,00	11	102,31
I3	10	138,42	8	153,72	10	124,9	11	104,22
I4	10	152,02	10	145,6	15	128,25	13	102,14
I5	10	125,80	15	134,2	18	125,25	12	99,95
I6	10	118,90	14	83,62	7	106	12	101,4
I7	10	120,97	8	114,08	7	122,3	10	99,98
Derecha								
D1	0	105,15	5	68,66	0	102,3	0	100,50
D2	10	152,78	7	60,09	7	152,9	11	99,95
D3	10	109,58	8	67,5	7	153,4	10	101,85
D4	10	145,51	10	120,4	10	142,5	13	100,5
D5	10	136,40	15	146,5	20	204,02	12	98,95
D6	10	138,90	14	69,31	13	100,40	12	105,01
D7	10	104,10	8	81,5	10	110	10	105,54

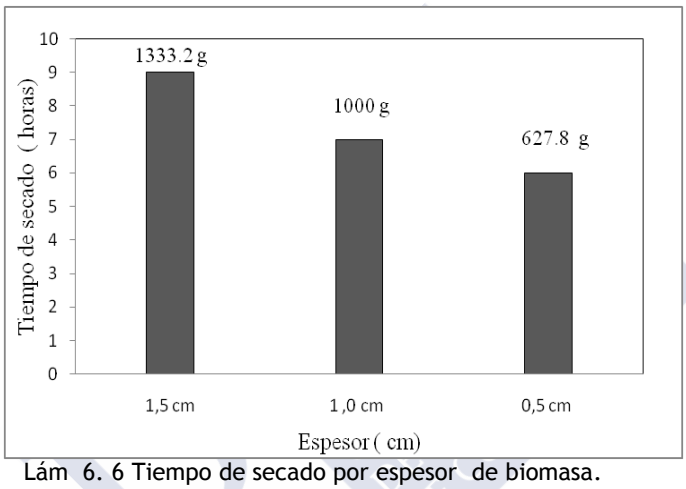
6.3.2 Análisis de la cinética de secado de las muestras a distintos espesores.

En el capítulo 3, se hace referencia de los factores que intervienen el proceso de secado, considerando como parámetros más importantes; las humedad, espesor, tamaño y masa de la muestra. En el marco de las observaciones anteriores, se ha analizado la cinética de secado del alga por medio de la influencia del espesor con el tiempo de secado. En los ensayos se ha valorado espesores de 0.5, 1.0 y 1.5 cm con las mismas condiciones de deshidratación.

En la lámina 6.5, se muestran los resultados de la variación en porcentaje de la humedad de la muestra en base húmeda X_{wb} con respecto al tiempo de secado hasta alcanzar el humedad de referencia establecida para este estudio (entre 15 y 20 %). Como es de esperar, a menor espesor (0.5 cm) el tiempo de secado de las muestras se reduce entre 1 y 3 horas con respecto a las muestras de 1 cm y 1.5 cm. Otro hecho observable, es la reducción del espesor de la muestra en bandeja que es de 0.25 cm, 0.6 cm y 0.8 cm respectivamente para las tres muestras antes mencionadas. Los resultados obtenidos son presentados en las láminas 6.5 y 6.6.



Lám 6. 5 Variación temporal de la humedad según el espesor



Lám 6. 6 Tiempo de secado por espesor de biomasa.

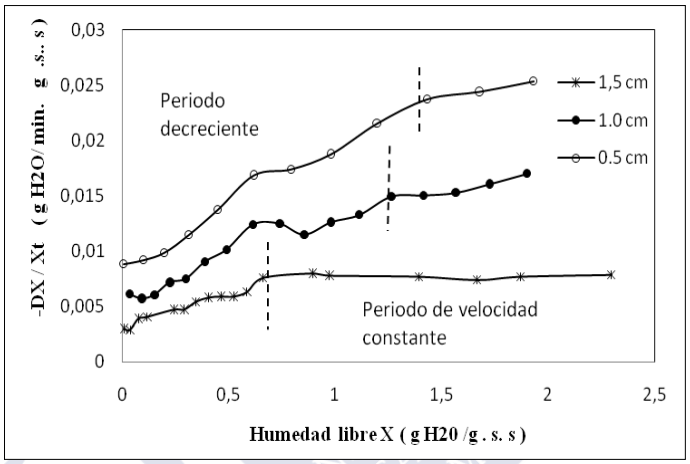
Análogamente, en la lámina 6.7, se presentan las curvas de velocidad de secado para los tres diferentes espesores, donde se aprecia claramente los periodos de velocidad constante siendo distintos en cada muestra, por otro lado el periodo de velocidad decreciente para los casos analizados de 1 cm y 0.5 cm presentan la misma tendencia. En términos generales y como era de esperar, la muestra de 1333 g de alga al ser de mayor espesor presenta un largo periodo de velocidad constante de secado.

Partiendo de la premisa anterior, en la lámina 6.3 el ratio de secado para una misma especie de alga (laminar) con la misma humedad inicial no cambia, lo que va a cambiar es la velocidad o tasa de secado ($\delta X/ \delta t$) de la biomasa, definiéndose esta como la cantidad de agua de un sólido que se evapora por unidad de tiempo.

Retomando el análisis de la curva de secado de la muestra 1.5 cm de espesor, se observa un periodo de velocidad constante más largo, debido a que al tener más espesor, la tasa de evaporación de la humedad contenida en el sólido en la primera capa del alga se produce de manera casi uniforme hasta llegar a disminuir su espesor entre 1.1 a 1 cm. A partir de este límite, no se puede extraer fácilmente el agua por evaporación (agua libre) entrando en la fase de velocidad decreciente. Durante este último periodo, tanto la humedad del interior como la adsorbida por las paredes del sólidos (el agua ligada), no se pueden eliminar completamente por evaporación , haciendo que la superficie de la muestra se comporte como

una película protectora, que no permite la salida ni entrada de humedad. Esto hace que al final del secado (masa constante) quede una muestra cuyo interior no se deshidrata completamente y una superficie de color negruzca deteriorada por el exceso de secado. El caso contrario, se puede observar en las curvas de secado de las muestras con espesores de 1 cm y 0.5 cm donde la tasa de evaporación en el periodo de velocidad constante es mucho más alta, y en el periodo de velocidad decreciente mantienen la misma tendencia de disminución de humedad. Por lo tanto el espesor y tamaño de la biomasa son dos factores a tomar en cuenta; mientras más pequeña o menos espesor tengan el producto que se va a deshidratar, menor será la distancia que debe recorrer la humedad interna para llegar a la superficie.

Dicho esto, se puede inferir que a espesores inferiores a 1 cm se obtiene un secado homogéneo en toda la biomasa macroalgal.



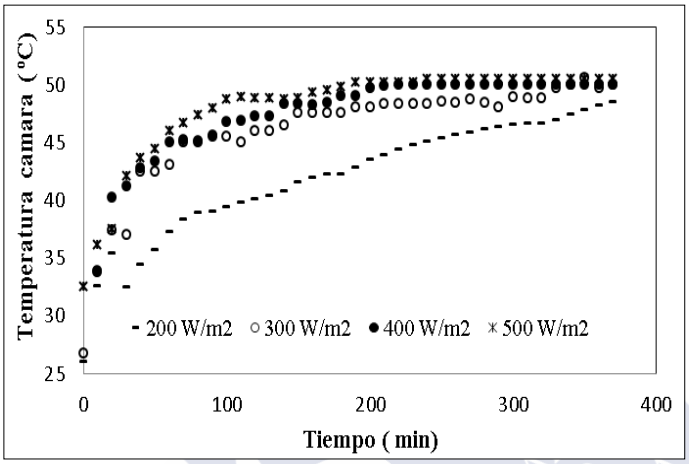
Lám 6. 7. Influencia del espesor del producto en la velocidad de secado de la biomasa

6.3.3 Análisis del prototipo experimental en condiciones de laboratorio.

Para comprobar el funcionamiento del prototipo experimental durante el proceso de secado, se ha analizado la pérdida de peso de 3139.4 g de biomasa distribuida en 5 bandejas con 624.8 g y 0.5 cm de espesor de macroalga. Los ensayos fueron realizados para una irradiación útil de 200, 300, 400 y 500 W/m^2. Como se aprecia en la Tabla 6.4, el tiempo de secado en los ensayos realizados presenta una diferencia de una hora, entre irradiaciones bajas de 200 y 300, por motivo que la irradiación incidente que llega a la superficie de la cámara no es suficiente para alcanzar a elevar rápidamente la temperatura de la cámara de secado a 50 ^{o}C y producir una alta tasa de evaporación de agua del producto, haciendo que el secado sea lento. Por otra parte , a partir de los 400 W/m^2 la temperatura de la cámara estará en torno de los 49 a 50 ^{o}C trascurridas las primeras 3 horas de operación del secado, por lo tanto el tiempo de secado se reduce en 30 minutos en relación a la irradiación útil de 500 W/m^2 que alcanza la temperatura de diseño después de 2,6 horas del proceso de secado. (Lámina 6.8).

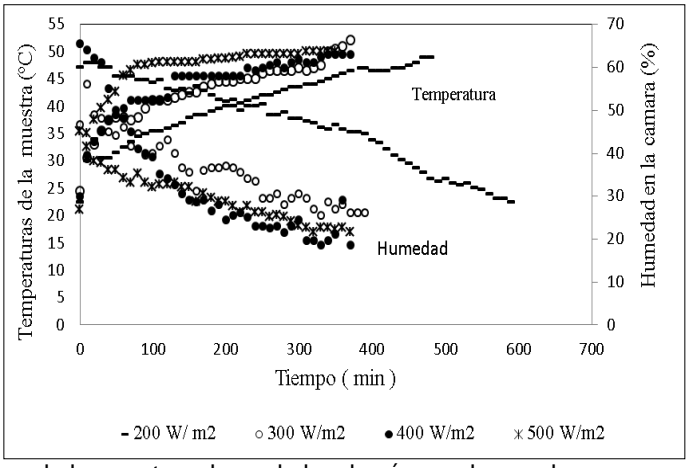
Tabla 6. 4 Tiempo de secado de la macroalga con respecto a distintas irradiaciones

Irradiación (W/m^2)	Masa inicial Wo (g)	Masa final Ws (g)	% humedad final	Tiempo (horas)
200	3133.4	741.50	15.32	8.5
300	3139.2	740.50	15.16	7.5
400	3139.1	742.00	16.51	6.5
500	3139.2	742.30	16.22	6



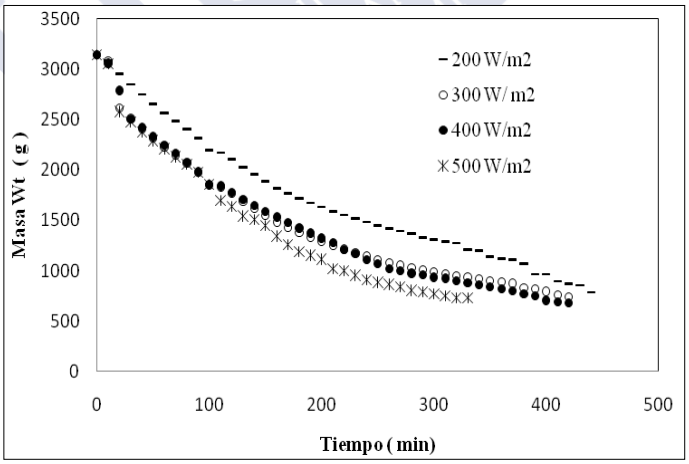
Lám 6. 8. Temperatura de la cámara de secado con respecto al tiempo y la irradiación solar que llega en la superficie de la cámara de secado.

Para dar una idea general de lo que ocurre durante el proceso de secado, se presenta en la lámina 6.9 la variación de temperatura en la superficie de una muestra de biomasa y la humedad de la cámara respecto al tiempo de deshidratación , en relación a la lámina 6.8 antes mencionada correspondiente a la temperatura interna de la cámara. A manera de ejemplo, para la curva de 400 W/m^2, se observa en la primera hora de operación del prototipo una temperatura interna en la cámara de 45 ^oC y una temperatura en la superficie de la muestra de 40 ^oC, con una humedad de 50 %. A medida que la humedad libre en la superficie del producto se evapora, la temperatura del aire caliente que pasa por las bandejas tratara de llegar al equilibrio con la temperatura en la superficie de la biomasa. El tiempo que tarda la muestra en llegar a esta temperatura de equilibrio se da a cabo de 6,5 horas de secado.



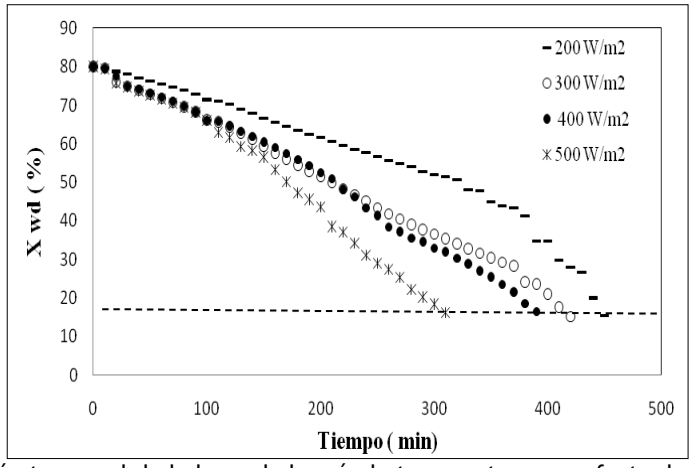
Lám 6. 9. Temperatura de la muestra y humedad en la cámara de secado con respecto al tiempo de deshidratación.

En la lámina 6.10 se presenta la cinética de secado de 4 ensayos, observándose que a una irradiación 200 W/m^2, tarda mucho más tiempo en llegar a la humedad en base humeda necesaria para su vida en anaquel (20 al 15 % de humedad). Es decir, para obtener una masa final en base seca de 741,5 g y retirar una masa de agua de 2391,9 g , el proceso tardó un tiempo de 8,5 horas de secado . Como se observó anteriormente en la lámina 6.8 la temperatura de operación que alcanza el prototipo experimental a 200 W/m^2 se mantuvo entre 40 y 46 ^{o}C. Para 300 W/m^2 la temperatura alcanzada fue de entre 45 y 48 ^{o}C, y a partir de los 400 W/ m^2 llegara a la temperatura de diseño. En base a lo expuesto, como era de esperar el aumento de temperatura incrementa la velocidad de secado disminuyendo así el tiempo correspondiente.



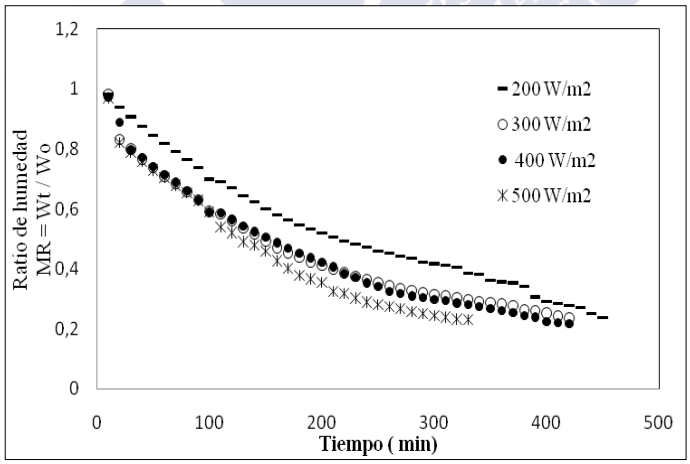
Lám 6. 10. Variación del peso de la biomasa con respecto al tiempo de secado.

En la lámina 6.11 se muestra la variación temporal de la humedad con respecto al tiempo de secado, para diferentes irradiaciones. Una vez más, se enfatiza el comportamiento del periodo de secado necesario en la biomasa para llegar a la humedad en base humeda predefinida.



Lám 6. 11. Variación temporal de la humedad según la temperatura por efecto de la Irradiación.

En la lamina 6.12 se muestran los ratios de humedad frente al tiempo de secado. Los ratios de humedad se expresan como la relacion del contenido de humedad de cada instante de tiempo con respecto al contenido de humedad inicial del producto. Se utiliza comunmente para la uniformidad en la velocidad de secado . Como se observa en los ensayos la perdida del agua va decreciendo linealmente , existiendo una relacion directa constante para extraer agua del sólido dependiendo del contenido de humedad del producto y la temperatura. Esta ultima sería un factor limitante en la velocidad de extracción. Como se observa el contenido de humedad final de los ensayos fueron de 0,2 , tendiendo a estabilizarse en el tiempo. La estabilización o la aparición de un punto de inflexión marcarian el limite en la capacidad de secado del secador.

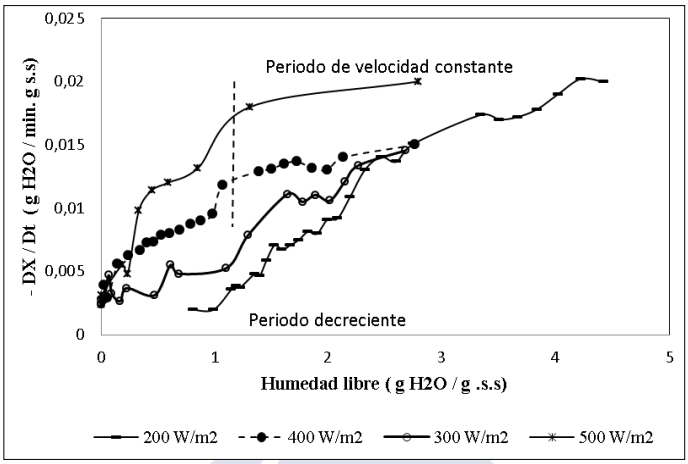


Lám 6. 12. Ratios de humedad frente al tiempo de secado.

En la lámina 6.13 se muestran la curva de velocidad de secado de los ensayos realizados. Como se observa, las curvas presentan dos periodos de velocidad de secado:

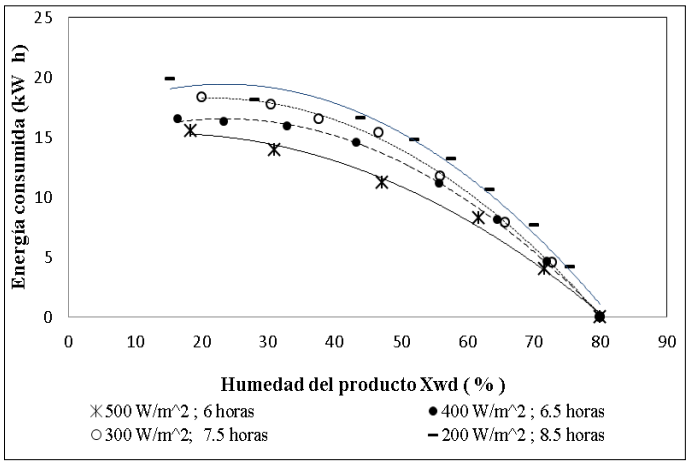
- Un primer periodo a velocidad constante. En los ensayos se observa como este régimen se acorta a medida que disminuye la temperatura del aire de secado. Se ha observado que el final del periodo de velocidad de secado constante varia relativamente en tono de los 1,2 g H2O/g .s.s para irradiaciones de 200 a 300 W/m^2, 2.5 g H2O/g .s.s para 400 W/m^2 y 4,3 g H2O/g .s.s para 500 W/m^2.
- Un segundo periodo de velocidad decreciente. Este es más largo a irradiaciones altas (400 y 500 W/m^2.).

Para finalizar el proceso de secado a partir de una humedad libre de 1 g H_2O/ g.s.s, después que la humedad de la superficie de la biomasa se ha retirado por evaporación, el nivel de secado depende de la velocidad con la que su humedad interna se dirige a la superficie, liberan más lentamente los niveles de humedad, por lo que necesitan más tiempo para ser deshidratado.



Lám 6. 13. Velocidad de secado de la biomasa a distintas irradiacione.

Para finalizar con el análisis de resultados, es necesario determinar el consumo de energía que se ha necesitado para evaporar los 4785,8 g de H_2O, contenidos en 6266,8 g de biomasa macroalgal (carga completa contenidos en los dos carros porta bandejas). En la lámina 6.14 se presenta la curva del consumo de energía por hora de secado en relación con la humedad en base húmeda del producto. Como es de esperar, el mayor consumo de energía se da a irradiación de 200 W/m^2 . A irradiaciones bajas, el aire se calienta a temperaturas inferiores de 50 ºC, debido a esto, se necesita más tiempo para llegar a peso final en base seca o a la humedad establecido anteriormente (20 % de humedad). Y sobre todo, es necesario enfatizar que la mayor parte de energía abastecida al prototipo experimental a bajas irradiaciones, proviene del colector solar y del sistema auxiliar (resistencias eléctricas). Los resultados relativos a la energía total consumida y aprovechada durante el secado se muestran en la Tabla 6.5.



Lám 6. 14. Consumo de energía por hora de operación con respecto a la variación temporal de humedad.

Como se puede observar en la Tabla 6.5, la eficiencia del secador varía en términos de la irradiación aprovechada en el sistema, siendo más eficiente el sistema a bajas irradiaciones. Esto es debido, a que la mayor cantidad de la energía producida por el sistema es consumida para el secado del solido húmedo.

Tabla 6. 5 **Valores de energía total consumida y aprovechada obtenida de los ensayos experimentales**

W/m^2	Energía aprovechada $Q_{cons.}$(kW)	Energía producida $Q_{prod.}$ (kW)	Eficiencia
500	15,77	18,81	0.84
400	16,57	20,44	0.81
300	18,37	21,48	0.86
200	19,87	22,22	0.89

6.3.4 Análisis del funcionamiento del secador solar en condiciones climáticas Ambientales.

Como se ha venido indicando, durante este capítulo, es importante conocer las cinéticas de secado de la biomasa, con el fin de determinar aquellas condiciones en las que los daños y las pérdidas de la biomasa sean menores. En este mismo sentido, en esta sección se ha evaluado el secado de dos muestras de algas deshidratadas al mismo tiempo y en diferentes condiciones; una muestra se deshidrata con radiación directa y otra utilizando el secador solar. Se realiza la comparación con la finalidad de conocer la cinética de secado de la muestra al exponerse directamente en el sol y los efectos segundarios que sufrirá la biomasa.

Durante el secado natural, 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 y a la evaporación de la humedad superficial, lográndose de esta forma la desecación del producto. (Montero, 2005). Por otro lado, la otra fracción se pierde por conducción entre la bandeja y la biomasa.

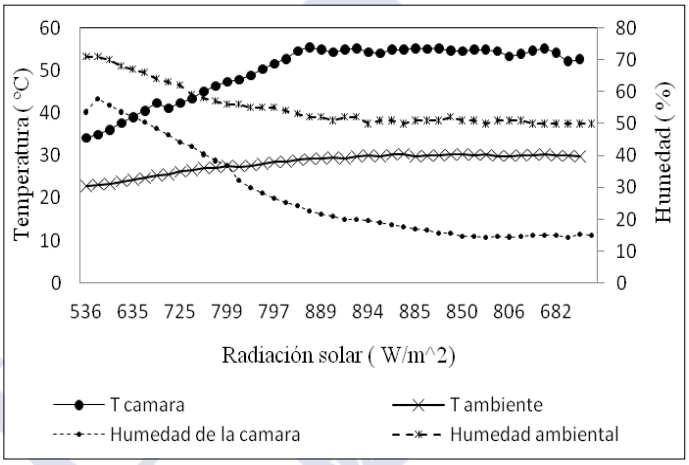
La deshidratación de un producto utilizando un equipo térmico de secado, es el resultado de una transferencia de calor y masa, donde el agua es evaporada y removida del producto por medio de un flujo de aire caliente y temperatura constante. Es decir, el mecanismo se basa en que el vapor de agua es arrastrado por el aire caliente, creando un gradiente de presión que a su vez provocara la difusión de vapor hacia la superficie del producto. (Calva ,2007)

Las ventajas de la deshidratación en secador están relacionadas con control de temperatura durante el proceso y sobre todo, la posibilidad de disminuir la calidad de nutrientes (lípidos y proteinas) del producto.

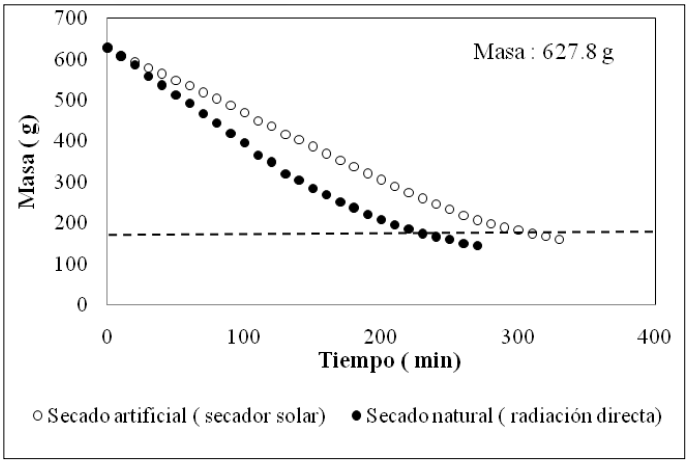
En la lámina 6.15, se presenta las condiciones climáticas durante los ensayos experimentales para el secado de la macroalga en modo natural (radiación directa) y en modo artificial (secador solar). Como se puede observar el ensayo fue realizado en un día con cielo despejado con variación de radiación solar entorno de los 536 a 894 W/m^2, temperatura

ambiente 29 ºC, velocidad de viento menor a 1 m/s y humedad relativa del 60 al 50 %. Con las condiciones antes indicadas, nos permite mantener una temperatura controlada de secado a 55 ºC en el interior de la cámara del secadero solar mixto (colector solar y cámara) permitiendo evaporar la mayor cantidad de agua de la muestra, hasta llegar a una humedad interna del 15 %.

Aunque el secado al natural prácticamente no requieren de ningún costo adicional, al no necesitar de ningún tipo de combustible esto no significa, que siempre esta metodología de secado ayude a deshidratar adecuadamente el producto en comparación al uso de un secadero solar controlado como se puede observar en la lámina 6.16, donde se muestran los resultados de la variación de la pérdida de peso de la biomasa para ambos métodos. En el secado natural la pérdida de humedad puede no ser constante por ser dependiente de las condiciones climáticas, llegando a ser muy lenta y a menudo el producto no se seca completamente en un solo día, por lo que debe permanecer expuesto durante toda la noche para finalizar su secado al día siguiente.



Lám 6. 15. Temperatura, humedad y radiación que fue expuesta la muestra al secado natural y secado artificial.



Lám 6. 16. Comparación entre el secado natural y el secado de la muestra utilizando un secador solar.

En la Tabla 6.6, se muestran la comparación en el tiempo de secado entre ambas metodologías. Como se puede observar, para este día en partícular el tiempo de secado de la muestra deshidratada al natural fue de 4.33 horas y la muestra deshidratada en el secador para llegar al mismo peso de producto final requirió de 5.33 horas. Al no tener un control de la biomasa en el exterior pueden adquirir un color oscuro y el nivel de ciertos nutrientes, particularmente las vitaminas, puede disminuir por la exposición directa al sol. Para ilustrar esto, se ha realizo la deshidratación hasta su máximo deterioro, tal como se muestra en la tabla, con un secador solar controlado nos permitiría controlar estos efectos antes que la muestra llegue a su degradación.

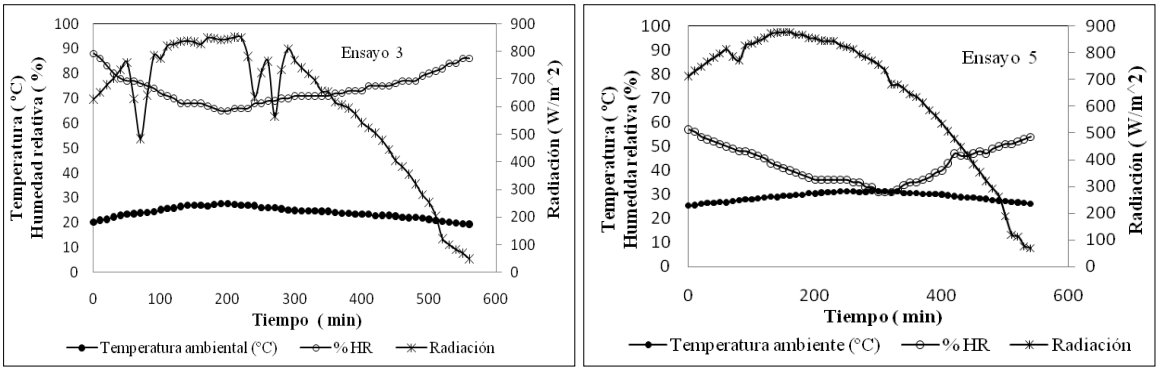
Tabla 6. 6 **Resultados de los ensayos realizados por secado natural y secado artificial**

	Secado natural radiación directa)	Secado artificial (cámara de secado)
Masa inicial		
Condiciones óptima para almacenamiento		
Masa final (g)	160.7	160.1
Tiempo (h)	4.33	5.33
Humedad Xdb (%)	15	14.9
Actividad de agua a_w	0.49	0.49
Condiciones de deterioro de las muestra		
Masa final (g)	80.4	92.4
Tiempo (h)	5.2	7
Humedad X db (%)	8.7	9
Actividad de agua, a_w	0.42	0.49
Apariencia	Color oscuro, muy quebradizo	Color oscuro

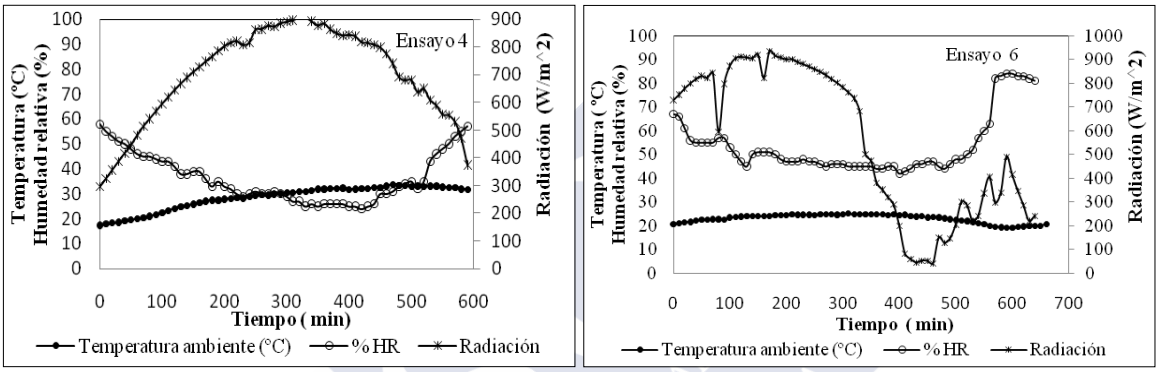
Por otra parte, se han realizado varias pruebas del funcionamiento del secador mixto [23] para tres diferentes cargas de biomasa siendo de; 6.27 kg, 10 kg y 13.3 kg, pero para efecto del estudio de la cinética de secado de la biomasa solo se ha analizado una bandeja por cada ensayo realizado, se decir pesos de 627.8 g , 1000 g y 1333 g . Con respecto a los ensayos realizados en las láminas 6.17 y 6.18, se presentan a manera de ejemplo los parámetros climáticos registrados durante los días correspondientes a los ensayos 3 y 5 (cámara de secado sin placa captadora), además de 4 y 6 (cámara de secado con placa captadora).

Los ensayos realizados fueron: Ensayo 1 y 2 con muestras de masa de 6,27 Kg de biomasa, ensayos 3 y 4 para masas de 1000 g y finalmente los ensayos 5 y 6 para masas de 1333 g de biomasa macroalgal . A su vez los ensayos 1 , 3 y 5 corresponde a las pruebas realizadas sin placa captadora , y los ensayos 2 , 4 y 6 corresponden a las pruebas experimentales realizadas adaptando una placa captadora o negra en el interior de la cámara de secado.

[23] El Secador mixto consta de una cámara de secado y un colector solar



Lám 6. 17 Variables climáticas en relación al ensayo 3 y 5 (Cámara de secado sin placa captadora).

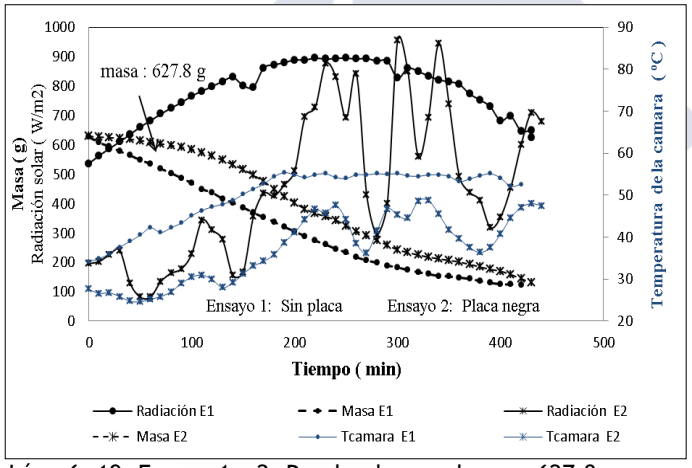


Lám 6. 18 Variables climáticas en relación al ensayo 4 y 6 (Cámara de secado con placa captadora)

En las láminas 6.19, 6.20 y 6.21, se presentan la influencia de la radiación solar en la temperatura interna de la cámara y la pérdida de peso de la biomasa macroalgal .Como se puede observar en el ensayo 1 y 2 para un peso de 627.8 g (Lám 6. 19) el tiempo final de secado para ambos ensayos fueron de 6.5 horas, aunque se ve una clara presencia de la variación instantánea de la radiación solar en el ensayo 2 , al colocar la placa captadora dentro de la cámara de secado no permite que la temperatura interna de la cámara varié drásticamente con la radiación. Este mismo efecto se puede observar en la lámina 6.20, en que el tiempo de secado para los ensayos desarrollados para 1000 g de masa fue de 7 horas. En la Tabla 6.7 se muestran los resultados obtenidos en los 6 ensayos estudiados.

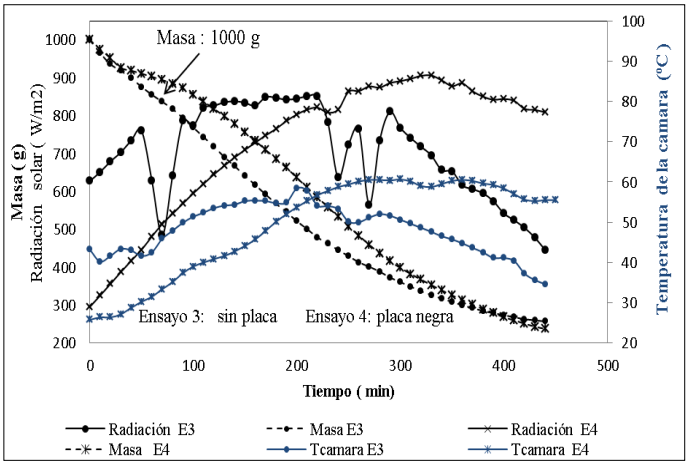
Tabla 6. 7 Ensayo del tiempo de secado utilizando el secador solar mixto

	Masa 627.8 g	Masa 1000 g	Masa 1333 g
	Ensayo 1	**Ensayo 3**	**Ensayo 5**
Secador solar mixto			
% humedad X_{wb}	77.46	77.49	77.58
Temperatura media (°C)	53	52.5	54
Tiempo (horas)	6.5	7	8
	Ensayo 2	**Ensayo 4**	**Ensayo 6**
Secador solar mixto con placa captadora			
% humedad X_{wb}	78.2	79.2	80
Temperatura media	40.5	52.5	50
Tiempo	6.5	7.2	11



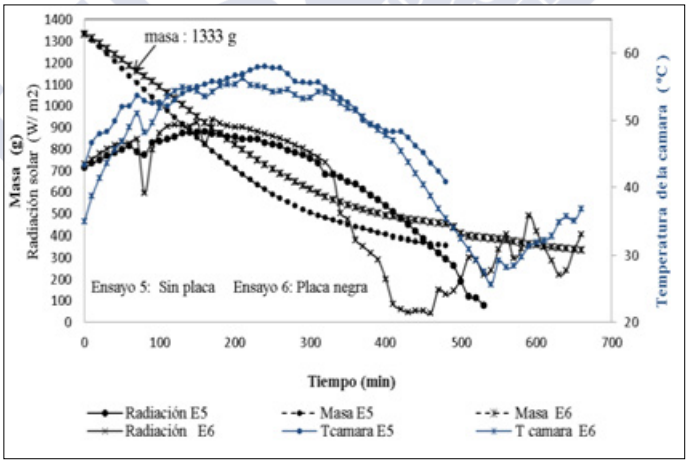
Lám 6. 19. Ensayo 1 y 2; Prueba de secado para 627.8 g.

Notar que con placa captadora, los tiempos de secado se alargan ligeramente en todos los ensayos. Esto puede explicarse por el hecho de trabajar en días de alta irradiación donde, como ya se argumentó en los ensayos controlados en vacío, la existencia de una capa captadora muestra buenos resultados solo a bajas irradiaciones. Un caso particular puede verse en los ensayos 1 y 2. En ellos se ve el impacto de la placa captadora en el ensayo 2, en un dia con irradiación baja y variable. En este caso, los tiempos de secado con semejantes a pesar de las malas condiciones climatológicas. En otras palabras, la incorporación de una plaza captadora asegura un mejor comportamiento en climas variables, sin disminuir las prestaciones del sistema en días de buena irradiación.



Lám 6. 20. Ensayo 3 y 4 ; Prueba de secado para masa de 1000 g.

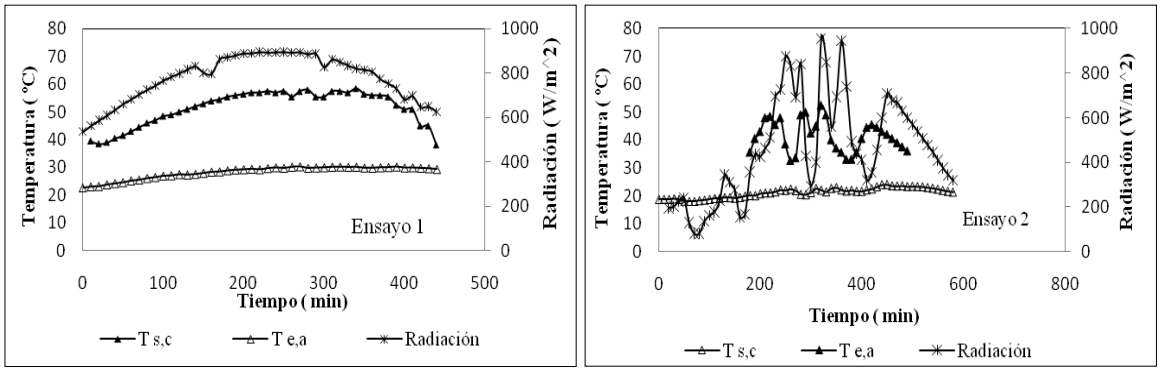
Por su parte en la lámina 6.21, se presentan los ensayos 5 y 6 analizados para una masa de 1333 g de alga. Como se observa en los primeros 500 min, la pérdida de masa de la muestras mantiene la misma tendencia lineal. Por otra parte, en el ensayo 6, a medida que la radiación desciende a valores menores de 200 W/m^2 (400 minutos), la temperatura de la cámara desciende lentamente entre 0.7 a 1 ºC cada 10 minutos. Paralelamente el sistema de control apaga automáticamente el colector solar para evitar el ingreso del aire frio con humedad relativamente alta. Finalizando el secado con la temperatura remanente en el interior de la cámara.



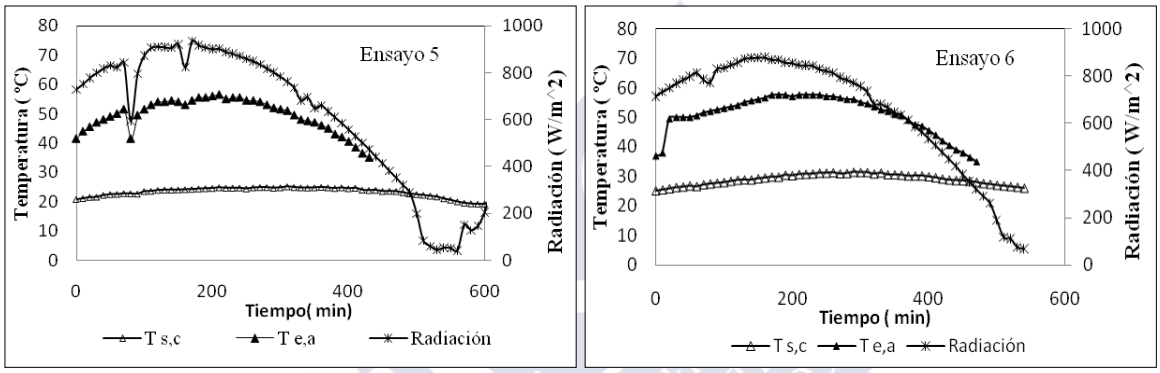
Lám 6. 21. Ensayo 5 y 6 ; Prueba de secado para una masa de 1333 g.

Durante el transcurso de esta sección se ha venido analizando directamente la cámara de secado, por lo tanto, se hace necesario estudiar el funcionamiento del colector solar por ser uno de los componentes principales del secador solar mixto. En las láminas 7.22 y 7.23 se presentan los valores de temperatura del flujo del aire en la entrada y salida del colector. Como se puede observar para los diferentes ensayos, el funcionamiento del colector solar depende de la radiación solar y la temperatura ambiente para poder calentar una cierta cantidad de flujo de aire que posteriormente será utilizado en el proceso de secado. Así, en los ensayos 2, 5 y 6, se observa los periodos en que el colector solar deja de funcionar cuando la temperatura de salida es inferior a 35 ºC (condiciones de operación, ver capítulo 6). Por otra parte, a irradiación superior a 600 W/m^2 se pudo determinar un incremento de temperatura del aire caliente entre 25 a 30 ºC. El incremento de temperatura se determina

como la diferencia de temperaturas entre el aire de salida del colector y el aire entrada, siendo la temperatura ambiental.

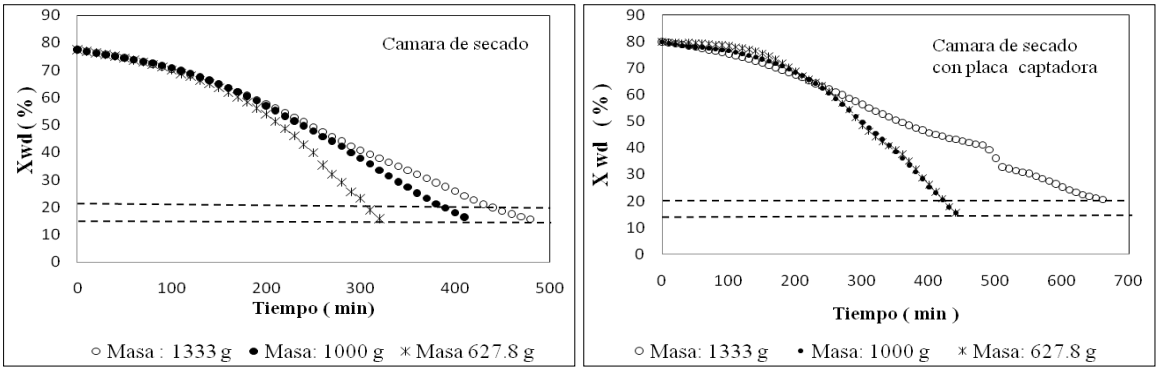


Lám 6. 22 Temperatura de salida del colector solar. Ensayo 1 y 2.



Lám 6. 23 Temperatura de salida del colector solar. Ensayo 5 y 6.

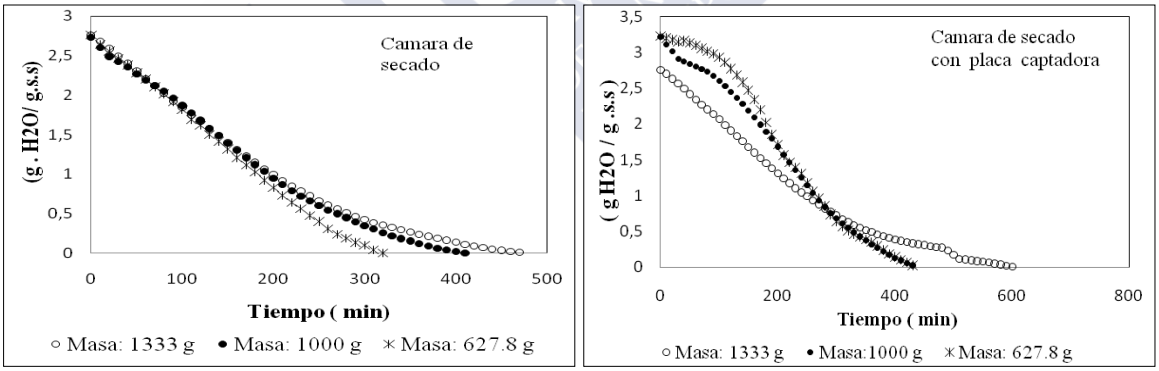
Una vez analizados los resultados de los principales parámetros que influyen en la cámara la cámara de secado, analizamos la cinética de secado de la biomasa deshidratada en el secador solar mixto. En la lámina 6.24 se muestra la variación temporal de la humedad con respecto al tiempo de secado, para los diferentes ensayos antes mencionados. En los resultados se observa la misma tendencia lineal de pérdida de humedad para las muestras estudiadas en el secador hibrido. No optante en el prototipo experimental con placa captadora la curva de pérdida de humedad para la masa de 1333 g, tiende a ser diferente por las condiciones climáticas de secado en ese día en particular. Los ensayos se finalizaron hasta llegar a una humedad en el sólido entre 15 al 20 %.



Lám 6. 24. Variación temporal de la humedad con respecto a la cantidad de masa secada en el secador solar mixto.

En la lámina 6.25 se presenta la tasa de humedad evaporada durante el tiempo de secado, como se observa en la lámina de los ensayos realizados sin placa captadora, las muestras empiezan a una tasa de evaporación de 2,8 g H_20/ g.s.s, con la misma humedad inicial en base húmeda y finalizan el primer periodo de velocidad constante en 0,25 H_20/ g.s.s donde la humedad libre del producto se ha evaporado completamente. A partir del valor antes mencionado el producto entra en la fase final en la cual la humedad de la muestra se encuentra ligada a la pared de la biomasa, disminuyendo la tasa de evaporación.

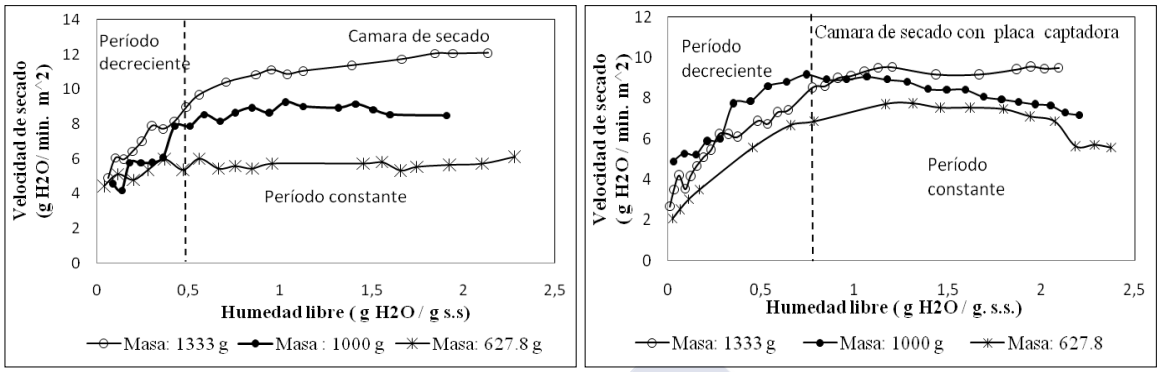
En relación a los ensayos realizados utilizando la placa captadora, la tasa de evaporación inicial de cada muestra es distinta al contener diferentes humedades iniciales de base húmeda, de igual forma influye la temperatura de secado. Como se observa el periodo de velocidad constantes de las muestras finalizan en 0,3 g H_20/ g.s.s , para dar paso al periodo de velocidad decreciente.



Lám 6. 25. Curva de secado experimental de la biomasa para tres cantidades de masas, deshidratadas en el secador solar.

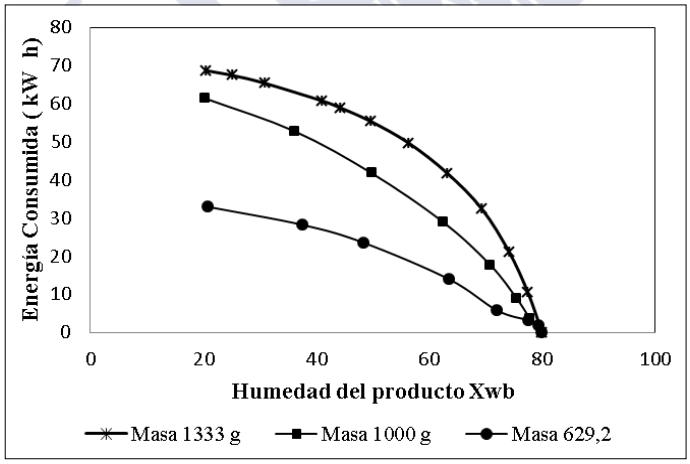
En la lámina 6.26 se muestran la curva de velocidad de secado de los ensayos realizados para los dos modelos estudiados, siendo modelo (a) sin placa captadora y el modelo (b) con placa. Como se observa ambas lamina la curva de velocidad de secado obtenida de los ensayos realizados con masas de 1333 g, 1000g y 267,8 g ; presentan dos periodos de velocidad de secado: un periodo de secado constante largo que finaliza en una humedad libre de 0,5 g H_2O/g .s.s modelo (a) y 0,8 g H_2O/g .s.s en el modelo (b) . Y un periodo de velocidad decreciente, que depende de la velocidad con la que su humedad interna se dirige a la superficie liberando lentamente la humedad, por lo que necesitan más tiempo para ser deshidratada. La velocidad de secado de los ensayos del modelo (a) finalizan en 4,06 g H_2O/ min.m^2 y varía entre 2 a 4,1 g H_2O/ min. m^2 en el modelo (b).

En relación de los resultados obtenidos en estos ensayos (Lám 6.26) realizados en días con irradiaciones entre 450 a 1000 W/m^2, y los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio (Lám 6.13), podemos concluir que estas curvas de velocidad de secado son semejante a las obtenidas en condiciones controladas para una irradiación de 500 W/m^2.



Lám 6. 26. Curva de velocidad experimental de secado de la biomasa, deshidratadas en el secador solar.

Para finalizar con esta etapa de análisis, se realizan los balances globales de materia y energía, para determinar el consumo de energía que necesitó la biomasa para deshidratarse completamente. Como es de esperarse el ensayo realizado para una masa de 1333 g consume más energía para deshidratar la biomasa hasta una humedad final del 20%. En la Tabla 6.8 y en la lámina 6.27 se muestran los resultados del consumo de energía requerido en un periodo de tiempo de 6,5 horas (627,8 g) , 7,2 horas (1000 g) y 11 horas (1333 g) utilizando un secador solar mixto con placas captadora.



Lám 6. 27 Consumo de energía por hora de operación con respecto a la variación temporal de humedad.

Como se aprecia en la Tabla 6.8, la eficiencia en el funcionamiento del secador mixto es aproximadamente del 0,6 al 0,66 %. Para irradiación solar a partir de los 400 W/m^2.

Tabla 6. 8 Valores de energía total consumida y aprovechada en el proceso de secado (secador solar con placa captadora)

Masa (g)	Energía aprovechada $Q_{cons.}$(W)	Energía producida $Q_{prod.}$ (W)	Eficiencia
1333	71,67	112,59	0.64
1000	61,39	93,35	0.66
627,8	32,80	55,01	0.60

6.3.5 Análisis del funcionamiento del secador hibrido en condiciones climáticas ambientales

En esta etapa se han evaluado el secado del alga marina utilizando un secador hibrido, en dos etapas de funcionamiento; funcionamiento del secador sin placa, modelo (a) y el funcionamiento del secador hibrido adaptado a una placa captadora, modelo (b). Ambos ensayos realizados para tres diferentes cargas de biomasa similares al caso anterior.

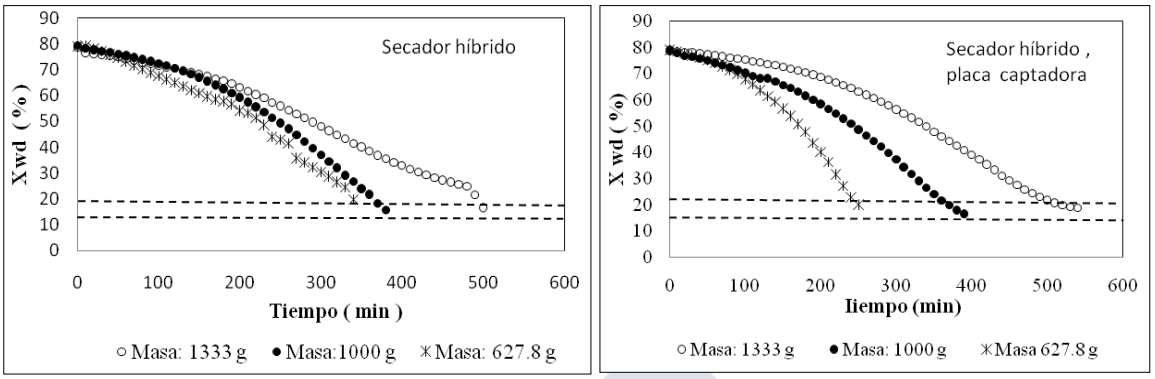
En la Tabla 6.7 se muestran los resultados del tiempo de secado, humedad en base seca inicial y final del producto, así como la temperatura de operación de la cámara de secado para los 6 ensayos realizados. Como se puede observar en la tabla, el tiempo final de secado de la biomasa varia entorno de los 20 a 30 minutos entre a ambos modelo (a y b) . Siendo de 5 a 5.7 horas para una masa de 627 g, de 6 a 6,3 horas para los ensayos de 1000 g, y de 5 a 5,7 horas en los ensayos con 1333 g.

Tabla 6. 9 Ensayos de tiempo de secado utilizando el secador hibrido.

	Masa 1333 g	Masa 1000 g	Masa 627.8 g
Secador hibrido			
% humedad $X_{wb\ inicial}$	78.70	79	79
% humedad $X_{wb\ final}$	19,2	18,25	19,66
Temperatura media (ºC)	49.95	49.99	50.4
Tiempo (horas)	8.30	6.30	5.70
Secador hibrido con placa captadora			
% humedad $X_{wb\ inicial}$	78.90	79	79
% humedad $X_{wb\ final}$	18.75	19.78	19.54
Temperatura media	50.3	52.04	52.88
Tiempo	8.30	6.00	5.00

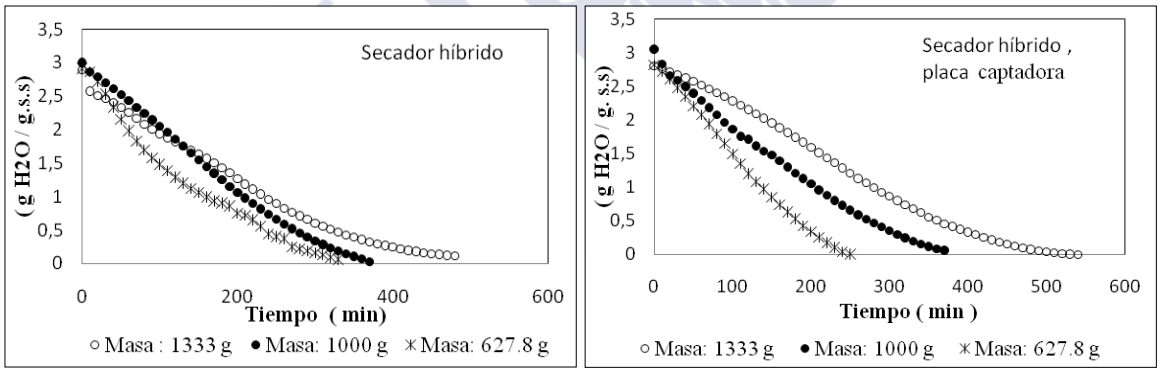
Sobre la base de lo anteriormente indicado, en lo siguiente se muestran la cinética de secado de la biomasa, a través de variación temporal de la humedad. En la lámina 6.28 se observa la misma tendencia lineal de pérdida de humedad para las muestras estudiadas para ambos modelos, con una temperatura de operación del secador de 50 ºC. Los ensayos se

finalizaron hasta llegar a una humedad en el sólido entre 15 al 20 %. En el caso del prototipo con placa captadora se observa una pérdida de humedad más uniforme durante el proceso, pudiendo deberse a que la placa negra permite una mejor transferencia de calor del aire caliente dentro de la cámara de secado permitiendo en ciertos casos que el tiempo de secado disminuya, además nos permite mantener un mejor control durante el proceso.



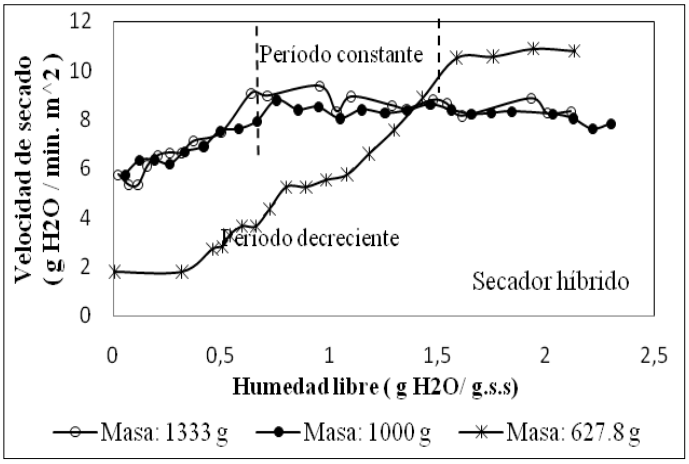
Lám 6. 28. Variación temporal de la humedad según la cantidad de masa a deshidrataren el secador híbrido.

En la lámina 6.29 se presenta la curva de secado experimental durante el tiempo de secado, como se observa en las láminas todas las muestras empiezan a una tasa de evaporación de 3 g H_20/ g.s.s, a distintas humedad inicial y finalizan el primer periodo de velocidad constante en 0,25 H_20/ g.s.s donde la humedad libre del producto se ha evaporado completamente. A partir del valor antes mencionado el producto entra en la fase final, es decir al periodo de velocidad decreciente donde va disminuyendo la tasa de evaporación.



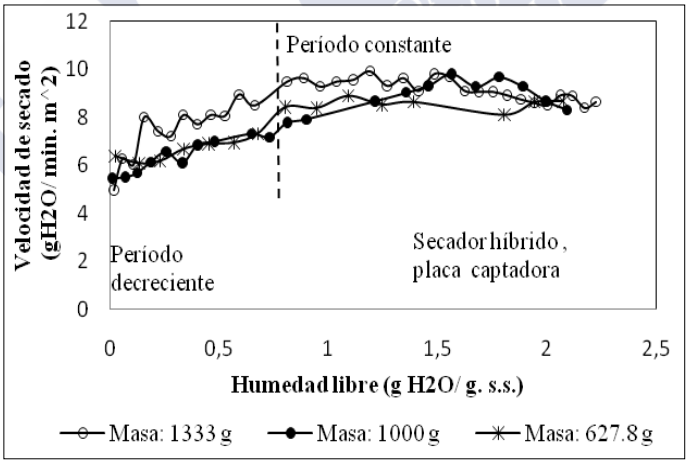
Lám 6. 29.Curva de secado experimental de la biomasa para tres cantidades de masas, deshidratadas en el secador híbrido.

Los mecanismos básicos en el proceso de secado son: la migración de la humedad del alga hacia su superficie, y la evaporación de la humedad desde la superficie al aire circundante. El parámetro de control de ambos procesos es la tasa de evaporación o velocidad de secado. En las láminas 6.30 y 6.31 se muestra esta tasa de secado determinada por el contenido de humedad del alga con respecto al tiempo y el área expuesta a un flujo con temperatura constante de aire.



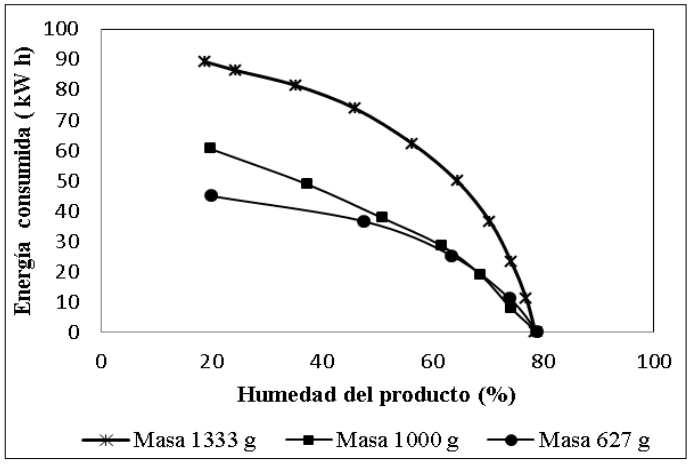
Lám 6. 30. Curva de velocidad experimental de secado de la biomasa, deshidratadas en el secador híbrido

Centrándose en la lámina 6.30, donde se muestran resultados de secador híbrido sin placa colectora, como en los casos anteriores, se observan dos regimenes de funcionamiento: El periodo de velocidad constante seguido del periodo de velocidad decreciente. Como comentario, observar que para masas pequeñas (627,8g por bandeja) al ser el secado más rápido, el tiempo en velocidad constante se acorta de modo apreciable. Además solo en este caso, se observa el límite de secado que viene marcado por la aparición de nuevo de una meseta en la grafica y que corresponde a una velocidad de secado de 2 gr de H_2O por minuto.



Lám 6. 31. Curva de velocidad experimental de secado de la biomasa, deshidratadas en el secador híbrido adaptando placas negras

En la lámina 6.31 se muestran resultados del mismo secador híbrido con placa colectora. Como en casos anteriores, el efecto de la placa colectora es mantener la tasa de evaporación mucho más constante, favoreciendo la homogeneidad del secado.



Lám 6. 32 Consumo de energía por hora de operación con respecto a la variación temporal de humedad.

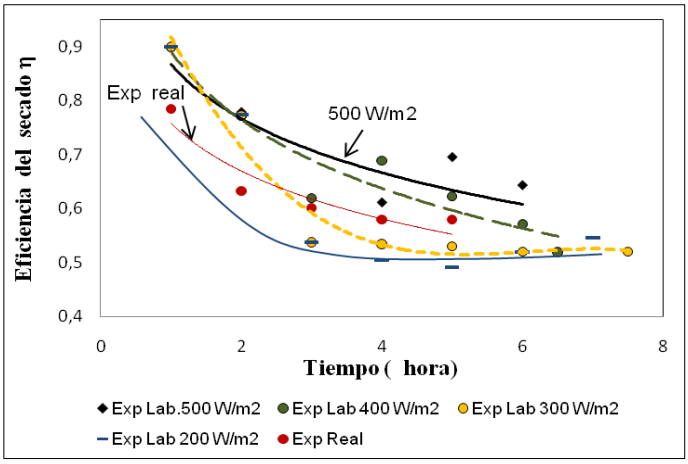
Por último, el la lámina 6.32 se muestra la energía consumida por hora de operación del secador. El único punto a remarcar es la mínima diferencia de consumo entre las masas inferiores. Este resultado, en caso de diseñar un colector para ser alimentado con fuentes sostenibles, deberá ser tenido en cuenta, pudiendo decirse que 1000 gr bandeja sería un valor límite de bajo consumo. Como se aprecia en la Tabla 6.10, la eficiencia en el funcionamiento del secador hibrido adaptando placas captadoras en el interior de la cámara es del 0,66 al 0,71 %.

Tabla 6. 10 **Valores de energía total consumida y aprovechada, así como eficiencia en el proceso de secado (Secador hibrido)**

Masa (g)	Energía aprovechada $Q_{cons.}$ (kW)	Energía producida $Q_{prod.}$ (kW)	Eficiencia
1333	91,34	139,21	0.66
1000	61,95	94,43	0.66
627,8	45,62	64,21	0.71

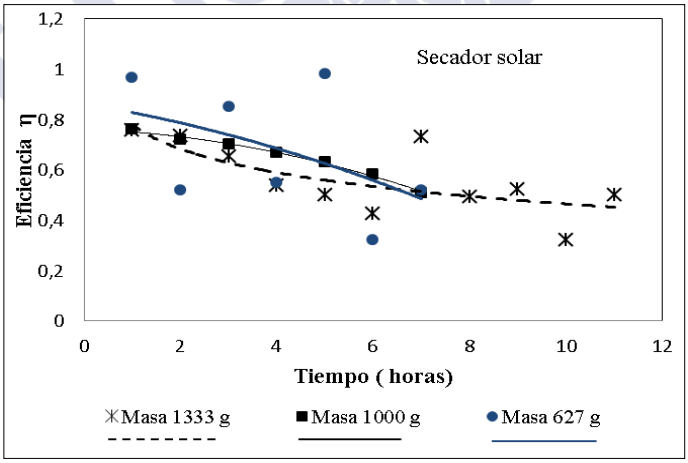
6.3.6 Eficiencia del proceso de secado.

En el apartado anterior se calculó la eficiencia de la cámara de secado, mientras que ahora se determinará la eficiencia del proceso de secado a partir de los datos obtenidos de los balances globales de la materia y energía. La eficiencia del secado se define como la relación entre la energía suministra y el agua evaporada durante proceso de secado. Por otro lado, como se ha indicado al transcurso de este estudio, la eficiencia de un secadero se define como la relación entre la energía utilizada y la energía total producida.



Lám 6. 33. Eficiencia del secado en condiciones de laboratorio.

En la lámina 6.33 se muestra la eficiencia de secado en el secador híbrido y para una masa de 1000 gramos. Los ensayos en condiciones controladas se focalizaron en estudiar el efecto a bajas irradiaciones. Como comentario, incluso a bajas irradiaciones, donde el proceso de secado está liderado por las resistencias, la eficiencia de secado es del 50%, esto es, comparable a otros secaderos no sostenibles del mercado. A partir de 400 W/m^2 de irradiación efectiva, el valor se incrementa en un 16%, llegando por tanto a 66% y mostrando solo una leve dependencia de la irradiación. En la misma lámina, se muestra la eficiencia de secado en condiciones ambientales. Como puede verse, los resultados están en buen acuerdo con los obtenidos en condiciones controladas.



Lám 6. 34 Eficiencia del secado en condicionales ambientales. Secador solar.

Por último, en la lámina 6.34 se muestra la eficiencia de secado del secador solar, esto es sin resistencia de apoyo, en condiciones ambientales para dos masas diferentes. Explicar que, condiciones ambientales, en un clima como Galicia implica grandes y rápidos cambios de irradiación y temperatura que puede apreciarse en algunos casos en la lámina como "saltos" de nivel. Los valores de eficiencia de secado en este caso muestran una tendencia lineal con valores mínimos de 50% y llegando a valores del 80%. Comentar que en secaderos solares tradicionales las eficiencias obtenidas están entre el 30 y el 40% (A. Fudholi, 2010).

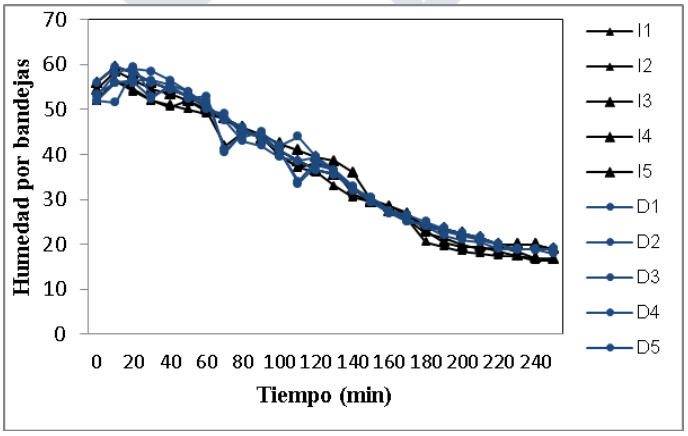
6.3.7 Uniformidad y homogeneidad del proceso de secado.

Una vez bien definidas las eficiencias del secador y del proceso de secado, queda un último parámetro a estudiar: La uniformidad del proceso de secado en el volumen de la cámara, y la homogeneidad de secado de la biomasa en la bandeja.

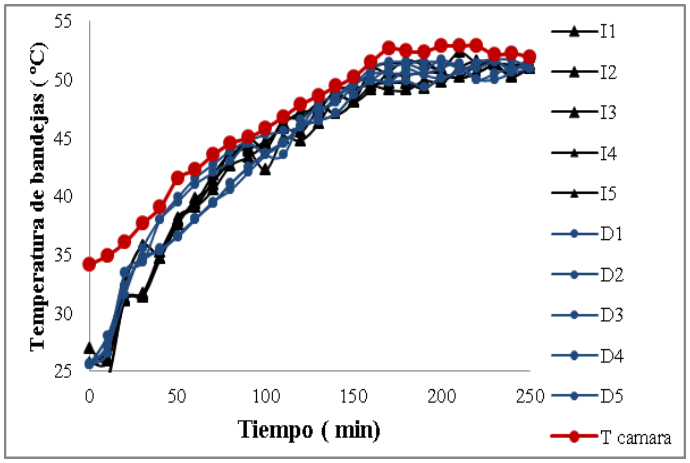


Lám 6. 35 Mediciones de temperatura y humedad registrados en los ensayos del secado de las muestras sargassum y laminaria.

Para estudiar la uniformidad, se han realizado varios ensayos en los que se ha medido la temperatura y el porcentaje de humedad en cada uno de las bandejas durante el proceso de secado. En las láminas 6.35 y 6.36 se muestran los resultados. Como puede observarse la diferencia de la perdida de humedad de la biomasa entre las bandejas es casi estable variando entre 3,5 a 0,1 % entre ellas. Con respecto a la temperatura se observan una diferencia de de temperatura con respecto al aire saturado interno de la cámara y la temperatura de la biomasa que oscila a partir de 10 ºC al inicio del secado hasta que la temperatura entre ambos medio se equilibren a un cierto tiempo, llegando a una diferencia de temperatura entre 0,4 ºC y 0.9 ºC.



Lám 6. 36 Perdida de humedad por bandejas (627,8 g).



Lám 6. 37 Temperatura por bandejas (627,8 g).

En la Tabla 6.11y 6.12 se muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados para dos especies de algas para diferentes masas (627,8 g y 1000 g). Como puede verse, la uniformidad de la humedad en las bandejas en la especie sargassum es del 16% y de la muestra laminar esta entono del 16 al 18 % para las masa de 627,8 y 1000 g respectivamente. Con una actividad de agua del 0.45 a 0,47 para la especie sargassum y de 0,49 a 0,51 para la muestras laminarias.

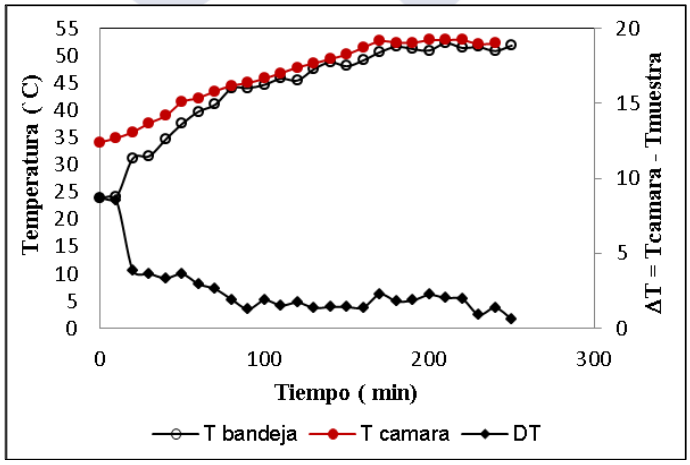
Tabla 6. 11 Resultados del secado de los ensayos realizados con la especie Sargassum

Sargassum , masa de 1000 g					Sargassum , masa de 627,8 g				
biomasa	peso	aw	%HR	Espesor cm.	biomasa	peso	aw	%HR	Espesor cm.
Inicial	**1000**	**0,9**	**80**	**1**	**Inicial**	**627,8**	**0,9**	**77,58**	**0,5**
I1	238,2	0,47	16	0,6	I1	169,9	0,47	16,7	0,35
I2	238,5	0,47	16,1	0,62	I2	170,1	0,47	17	0,34
I3	238,3	0,46	16,1	0,62	I3	168,9	0,46	16,6	0,34
I4	237,9	0,47	15,9	0,6	I4	168,9	0,46	16,6	0,35
I5	236,5	0,46	15,6	0,6	I5	168	0,46	16,4	0,34
D1	238,1	0,48	16	0,6	D1	167,2	0,45	16,1	0,34
D2	238,6	0,47	16,09	0,6	D2	167,4	0,45	16	0,34
D3	238,6	0,45	16,16	0,61	D3	167,5	0,45	16	0,35
D4	237,5	0,45	15,8	0,61	D4	170,3	0,47	16,8	0,35
D6	238,67	0,48	16,2	0,62	D5	170,2	0,47	16,8	0,35

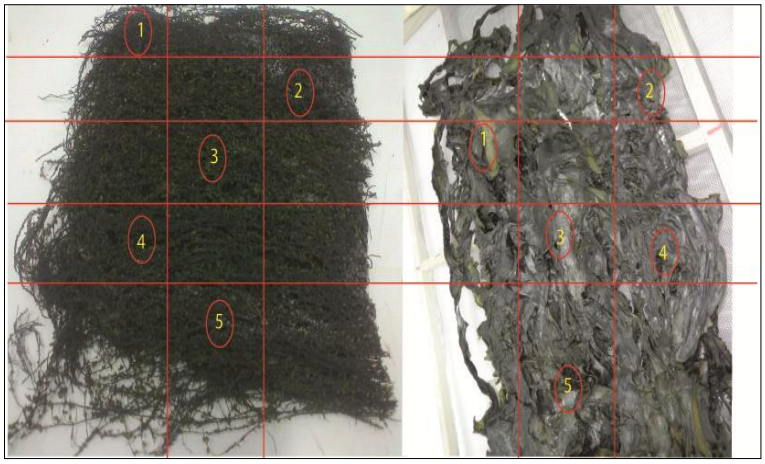
Tabla 6. 12 Resultados del secado de los ensayos realizados con la especie laminar.

Laminaria , masa de 1000 g					Laminaria , masa de 628,7 g				
biomasa	peso	aw	%HR	Espesor cm	biomasa	peso	aw	%HR	Espesor cm
Inicial	**1000**	**0,91**	**82**	**1**	**Inicial**	**627,8**	**0,9**	**80**	**0,5**
I1	220,9	0,5	18,7	0,83	I1	122,7	0,5	16,53	0,3
I2	222,4	0,51	19,1	0,85	I2	122,9	0,51	16,74	0,31
I3	222,7	0,51	19,2	0,85	I3	122,8	0,5	16,57	0,32
I4	221,4	0,49	18,7	0,84	I4	125,4	0,49	16,10	0,33
I5	221,5	0,49	18,7	0,84	I5	121,5	0,49	16,00	0,35
D1	221,1	0,49	18,6	0,83	D1	121,8	0,49	16,25	0,29
D2	221,6	0,5	18,8	0,84	D2	122	0,49	16,30	0,3
D3	221,7	0,5	18,8	0,83	D3	22,5	0,5	16,56	0,3
D4	222,5	0,51	19,1	0,84	D4	122,7	0,5	16,68	0,3
D6	223	0,51	19,3	0,85	D5	122,4	0,5	16,53	0,3

Como la homogeneidad del secado, es más complicado de evaluar durante el tiempo que dure el proceso de secado, tal como se puede observar en la lámina 6.37 la pérdida de masa o humedad y la temperatura que alcanza la biomasa se desarrolla en el tiempo, por lo tanto se hace un poco difícil evaluar la uniformidad del secado de la biomasa en varios puntos. En este caso, proponemos la medida del porcentaje de humedad y la actividad de agua de la biomasa en una bandeja, realizando un muestreo al azar en la superficie de la misma. Los ensayos se realizaron a la biomasa en base seca. En la lámina 6.39 se muestran los puntos de muestreos aleatorios que se tomaron de la muestra y en la tabla 6.13 se presentan los resultados. Como puede verse, la humedad promedio de secado de la especie *laminar* es del 18,7 % y en especie *sargassum* del 15,74 % de humedad.



Lám 6. 38 Variación de la temperatura en la bandejas.



Lám 6. 39 Puntos de muestreo de humedad y actividad de agua de la biomasa seca.

Tabla 6. 13 **Resultados de humedad y actividad de agua de la muestra seca.**

	Sargassum		*Laminar*	
	Humedad	**aw**	**Humedad**	**aw**
Punto 1	15,5	0,44	18,7	0,49
Punto 2	15,6	0,45	18,5	0,49
Punto 3	16,1	0,47	19,1	0.50
Punto 4	15,9	0,45	18,7	0,49
Punto 5	15,6	0,45	18,7	0,49

6.4 CONCLUSIONES

Se han realizado ensayos experimentales en secador hibrido con biomasa algal, tanto en condiciones controladas como en condiciones ambientales. Con el fin de estudiar la dependencia con la masa a secar se han propuesto tres ensayos con 628, 1000 y 1300 gramos por bandeja. Como comparación se han realizado ensayos con el secador solar.

Las conclusiones obtenidas son:

- ***Optimización de la cinética de secado de la biomasa***. Los mejores resultados fueron obtenidos con bandejas en malla 3 cm, espesores de masa algal menores de 1 cm, que corresponden a una carga máxima de 1000 gr por bandeja. Igualmente se identificó la mejor distribución espacial entre bandejas dentro de la cámara de secado.

- ***Optimización de la velocidad de secado de la biomasa.*** La curva de velocidad de secado presenta dos regimenes, uno inicial de velocidad constante de entre 8 y 10 gr H2O/min.m2, y un segundo de velocidad decreciente. En casos de secado a muy baja irradiación (200 W/m2) se aprecia un límite de velocidad de 0,25 gr H2O/min.m2. La comparación de resultados obtenidos en ensayos con y sin placa captadora mostraron un mejor comportamiento con placa captadora. Los resultados en condiciones controladas y ambientales son absolutamente compatibles.

- ***Estimación de la eficiencia de la cámara de secado y cálculo energético.*** La eficiencia en el funcionamiento del secador hibrido adaptando placas captadoras en el interior de la cámara es del 66 al 71 %. El cálculo energético realizado muestra que en caso de diseñar un secador para ser alimentado con fuentes sostenibles, deberá ser tenido en cuenta, pudiendo decirse que 1000 gr bandeja sería un valor límite de bajo consumo.

- ***Estimación de la eficiencia de secado.*** En condiciones controladas, se obtiene una eficiencia de 66% a partir de 400 W/m2 de irradiación efectiva, mostrando solo una leve dependencia de la irradiación. Incluso a bajas irradiaciones, donde el proceso de secado está liderado por las resistencias, la eficiencia de secado es del 50%, esto es, comparable a otros secaderos no sostenibles del mercado. Los ensayos en condiciones ambientales muestran resultados comparables. Ensayos realizados sobre el secador solar muestran valores de eficiencia de secado del 50%, superior por tanto a los obtenidos por secadores solares tradicionales.

- ***Uniformidad y homogeneidad del proceso de secado en la biomasa.*** Los ensayos realizados muestran una uniformidad en la humedad en base seca del 18,7 %, actividad de agua del 0,49 y espesor final del 0,8 centímetro en la muestras *laminar* y del 15,7 % , aw de 0,45 y espesor del 0,6 para la muestra *sargassum*. Se garantiza una homogeneidad de la biomasa en referencia a la humedad final del producto cuando la temperatura sea uniforme a lo largo del secado (50 ºC).

CAPITULO 7.
CONCLUSIONES GENERALES Y LINEAS FUTURAS

El objetivo del trabajo que se presenta es el diseño construcción y optimización de un secadero solar alimentado por energías renovables. El prototipo está constituido por una cámara de secado dómica, conectada a un colector solar, un conjunto de resistencias auxiliares alimentado por un conjunto de paneles fotovoltaicos y un intercambiador enterrado. El sistema puede operar tanto como un secador solar, como colector híbrido solar térmico-fotovoltaico o un sistema solar -aerotermico.

Valoración de la biomasa algal

Los resultados obtenidos durante el proceso de secado de diferentes especies de macroalgas, permiten concluir que el tiempo de secado depende de la estructura, masa del producto y la temperatura del aire de secado. Las isotermas de desorción determinadas experimentalmente para las macroalgas muestran un comportamiento de tipo III en clasificación de Brunauer ajustándose satisfactoriamente al modelo GAB.

Se ha determinado que la curva de velocidad de secado del producto se presenta en dos etapas; la primera a velocidad constante y una segunda etapa de velocidad decreciente. Un factor crítico en el proceso de secado es la humedad del aire, a medida que se elimina el agua del alga, el aire circundante aumentara su contenido de humedad, y al remover grandes cantidades de vapor de agua del aire puede conducir a quemar la superficie del producto algal, por lo tanto es necesario mantener un control del proceso de secado.

El tiempo de secado del producto está relacionado con el espesor del producto teniendo un efecto significativo sobre el contenido final de humedad. En consecuencia, se recomienda el uso de bajo espesor y un máximo 1 kg de algas sobre las bandejas. Los parámetros de color mostraron un oscurecimiento significativo en toda la biomasa, mostrando un contenido máximo de humedad después del secado del 18 al 20 %. Con una uniformidad en todo el producto y una actividad de agua del 0.45.

Prototipo experimental

Se ha realizado un exhaustivo conjunto de pruebas experimentales tanto en laboratorio como en condiciones ambientales. Analizando los resultados obtenidos se ha visto en primer lugar que el prototipo experimental permite lograr una velocidad de secado uniforme. Además el empleo de sistemas auxiliares y complementarios permite reducir el tiempo de secado de un producto, garantizando posteriormente una mejor calidad del producto seco. El sistema de aerotermia permite una aportación estable de calor al colector solar por el precalentamiento del aire.

El prototipo experimental adaptado con fuentes energéticas sostenible, analizado como secador solar mixto, solar – fotovoltaico y solar- aerotermia, mostró una muy buena uniformidad y homogeneidad en la temperatura interna en la cámara de secado.

El uso de la energía solar fotovoltaica permite reducir el consumo de energía eléctrica durante el secado en un 75%. Las eficiencias térmicas del prototipo oscilan entre el 66 y el 71 %. El total de energía consumida para el secado de 10 Kg de biomasa fue de 61 kW durante las 7 horas de operación, alimentada el 70 % por el colector solar y la cámara por efecto invernadero, el 30 % restante por el sistema auxiliar. La incorporación de un sistema auxiliar alimentado con energía fotovoltaica contribuyó de manera significativa a mejorar la eficiencia térmica global del sistema y el tiempo de secado del producto.

La eficiencia del secador híbrido analizado en condiciones climáticas ambientales, en torno al 70%, fue similar a la calculada teóricamente. Comparando este resultado con los secadores existentes combinado solar – fotovoltaica e indicados en la teoría podemos concluir que nuestro diseño tiene una eficiencia del 22 % más. Por otro lado, el prototipo experimental solar – aerotermia muestra una eficiencia entorno al 65%. Con respecto a los modelos de secadores actuales, el sistema muestra una eficiencia superior (en torno a un 30%).

Finalmente esta tesis demuestra que es posible desarrollar tecnología apropiada para el secado de productos macroalgal, con materiales locales y un diseño modular, asequible e innovador. Su carácter modular le permite adaptarse a las condiciones de productividad.

Modelamiento del prototipo experimental

De los resultados analizados se puede indicar que las herramientas computacionales para la simulación del fluido y trasferencia de calor (CFDs) ofrecen unos resultados muy aproximados con los datos experimentales, especialmente en irradiaciones superiores de 500 W/m^2.

Línea de investigación futura

Como línea de trabajo futuro se propone:

- Un análisis de la recuperación de calor que se pierde en el aire húmedo de salida.
- Análisis complementarios de adaptación de otras fuentes de energías renovables
- Una valoración más detallada del sistema de aerotermia adaptada a secadores solares.
- Evaluación de emisiones en el proceso del secado utilizando secadores solar-fotovoltaico, solar-aerotermia.
- Valoración físico química del producto seco de la macroalga.

The main objective of the work presented is the design, construction and optimization of a solar dryer powered by renewable energies. The prototype consists on a dome drying chamber, connected to a solar collector, a set of auxiliary electrical heaters powered by photovoltaics panels and a underground exchanger. The system can operate both as a solar dryer, and thermal-photovoltaic solar hybrid collector or as a low enthalpy geothermal solar system.

Assessment of algal biomass

The results obtained during the drying process from different species of macroalgae, support the conclusion that the drying time depends on the structure of the product mass and the temperature of the drying air. Desorption isotherms determined experimentally for macroalgae show a behavior type III Brunauer classification successfully using the the model GAB.

It has been determined that the drying rate curve of the product comes in two stages; the first on constant speed and a second step of decreasing speed. A critical factor in the drying process is the air humidity as the algae water is removed, the surrounding air to increase its moisture content and to remove large amounts of water vapor in the air can lead to burn the surface algae product, therefore it is necessary to maintain control of the drying process.

The drying time of the product is related to the thickness of the product having a significant effect on the final moisture content. Consequently, the use of low thickness and a maximum 1 kg of algae on the trays is recommended. Color parameters showed a significant darkening of all biomass, showing a maximum moisture content after drying from 18 to 20%. A high uniformity throughout the product and a water activity of 0.45 is given.

Experimental prototype

There were performed a comprehensive set of experimental tests in the laboratory and in environmental conditions. After analyzing the results, we have seen that the experimental prototype allows a uniform drying speed. Also the use of auxiliary and complementary systems can reduce the drying time of a product, ensuring a better quality for the dried product. The low enthalpy geothermal system allows a stable supply of heat to the solar collector to preheat the air.

The experimental prototype adapted to sustainable energy sources, was analyzed as a mixed solar dryer, solar - photovoltaic and solar - geothermal, showed very good uniformity and consistency in the internal temperature of the drying chamber.

The use of solar PV reduces energy consumption during drying by 75%. The prototype thermal efficiencies range between 66 and 71%. The total energy used by drying 10 kg of biomass was 61 kW during 7 hours of operation, 70% powered by solar collector chamber and greenhouse, the remaining 30% by the auxiliary system. The incorporation of an auxiliary powered photovoltaic system contributed significantly to improve the overall thermal efficiency of the system and product drying time.

The efficiency of the hybrid dryer used in ambient weather conditions, around 70%, was similar to that theoretically calculated. Comparing this result with existing combined solar dryers - photovoltaic and indicated in the theory can conclude that our design has an efficiency of 22%. Furthermore, the experimental solar-geothermal prototype shows an efficiency of 65%. Regarding current models of dryers, the system displays superior efficiency (around 30%).

Finally, this thesis shows that it is possible to develop an appropriate technology for drying macroalgal products using local materials and modular, affordable and innovative design. Its modular nature allows it to adapt to the conditions of productivity.

Modeling the experimental prototype

From the analyzed results it may indicate that the computational tools for the simulation of fluid and heat transfer (CFDs) offer a very approximate result with experimental data, especially at higher irradiation of 500 W/m ^{2}.

Lines of future research

As lines of future work are proposed:

- An analysis of the recovery of heat lost in the moist exhaust air.
- Complementary analyzes adjusting other renewable energies
- A more detailed assessment of low enthalpy geothermal system adapted to solar dryers.
- Evaluation of emissions in the drying process utilizing solar-photovoltaic, solar-aerothermal dryers.
- Physical chemistry assessment from dried macroalgae.

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades
A	Área superficial	m^2
Ab	Área de bandejas	m^2
Ac	Superficie del captación	m^2
$A_{entrada}$	Área de entrada del aire	m^2
$A_{trasv.}$	Área transversal	m^2
A_{panel}	Área del panel	m^2
$a_{w.}$	Actividad de agua	
C	Constante de Guggenheim.	Wh/día
C	Consumo de energía	kcal/kg ºC
$C_{nominal}$	Capacidad nominal	Ah
c_o	Factores de alojamiento entrópico	
$C_{p.\ a,c}$	Calor especifico del aire	kcal/kg ºC
$C_{p\ prod}$	Calor especifico del material	kcal/kg K
$C_{p\cdot policarbonato}$	Calor específico del policarbonato	kcal/kg K
$C_{p\cdot aislante}$	Calor específico del aislante	J/ kg ºC
C_p	Calor especifico	J/kg K
Cs	Variable de velocidad	
Di	Diámetro interno del tubo	m
d	días	días
da	Densidad del aire	Kg/m^3
d_{ac}	Densidad del aire caliente	Kg/m^3
df	Densidad del fluido	Kg/m^3
dt	Variación de tiempo.	min o h
$d_{\ prod}$	Densidad del producto	kg/m^3
$d_{policarbonato}$	Densidad del policarbonato	kg/m^3
$d_{aislante}$	Densidad del aislante	kg/m^3
d_{acero}	Densidad del acero	kg/m^3
$d_{plast,\ glass}$	Densidad del plástico glass	kg/m^3
e	Espesor del producto	cm
$e_{\ policarbonato}$	Espesor (policarbonato)	mm
e_{acero}	Espesor del acero	mm
$e_{plast,\ glass}$	Espesor(plástico glass)	mm
erf	Función Gaussiana	
ε_m	Emisividad de la superficie	
εr	Coeficiente de rugosidad	
E_d	Margen de seguridad	

F_R	Factor de disipación de calor	
Fr ($\tau\alpha$)	Factor de eficiencia	
F	Coeficiente de fricción	
G_T		
$G_{b,T}$	Irradiación	W/m^2
$G_{d,T}$	Radiación solar directa	W/m^2
	Radiación solar difusa	W/m^2
Ha		
Ha,c	Humedad absoluta	kg/kg aire seco
Hr	Humedad bulbo seco	kg agua/kgaire seco
H_T	Humedad relativa	%
hv	Radiación horaria	kJ/h
h_o	Entalpía	kJ/kg de aire seco
H_m	Coeficiente convectivo	W/m^2 K
H_q	Calor total de adsorción	kJ/mol
H_W	Calor total de desorción	kJ/mol
h_r	Humedad bulbo húmedo	kg agua/kgaire seco
h_1	radiación	W/m^2 K
h_2	Entalpia bulbo seco	kJ/kg $_{\text{aire seco}}$
h_k	Entalpia bulbo húmedo	kJ/kg $_{\text{aire humedo}}$
	Resistencia térmica por conducción	W/m^2 K
I		
Isc	Intensidad	A
Imp	Intensidad de cortocircuito	A
I_T	Intensidad pico	A
	Radiación total incidente	W/m^2 día
k_g		
k,	Coeficiente de trasferencia de masa	kJ/kg $_{\text{aire seco}}$
k_o	Factor de corrección relacionado	kg. mol/ s. m^2
k $_{\text{prod}}$	Factores de alojamiento entrópico	
K $_{\text{policarbonato}}$	Conductividad térmica del alga	W/m K
$k_{aislante}$	Conductividad de policarbonato	W/m K
k_{acero}	Conductividad del aislante	W/m K
	Conductividad del acero	W/m K
L		
	Longitud	m
M		
M_A	Peso de la muestra	gr
Mb	Peso molecular del agua	kg/kmol agua
$\dot{m}_a$	Peso del aire molecular	kg/kmol agua
M evap	Consumo de aire seco	$kg_{\text{aire seco}}$/ s
	Masa de agua a evaporar	kg_{agua}
N_A		
N_p	Masa evaporada	kg mol H20 evap/ s.m^2
N_b	Número de paneles	
Nbat.	Número de bandejas	
n	Número de baterías	

	Número de Nusselt.	
$_{reg}$	Eficiencia o rendimiento. Rendimiento del regulador	
P		
Po	Presión de vapor de agua	Pa
Pas	Presión de vapor de agua pura	Pa
PCI	Presión parcial de aire seco	kPa
PCS	Poder calorífico inferior	J/kg
Pd	Poder calorífico superior	J/kg
Pr	Profundidad de descarga	
Pt	Número de prandtl	Adimensional
Pv	Máxima potencia	W
P_{max}	Presión de vapor	Pa
	Potencia de un modulo	W
q/A		
Q_{total}	Flujo de calor	W/m^2
Q_T	Energia total	J/h
$Q_{evap.}$	Energía consumida (eléctrico)	W
$Q_{útil}$	Energía evaporada	kcal
$Q_{perd\ calor}$	Calor Útil	kcal
	Energía perdida	Kcal
R_c		
R	Velocidad de secado	kg/ m^2 h
Re	Constante universal de los gases	J/ kmol K
	Número de Reynolds	Adimensional
Ta		
$T_{a,c}$	Temperatura de aire ambiente	ºC
Tbs	Temperatura del aire caliente	ºC
Tbh	Temperatura de bulbo seco	ºC
T_{cielo}	Temperatura de bulbo húmedo	ºC
Td	Temperatura del cielo	ºC
T_{fs}	Temperatura de salida del aire	ºC
T_{fe}	Horas del sol	h
T_s	Temperatura de entrada del aire	ºC
$T_{p,m}$	Temperatura de la superficie	ºC
Tpr	Temperatura media de la placa	ºC
T_r	Temperatura de bulbo de roció	ºC
Ts	Temperatura del producto	ºC
t1	Temperatura de la superficie	ºC
t2	Tiempo de periodo constante de secado	h
tb	Tiempo de periodo de velocidad decreciente	h
	Tiempo de operación	h
S	Metros cuadrado de paneles	m^2
U_L	Coeficiente global de pérdida de calor	W/m ºC
V		

V_a	Tensión de la batería	V
V_T	Velocidad de aire	m/s
$V_{a,c}$	Velocidad total de evaporación	kg $_{agua}$/h
V_{prod}	Volumen del aire	m^3
$V_{policarbonato}$	Volumen del producto	m^3
$V_{aislante}$	Volumen (policarbonato)	m^3
V_{acero}	Volumen (aislante)	m^3
$V_{plast,\ glass}$	Volumen (acero)	m^3
	Volumen (plástico glass)	m^3
W		
W_S	Peso del sólido húmedo	kg
W_o	peso del sólido seco	kg
	Peso húmedo inicial	kg
X_w		
X_{db}	Humedad del material	kg $_{agua}$/ kg $_{prod\ húmedo}$
$X_{aire\ caliente}$	Humedad final de la muestra	kg $_{agua}$/ kg $_{prod.\ Seco}$
$X^*;_;$	Humedad contenida en el agente secante	%
$X\ superficie$	Humedad de equilibrio	kg $_{agua}$/ kg $_{prod\ húmedo}$
	Humedad en la superficie del material	kg $_{agua}$/ kg $_{prod\ húmedo}$
w	Ángulo de Inclinación	grados
σ	Calor latente de vaporización	kJ/kg
δ	Constante de Stefan Boltzmann	$W/m^2\ K^4$
τ	Declinación	grados
γ	Ángulo horario	grados
α	Ángulo acimutal de la placa	grados
αs	Elevación de la placa	grados
$\tau\alpha$	Ángulo de elevación	grados
γs	Energía incidente	grados
θs	Ángulo solar o azimut	grados
	Ángulo cenital	grados
	Latitud	grados

BIBLIOGRAFÍA

1. A .Zomorodian, D. Z. (2007). Optimization and evaluation of a semi continuous solar dryer for cereals. *Desalination , ScienceDirec* , 129-135.
2. A Vega, A. A. (2005). Modelo de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (Capsicum Annuum L. cv). *16*(n 16), 3-11. La Serena , Chile.
3. A. El Beltagy, G. G. (2007). Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of food Engineering. Science Direct* , 456-464.
4. A. Fadhel, S. K. (2005). Study of the solar drying of grapes by three different processes. *Desalination . ElSEVIER* , 535-541.
5. A. Fudholi, K. S. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 1-30.
6. A. Zomorodian, D. z. (2007). Optimization and evaluation of semi continuous solar dryer for cereals. *ScienceDirect. El sevier* , 129-135.
7. A.A. El Sebaii, S. S. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 37-43.
8. A.H .Al- Muhtaseb, W. M. (2002). Moisture Sorption isitherm Characteristics of Food Products: A Review. *Food and Bioproducts Processsing. ELSVIER* , 118-128.
9. A.O Dissa, D. B. (2011). Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. *Energy , ElSEVIER* , 2517-2527.
10. A.O. Disssa, J. B. (2009). Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices. *Renewable Energy. ELSEVIER* , 1000-1008.
11. A.O. Raji, J. O. (2011). Moisture sorption isotherms of two varieties of millet. *Food and Bioproducts Processing. ELSEVIER* , 178-184.
12. A.O.Dissa, D. B. (2011). Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. *Energy, ElSEVIER* , 2517-2527.
13. Abella, M. A. *stema Fotovoltaico.* Madrid: CIEMAT.
14. Adnan Midilli, H. K. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management* , 1111-1122.
15. Alba, J. (2010). CRITERIOS Y PROCESO DE CÁLCULO DE SECCIONES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.
16. Alonso, M. (08 de 2008). Energía Fotovoltaica. Gestión de las Energias Renovables Perspectivas de Futuro. (Sexta). (C. CIEMAT, Ed.) Madrid, España.
17. Alonso, M. *Energía Solar fotovoltaica* (Sexta ed.). (Ciemat, Ed.) España: CEDDET.
18. Aponte, A. A. (2011). Adsorption Isothermas and isosteric Heat Estimation in Cassava Flour. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* , 88-96.
19. Atul Sharma, C. C. (2009). Solar energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, ELSEVIER* , 1185-1210.
20. Ayala, A. (2011). Adsorptión Isothermas and Isosteric Heat Estimation in Cassava Flour. *Biotecnología , 9* (1), 88-96.
21. B.M.A. Amer, M. H. (2009). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management. EL SEVIER*.

22. Bañón, R. (15 de 03 de 2012). INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LAS ESPECIES EXÓTICAS MARINAS EN GALICIA. *Tercero* . (R. G. Mariños, Ed.) España.
23. Bárbara, I. (2009). ALGAS BENTÓNICAS MARINAS Y SALOBRES DE GALICIA. La Coruña, A Coruña, España.
24. Barbara, I. (2009). *Reconocimeinto de especies invasoras en Galicia, e introducción a su problematica.* Recuperado el 03 de 03 de 2014, de Xunta de Galicia, Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible: http://www.slideshare.net/ignacio1barbara/algas-marinas-invasorasgalicia
25. Bejar, A. K. (2012). Moisture Sorption isotherms Esperimental and Mathematical Investigations of Orange (Citrus sinensis) peel and Leaves. *Food Chemistry .ElSEVIER* , 1728-1735.
26. Cachadiña, I. (14 de 03 de 2007). *Universidad de Extremadura* . Recuperado el 18 de 01 de 2014, de http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf
27. Calva, M. (04 de 2007). Comparación de eficiencia energética entre sistemas de secado horizontal y vertical. México D.F, México, México.
28. Ceballos Adela, G. G. (2009). Evaluation of Various Models of Water Adsorption Isotherms of a Dried Fruit Powder. *Vector* , 107-116.
29. Ciemat. (s.f.). Energía Solar Térmica. (Sexta). España: CEDDET.
30. Comisión Europea, U. (22 de 01 de 2014). Informe de la comisión al Parlamento Europeo, al Consejo , al Comite Económico y Social Europeo. Brueslas, Bélgica.
31. Creus, A. (2009). *Energías Renovables* (Segunda ed.). España: CEYSA. CANO PINA .
32. Dávila, J. (13 de 03 de 2004). Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire. Cholula, Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
33. Denisse Jeria Heitmann, A. P. (2011). Estudio del Secado Convectivo de Hojas de Stevia Rebaudiana y Factibilidad Técnico - Economica de una Planta Elaboradora de Edulcorante a Base de Stevia. *Universidad de Chile , Faculta de Ciencias QUimicas y Farmacéuticas. Memoria para optar título de Ingenieria en Alimentos* , 22.
34. Diego Pineda, W. V. (2010). Diseño y construccion de un túnel de viento subsónico con sistema de adquisición de datos para el estudio de la aerodinámica de los vehículos. Latacunga , Cotopaxi, Ecuador: Escuela Politecnica del Ejercito.
35. Dilip Jain, R. K. (2004). Perfomance evaluation of an inclined multi pass solar air heater with in built thermal storage on deep bed drying application . *Journal of food Energineering 65* , 497-509.
36. Domínguez, A. (03 de 2009). Evaluación del efecto de tres condiciones de almacenamiento sobre la estabilidad y tiempo de vida en anaquel de panela granulada. (E. P. Nacional, Ed.) Quito, Pichincha, Ecuador.
37. E.H Papaionnau, S. P. (2013). Characterization of condensates from an indirect olive oil pomace drying process the effect of drying temperature. *Journal of Enveronmental Chemical Engineering. EL SEVIER* .
38. Egan Aguirre, J. M. (2006). Instructivo para el desarrollo de protocolo de medición y evaluación. *Universidad Nacional de Tres de Febrero. Ergonomía* , 1-12.
39. Emérita Delgado, Á. L. (2012). Modelamiento y Análisis de secaderos con aplicaciones a fuebtes de energía alternativa utilizando programa de simulación. *lll CAIM , Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica* , 12.
40. Emérita Delgado, J. P. (2013). Utilización de energiá solar e Intercambiador enterrado como fuente de calor para camara de secado. *INER* , 8.

41. Europeas, C. d. (6 de 08 de 2009). Regalmento (CE) nº 710/2009 de la comisión de 5 de agosto de 2009 que modifican el reglamento (CE) nº 889/2008. *L 204/15* Diario Oficial de la Unión Europea.
42. Eva Lllera, J. Á. (2007). Algas Marinas de Asturias. Asturias, España.
43. F.K Forson, M. N. (2007). Modelling and experimental studies on a mixed mode natural convection solar crop-dryer. *Solar Energy ScienceDirect* , 346-357.
44. FAO. (2005). *http://www.fao.org/*.
45. Fernández, P. (2003). *Procesos Termosolares en baja, media y alta tempertura.* Universidad de Cantabria , Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.
46. Fernández, P. (24 de 07 de 2003). Procesos Termosolares en Baja,Media y Alta Temperatura. Cantabria, España.
47. Gracía, V. (2012). Bombas de calor geotérmicas. Correcta planificación , instalación y uso. En Varios., *GeoEner* (pág. 141). Madrid: Fundación de la Energía en la Comunidad de Madrid.
48. H.A. Iglesias, J. C. (1995). An alternative to the Guggenheim, Anderson and De Boer model for the mathematical description of moisture sorption isothermans of foods. *Food Research International. ELSEVIER* , 317-321.
49. HectorA. Tinoco, D. O. (2010). Analisis del Proceso de Deshidratación de Cacao para la Disminución del Tiempo de Secado. *13* (53-63).
50. Hodali, R., & Bougard, J. (2001). Integration of a desiccant unit in crops solar drying installation: optimization by numerical simulation. *Energy Coversaion y Management. Pergamon* , 1543-1558.
51. I.A. Mc Doom, R. R. (1999). Optimization of solar crop drying. *Renewable Energy. Pergamon* , 749-752.
52. IRENA, I. R. (06 de 2012). RENEWABLE ENERGY COUNTRY PROFILES LATIN AMERICA.
53. J Álvarez, J. A. (2012). Diseño de un laboratorio especifico para el ensayo de bombas de calor de acuerdo a las Normas EN 255-3. En Varios., *GeoEner* (pág. 102). Madrid: Fundación de la energía de la comunidad de Madrid.
54. J. Escuer, L. B. (2012). Rendimiento térmico de los intercambiadores de calor tierra - aire para reducir la demanda de energía de enfriamiento y renovación de aire en España. En Varios, *Geo Ener* (págs. 239-246). Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
55. Jain, D. (2005). Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application. *Journal of food Engineering. Science Direct* , 170-178.
56. Jairo Acosta, C. D. (2008). Simulación 3D del Flujo en un Compresor Centrífugo por Medio de Herramientas CFDs Bajo Carga Parcial. *Revista Chilena de Ingeniería , 16*, 203-2010.
57. Javier Más, S. (2009). *Energa Solar térmica de baja, media y alta temperatura.* Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
58. Javier Méndez, R. C. (2010). *Energía Solar Térmica* (primera ed.). (F. Editorial, Ed.) Madrid: España.
59. John Duffie, W. B. (2006). *Solar Engieering of thermal processes* (Tercera ed.). New Jersey , United States of America : Wiley.
60. José Carta, R. C. (2009). *Centrales de Energía Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovabes* (Primera ed.). Madrid, España: Pearson, Prentice Hall.

61. José Carta, R. c. (2009). *Centrales de energías renovables . Generación eléctrica con energía renovables.* Madrid: Pearson Prentice Hall.
62. José Carta, R. C. (2009). *Centrales de energías renovables . Generación eléctrica con energías renovables* (Primera ed., Vol. 1). Madrid, España: PEARSON.
63. José Méndez, R. l. *Energía Solar Térmica* (Primera ed., Vol. 1). (F. Confemetal, Ed.) Madrid, Madrid, España: FC.
64. José Neira, I. P. (02 de 2009). Elaboración de carnes deshidratadas de res , cerdo y aves. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
65. Juan Cedillo Galarza, M. M. (09 de 2011). Validación de Modelo Computacionales de Flujo Dinamico con Pruebas de trazadores en Lagunas de Gran Escala. Cuenca, Ecuador.
66. Juan Hermosillo, D. G. (1995). *Notas sobre curso de Energía Solar* (Primera ed.). (D. d. Ingeniería, Ed.) Tlaquepaque, Jalisco, Mexico : Instituto Tecnologíco y de Estudios Superiore de Occidente.
67. Julio Gil, S. M. (2013). Water Adsorption and Desortion Isotherms on non Fat Dry Milk. *Ciencias de la Ingenieria* , 51-59.
68. JulioGil, S. M. (2013). Isotermas de Adsorción y desorción de Agua en Leche Descremada en Polvo. *4* (51-59).
69. Jutglar, L. (2004). *Energía Solar* (Primera ed.). Barcelona, Cataluña, España : CEAC.
70. K.S Jairaj, S. S. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy, ScienceDirect* , 1698-1712.
71. Koyuncu, T. (2006). Perfomance of various desing of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy. ELSEVIER* , 1073-1088.
72. Koyuncu, T. (2005). Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy, Science Direct, El Sevier* , 1073-1088.
73. Koyuncu, T. (2006). Performance of various desing of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy. Science direct* , 1073-1088.
74. Kyung A Jung, S. R. (2013). Potencials of Macroalgae as Feedstocks for Biorefinery. *Bioresource Technology. ELSEVIER* , 182-190.
75. Llosa, R. (07 de 25 de 2008). Pérdidas de Carga en Tuberías. Perú.
76. López, Á. (11 de 03 de 2010). Instalaciones Solares Fotovoltaica. Santiago de Compostela, España.
77. M. Augustus Leon, S. K. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable y Sustainable Energy Reviews. Pergomon* , 367-393.
78. M. Palomino. F. Estrada, G. L. (2010). Microalgas. Potencia para la producción de biodiesel. Universidad del Valle. Cali, colombia.
79. M.O. Abdullah, F. M. (2006). Drying performance and thermal trasient study with solar radiation supplemented by forced ventilation. *Cience Direct . ELSEVIER* , 1027-1034.
80. María Chavez, S. S. (2004). Isotermas de adsorción de berenjenas deshidratadas.
81. Martín Almada, M. S. (2005). Guia de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortaliza, plantas medicinales y carnes. (F. C. Almada, Ed.) Asunción , Paraguay.
82. Martínez, C. (s.f.). Influencia de las Condiciones de Secado en las Cinéticas de Deshidratación de Pepitas de Uva . Universidad Politecnica de Valencia. Master en Gestión y Seguridad Alimentaria. Valencia, España.

83. Martínez, J. (2013). *Energía Geotérmica* (Primera ed., Vol. 1). (U. E. Geotermia, Ed.) Madrid, Madrid, España .
84. Martínez, J. (2013). *GEOTERMIA , como generar masivamente electricidad calor y frío con la energía de la tierra* (Pimera ed.). Madrid, España: Unión Española de geotermica .
85. Martínez, J. (2013). Geotermia. En J. Martínez, *Como Generar Masivamente Electricidad Calor y Frío con la Energía de la Tierra* (pág. 29). Madrid: Primera.
86. Más, J. (2009). *Energía Solar térmica de baja , media y alta temperatura.* Santiago de Compostela: Universidad Santiago de Compostela.
87. Miguel Angel Condorí, G. D. (2010). Diseño, Construcción y Análisis de un Secador Solar Industrial en Huacalera, Quebrada de Humahuaca, Argentina. *IV ISES CLA.*
88. Miguel Casa, M. B. (2012). *Instalaciones Solares Fotovoltaica* . Barcelona: Marcombo.
89. Miguel López, H. S. (2011). Elaboración de sopa instantanea a partir de harina de frejol. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
90. Ministério da Saúde, M. (2007). *Modes of Transmission Study – Review of the National HIV Prevention.*
91. Ministério da Saúde, M. (2005). *Plano Estrategico do Sector de Saúde.*
92. Miquel Casa, M. B. (2012). *Instalaciones Solares Fotovoltaica* (Primera ed.). Barcelona, España: Marcombo.
93. Miquel Casa, M. B. (2012). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas* (Primera ed., Vol. 1). Barcelona, Cataluña, España: Marcombo.
94. Montero, I. (11 de 2005). Modelo y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura . Badajoz, Extermadura, España .
95. Moreira, R. F. (1997). *Estudio del proceso de secado de uvas y ajos en plantas piloto.* Santiago de Compostela: Universidad Santiago de Compostela.
96. Muhtaseb A, M. E. (2010). Moisture, adsorption isothermas of microware - baked Madeira Cake. *43* (1042-1049).
97. Mujumdar, A. (2007). *Handbook of Industrial Drying* (Third ed.). NW, United States of America: Taylor end Francis Group.
98. O.V. Ekechukwu, B. N. (1999). Review of solar energy drying systems III: low temperature air heating solar colllectors for crop drying applications. *Energy Conversion y Management* , 657-667.
99. Ocampo, A. (2006). Modelo Cinético del secado de la Pulpa de Mango. *5* (119-119).
100. Ochleng, R. (2010). *Solar collectors and theory and applications.* Rijeka: SCLYO.
101. Omaña, M. (03 de 2010). Isostermas de absorción de agua en residuos de extración de jugo de naranja. (U. P. Bolivariana, Ed.) Medellin, Colombia.
102. Ortiz, B. S. (01 de 03 de 2003). *Colección de Tesis Digitales.* Recuperado el 04 de 02 de 2012, de Universidad de las América Puebla: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/ortiz_a_bs/portada.html
103. Osman Yaldiz, C. E. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy. Pergamon* , 457-465.
104. Osorio, M. A. (2009). *monografías*. Recuperado el 01 de 03 de 2011, de htt://www.monografias.com/trabajo14/algas/algas.shtml
105. P. Lodeiro, B. C. (2005). Biosorption of cadmium by biomasa og brown marine macroalgae. *BIORESOURCE TECHNOLOGY . Science Direct. ELSEVIER.* , 1796-1803.

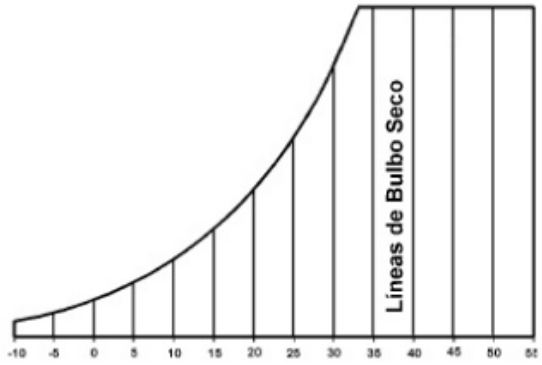
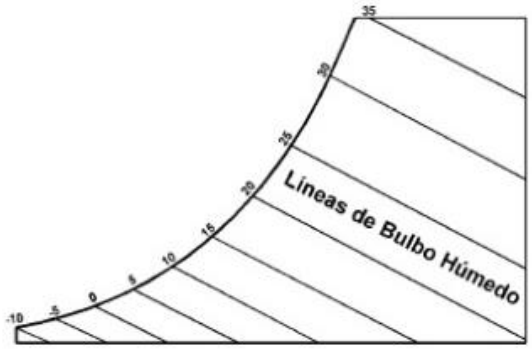
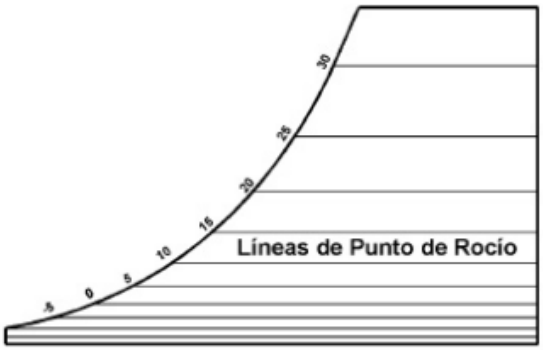
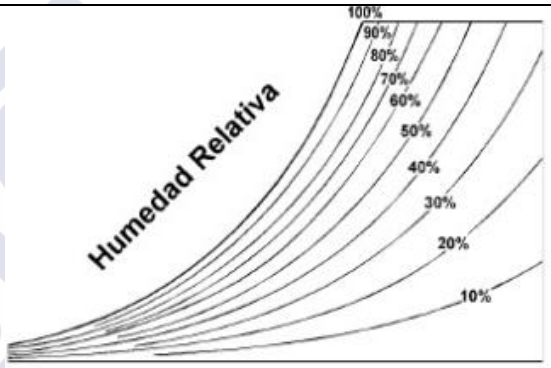
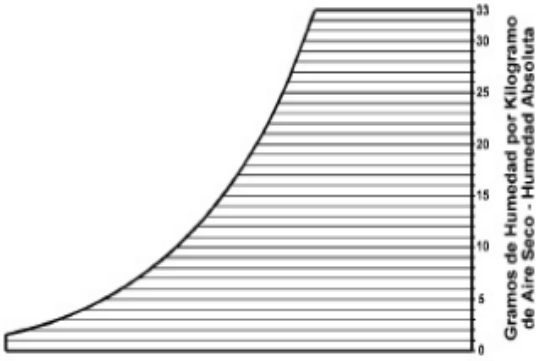
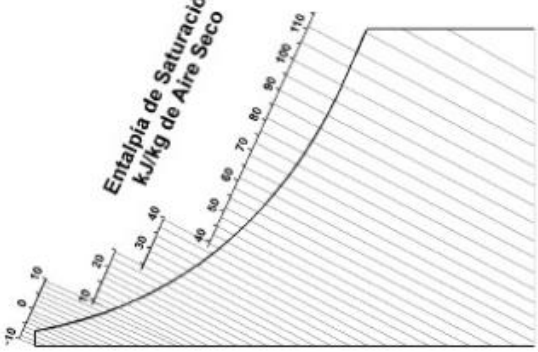
106. PawKit. (2001). *Operator´s Manual. Water activity meter. Version 8.* Decagon Devices, Inc.
107. Pedro Fito Maupoey, A. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente.* Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
108. Prosalus. (2007). *ANALISIS DE LA REALIDAD DE MOZAMBIQUE.*
109. Punín Crespo, M. O. (02 de 02 de 2005). Estudio de algas para consumo humano producidas y manufacturadas en Galicia: Evaluación de su seguridad alimentaria. Tesis doctoral. Dpto de Química Analítica, Nutrición y Bromatología. Facultad de Farmacia. . (U. S. Compostela, Ed.) Santiago de Compostela, A Coruña, España. Obtenido de Universidad de Santiago de Compostela, .
110. Renewable Energy, R. 2. (2013). Renewables 2013, Global Status Report.
111. Riyad Hodali, J. B. (2001). Integration of desiccant unit in crop solar drying installation: optimization by numeral simulation. *Energy Conversion y Management* , 1543-1558.
112. RobertoA. Lemus, M. P. (2008). Kinetic study deshydration and desorption isotherms of red alga Gracilaria. *LWT . Science Direct* , 1592-1599.
113. Ronald E. Walpole, R. H. (1999). *Probabilidades y Estadística . Paa Ingenieros* . Printece Hall.
114. Ronicely P. daRoncha, E. d. (2012). Cinérica del secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente , 16* (6), 675-683.
115. Rubira, K. (2012). DIVERSIDAD, ABUNDANCIA Y DISTRIBUCIÓN DE LAS MACROALGAS EN LA ZONA INTERMAREAL ROCOSO EN LAS PLAYAS DE SALINAS, LA LIBERTAD Y BALLENITA (PENÍNSULA DE SANTA ELENA – ECUADOR OCTUBRE – NOVIEMBRE 2009). Guayaquil, Guayas, Ecuador.
116. S. Boughali, H. b. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar - Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Enery , ScienceDirect* , 2223-2232.
117. S. Vijaya Venkata Raman, S. I. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 2652-2670.
118. Sahbi Ouertani, S. A. (2014). Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Jack Pine and Palm Wood: Comparative Study. *Industrial Crops and Products* , 200-210.
119. Samaneh Sami, N. E. (2011). Energy and exergy analysis of an indirect solar dryer based on mathematical modeling results. *Science Direct Energy , 36*, 2847-2855.
120. Shobhana Singh, S. K. (2012). testing method for thermal perfomance based rating of various solar dryer desings. *Solar Energy. SciVerse Science Direct* , 87-98.
121. Silvana Miranda, G. v. (2013). Macroalgas. (U. d. Bosco, Ed.) Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.
122. SolidWorks. (2010). SolidWorks Flow Simulation 2010 Technical Reference . Estados Unidos .
123. Tania Váquez, S. A. (1997). Manual del Secado Solar Técnico de Alimentos. Cochabamba, Bolivia.
124. Thomas Müller, A. S. (octubre 2005). *Assessment of the Forest Reserve Network in Mozambique.*
125. UNAM. (2007 de Marzo de 2007-2008). Fundamentos y ténicas de ánalisis de alimentos. México, México.
126. V.P. Sethi, S. A. (2009). Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall refrection. *Solar Energy. Science Direct* , 1472-1484.

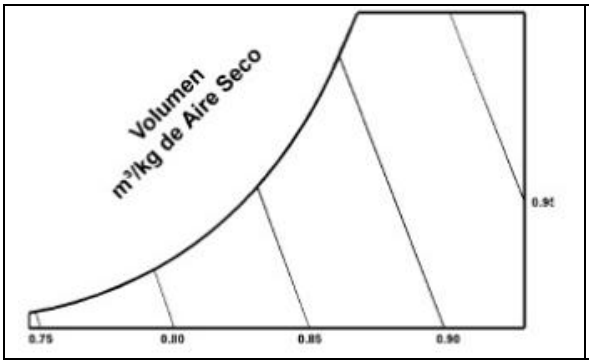
127. Valdés, T. (08 de 12 de 2012). *Naukas*. Recuperado el 11 de 01 de 2014, de http://naukas.com/2012/12/18/energia-sin-co2-un-problema-presente-reduccion-de-emisiones-de-co2/
128. Verónica Lagos, J. C. (2004). Contribución al conocimiento de la biología del alga parda alimentaria Himanthalia elongata (Fucales, Phaeophyta) en las costas de Galicia . *Anales de Biología 26* , 105-116.
129. Viades, J. (2010). Adsorción de agua en alimentos. Isoterma de adsorción de Guggenheim, Anderson y Boer (GAB). México, México.
130. Walter Cova, H. M. *Desecación de productos agrarios: Antecedentes teóricos y bibliograficos.* La Rioja - Argentina: Editorial de la Universidad Tecnologíca Nacional.
131. White, F. (2003). *Mecánica de Fluidos* (Quinta ed.). Mc Graw Hill.
132. Xavier Álvarez, M. P. (2012). *Proyecto transferencia Tecnológica y Valoración Energética de Biomasa.* Guayaquil: Facultad de Ciencias Naturales Universidad de Guayaquil/ ESPOL/USC.
133. Yolanda Benito, M. M. (06 de 2007). Panorámas de las energías renovables. Marco legislativo y aspecto medioambiental. (CIEMAT, Ed.) Madrid, España.

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

ANEXOS

Anexo A

Línea de temperatura de bulbo seco en ºC	Línea de temperatura de bulbo húmedo en ºC
	
Línea de temperatura de punto de rocío en ºC	Línea de humedad relativa en %
	
Línea de humedad absoluta en g/kg	Línea de entalpía en kJ/kg de aire seco
	
Línea de volumen especifico en m^3/kg aire seco	


Volumen
m³/kg de Aire Seco
0.75
0.80
0.85
0.90

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ANEXO B

PROTOCOLO DE MEDICION PARA LA VALORACIÓN DE BIOMASA MAGROALGAL

REALIZADO POR :

Emérita Delgado Plaza

INTRODUCCIÓN

Se conoce a través de varias investigaciones desarrolladas y publicadas, que, para la valoración y análisis de la biomasa macroalgal durante el proceso de secado, ya sea cortada, este debe de realizarse lo más pronto posible, pues lo contrario se perderá sus nutrientes [1]. Además, existe una diferencia significativa en la variación de las propiedades físicoquímicas en el momento de la valoración de la muestra; relacionada con el sitio de recogida, tiempo, traslado y almacenado hasta ser utilizada. Entre los factores importantes notamos; pérdida de masa, decoloración, textura, cualidades nutritivas, entre otras.

Con el tiempo, se ha evidenciado más el uso potencial de las macroalgas marinas; en la industria farmacéuticas, sectores agrícolas como nutrientes para mejorar o suplementar el suelo (fertilizantes y abono), en forma de extracto líquido, harinas o aspersores foliares, además para obtener biocombustibles, entre otros.

‘’Un protocolo es una estructura formal que consiste en desarrollar con datos precisos necesarios lo que compete al tema en cuestión, desglosar los resultados obtenidos y contrastar con normas y leyes.”[2]. El protocolo de medición tiene como objetivo explicar el conjunto de pasos necesarios para plasmar el trabajo de campo y de laboratorio para un muestreo adecuado, análisis consecutivo de la biomasa algal y valoración del producto final.

Metodología:

La utilización de este protocolo de trabajo puede ayudar de manera general a conocer los procedimientos esenciales para la toma de muestra, durante el trabajo de campo y la metodología de medición para obtener resultados confiables.

El protocolo se ha dividido en tres etapas esenciales para llevar a cabo la valoración de la biomasa marina (Macroalgas).

1. Recolección de muestras.

Durante esta primera etapa es necesario conocer el lugar donde se realizara la recolección de la muestra, llevar los implementos necesarios para realizar el trabajo de campo, además la persona encargada del muestreo deberá tener conocimientos previos del protocolo de medición para garantizar una correcta recolección de muestra, medición y manejo de equipos, adecuada conservación de la biomasa y notas ordenadas de los datos registrados (plantillas de datos) para ser posteriormente procesada la información.

La plantilla del protocolo elaborado para la recolección de datos ***(anexo 2)*****,** es una estructura fácil de llenado que comprenden los siguientes ítems:

1.1 Plantillas para registro de datos

- ***Nombre del Investigador:*** Persona/s encargada/s en realizar la recolección de las muestra y manejo de equipos.
- ***Localización*****:** Nombre de la ciudad, pueblo o comuna, alguna referencia cercana al sitio como una carretera, calle o distancias. Si fuera el caso escribir las coordenadas de localización como latitud y longitud utilizando un GPS o geoposicionador.
- ***Fecha / hora:*** Día y hora en el momento de la recogida de la biomasa.
- ***Nombre de la biomasa:*** Especifique el nombre de la especie, género o divisiones. Si la conoce, caso contrario indique algo referencial que sea identificada por usted hasta que la muestra sea llevada a la persona profesional del área. Ejemplo; divisiones (algas verdes, pardas, rojas), género (Sargassum, Padina, Codium.)
- ***Naturaleza física de la muestra:*** De manera cualitativa se indicara la coloración, textura, forma de encontrase (por ramas , ancladas en las rocas, etc)
- ***Punto de muestreo****:* Distancia aproximada de la orilla de la playa, profundidad aproximada si son recogidas en aguas someras o ambiente intermareales.
- ***Actividad de agua (a_w) de la muestra****:* Es la fracción de agua disponible en un medio determinado, para lo cual se utilizara un medidor digital para medición de actividad de agua.
- ***Temperatura del agua*****:** La medición se realiza con un medidor digital.
- ***pH del agua:*** *(opcional)*
- ***Cantidad de muestras recogidas****:* numere las muestras representativas tomadas en la misma área, a través de una malla trazada en el sitio de análisis.
- ***Tipo de contenedor:*** Recipiente utilizado para el almacenamiento de la muestra con su respectiva etiqueta. Estos pueden ser botellas de plásticos, fundas, baldes, heladeras, etc.
- ***Observaciones*****:** Indique lo que considere relevante durante el muestreo por distintos factores que puedan afectar los resultados. Manera cualitativa o cuantitativa.
- ***Equipos:*** Medidor de actividad de agua , Termómetro, peachímetro, GPS

En el manual de campo realizado por Héctor Zaixso, establece; "*la confiabilidad de los datos depende del diseño de muestreo que es referido a la replicación de la muestra obtenida en aproximadamente la misma ubicación de muestreo*, *que permite establecer los límites de confianza del mismo "*[3].

1.2 PROTOCOLO

a. Establecer una lista de los equipos e insumos necesarios para llevar durante la recogida de las muestra de biomasa. (Anexos 1).
b. Imprima las plantillas del protocolo para que el técnico lleve y pueda ir rellenando a medida que toma los datos.
c. *Recipientes, fundas y contenedores de muestras*:

- Para análisis de laboratorio es necesario el uso de fundas con cierre, las que se llevaran selladas hasta ser utilizadas durante el muestreo, una heladera de telgopor térmica y paquete de hielo gel (Ice Pack).
- Para recogida de biomasa en grandes cantidades (secado) se utilizaran recipientes como baldes de plásticos o botellas, nuevos o usados deben de limpiarse antes de su utilización. Los mismos deben permanecer tapados hasta su uso.

d. Los equipos de medición que se llevaran para el muestreo, deberán estar calibrados. Ver especificaciones del fabricante.
e. Durante la elaboración del cronograma de viaje se recomienda investigar los periodos de crecimiento de biomasa macroalgal , además de los días y horas en que la marea se encuentra alta o baja en el sitio en que se pretende tomar muestras. Ver páginas web del Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador (INOCAR), http://www.inocar.mil.ec/mareas/mareas.php, y el Servicio de Hidrografía Naval, http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form_Tmareas.asp, para Argentina.
f. Durante el trabajo de campo es recomendable elaborar un croquis del área de muestreo, de los sitios (puntos numerados) cercanos a la orilla, charcos de agua y en escasa profundidad (menos de 2 metros). Comenzar las actividades preparatorias del muestreo una o dos horas antes.
g. En cada área de muestreo se tomara el punto de localización (coordenadas referenciales) con ayuda de un **GPS o un geoposicionador** , las mismas que serán anotadas en la plantilla de datos.
h. Previo a la recolección, los recipientes de muestreo deberán ser lavados con agua de mar y llenados a su media capacidad. Evite coger agua mezclada con arena u otras impurezas.
i. Las macroalgas recogidas, deberán limpiarse de la arena e impureza que pueda contener.
j. *Recolección en grandes cantidades;* La biomasa deberá ser depositada directamente en los contenedores o recipientes debidamente etiquetados (nombre y punto de recolección), mantenerlas sumergidas en agua marina hasta que pueda ser procesada. No dejar la muestra en el sol, para evitar su deterioro por resequedad, el humo de cigarro y combustión puede contaminar las muestras con metales pesados.
k. *Para análisis generales;* colocar las muestras en fundas plásticas con cierre hermético, etiquetar, ponerlo dentro de la heladera de telgopor con Ice Packs. Tapar herméticamente para transportar las muestras dentro de 24 horas al laboratorio.
l. Estimar la **altura de profundidad** del agua de mar del sitio donde se toma de muestra lo cual puede ser en charcos, profundidades de menos de 1 metro, etc. Anotar el valor en la plantilla de registro de datos.
m. Tomar una pequeña muestra de biomasa limpia de residuos y colocar en el porta muestra, destapar el analizador de humedad **"AQUALAB"** que tiene incorporado un sensor de humedad dieléctrico en el medidor de actividad de agua, en la parte de abajo del equipo. Colocar el porta muestra en el sensor del Aqualab, esperar 5 minutos, ver el valor en la pantalla digital. Anotar la medición en la plantilla de registro de datos.
n. Tomar la **temperatura** del agua, sumergiendo la termocupla en el agua, permitiendo que esta se equilibre, leer el termómetro y anotar su valor en la plantilla. evite topar la superficie de la zona (arena) durante la medición. Solo se tomara la temperatura del agua

en los sitios donde las algas son recogidas como encharcadas, piletas de marea, aguas someras.

o. **Medición de pH** en el agua (Opcional) se lleva a cabo por medio de un pH, introducir el electrodo en la disolución, el sistema dará el resultado a través de la pantalla digital. Anotar el valor en la plantilla de datos.
p. Repetir el número de veces que consideren necesario la recolección de muestras múltiples para laboratorios, siempre y cuando no sean zonas cuyas características sean distintas. Repita paso g,h, k, i, m, n,o.
q. Durante el transporte, evitar que las muestras se calienten.
r. Las muestras deben de ser enviadas al laboratorio, de manera que estas lleguen preferentemente antes de las 24 horas.

1.2.1 Observaciones.

En caso que el análisis de las muestras sea después de 24 horas, deberán usarse métodos de conservación para mantener muestras biológicas.

2. Caracterización de la biomasa

La caracterización de la biomasa, servirá para conocer la posibilidad de uso y el proceso que esto conlleve para la obtención de la materia prima final. Los parámetros analizadas en las muestras se han dividido en propiedades físicas, químicas y térmicas que consisten en determinar; porcentaje de humedad, lípidos, peso, carbohidratos, nutrientes, poder calorífico, composición química, etc., que se encuentran en el producto. Cabe indicar que es necesaria una muestra representativa para su análisis.

A continuación se describe los análisis que se han considerado indispensables para la valoración de la biomasa marina.

Tabla 1. Principales parámetros evaluados en el análisis de la materia prima

	Parámetros	Método
Parámetros Físicos	Porcentaje de Humedad	• Método de estufa basado en determinación gravimétrica. • Método de termo balanza
	Densidad aparente	
Parámetros Químicos	Materia orgánica (opcional)	
	Porcentaje de Carbohidratos	
	Porcentaje de lípidos o grasas	Soxhlet
	Nitrógeno total	Kjeldahl
	Fósforos totales	Gravimétrico Método calorimétrico
	Potasio	Espectrofotometría de Absorción atómica
	Calcio	Espectrofotometría de Absorción atómica
	Cadmio	Espectrofotometría de Absorción atómica
	Zinc	Espectrofotometría de Absorción atómica
	Plomo	Espectrofotometría de Absorción atómica
	Sodio	Espectrofotometría de Absorción atómica
	Magnesio	Espectrofotometría de Absorción atómica

	Hierro	Espectrofotometría de Absorción atómica
	Cobre	Espectrofotometría de Absorción atómica
Parámetros energéticos	Poder calorífico	Calorímetro

3. Obtención de curva de secado representativa de la muestra

Para determinar la velocidad de secado de la biomasa es necesario obtener las isotermas desorción para calcular el contenido de humedad final, y en ciertos casos conocer el consumo energético necesario para secar un producto. [4]

3.1 Plantilla de registro de datos:

- ***Nombre del investigador:*** Persona/s encargada/s en realizar las mediciones.
- ***Fecha (dd/mm/aa):*** día, mes y año que se realiza las mediciones.
- ***Tiempo de secado (t):*** periodo de mediciones realizadas por un intervalo de tiempo, pudiéndose evaluar cada 5 o 10 minutos.
- ***Peso inicial (m_i):*** registro de la masa inicial del producto antes de ingresar al secador y durante el intervalo de tiempo de secado que se analice las pruebas en la muestra.
- ***Peso final (m_w):*** registro de masa final pesada en un intervalo de tiempo durante el proceso de secado.
- ***Humedad (HR %):*** porcentaje de humedad inicial del producto. Uso de una termobalanza.
- ***Actividad de agua (a_w):*** utilizando un medidor digital para medición de actividad de agua, se registra el valor a_w en cada intervalo de tiempo conforme se va secando la muestra.
- ***Temperatura (T) :*** valor de temperatura que se encuentra expuesta la muestra dentro de la cámara de secado en el intervalo de tiempo seleccionado.
- ***Textura de la muestra***: análisis sensorial como son olfativo, visual y tacto a la muestra; decoloración, forma física, fragilidad.

***Equipos utilizados*:** medidor de actividad de agua, medidor de humedad para muestras sólidas, balanza de laboratorio, secador eléctrico (estufa).

3.2 PROTOCOLO.

a. Observar si la biomasa a utilizar se encuentra libre de residuos (arena), de ser así se procederá a lavar con agua destilada.
b. Colocar un pequeño trozo de muestra en un portamuestra (Recipiente poroso plástico para muestras pequeñas con tapa. Tamaño aproximado de 12,7 mmx 15,7 mm). Llevar a la termobalanza para medir su contenido de humedad. Registrar este valor en la plantilla de datos como el valor de humedad inicial de la muestra.

c. En una balanza electrónica de laboratorio pesar tres porta muestras (material de lámina de aluminio) que se utilizaran durante el análisis. Numerar cada uno con un marcador permanente
d. Colocar el portamuestra en la balanza, encerar la misma y medir 10 gramos de la muestra. Replicar las muestras tres veces.
e. Trasladar las muestras a una estufa experimental de calentamiento forzada a 90 ^{0}C, por 10 min.
f. sacar las muestra de la estufa una a una, E ir colocándolos en cada recipiente trasportador con tapa (envase de plástico con soporte para muestras y un agente deshidratante como la sílica gel).
g. Pesar las muestras en la balanza digital, anotar el valor en la plantilla de datos.
h. Seleccionar un pequeño pedazo de cada muestra para medir la actividad de agua con un medidor digital marca el Aqualab Water Activity meter, cuyo valor de a_w varía entre 0 a 1. Llenar la plantilla del protocolo con los valores de la actividad de agua y la temperatura que indica el equipo.
i. Seleccionar un pequeño pedazo de cada muestra para medir el contenido de humedad en la termobalanza.
j. Medir el peso final de cada una de las muestras. Regístralo en la plantilla. Es necesario no olvidar poner la muestra dentro del recipiente transportador con tapa, mientras se efectúan las mediciones de las demás muestras. Esto evitara que las mismas no se contaminen ni absorban agua del ambiente.
k. Repetir el procedimiento de los literales e,f,g,h,i,j por varias veces en el intervalo de tiempo indicado, hasta que la actividad de agua en la muestra sea constante.
l. Obtenida la tabla de datos experimental (a_w , m_i, m_f, %HR) , se procede a ingresar los valores en el programa Water Analyzer, que ajusta la isoterma al modelo de GAB. Para obtener la isoterma de desorción , el índice de correlación de datos y la humedad de equilibrio (g H_2O/g sólido seco)

La curva de velocidad de secado característica de las muestras, se obtiene a través de los valores de humedad de equilibrio dada en g H_2O /g s.s, peso inicial, base seca del producto, temperatura, velocidad del aire en cada periodo de tiempo.

A partir de estos cálculos se elaborarán dos tipos de gráficos:

- Humedad libre vs Tiempo
- Velocidad de Secado vs Humedad libre

Observaciones

Si en el laboratorio cuenta con una báscula o balanza con protección externa sería mucho mejor.

Criterios legales aplicables.

- Porcentaje de Humedad; Método AOAC 934.01
- Medición de Ph ; método de la AOAC 994.18 (1995)
- Grasas; tipo Soxhlet de acuerdo al método oficial de la AOAC 14.059 (1960).

- Metales; método kjeldahl de la AOAC 2.057 (1980).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Bula Meyer,G. 2004. Las Macroalgas marinas en la agronomía y el uso potencial del sargassum flotante en la producción de fertilizante en el archipiélago de San Andrés y Provincia, Colombia. Revista Intropica (Santa Marta). 1: 91-103.
[2] Aguirre Egan, J. Melo, José. 2006. Instructivo para el desarrollo de protocolos de medición y evaluación. Universidad Nacional de tres de febrero. Trabajo de Ergonomía. 1; 1-12.
[3] Zaixso Héctor, 2002. Manual de Campo para Muestreo del bentos. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Facultad de humanidades y Ciencias Sociales. Versión 1. 129-157.
[4] Delgado Plaza Emérita, 2011. Diseño y construcción de prototipo de secadero termosolar de baja temperatura para la utilización de biomasa para fines energéticos. Universidad Santiago de Compostela. Trabajo fin de Master. 1: 10-16.
[5] Nogués Fernando, García Daniel.2010. Energía de la biomasa. Volumen 1. 41-42

Anexos 1.

Tabla 2. Elaboración de un listado posible de equipos e insumos necesitados para realizar muestreos de campo:

Descripción	cantidad
Fundas plásticas con cierre térmico	
Recipientes plásticos o botellas	
Heladera de telgopor	
Etiquetas	
Plantilla para la recolección de datos (establecidas en el protocolo)	
Libreta o libro de campo	
Útiles de escritura	
Mapa	
Cintas masking.	
Ice Packs	
Equipos de muestreos : Medidor de actividad de agua Termómetro Medidor de PH. GPS	
Fotocopia del manual de cada equipo Cámara fotográfica	
Cámara fotográfica	
Baterías o pilas necesarias para los equipos	
Cinta métrica	
Equipos personales (botas, trajes de agua, chaleco, etc)	
Mochila para cargar implementos	

Implementos de primeros auxilios Alcohol Linterna Pastillas antiinflamatoria, infección	

Anexo 2

Tabla 3. Plantilla de registro de datos durante el Muestreo de campo

PLANTILLA PARA MUESTREO EN CAMPO				
Nombre de Investigador:				*Fecha :*
	Muestra 1	*Muestra 2*	*Muestra 3*	*Muestra 4*
Hora:				
Localización:				
Coordenadas				
Nombre de la biomasa				
Naturaleza física de la muestra				
Punto de muestreo				
Actividad de agua (a_w) de la muestra				
Temperatura del agua (C)				
Ph del agua				
Número de muestras recogidas				
Tipo de contenedor				
Nombre de la Etiquetado				
Observaciones:				
Equipos: Medidor de actividad de agua , Termómetro, PH-metro, GPS ***Tipos de contenedor:*** fundas, recipientes o botellas de plásticos				

Tabla 4. Plantilla de registro de datos para la obtención de la curva de secado.

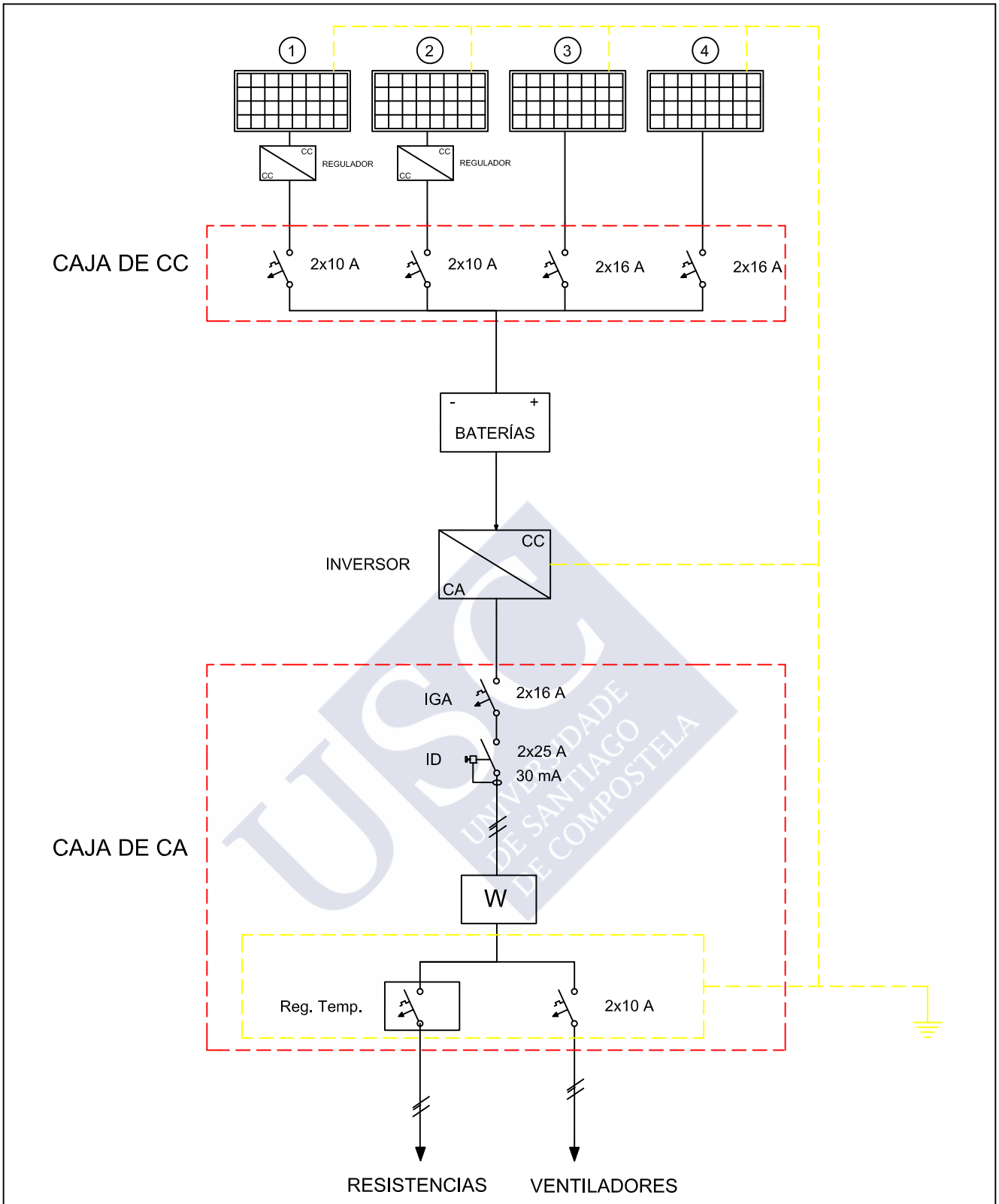
PLANTILLA DE REGISTRO DE DATOS PARA LA OBTENCION DE CURVA DE DESORCION Y SECADO

Nombre del investigador:	*Fecha (dd/mm/aa):*

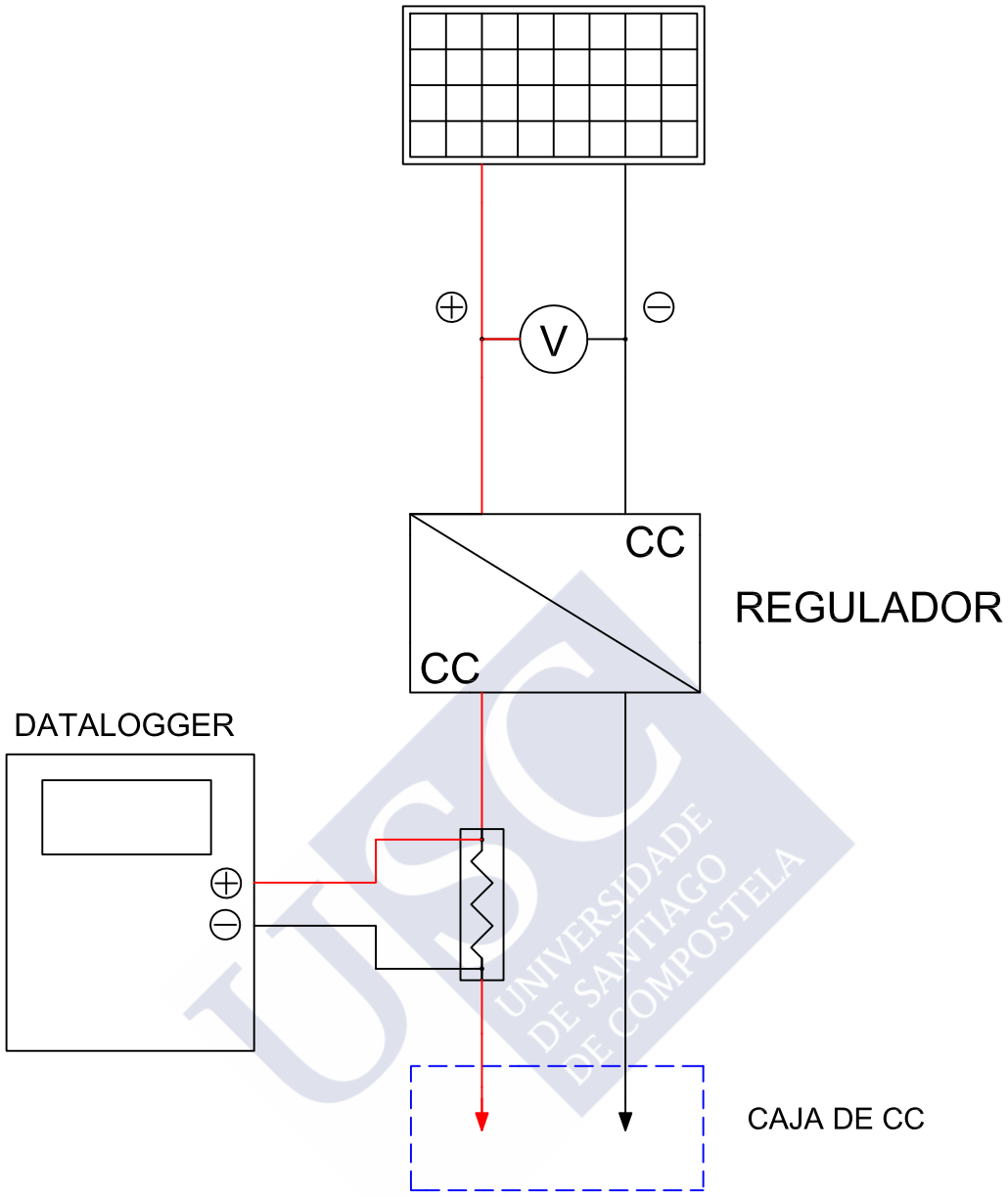
Tiempo de secado	*Peso inicial (m_i)*	*Peso final (m_w)*	*Humedad (HR %)*	*Actividad de agua (a_w)*	*Temperatura (C) (obtenida en el aw)*	*Temperatura (C) (estufa)*
Textura de la muestra:						

Equipos utilizados: medidor de actividad de agua, medidor de humedad para muestras sólidas, balanza de laboratorio, secador eléctrico (estufa).

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA



LEYENDA	
P.I.A. Pequeño Interruptor Automático	Puesta a Tierra
I.D. Interruptor Diferencial	W VATÍMETRO
Panel fotovoltaico	ANEXO C

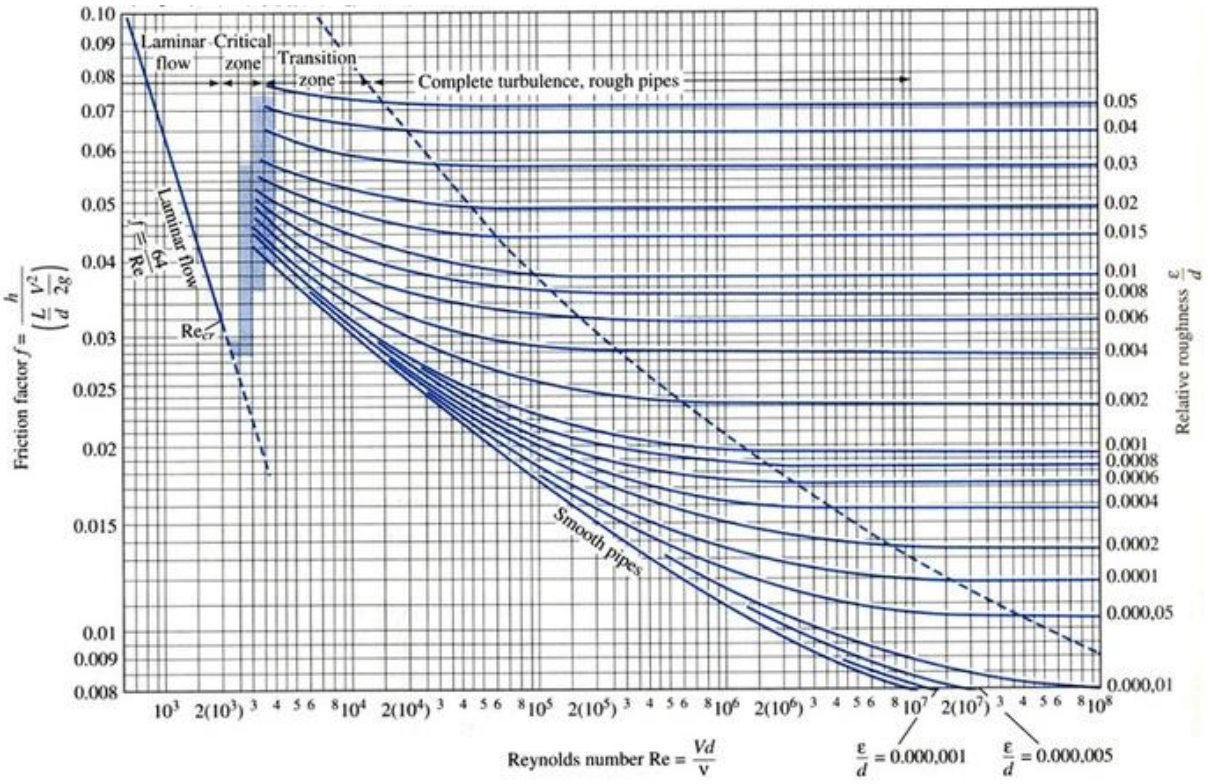


ANEXO C

LEYENDA	
V	VOLTÍMETRO
	SHUNT
	PANEL FOTOVOLTAICO

ANEXO D

Diagrama de Moody



http://www.ebah.com.br/content/ /tabela-moody

Zona Turbulenta: Establecida para Reynolds Re ≥4000. Se identifican dos zonas, transición turbulenta y turbulenta plena. En la última el flujo no depende prácticamente de la viscosidad por lo que la curva se vuelve recta.

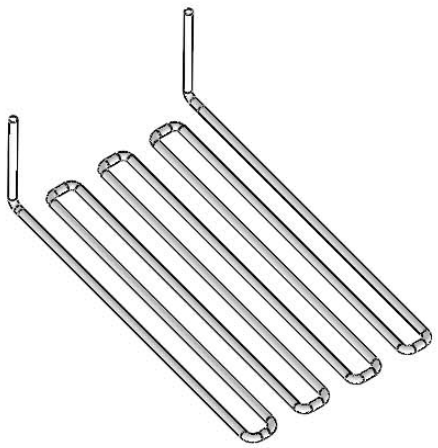
Zona Crítica: El flujo cambia constantemente de laminar a turbulento y no se puede definir en qué régimen se encuentra.

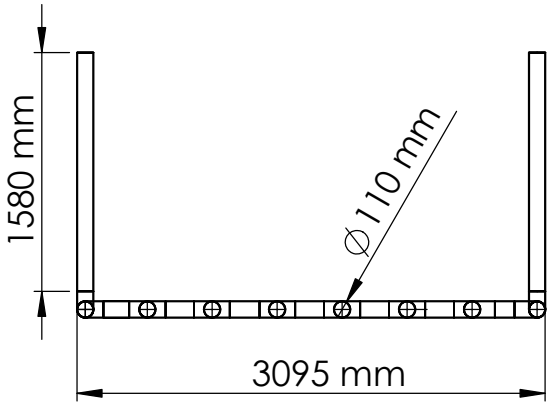
Zona Laminar: Establecida para Reynolds Re ≤2000. El coeficiente de pérdida no depende de la rugosidad del material.

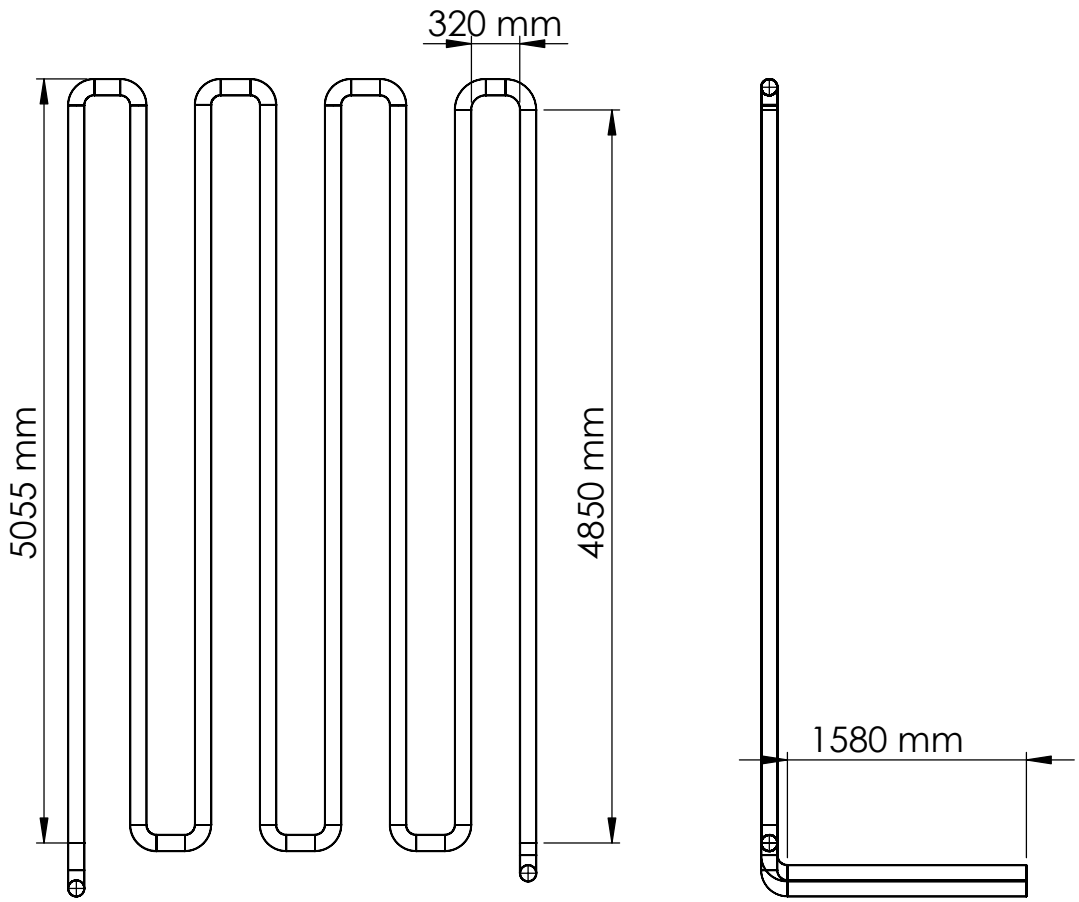
Bibliografía

Llosa, R. (07 de 25 de 2008). Pérdidas de Carga en Tuberías. Perú.

Intercambiador , Vista en 3D







NOMBRE	FECHA	TÍTULO:
Emérita Delgado	11/03/2012	ANEXO E Intercambiador enterrado
MATERIAL: Tuberia de PVC	N.º DE DIBUJO	Nº 2 — A4
Unidad : Milimetros	ESCALA:1:50	HOJA 1 DE 1

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ANEXOS F

PROTOCOLO TECNICO DE MEDICIÓN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE SECADO.

ELABORADO POR:

Emérita Delgado Plaza

METODOLOGÍA

El procedimiento estandarizado se describe en el protocolo, que se ha dividido en tres etapas principales : colector solar (captador que aprovecha la radiación solar para convertirla en energía térmica) que aportara calor al sistema , cámara de secado (recipiente o contenedor aislado del medio ambiente donde recirculara un flujo de aire caliente al producto a deshidratar por un tiempo determinado) y deshidratación del producto.

1. COLECTOR SOLAR

1.1. Plantilla de recolección de datos

- ***Nombre del/los investigador/es:*** Persona/s encargada/s en realizar manipulación de equipos, monitoreo y medición de datos.
- ***Fecha:*** día, mes y año en el que se efectúa el registro de datos.
- ***Área:*** área en m^2 de la salida de aire caliente proveniente del colector
- ***Velocidad (aire caliente):*** Unidades en m/s, medición realizada en el ducto de salida de aire caliente proveniente del colector.
- ***Flujo (aire caliente):*** Salida de aire caliente del colector, registrada en m^3/s.
- ***Temperatura (aire caliente):*** Medición focalizada en el ducto de salida de aire caliente del colector, ^{0} C o Kelvin.
- ***Temperatura (ambiente)***: datos obtenido de la estación meteorológica en ^{0} C o Kelvin, o medido con directamente al ambiente con un equipo de medición.
- ***Radiación solar:*** Obtenida de la estación meteorológica más cercana al lugar, o medida a través de un piranómetro , W/m^2día.
- ***Nubosidad (opcional):*** Parámetro de referencia en W/m^2 en el día de medición.
- ***Velocidad (ambiente):*** Parámetro obtenido de la estación meteorología cercana al lugar, m/s.

***Equipos utilizados*:** medidor de flujo, piranómetro (opcional), multímetro.

2. CÁMARA DE SECADO

2.1 Plantilla de recolección de datos

- ***Nombre del/los investigador/es:*** Persona/s encargada/s en realizar manipulación de equipos, monitoreo y medición de datos.
- ***Fecha:*** Día , mes y año en el momento del registro de datos
- ***Tipo de secador empleado:*** Secadero directo, gabinete indirecto, modelo hibrido, túnel, arcón, forzado.
- ***Área de exposición:*** Comprendiendo el área interna del secadero , m^2
- ***Tiempo:*** Intervalo de tiempo sugerido para el registro de datos. minutos
- ***Temperatura (ambiente):*** Estación meteorológica en ^{0} C o Kelvin, o medido con directamente al ambiente con un equipo de medición.

- ***Velocidad (ambiente):*** Parámetro obtenido de la estación meteorología cercana al lugar, m/s.
- ***Humedad relativa (ambiente):*** Parámetro obtenido de la estación meteorología cercana al lugar, %HR.
- ***Radiación:*** Obtenida de la estación meteorológica más cercana al lugar, o medida a través de un piranómetro , W/m^2día.
- ***Temperatura (aire caliente):*** Monitoreo realizado dentro de la cámara de secado, ^{o} C o kelvin.
- ***Humedad (aire caliente):*** Medición de humedad relativa dentro de la cámara de secado % HR.
- ***Flujo (aire caliente):*** Medición realizada en la entrada y Salida del aire caliente en la cámara de secado, registrada en m^3/s.
- ***Velocidad (aire caliente):*** Medición realizada en la entrada y Salida del aire caliente en la cámara de secado, registrada en m/s.
- ***Equipos de medición:*** Datalogger con termocupla tipo K, medidor de humedad, medidor de flujo, multímetro.

3. PROCESO DE SECADO DEL PRODUCTO

3.1. Plantilla de registro de datos

- ***Nombre del/los investigador/es:*** Persona/s encargada/s en realizar manipulación de equipos, monitoreo y medición de datos.
- ***Fecha:*** día, mes y año que se realiza las mediciones**.**
- ***Tipo de bandejas:*** este apartado corresponde en describir si la bandeja utilizada es con o sin mallado, tipo de material construccional.
- ***Área de la bandeja: el*** área se calcula midiendo la longitud por el ancho de la bandejas, m^2.
- ***Numero de bandeja:*** Numerar las bandejas que contienen productos para su respectivo análisis variable en el tiempo.
- ***Tiempo:*** periodo entre 5 a 10 minutos.
- ***Humedad :*** Humedad relativa medida en el producto % HR
- ***Masa:*** Cantidad de producto en gramos colocado en cada bandeja.
- ***Temperatura de la muestra:*** Grados Celsius, registrada en el producto que varía con respecto al tiempo de exposición de la muestra.
- ***Velocidad de aire caliente:*** Corresponde al aire caliente que ingresa en la cámara de secado necesario para la deshidratación del producto. (m/s)
- ***Temperatura de la cámara:*** Grados Celsius, de aire caliente proveniente de la fuente de calor y fluye por el producto.
- ***Flujo de aire caliente:*** m^3/s, de aire caliente utilizado para la deshidratación del producto.
- ***Radiación:*** Obtenida de la estación meteorológica más cercana al lugar, o medida a través de un piranómetro , W/m^2día.

- ***Cambios químicos:*** son propiedades cualitativas del producto, donde se puede describir su color, olor, dureza, textura, etc.

Equipos de medición: Datalogger con Termocupla tipo K, medidor de humedad, dinamómetro

Anexos

Tabla 1. Lista de equipos utilizados

Equipos	Descripción
Flujómetro	Medidor de flujo y velocidad de aire. Equipo digital. Testo 404-V1. Rango de temperatura: -20 a 70 C. ±0.5 °C. Resolución 0.1 C. Rango de velocidad; 0 a 10 m/s, ± (0.1 m/s + 5% of mv) (0 to +2 m/s). Resolución 0.01 m/s Necesita: 3 Pilas tipo AAA.
Piranómetro	Medidor de radiación que ira conectado a un multímetro digital (mv). Este sistema es ***opcional***, siempre y cuando se tenga la base de datos de la estación meteorológica cercana del lugar. Necesita: Cable de conexión propio y un Multímetro
Multímetro	Medidor digital de voltaje, corriente y temperatura. Necesita; Baterías, cables de conexión para medidas.
Thermocupla data logger	Data logger Pico Technology, USB installation, con conexión a termopares hilo fino tipo K de 3m. La recogida de datos se realiza instalando el programa a una computadora. Necesita: Calibración previa del equipo. Computadora conectada en el lugar, 8 termopilas tipo K, rango de -50 a 250 C y cable de conexión con puerto USB propio del equipo.
Medidor de humedad	Registrador de datos RH/ Temperatura y punto de rocío. Lascar EL-USB-2. Sistema de adquisición de datos basados en PC. Rango de 0 a 100 % RH. Temperatura soporte -35 a 80 C. Necesita: Pila ½ AA , 3.6 V. Una computadora que se instalara el software.
Balanza	Sistema de medición de masa.

Tabla 2. Plantilla de Registro de datos para colectores

PLANTILLA DE REGISTRO DE MEDICION "'COLECTOR ''

Nombre del investigador:	*Fecha (dd/mm/aa):*

Área (ducto de aire en la salida del colector)(m2):						
Tiempo	*Temperatura Ambiente C*	*Radiación solar W/m2*	*Nubosidad*	*Temperatura salida del colector C*	*flujo de aire salida colector m3/s*	*Velocidad de aire salida colector m/s*

***Equipos utilizados*:** flujo metro, pirómetro, multímetro.

Tabla 3. Plantilla de recogida de datos en la cámara de secados

PLANTILLA DE REGISTRO DE MEDICION ''CAMARA DE SECADO''								
Nombre del investigador:							*Fecha (dd/mm/aa):*	
Tipo de secadero:				*Área de la cámara de secado:*				
Tiempo (min)	*Temperatura Ambiente C*	*Radiación solar W/m2*	*Humedad relativa ambiental (%RH)*	*Velocidad aire ambiente*	*Temperatura interna , cámara C*	*Humedad aire caliente (%HR)*	*Velocidad aire caliente m/s*	*flujo de aire m3/s*

Equipos de medición: datalogger con termocupla tipo K, medidor de humedad, medidor de flujo, pirómetro, multímetro.

Tabla 4. Plantilla de recogida de datos, secado del producto

PLANTILLA DE REGISTRO DE MEDICION 'PRODUCTO''

Nombre del investigador:	*Fecha (dd/mm/aa):*

Tipo de bandejas:					*Área de bandejas:*		
Tiempo (min)	***Número de Bandeja***	*Humedad (%RH)*	*Peso (g)*	*Temperatura de la muestra (C)*	*Velocidad aire caliente m/s*	*Temperatura de la cámara C*	*Flujo de aire (m3/s)*
Equipos de medición: Datalogger con termocupla tipo K, medidor de humedad, dinamómetro, flujometro							

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

ANEXO G.

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL "FLOW SIMULATION DE SOLIDWORKS"

El simulador resuelve tiene en cuenta la transferencia térmica por convección, conducción y radiación. Además analiza el flujo de un fluido, aplicando las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo laminar y turbulento, que comprenden un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que incluyen variables de masa, cantidad de movimiento y de conservación energética, complementándose con la ecuación de estado del fluido que incluye la densidad del fluido, viscosidad y la conductividad térmica en una temperatura establecida. La herramienta considera distintos parámetros permitiendo al usuario especificar el comportamiento del fluido dentro del modelo en forma laminar o turbulenta, además es capaz de predecir el comportamiento de aquel a partir de los valores del número de Reynolds. Para predecir el flujo turbulento utiliza las ecuaciones Navier -Stokes promediadas - Favre , que considera los efectos promediados en el tiempo del flujo turbulento. Finalmente permite estimar el comportamiento del modelo y sus variables en estado estacionario o transitorio, incorporando dentro del proceso de simulación los fenómenos de transferencia de calor en los fluidos mediante la ecuación de conservación de energía cinética y su tasa de disipación (SolidWorks, 2010).

El programa establece un modelo de capa límite laminar / turbulenta que se utiliza para describir los flujos en regiones cercanas a la pared que proporciona condiciones límite de velocidad y temperatura exactas para las ecuaciones de conservación.

El programa proporciona simulaciones de flujos de gas y líquido en función de la densidad, viscosidad, conductividad térmica, los calores específicos, y difusiones de la especie como funciones de las concentraciones de presión, temperatura y especies en mezclas de fluidos, así como de condensación equilibrio volumen de agua de vapor puede ser tenida en cuenta cuando se simulen los flujos de vapor.

En caso del estudio de gases ideales, Flow Simulation utiliza una modificación de la ecuación de Redlich- Kwong expresada en forma adimensional.

Al tratarse de líquidos aplica el modelo de Herschel - Bulkley que hace referencia al coeficiente de consistencia del liquido, el índice de potencia y a la tensión de fluencia del liquido para líquidos newtonianos y en líquidos no newtonianos incluye el modelo de Bingham y el modelo de ley de potencia de los líquidos no newtonianos.

ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El Flow Simulation permite predecir la transferencia simultánea de calor en medios sólidos y fluidos, por medio de un intercambio de energía entre los medios de comunicación de fluido y del sólido calculando a través del flujo de calor en la dirección normal a la interface sólido / líquido teniendo en cuenta la temperatura de la superficie sólida y las características de la capa límite del fluido. La transferencia de calor en los fluidos se calcula por la ecuación de conservación de la energía, aplicado también para medios porosos (definidos a través del intercambio de calor volumétrico, teniendo en cuenta las densidades de

los fluidos y sólidos multiplicado por el fluido correspondiente y fracciones de volumen de sólidos en la matriz porosa).

La transferencia de calor por radiación entre sólidos se determina a partir de la emisividad, temperatura límite del calor irradiado por la superficie, constante de Stefan – Boltzmann, radiación solar definido por la ubicación especificada (en la superficie de la Tierra) y el tiempo o por la dirección, la reflectividad de la superficie y la intensidad constante o dependiente del tiempo que sería la radiación térmica incidente en esta superficie.

El simulador analiza la transferencia de calor por radiación del modelo con las siguientes suposiciones (SolidWorks, 2010).

- La radiación de calor de las superficies sólidas, tanto emitida como reflejada y difusa obedece a la ley de Lambert , según la intensidad de radiación por unidad de área y por unidad del ángulo sólido del mismo en todas las direcciones .
- La radiación solar es absorbida y reflejada por las superficies de forma independiente.
- La propagación de la radiación de calor pasa a través de un cuerpo si se especifica como transparente a la radiación pasando sin ningún tipo de refracción y / o absorción.
- Un cuerpo se puede especificar como transparente sólo para radiación solar, o transparente a la radiación térmica a partir de todas las fuentes excepto la radiación solar, o transparente para ambos tipos de radiación, térmica y solar.
- Los fluidos ni emiten ni absorbe radiación de calor, por lo que la radiación de calor se refiere a sólo superficies sólidas.
- Las superficies sólidas de radiación que no se especifican como un cuerpo negro o cuerpo blanco son asumidas como un cuerpo gris ideal, es decir, que tiene un espectro de emisión de potencia continua similares a la de cuerpo negro.

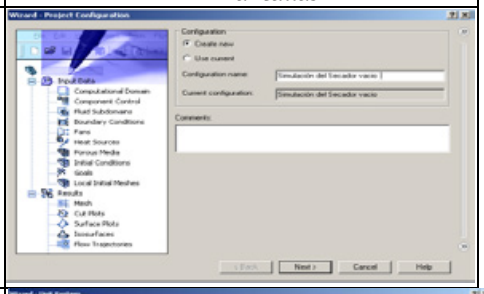
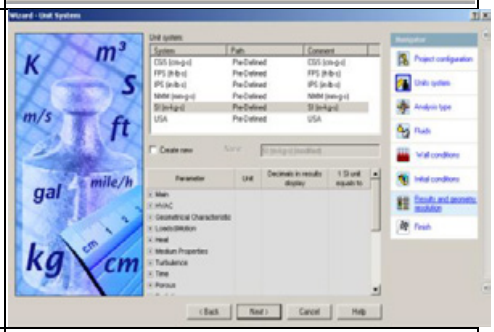
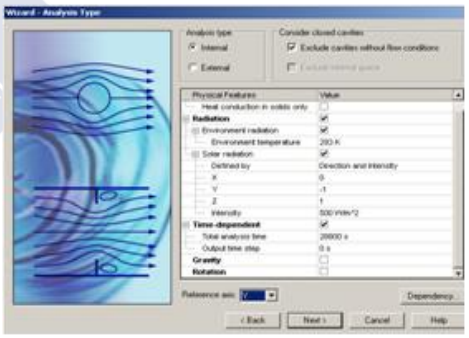
Con el fin de reducir la memoria durante la simulación, el problema resuelve utilizando el método de Monte Carlo, que se utilizan para determinar los flujos netos.

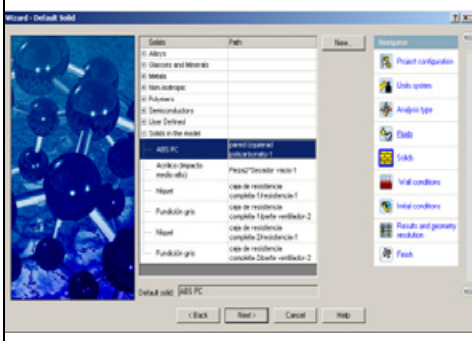
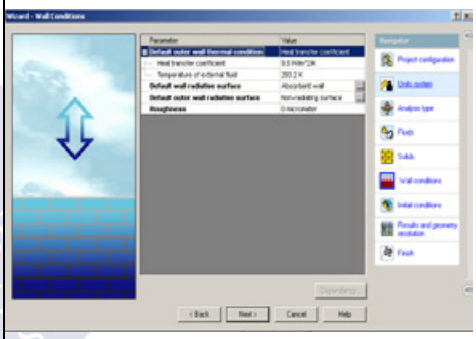
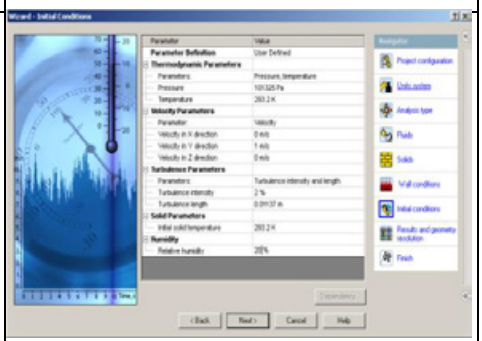
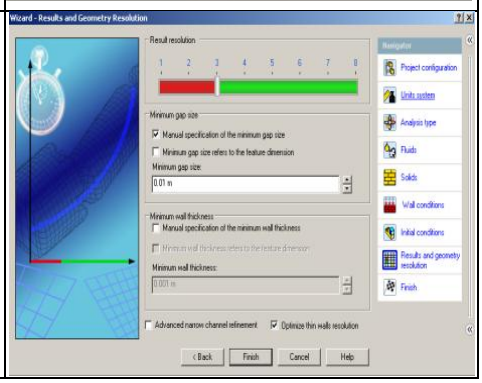
Con respecto a la radiación ambiental, se considera como el flujo de energía no direccional generado por las paredes de un imaginario. La radiación solar es modelada por el flujo de energía direccional definiéndose a través de su flujo de potencia (intensidad) y su vector direccional (X, Y , Z) valorizado en 1.

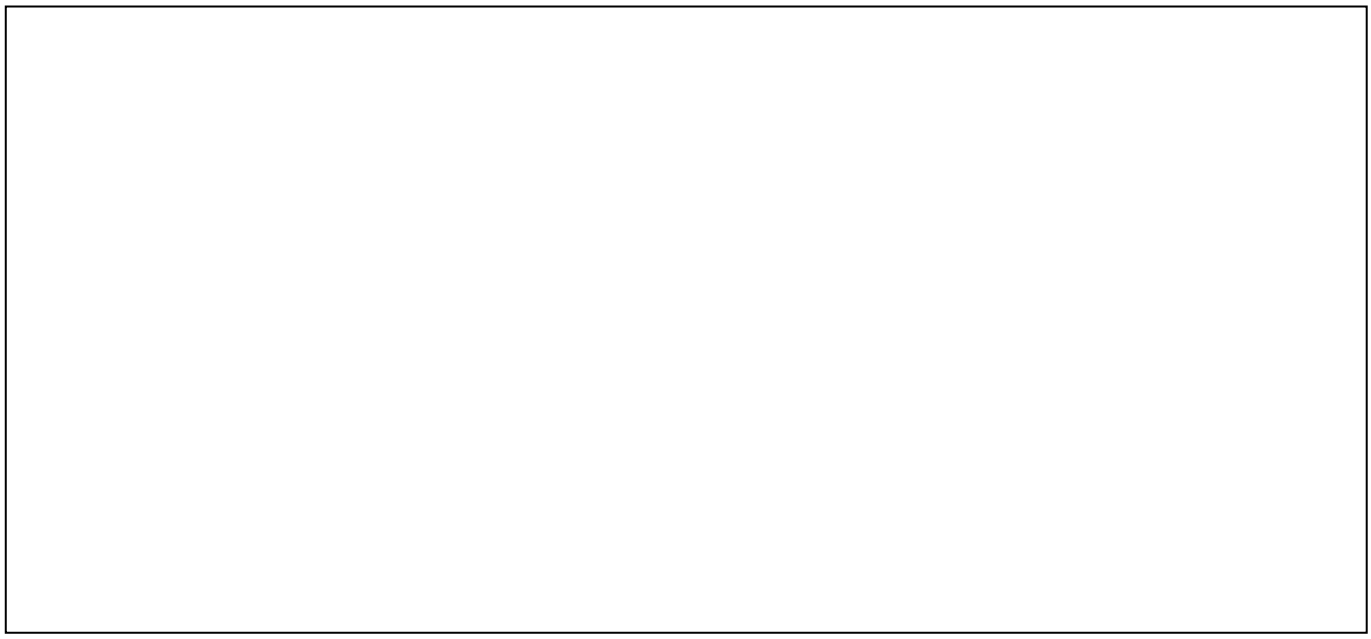
PREPARACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Para inicializar flow simulation en la barra de herramienta se selecciona el comando Wizard, donde se establecen las condiciones generales del modelo térmico y fluido dinámico (Diego Pineda, 2010) . En la siguiente tabla se presenta la secuencia de ventanas que permitirán un desarrollo adecuado del proyecto.

Tabla 1. Ventanas generadas en el Wizard para la ejecución del proyecto

Ventana	Descripción	Pasos seguidos para simulación	Pantallas
Configu-ración del proyecto	Se inicia con la creación del proyecto, asigna el nombre del mismo.	• Crear nuevo • Nombre • Siguiente (next)	
Sistema de unidades	En esta ventana se selecciona la unidad de trabajo en forma general (sistema internacional de unidades SI, sistema inglés FPS e IPS, cegesimal de unidades CGS, sistema anglosajón USA), además que se puede especificar las unidades de cada parámetro o variables analizadas en el proyecto.	• Sistema de unidades SI • Velocidad m/s • Masa kg • Longitud m • Temperatura K • Siguiente (Next)	
Tipo de análisis	Existen dos tipos de análisis : *Interno* en caso que se requiera solo conocer el comportamiento del fluido dentro de un sistema y *Externo* cuando se trata de analizar el fluido que pasa por ejemplo a los lados de una hélice. Da la opción para seleccionar características físicas si existe conducción de calor del sólido, radiación ambiental y radiación solar donde el programa cuenta con una base de datos de las principales ciudades. Al no encontrarse el sitio de análisis del proyecto se ingresan la dirección e intensidad de la radiación (Se deberá observar el eje de coordenadas del dibujo). Además permite asignar variables con dependencia con el tiempo, gravedad y rotación.	• Interno • Excluir cavidades sin condiciones de flujo • Condición de calor en el sólido. • Radiación- radiación ambiente. • Temperature ambiente: 20 C. • Radiación solar /dirección e intensidad , X=0 , Y=-1, Z=1 • Depende del tiempo • Tiempo de análisis (s) • Siguiente (Next).	
Predetermi-nación del fluido de trabajo	En esta ventana seleccionamos el tipo de fluido de trabajo a partir de una base de datos que contienen diversidad de gases, líquidos, líquidos no newtonianos, comprensibles, gases ideales y vapor. Finalmente se ingresa las características del fluido.	• Gases • Aire • Tipo de fluido : Laminar y turbulento • Humedad • Siguiente (Next)	
Predetermi-nación del	Podemos encontrar una base de datos con una serie de	• Definición: Solido del modelo.	

material del sólido	materiales. Adicionalmente se encuentra la opción para seleccionar los materiales previamente creados en el modelo del sólido. En este caso se seleccionaría el material predominante del diseño. Cabe indicar que el material es seleccionado a partir del material designado previamente a cada pieza ensamblada en el solidworks.	• Policarbonato • Acero • Siguiente (Next)	
Condición de la pared	En este apartado se indica las condiciones del estado de las paredes del modelo, así como darles propiedades de temperatura, rugosidad, entre otras.	• Condiciones térmica de la pared externa: Coeficiente de transferencia de calor: 9.5 w/m^2 K • Temperatura externa del fluido: 293.3 K. • Defecto de la pared de la superficie radiativa: pared absorbente. • Defecto Superficie radiativa de la pared exterior: superficie no radiativa. • Porosidad: micrómetro • Siguiente (Next)	
Condición inicial	Referido a las condiciones de los parámetros termodinámicos iniciales como son: presión, temperatura, densidad dirección de la velocidad del fluido (x, y, z). Se pueden definir los parámetros de turbulencia con respecto a una longitud específica por medio del ingreso de tabla de datos.	• Presión : 101325 Pa • Temperatura : 20 C • Velocidad en dirección X: 1 m/s. • Siguiente (Next)	
Resultados y resolución geométrica	Corresponde a geometría y resolución y el tamaño de la malla. En un rango de resolución de malla de 1 a 8.	• Grado de refinamiento: 3 • Finalizar (Finish)	



USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA