

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROTOTIPO DE
DESHIDRATADOR SOLAR PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS**

PRESENTADO POR:

EDGARDO ERNESTO MÉNDEZ RECINOS

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTORA :

MSc. PATRICIA HAYDÉE ESTRADA DE LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

Título :

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROTOTIPO DE
DESHIDRATADOR SOLAR PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS**

Presentado por :

EDGARDO ERNESTO MÉNDEZ RECINOS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

MSc. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

San Salvador, febrero 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

MSc. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar en estas líneas mi agradecimiento principalmente ha Dios Todo Poderoso, por haberme dado la capacidad y la sabiduría de poder desarrollar el tema de investigación, ya que sin el poder de Dios las hojas de los árboles no se mueven.

También le agradezco al MSc. e Ing. Gustavo Salomón Torres Ríos Lazo, por su inestimable labor de dirección de tesis y sobre todo, por la confianza depositada y por su continuo apoyo, atención y dedicación a las expoliciones de los temas desarrollados en la investigación.

Asimismo, quiero expresar mis agradecimientos con todo mi afecto, a mi Madre Carmen Amanda Recinos Campos por los consejos y el apoyo incondicional, a todos mis hermanos y hermanas, sobrinos, a toda las Familia Palacios, a Vidali Palacio Tejada, a la Abuela Margarita Tejada viuda de Palacio, por sus siempre valiosos consejos y su constante apoyo. Por todo, gracias.

Le agradezco a la Empresa EDESAL, a mi Jefe Ing. Leonel Bolaños, por el apoyo brindado, a mis compañeros de trabajo especialmente a los del área Técnica quienes también me apoyaron en el movimiento del quipo prototipo construido en la investigación de este trabajo de Tesis.

Por ultimo expreso mis agradecimientos a MSc. e Ing. Jorge Zetino, al MSc Arevalo, por el aporte y las recomendaciones vertidas como jurado en la presentación de la investigación, a la Escuela e Post Grado, a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, por facilitar los equipos para la investigación de campo.

2. Índice General.

1. Introducción.....	1
3. Antecedentes y Justificación.	2
3.1 Antecedentes.....	2
3.2 Justificación.	2
4. Planteamiento del problema e Hipótesis.	3
5. Objetivos.....	4
5.1 Objetivo General.....	4
5.2 Objetivo Especifico.....	4
6. Marco referencial.....	4
6.1 Psicrometría.	4
6.2 Carta Psicrométrica.....	5
6.3 Principales Procesos de Secado de Granos.....	6
6.3.1 Calentamiento y Enfriamiento.....	6
6.3.2 Secado.....	7
6.3.3 Secado del Maíz.....	7
6.3.4 Temperatura de Secado.....	8
6.3.5 Factores que influyen en el deterioro de granos y semillas.....	9
6.3.6 Método tradicional de secado de maíz en El Salvador.....	10
6.4 Evaluación del Recurso Solar.....	11
6.4.1 El Sol.....	11
6.4.2 La Constante Solar.....	13
6.4.3 Variación de la Radiación Extra-terrestre.....	14

6.4.4 Distribución Espectral de Radiación Extra-terrestre.....	15
6.4.5 Definiciones.....	16
6.4.6 Tiempo Solar.....	17
6.4.7 La Atmósfera y como influye en la Radiación Solar.....	19
6.4.8 Dirección de la Radiación Solar Directa.....	20
6.4.9 Relaciones Angulares.....	23
6.4.10 Tipos de Radiación.....	25
6.4.11 Radiación Solar Directa.....	25
6.4.12 Radiación Solar Difusa.....	26
6.4.13 Radiacion Solar Albedo.....	27
6.5 La Radiación Solar en El Salvador.....	27
6.5.1 Comportamiento de la Temperatura Ambiente Anual.....	27
6.5.2 Comportamiento normal de la luz Solar y el Brillo Solar.....	28
6.5.3 Temperaturas máximas absolutas diarias, periodo del 01 al 10 de diciembre de 2015....	29
6.6 Transferencias de Calor.....	31
6.6.1 Transferencias de Calor por Conducción.....	31
6.6.2 Transferencias de Calor por Convección.....	33
6.6.3 Transferencias de Calor por Radiación.....	35
6.7 Dimensionamiento y diseño del Sistemas.....	38
6.8 Cálculo del consumo de energía.....	41
6.9 Cálculo del sistema.....	44
7. Diseño metodológico de la investigación.....	45
7.1 Investigación metodológica.....	45
8.0 Proceso experimental.....	45
8.1 Dimensiones de Horno Prototipo.....	47
8.2 Dimensiones de Cámara de secado del Prototipo.....	47

8.3 Materiales de construcción de Prototipo.....	48
8.4 Resultados de Proceso experimental.....	49
8.4.1 Calculo de la Irradiancia solar Directa a partir de los datos experimentales (IB).	50
8.5 Relación de la Temperatura e Irradiancia.	54
8.6 Perdidas de Humedad en el proceso de deshidratación.	55
9.0 Caracterización de Horno deshidratador solar.....	58
9.1 Costos de construcción de prototipo.	59
10. Conclusiones.....	59
11. Recomendaciones.	61
12. Referencias Bibliográficas.....	62
13. Anexos.....	64
13.1 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 27 de octubre de 2016.	64
13.2 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 29 de octubre de 2016.	67
13.3 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 31 de octubre de 2016.	70
13.4 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 01 de noviembre de 2016.	72
13.5 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 18 de noviembre de 2016.	74
13.6 Equipos utilizados para toma de datos en los ensayos de Horno Deshidratador.	79

Índice de Figuras.

Figura 6.0. Carta Psicrométrica a condiciones normales, presión barométrica 760 mmHg ó 14.7 PSI ó 101.325 Pascales. Altura entre 0 – 323 metros sobre el nivel del mar [Propiedades de carta Psicrométrica].	6
Figura 6.0 Forma tradicional de secado de maíz [Foto: Edgardo E. M.]	10
Figura 6.0.1 Forma tradicional de secado de maíz y pérdidas obtenidas del producto [Fotografía].	11
Figura 6.1: Núcleo, la estructura del sol [El sol nuestra estrella] [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].	11
Figura 6.2: Campos magnéticos en el sol [El sol nuestra estrella].	12
Figura 6.3. Relación entre el sol y la tierra [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].	13
Figura 6.4: Variación de la radiación extraterrestre [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].	15
Figura 6.5: Curva de Irradiancia espectral estándar (WRC) a una distancia promedio Tierra-Sol [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].	15
Figura 6.6: La ecuación del tiempo E en Minutos, como una función del tiempo del año [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].	19
Figura 6.7: (a) Ángulo cenit, pendiente, ángulo acimut de la superficie y ángulo acimut solar para una superficie inclinada. (b) Vista superior que muestra al ángulo acimut [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].	21
Figura 6.8: Nomograma para determinar el tiempo de la puesta del sol y de la duración del día. [Adaptado de Duffie y Beckman (1991) y Whillier (1965)]	22
Figura 6.9: Relaciones entre los ángulos que describen el movimiento aparente del Sol [Gonzalo Abal].	24
Figura 6.10: Horas de sol diarias para una latitud $\phi = 13.71$, de San Salvador [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].	25
Figura 6.11: Esquema de la radiación solar directa sobre un plano inclinado [Fuente: J.C.Y y J.M. Lopez].	26
Figura 6.12: Esquema de la radiación solar difusa sobre un plano inclinado [Fuente: J.C.Y y J.M. Lopez].	26
Figura 6.13: Esquema de la radiación solar difusa sobre un plano inclinado [Fuente: J.C.Y y J.M. Lopez].	27

Figura 6.14: Esquema del brillo solar en EL Salvador [Fuente: MMARN].	28
Figura 6.15: Esquema de la radiación solar anual en EL Salvador [Fuente: MMARN].	29
Figura 6.16: , Representación de temperatura y húmedad [Fuente: MMARN].	31
Figura 6.17: , Representación de trasferencias de calor por conducción [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].	31
Figura 6.18: Absorción de la radiación incidente sobre una superficie opaca de absorptividad α [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].	37
Figura 6.19: Diseño de horno solar para deshidratación de productos agrícolas [Diseño: Edgardo E. M.].	38
Figura 6.20: Diseño del cuerpo externo del horno de deshidratación.Vista de la parte externa de la cocina solar. (Recubrimiento de Madera) [Diseño: Edgardo E. M.].	39
Figura 6.21: Diseño de aislamiento entre el cuerpo del horno y cámara de deshidratación [Diseño: Edgardo E. M.].	39
Figura 6.22: Diseño de cámara de deshidratación (estructura metalica.) [Diseño: Edgardo E. M.].	39
Figura 6.23: Dimensiones de diseño de cámara de deshidratación (estructura metalica.) [Diseño: Edgardo E. M.].	40
Figura 6.24: Dimensiones de bandejas de cámara de deshidratación (estructura metalica.) [Diseño: Edgardo E. M.].	40
Figura 6.25: Dimensiones del cuerpo del horno deshidratador (estructura de madera) [Diseño: Edgardo E. M.].	41
Figura 6.8: Áreas para el cálculo de transferencias de calor, [Diseño: Edgardo E. M.].	42
Figura 8.0: Ubicación de la toma de temperatura T1, T2, T3 y T AMB, en los ensayos del horno deshidratador prototipo (estructura de madera) [Diseño: Edgardo E. M.].	46
Figura 8.1: Dimensiones del cuerpo del horno deshidratador prototipo (estructura de madera) [Diseño: Edgardo E. M.].	47
Figura 8.2: Dimensiones de cámara de secado del horno deshidratador prototipo (estructura metálica) [Diseño: Edgardo E. M.].	47
Figura 8.3: Dimensiones de las bandejas de la cámara de secado del horno deshidratador prototipo [Diseño: Edgardo E. M.].	48
Figura 8.4: Protótipo Construído [Foto: Edgardo E. M.].	49
Figura 8.5: Condiciones de los días de ensayo, 27, 28 y 29 de octubre [Foto: Edgardo E. M.].	50

Figura 8.6: Condiciones de los días de ensayo, 31 de octubre y 01 de noviembre [Foto: Edgardo E. M.]	50
Figura 8.7: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.....	51
Figura 8.8: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.....	51
Figura 8.9: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.....	52
Figura 8.10: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.....	52
Figura 8.11: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.	53
Figura 8.12: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.	53
Figura 8.13: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.	54
Figura 8.14: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.	54
Figura 8.15: Correlación lineal desde la salida del sol hasta aproximadamente al mediodía solar.	55
Figura 8.16: Correlación línea desde el mediodía solar hasta la puesta del sol.	55
Figura 13.1.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.....	64
Figura 13.1.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.	64
Figura 13.1.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.....	65
Figura 13.1.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.	65
Figura 13.1.4: Preparación de maíz en el primer día de ensayo.....	66
Figura 13.1.5: Montajes del los equipos para el ensayo del horno deshidratador.....	66

Figura 13.1.6: Montajes del los equipos para el ensayo del horno deshidratador, tomas de lecturas de Irradiancia.....	67
Figura 13.2.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.....	67
Figura 13.2.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.	68
Figura 13.2.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.....	68
Figura 13.2.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.	68
Figura 13.2.4: Preparación de maíz en el tercer día de ensayo y preparación de equipos de medición de irradiancia.	69
Figura 13.2.5: Tomas de temperatura en la cámara deshidratación del horno	69
Figura 13.2.5: Resultados obtenidos en el secado de maiz al final del tercer día de ensayo del horno.	69
Figura 13.3.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.....	70
Figura 13.3.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.	70
Figura 13.3.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.....	71
Figura 13.3.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.	71
Figura 13.4.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.....	72
Figura 13.4.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.	73
Figura 13.4.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.....	73
Figura 13.4.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.	73

Figura 13.5.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Fríjol el día 18 de noviembre de 2016.	74
Figura 13.5.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Fríjol el día 18 de noviembre de 2016.....	75
Figura 13.5.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Fríjol el día 18 de noviembre de 2016.....	75
Figura 13.5.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Fríjol el día 18de noviembre de 2016.	76
Figura 13.5.4: Preparación del fríjol en las bandejas de la cámara de secado del horno deshidratador el día 18de noviembre de 2016.....	76
Figura 13.5.5: Preparación horno deshidratador con orientación sur y equipamiento para medir temperaturas, Irradiancias, Humedad y Velocidad de viento, ensayo realizado en Universidad Nacional el día 18de noviembre de 2016.....	77
Figura 13.5.6: Horno Solar para Deshidratación de productos agrícolas, ensayo realizado el día 18de noviembre de 2016.....	77
Figura 13.5.7: Finalización del en sayo día 18de noviembre de 2016.	77
Figura 13.5.7: Tomas de lecturas de irradiancia solar, Humedad relativa ambiente, ensayo día 18de noviembre de 2016.....	78
Figura 13.5.8: Presión atmosférica de 101.3 mb, y 688 msnm en el lugar de ensayo el día 18de noviembre de 2016.....	78
Figura 13.5.9: Finalización del en sayo en Universidad Nacional de El Salvador, Escuela de Ingeniería de Mecánica, día 18de noviembre de 2016.	79
Figura 13.6.0: Amperímetros para la tomo de lecturas de la Irradiancia solar en mV.....	80
Figura 14.6.1: (a) Amperímetros tipo Clamper para la tomo de lecturas de temperaturas en °C, (b) Anemómetro para lecturas de velocidad de viento.....	80
Figura 13.6.2: Pyranometer para medicion de irradiancia solar global.....	81
Figura 13.6.3. Pyranometer para medición de irradiancia solar difusa en conjunto del arco generador de sombra.....	81
Figura 13.6.4: (a) Pyranometer para la tomo de lecturas de Irradiancia solar directa, y (b) medidor de Humedad relativa y la temperatura asociada a la humedad en el punto de medicion.	82
Figura 13.6.5: GPS para toma de las coordenadas, altura y presión atmosférica en el lugar de ensayo.	82

Índice de Tablas.

Tabla 6.0: Temperatura máxima que no debe sobrepasar el grano para mantener su calidad. [Fuente J. C. Rodriguez 2004].	9
Tabla 6.1: Tabla de temperaturas, registradas en El salvador [Fuente: MMARN].	29
Tabla 6.2: Tabla de temperaturas máxima, registradas por estaciones metereologicas en El salvador [Fuente: MMARN].	30
Tabla 6.3: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por Convección [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].	34
Tabla 6.4 de Emisividades [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].	37
Tabla 8.0: Listado de Materiales [Diseño: Edgardo E. M.].	48
Tabla 8.1: Peso de la masa al inicio y al final del ensayo, por días. Ensayo con maíz.	56
Tabla 8.2: Peso de la masa al inicio y al final del ensayo, por días. Ensayo con frijol.	56
Tabla 8.3: Perdidas de humedad por días, deshidratación de maíz.	57
Tabla 8.4: Perdidas de humedad por días, deshidratación de frijol.	57
Tabla 9.0: Caracterización del horno deshidratador solar.	58
Tabla 9.2: Costos de construcción de horno deshidratador solar prototipo.	59
Tabla 10: Comparación del diseño de horno deshidratador solar y el método tradicional de sacado al sol.	61

Resumen.

En este trabajo, se ha hecho uso del recurso solar a través de la conversión foto-térmica, con la finalidad de hacer uso del recurso solar para obtener energía calorífica para que esta energía pueda ser aprovechada en calentamiento de un horno deshidratador de productos agrícolas. En el sistema diseñado se aprovecha la conversión foto-térmica de tal manera que se capta la energía necesaria para que su disponibilidad termodinámica sea satisfactoria en el proceso de deshidratado. El secado o deshidratado es un proceso de gran importancia en la cadena de producción de alimentos, ya que el contenido de humedad es, sin duda, la característica más importante para determinar si el producto agrícola como los granos básicos corren el riesgo de deteriorarse durante el almacenamiento. El secado se realiza para inhibir la germinación de semillas, reducir el contenido de humedad de los granos hasta un nivel que impida el crecimiento de los hongos, y evitar las reacciones de deterioro.

El proceso de secado tradicional al sol, muchas veces es lento debido a la elevada humedad en el ambiente, además en el proceso de secado se tienen pérdidas en el grano de maíz, sobre todo cuando contienen un alto porcentaje de agua, este se pudre o se enmohece, también están expuestos al polvo, insectos y aves que pueden deteriorar o generar pérdidas del grano así como también pérdidas económicas. Es por ello que se ve la necesidad de diseñar un horno para realizar el proceso de deshidratación del maíz, utilizando energía solar, sin comprometer la calidad del maíz durante el proceso de secado.

En el presente trabajo se ha diseñado un horno solar para la deshidratación de productos agrícolas, en el diseño se a tomado en cuenta las características de incidencia de la radiación solar en El Salvador, además se a tomado en cuenta el estudio de la transferencia de calor en los diferentes materiales seleccionados en el diseño. En base al diseño se ha construido un horno prototipo y se realizaron ensayos con maíz y frijón, con un área de captación solar del prototipo de 1.06 m^2 , y un quintal de maíz, se ah obtenido resultados de: temperatura promedio de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ en la cámara de secado con una irradiancia global promedio diaria de 537.22 W/m^2 , la temperatura promedio y velocidades de viento promedio en el ambiente fueron de $33.3 \text{ }^\circ\text{C}$ y 0.43 m/s respectivamente, retirando un promedio de humedad en base húmeda por día de 6.47% , llevando el producto a valores de humedad adecuados para su almacenamiento en un periodo de 5 días.

Con los ensayos realizados con el horno solar prototipo, se ha podido caracterizar y escalar, con su geometría de diseño a un horno deshidratador solar para la deshidratación de 50 quintales de maíz y con un área de captación de energía solar de 13.21 m^2 .

Summary.

In this work, the solar resource has been used through the photo-thermal conversion, in order to make use of the solar resource to obtain heat energy so that this energy can be harnessed in heating of an oven dehydrator of agricultural products. In the designed system the photo-thermal conversion is used in such a way that the necessary energy is captured so that its thermodynamic availability is satisfactory in the dehydration process. Drying or dehydration is a process of great importance in the food production chain, since moisture content is undoubtedly the most important feature in determining whether the agricultural product such as basic grains is likely to deteriorate during the storage. Drying is done to inhibit the germination of seeds, reduce the moisture content of the grains to a level that prevents the growth of the fungi, and avoid the deterioration reactions.

The traditional drying process in the sun, is often slow due to the high humidity in the environment, and in the drying process losses are present in the corn grain, especially when they contain a high percentage of water, it is rotted or Are also exposed to dust, insects and birds that can deteriorate or generate grain losses as well as economic losses. This is why it is necessary to design a furnace to perform the dehydration process of the corn, using solar energy, without compromising the quality of the corn during the drying process.

In the present work, a solar furnace has been designed for the dehydration of agricultural products. In the design, the characteristics of the incidence of solar radiation in El Salvador have been taken into account. In addition, the study of heat transfers in the different materials selected in the design. Based on the design, a prototype furnace was built and maize and bean trials were carried out, with a prototype solar collection area of 1.06 m^2 , and a quintal of maize. Results were obtained: Average temperature of $55 \text{ }^\circ\text{C}$ in the drying chamber with an average daily global irradiance of 537.22 W/m^2 , the average temperature and average wind speeds in the environment were $33.3 \text{ }^\circ\text{C}$ and 0.43 m/s respectively, with an average of Moisture on a wet basis per day of 6.47% , bringing the product to suitable moisture values for storage over a period of 5 days.

With the tests carried out with the prototype solar furnace, it has been possible to characterize and scale with its design geometry a solar dehydrator oven for the dehydration of 50 quintals of maize and with a solar energy catchment area of 13.21 m^2 .

1. Introducción.

Es predecible que las fuentes energéticas basadas en petróleo, gas natural y carbón se agoten en un futuro. Ni aún la estimación más optimista de reservas adicionales justifica un consumo continuo. Por otra parte, es claro que el desarrollo industrial y socioeconómico de un país depende fuertemente de la solución de su problemática energética. Por esta razón, varias alternativas en energías renovables han comenzado a surgir, pretendiendo responder a la demanda de energía. Una de las vías hacia el uso de la energía renovable es el aprovechamiento de la energía solar. El uso de dicha energía no es una idea novedosa, ya que la humanidad ha hecho uso de ésta en diferentes aplicaciones desde hace siglos. Con estudio en esta alternativa y con el afán de buscar aumentar la eficiencia y una idealizada convivencia con la naturaleza nos permite una alternativa para un plan de desarrollo. Si bien este tipo de energía es abundante, universal y con un impacto ambiental bajo, la ingeniería ha encontrado grandes limitantes en su utilización, como es el hecho de su carácter oscilante e intermitente, su dispersión, su baja intensidad, las bajas eficiencias de conversión asociadas a los actuales dispositivos y su complicado almacenamiento.

En este trabajo, se ha pretendido la utilización del recurso solar a través de la conversión foto-térmica. Con la finalidad de hacer uso del recurso solar para obtener energía calorífica ya que esta energía puede ser aprovechada en calentamiento de fluidos de trabajo para diversos fines; calefacción y refrigeración, secado de granos para conserva, destilación de agua, entre otros. En los sistemas de conversión foto-térmica se busca captar la energía necesaria para que su disponibilidad termodinámica sea satisfactoria. Esta disponibilidad depende de la temperatura de operación del sistema y de su transformación en calor útil.

En este trabajo se ha retomado las características de calentamiento a través de la energía solar para el diseño de un horno de baja temperatura para la deshidratación de productos agrícolas, de tal manera que con el aprovechamiento del recurso solar, se pueda extraer humedad de los productos agrícolas de tal manera que estos puedan ser almacenados en condiciones adecuadas para evitar deterioro, además de que, en el proceso de secado se pueda controlar la contaminación causada por plagas, debido a que los insectos causan contaminación del grano con partes de sus cuerpos y sus excrementos. La contaminación con orina y excremento de animales domésticos roedores así como los excrementos de aves pueden introducir organismos dañinos al grano, los cuales pueden introducirse en los alimentos; en consecuencia también se reducen pérdidas en granos agrícolas.

3. Antecedentes y Justificación.

3.1 Antecedentes.

El secado es un proceso de gran importancia en la cadena de producción de alimentos, ya que el contenido de humedad es, sin duda, la característica más importante para determinar si el grano corre el riesgo de deteriorarse durante el almacenamiento. El secado se realiza para inhibir la germinación de las semillas, reducir el contenido de humedad de los granos hasta un nivel que impida el crecimiento de los hongos, y evitar las reacciones de deterioro. El secado es el método universal para acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla. Con los métodos tradicionales de producción de granos de los pequeños agricultores se producen considerables pérdidas antes y durante el almacenamiento. Una de las principales fuentes de pérdidas es la falta de un secado adecuado, ya que la mayoría de los agricultores deja secar sus productos en el campo, expuestos a la intemperie y sujetos al ataque de insectos y aves. A pesar de las pérdidas, los pequeños agricultores continúan empleando este método por su bajo costo y también debido al desconocimiento de otras técnicas.

3.2 Justificación.

El beneficio de utilizar la energía solar para nuestros propios fines es un hecho que justifica la realización de este trabajo. El ahorro de energía teniendo presente la afectación cada vez mayor de uso de combustibles fósiles ante la contaminación ambiental, evidenciándose cada vez más en el cambio climático, el cual es hoy un tema de primordial importancia; es ahí donde surge la alternativa de la energía solar.

Una de las maneras más comunes de utilizar la energía del sol es transformándola en calor, a la cual se le pueden dar diferentes usos, como son: destiladores, calentadores solares, cocinas, secadoras solares, etc.

En este trabajo se pretende que, con el aprovechamiento de la energía solar, la propuesta se pueda caracterizar en el diseño de un horno secador solar, para el proceso de deshidratación de maíz, de tal manera que se pueda tener una buena técnica o mejora en el proceso del secado de maíz a través del uso de un horno de energía solar.

Cuando el agricultor recoge la cosecha de maíz, los granos contienen excesiva humedad para poder almacenarlos con seguridad y hay que secarlos hasta niveles seguros de humedad: aproximadamente el 14 %. El secado de granos ayuda a prevenir la germinación de semillas y el crecimiento de bacterias y hongos, y retarda considerablemente el desarrollo de ácaros e insectos.

4. Planteamiento del problema e Hipótesis.

Los alimentos de granos básicos como es el maíz, pueden ser conservados por disminución del contenido del agua de composición a través de procesos de la deshidratación o desecación (productos finales sólidos), entre las razones por la cual es importante realizar la deshidratación de este tipo de alimentos, podemos mencionar:

- a). Conservar el maíz durante muchos meses y consumirlos conservados en periodos de escasez o fuera de temporada.
- b). Asegurar la calidad de la alimentación de la familia durante todo el año.
- c). Aprovechar la energía gratis y limpia del sol.
- d).Facilitar el proceso de deshidratación del maíz, sin generar perdidas del producto o deterioro, en el proceso de secado.
- e) Ahorro económico familiar significativo, mediante el almacenamiento adecuado en relación a la humedad del maíz, evitando que se pudra o se enmohezca.

El proceso de secado tradicional al sol, muchas veces es lento debido a la elevada humedad en el ambiente, además en el proceso de secado se tienen pérdidas en el grano de maíz, sobre todo cuando contienen un alto porcentaje de agua, este se pudre o se enmohece, también están expuestos al polvo, insectos y aves que pueden deteriorar o generar pérdidas del grano así como también pérdidas económicas. Es por ello que se ve la necesidad de

diseñar un horno para realizar el proceso de deshidratación del maíz, utilizando energía solar, sin comprometer la calidad del maíz durante el proceso de secado.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General.

Diseñar un horno secador, utilizando energía solar para deshidratación de granos de maíz para una capacidad por períodos de deshidratación equivalentes a 50 quintales, su construcción y pruebas de funcionamiento para prototipo.

5.2 Objetivo Especifico.

1. Estudiar el proceso de deshidratación del maíz.
2. Realizar el estudio del recurso solar para el funcionamiento del horno.
3. Realizar el diseño y determinar las dimensiones del horno secador de maíz.
4. Construir un horno prototipo y realizar pruebas para su validación.

6. Marco referencial

6.1 Psicrometría.

El estudio de las relaciones termodinámicas entre el vapor de agua y aire se conoce como psicrometría. Estas relaciones son básicas e importantes en la deshidratación de alimentos debido al papel que desempeñan las fuerzas involucradas en la remoción de humedad del producto.

La presión parcial de un componente puede ser definida como la presión que el componente ejercería si estuviera completamente aislado. Ambos, aire de secado y vapor de agua ejercerán una presión parcial en la mezcla de aire-vapor (Heldman, 1981).

La humedad relativa (HR) es la proporción de la cantidad de vapor en mezclas gaseosas del máximo de vapor que puede estar contenida en la mezcla. En suma, la humedad relativa es

la relación de la presión parcial de vapor (p_v) a la presión de saturación de vapor (p_s) para una mezcla de agua-vapor.

La humedad absoluta (HA) es la proporción de masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco.

Las definiciones anteriores son necesarias para realizar cálculos mediante el uso de la carta psicrométrica que es una gráfica de humedad absoluta a lo largo del eje vertical versus la temperatura del bulbo seco en el eje de la horizontal. La curva en el eje superior representa el punto de saturación y conociendo las temperaturas de bulbo húmedo se puede calcular la humedad relativa.

Otro factor de considerable importancia que podemos obtener es el contenido calorífico o entalpía en la saturación.

Algunos procesos pueden ser descritos mediante la observación de cambios en la carta psicrométrica. Estos incluyen el calentamiento o enfriamiento sensible. La evaporación por enfriamiento o el proceso de deshidratación ocurre a temperatura de bulbo húmedo constante. Las mezclas de aire con diferentes condiciones de humedad también pueden evaluarse utilizando la carta. Probablemente el proceso de mayor importancia que ocurre en la mayoría de las operaciones de secado es el enfriamiento por evaporación que ocurre durante el período de velocidad constante. Este proceso se conoce por la adición de humedad hacia el aire de secado a la temperatura de bulbo húmedo constante.

6.2 Carta Psicrométrica.

Para facilitar la frecuente necesidad del cálculo existen gráficas especiales con las cuales se evalúan las propiedades de las mezclas de aire-vapor.

A estas gráficas se les conoce con el nombre de cartas psicrométricas, las cuales están compuestas por líneas que representan gráficamente los valores de entalpía, temperatura, humedad relativa, volumen específico, etc., como se indica en la figura 6.0.

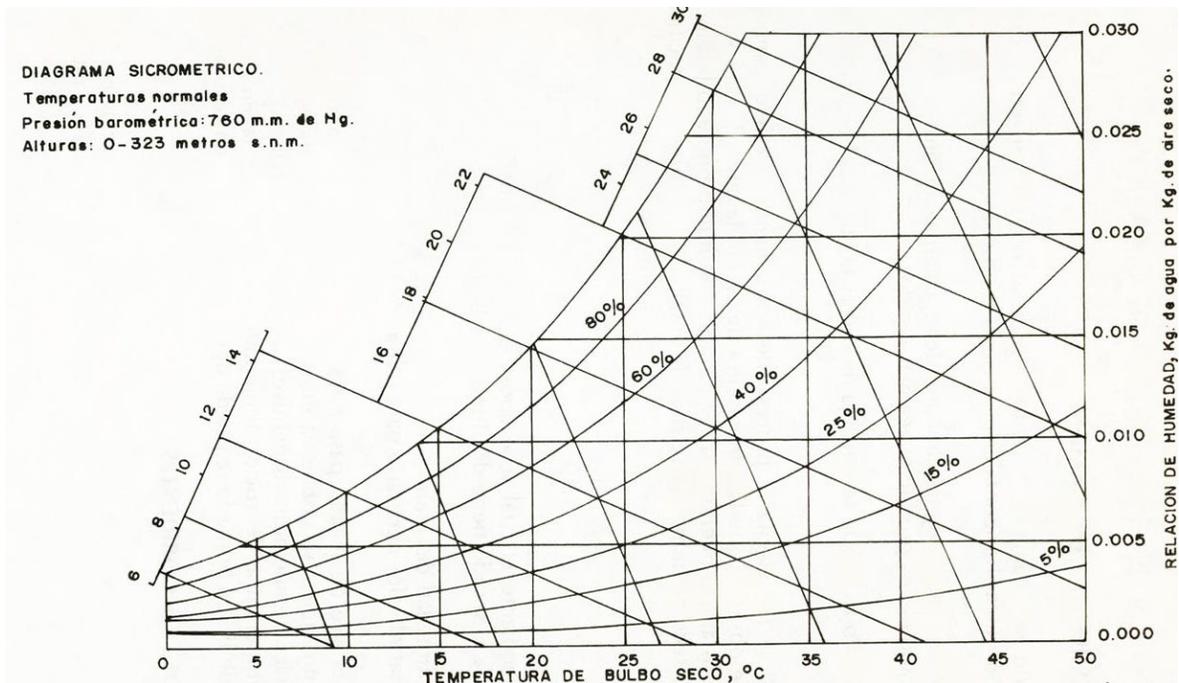


Figura 6.0. Carta Psicrométrica a condiciones normales, presión barométrica 760 mmHg ó 14.7 PSI ó 101.325 Pascales. Altura entre 0 – 323 metros sobre el nivel del mar [Propiedades de carta Psicrométrica].

Una carta psicrométrica es aplicable únicamente a la presión barométrica para la cual es construida, o sea para una altura determinada sobre el nivel del mar.

6.3 Principales Procesos de Secado de Granos.

6.3.1 Calentamiento y Enfriamiento.

Los procesos de calentamiento y enfriamiento se representan en la carta psicrométrica por líneas horizontales paralelas a la abscisa.

En el proceso de secado generalmente se calienta el aire ambiental, para que el secado de los productos sea más rápido.

El aire así calentado es el que se encarga de retirar la humedad contenida en el grano.

6.3.2 Secado.

Es el proceso mediante el cual se evapora el agua o humedad del grano. El aire usado para secado tiene dos funciones básicas:

1. Retirar la humedad del grano.
2. Proporcionar el calor necesario para retirar dicha humedad.

A medida que el aire de secado pasa a través de la masa de grano evapora el agua del grano, que a su vez se va enfriando, es decir la temperatura disminuye; la humedad absoluta, la humedad relativa y la temperatura de rocío, aumentan, mientras que la entalpía y la temperatura de bulbo húmedo se puede decir que permanecen constantes.

6.3.3 Secado del Maíz.

La recolección del maíz es una actividad muy mecanizada en los países desarrollados, mientras que en los países en desarrollo ésta se hace aún manualmente. El sistema mecanizado no sólo arranca la mazorca de la planta, sino también el grano de la panoja (olote), mientras que la recolección a mano requiere arrancar primero la mazorca, y posteriormente mondarla. En ambos casos, el maíz se recoge habitualmente cuando tiene un contenido de humedad del 18 al 24 %. Los deterioros ocasionados al grano (normalmente durante la operación de des-cascaramiento) guardan relación con el contenido de humedad en el momento de la recogida: cuanto menor sea la humedad, menor será el deterioro. Tanto si se recogen mecánica o manualmente, los granos contienen excesiva humedad para poder almacenarlos con seguridad y hay que secarlos hasta niveles seguros de humedad: aproximadamente el 12 %. El secado de granos ayuda a prevenir la germinación de semillas y el crecimiento de bacterias y hongos, y retarda considerablemente el desarrollo de ácaros e insectos. Cuando la humedad del grano está entre el 45% y el 60% puede tener lugar el proceso de germinación. Por debajo de 45% y entre el 20% y el 18%, la respiración de los granos y los microorganismos es extremadamente alta y se alcanzan temperaturas elevadas que pueden matar el germen. Las humedades por debajo del 12% no proporcionan un ambiente favorable para el desarrollo de los insectos en los granos almacenados [4].

Los granos y semillas deben secarse en forma artificial o por exposición directa al sol hasta que alcanzan niveles de humedad menores del 12 %. Si el producto será usado como semilla, en el secado artificial, debe cuidarse que la temperatura no dañe al embrión.

6.3.4 Temperatura de Secado.

La temperatura del grano durante el proceso de secado es un factor primordial por su relación, no solamente por la calidad del grano sino también por su influencia en el enfriamiento posterior en el horno. En general, puede afirmarse que la temperatura del grano es tanto más baja cuanto más elevada sea la humedad inicial ya que la mayor evaporación que se produce absorbe calor. Siendo de tal importancia las temperaturas máximas que puede soportar un grano determinado, se recomienda tener muy en cuenta los valores respectivos.

En secadoras comunes los granos normalmente salen con 40 a 60°C de la zona de secado, aun con temperaturas del aire entre 100 y 120°C. Pero en secadoras antiguas, o de diseño poco satisfactorio, los granos pueden llegar a muy altas temperaturas, sobre todo en algunas partes de la máquina

El secado se puede realizar con aire natural o con aire caliente y generalmente se refiere a la temperatura del aire de secado y rara vez a la temperatura del grano. Sin embargo, la temperatura que el grano adquiere en el proceso de secado determinara si el mismo mantiene la calidad inicial que poseía antes de iniciado dicho proceso

La siguiente tabla muestra las temperaturas máximas que el grano no debería sobrepasar para mantener la calidad de acuerdo al uso final que se lo destine.

GRANO	USO FINAL	Tem. Max: (°C)
MAIZ	MOLIENDA SECA Y SEMILLA	38 - 43
	MOLIENDA HUMEDA	55 - 60
	CONSUMO ANIMAL	71 - 82
TRIGO	SEMILLA	44
	MOLIENDA DE HARINA	49 - 66
SOJA	SEMILLA	38
	ACEITE	48
GIRASOL	CONFITERIA	60 - 75
	ACEITE	75 - 80
ARROZ	MOLIENDA	40

Tabla 6.0: Temperatura máxima que no debe sobrepasar el grano para mantener su calidad. [Fuente J. C. Rodriguez 2004].

6.3.5 Factores que influyen en el deterioro de granos y semillas.

Independientemente del uso que se le dará al producto cosechado, es importante no olvidar que el grano o la semilla son entes vivientes que respiran oxígeno del ambiente y producen como resultado bióxido de carbono, agua y energía que se traduce en calor; consecuentemente, en la medida en que se acelere el proceso de la respiración, lo hará también el deterioro del grano o la semilla.

Los principales factores que determinan y acentúan las pérdidas de granos y semillas en el almacén, son:

- a) Altos contenidos de humedad del producto almacenado.
- b) Elevada temperatura y/o humedad en el ambiente.
- c) Elevado porcentaje de impurezas mezcladas en granos y semillas como por ejemplo; granos o semillas quebradas, restos de plantas, insectos muertos y tierra.
- d) Carencia de almacenes adecuados.
- e) Presencia de insectos, hongos, bacterias y roedores.
- f) Manejo deficiente.
- g) Desconocimiento de los principios de la conservación.

La conservación apropiada de granos y semillas en el almacén, depende principalmente de las condiciones ecológicas de la región, del tipo de troje, bodega o almacén disponible, del tipo y condición del grano o semilla por almacenar y del tiempo del almacenamiento.

En las regiones tropicales, donde el clima es cálido y húmedo, se acelera la respiración de los granos y semillas y se favorece el desarrollo de insectos y hongos; sucediendo lo contrario en las regiones de clima frío y seco.

6.3.6 Método tradicional de secado de maíz en El Salvador.

El secado tradicional consiste en tender el maíz sobre una lona o plástico al aire libre, si es un pequeño productor, el tiempo de asoleado aproximado es de 5 a 6 horas, desde las 8 horas en adelante hasta las 14 horas, si la producción de maíz es grande se acostumbra tender el maíz sobre asfalto o pavimento, en las calzadas de las carreteras, con este método se tienen cuantiosas pérdidas en el proceso de secado del grano, los productores tienen que estar pendientes durante el proceso y además se exponen a sufrir un accidente cuando están en las calzadas de la carretera, a que sean investidos por un vehículo.



Figura 6.0 Forma tradicional de secado de maíz [Foto: Edgardo E. M.].



Figura 6.0.1 Forma tradicional de secado de maíz y pérdidas obtenidas del producto [Fotografía].

6.4 Evaluación del Recurso Solar.

6.4.1 El Sol.

EL Sol se encuentra en un brazo espiral de nuestra Galaxia, el brazo de Orión, a 30,000 años luz del centro galáctico, orbita el centro de la Vía Láctea cada 225 millones de años. Por tanto la velocidad del sistema solar es de 320 km/s (830 000 km/h). Nuestra galaxia consiste de 100 mil millones de estrellas y existen unas 100 mil millones de galaxias. El sol esta formado por 78% de Hidrógeno, 20% de Helio y 2 % de otros elementos, su edad aproximada es 4.55×10^9 años.

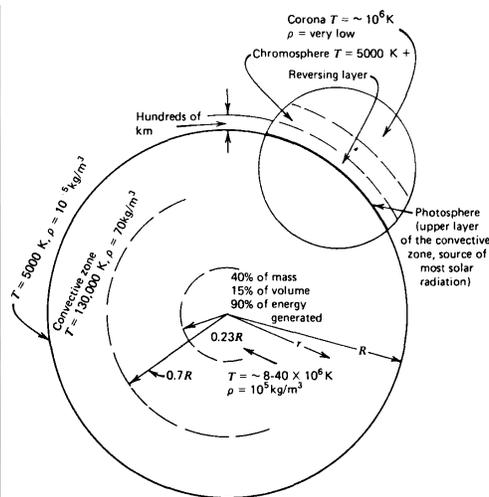
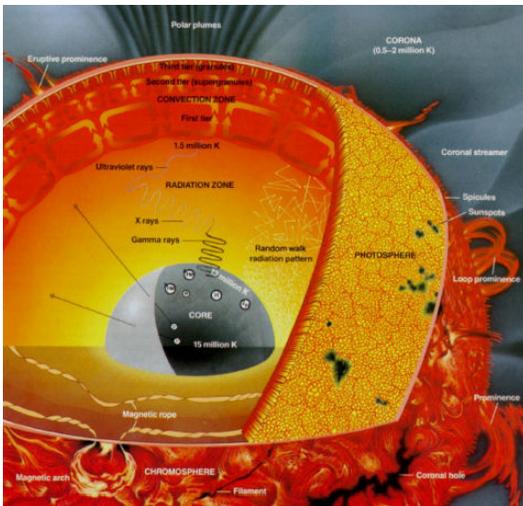


Figura 6.1: Núcleo, la estructura del sol [El sol nuestra estrella] [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].

Núcleo: Generador de energía. Las reacciones nucleares queman cada segundo 700 millones de toneladas de hidrógeno convirtiéndolo en Helio.

Zona Radiativa: La energía se transporta por radiación, debido a las múltiples absorciones y reemisiones de la luz por el denso plasma solar, la luz tarda sobre un millón de años en escapar del Sol.

Zona Convectiva: La energía se transporta por convección (ebullición) alcanzado las capas externas de la fotosfera.

En la estructura esquemática del sol en la muestra en la figura 6.1. Se estima que el 90% de la energía se genera en la región de 0 a 0.23R (donde R es el radio del sol), que contiene el 40% de la masa del sol. A una distancia de 0.7R desde el centro, la temperatura ha caído alrededor de 130,000 K y la densidad se ha reducido a 70 kg/m^3 , aquí se dan procesos de convección que vienen a ser importante, y la zona de 0.7 a 1.0R se conoce como la zona convectiva. Dentro de esta zona la temperatura baja a aproximadamente 5000 K y la densidad a alrededor de 10^{-5} kg/m^3 .

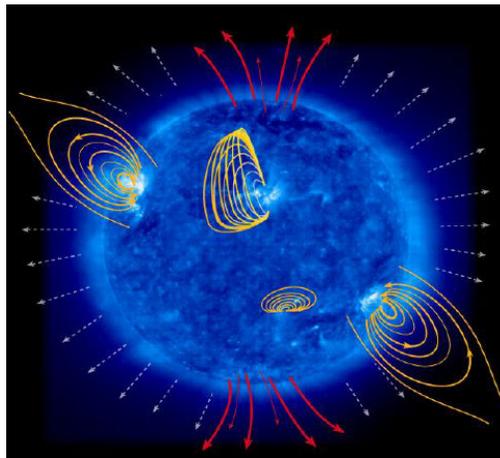


Figura 6.2: Campos magnéticos en el sol [El sol nuestra estrella].

El Sol está afectado fuertemente por campos magnéticos: Las flechas rojas muestran líneas de campo magnético abiertas que emergen de los polos. Las flechas grises representan partículas del viento solar disecionadas a lo largo del campo magnético. Las regiones activas brillantes muestran líneas de campo magnético cerradas (naranja).

El sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de 1.39×10^9 m, y está, en promedio a 1.5×10^{11} m de la tierra. Como se ve por la tierra, el sol gira sobre su eje una vez cada cuatro semanas. Sin embargo, no gira como un cuerpo sólido; el ecuador tarda unos 27 días, y las regiones polares toma alrededor de 30 días para cada rotación. Varias reacciones de fusión se han sugerido para suministrar la energía radiada por el sol.

El sol tiene una temperatura de cuerpo negro efectiva de 5777 K. La temperatura en las regiones interiores centrales se estima variaciones de 8×10^6 a 40×10^6 K y se estima una densidad en alrededor de 100 veces la del agua. El sol es, en efecto, un reactor de fusión continua con sus gases constituyentes como un "recipiente de contención" retenido por las fuerzas gravitacionales. Varias reacciones de fusión han surgido para suministrar la energía radiada por el sol.

6.4.2 La Constante Solar.

La Figura 6.3 muestra esquemáticamente la geometría de las relaciones de la tierra y el sol. La excentricidad de la órbita de la Tierra es tal que la distancia entre el Sol y la tierra tiene variaciones de 1.7%. A una distancia de una unidad astronómica de 1.495×10^{11} m, la distancia media Tierra-sol, el sol abarca un ángulo de $32'$. La Intensidad de la radiación emitida por el Sol y recibida por Tierra resulta casi constante fuera de la atmósfera de la Tierra.

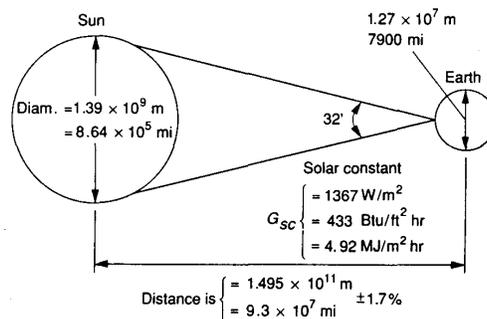


Figura 6.3. Relación entre el sol y la tierra [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].

La constante solar G_{sc} , es la energía proveniente del Sol, por unidad de tiempo, recibida en un área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a una unidad astronómica fuera de la atmósfera.

Estos estudios y mediciones fueron resumidos por Jonson (1954); el valor de la constante solar es de 1322 w/m^2 , esto fue revisado e incrementado por Johnson a un valor de 1395 w/m^2

El dato $1,353 \text{ w/m}^2$ dado y reexaminado por Frohlich (1977) y reducido a una nueva escala pirheliómetro basado en la comparación de los instrumentos con radiómetros absolutos. Los datos de los satélites Nimbus y Mariner también se han incluido en el análisis, y en 1978 Frohlich recomienda un nuevo valor de la constante solar de $G_{SC} = 1,373 \text{ w/m}^2$, con un error probable de 1 a 2%. Este fue de 1.5% mayor que el valor anterior y 1.2% más alta que la mejor determinación de la constante disponible solar por la integración de las mediciones espectrales. Mediciones espaciales adicionales de naves se han hecho con Hickey et al. En (1982) informes reportan 1373 w/m^2 y Wilson et al. (1981) reporta 1368 w/m^2 en informes.

6.4.3 Variación de la Radiación Extra-terrestre.

La otra es la variación de la distancia Tierra-Sol donde se tiene una variación del orden del 3% en el flujo de radiación extra-terrestre. En la siguiente Ecuación se indica esta variación para cada día del año.

$$G_{on} = G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right)$$

Donde G_{on} es la radiación extra-terrestre, medida en el plano normal a la radiación en el n -enésimo día del año.

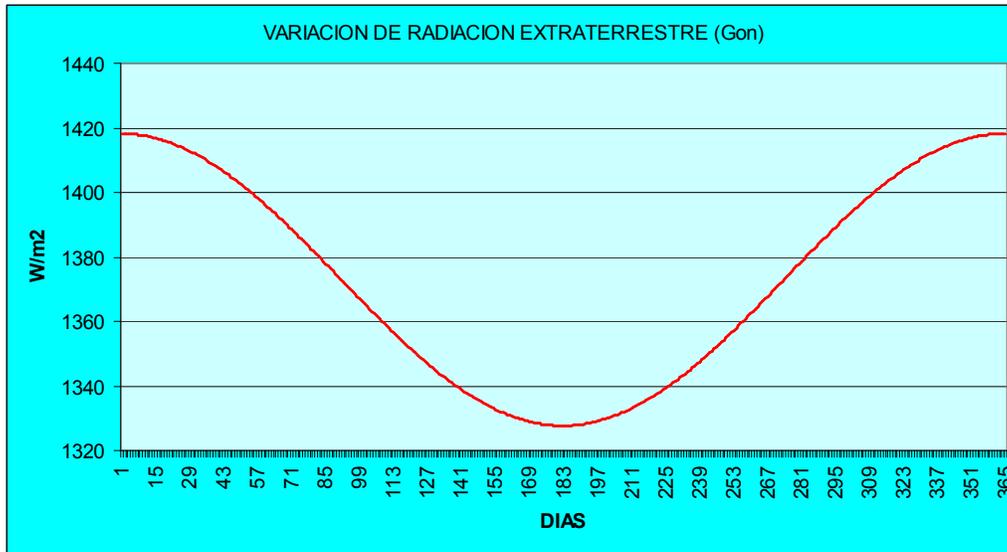


Figura 6.4: Variación de la radiación extraterrestre [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].

6.4.4 Distribución Espectral de Radiación Extra-terrestre.

Además de conocer la energía total presente en el espectro solar extraterrestre (por ejemplo la constante solar), es de vital importancia para éste estudio conocer la distribución espectral de la radiación solar. Una curva de irradiancia espectral estándar ha sido construida con base en mediciones a grandes altitudes y en el espacio exterior. La Figura 6.5, muestra la distribución espectral aceptada por la WRC.

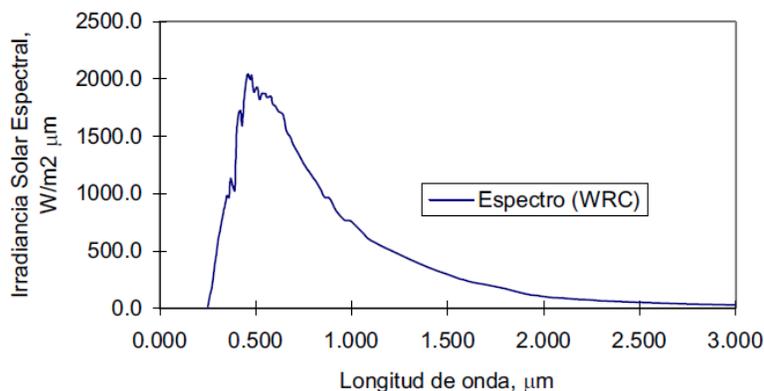


Figura 6.5: Curva de Irradiancia espectral estándar (WRC) a una distancia promedio Tierra-Sol [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].

La radiación solar es reflejada, dispersada y absorbida por los diferentes componentes que constituyen la atmósfera. Dichos componentes básicamente son O₂, CO₂, O₃, N₂, H₂O y partículas de polvo. La radiación solar que sufre dispersión y absorción es la que tiene una longitud de onda entre 0.29 y 2.5 μm, ya que casi toda la radiación fuera de este intervalo es dispersada y absorbida de inmediato.

La radiación de onda corta (ultravioleta) se absorbe fundamentalmente por O₃, este fenómeno ocurre principalmente en la capa superior de la atmósfera. La absorción por Ozono decrece a partir de los 0.29 μm, hasta los 3.5μm donde ya no hay absorción. Se tiene una ligera absorción cercana a la banda de 0.6μm.

Por otra parte, la radiación de onda larga se absorbe por vapor de agua, con bandas fuertes de absorción a 1.0, 1.4 y 1.8 μm. Más allá de los 2.5 μm, la transmisión atmosférica es muy baja debido a la absorción por H₂O y CO₂. La energía en el espectro extraterrestre para $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$ es menor al 5% del total del espectro solar y la energía recibida en Tierra a $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$ es muy pequeña.

6.4.5 Definiciones.

Masa de Aire (m): la razón de masa de la atmósfera a través de la cuál la radiación directa pasa. Así, cuando el Sol esta en el cenit a nivel del mar, m=1. Para un valor del ángulo cenit θ_z de 60°, m=2. Para ángulos de 0 a 70° a nivel del mar, se tiene:

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

Para ángulos mayores, los efectos de curvatura de la Tierra son significativos y deben ser tomados en cuenta. Para una discusión más completa de la masa de aire, se puede consultar Robinson (1966), Kondratyev (1969) o Garg (1982).

Radiación Solar Directa La radiación solar recibida sin que haya sido dispersada por la atmósfera. (Para evitar confusión en el uso de subíndices que refieren radiación directa y

difusa, se ha utilizado el subíndice “b” para radiación directa acuñado del término en inglés “*beam radiation*”).

Radiación Solar Difusa La radiación solar recibida después de que su dirección ha cambiado por la dispersión de la atmósfera (la radiación solar difusa es citada en meteorología como la radiación del cielo o radiación solar de cielo; la definición que se usa aquí permite distinguir la radiación solar difusa de la radiación infrarroja emitida por la atmósfera).

Radiación Solar Total La suma de la radiación solar difusa y directa en una superficie, también referida como **radiación global** cuando se trata de una superficie horizontal. Sin embargo, el término Radiación Solar Total es usado para indicar la energía por unidad de tiempo y por unidad de área de superficie integrada sobre todas las longitudes de onda del espectro solar.

Irradiancia (W/m^2) La energía radiante que está incidiendo en una superficie, por unidad de tiempo y unidad de área de superficie. El símbolo G es usado para la Irradiancia solar, con sus apropiados subíndices para indicar radiación directa, difusa o espectral.

Potencia Emisiva (W/m^2) La cantidad de energía radiante por unidad de tiempo y por unidad de área que abandona una superficie sólo por emisión.

Cualquiera de estos términos de radiación, excepto insolación, pueden aplicarse a cualquier rango de longitud de onda (p. ej. el espectro solar) o radiación monocromática. La insolación se refiere sólo a la irradiación en el espectro de energía solar.

6.4.6 Tiempo Solar.

El tiempo basado en el aparente movimiento angular del Sol a través del cielo, con el mediodía solar en el instante en que el Sol cruza el meridiano del observador.

El tiempo solar es usado en todas las relaciones de ángulos solares y no coincide con la hora local. Es necesario convertir el tiempo estándar a tiempo solar (Duffie y Beckman

(1991)). El tiempo solar se obtiene al aplicar dos correcciones. La primera rectifica la diferencia entre el meridiano del observador y el meridiano en el cual el tiempo estándar local está basado. La segunda corrección toma en cuenta las variaciones de velocidad en la rotación de la Tierra a lo largo del año, ya que estas variaciones repercuten en el tiempo que le toma al Sol pasar por el meridiano del observador. La diferencia en minutos establecida entre el tiempo solar y el tiempo estándar es entonces:

$$\text{Tiempo solar} - \text{Tiempo estándar} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

Donde el tiempo solar menos el tiempo estándar, L_{st} el meridiano estándar para la zona de tiempo local y L_{loc} la longitud de la locación en cuestión. La ecuación de tiempo E establecida en minutos es determinada por Spencer (1971) e Iqbal (1983).

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B))$$

Donde:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

Establecido en grados y n es igual al número de días es decir $1 \leq n \leq 365$.



Figura 6.6: La ecuación del tiempo E en Minutos, como una función del tiempo del año [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].

Se debe tener en cuenta que las correcciones para las ecuaciones de tiempo y el desplazamiento desde el meridiano estándar son en cuestión de minutos y de que hay una diferencia de 60 minutos entre el horario de verano y la hora estándar. El tiempo se especifica normalmente en horas y minutos. Se debe tener cuidado en la aplicación de las correcciones, que pueden sumar más de 60 minutos.

6.4.7 La Atmósfera y como influye en la Radiación Solar.

Se conoce como atmósfera a la delgada capa de gases que rodean a la tierra, compuesta principalmente por O₂, N₂, CO₂, agua y pequeñas partículas de polvo y sólidos suspendidos. Cuando la radiación solar directa alcanza la atmósfera, una parte de ella es absorbida y otra es dispersada. El grado en que la radiación es dispersada depende de la transmisividad de los gases y sólidos que conforman la capa gaseosa.

La dispersión de la radiación solar cuando pasa a través de la atmósfera es causada por la interacción de los rayos con las moléculas de aire, el agua (en forma de vapor y pequeñas gotas) y el polvo. El grado con el cual se produce la dispersión es una función del número de partículas a través de las que deben pasar la radiación y el tamaño de las partículas relativo a la longitud de onda (λ). La distancia que debe recorrer la luz del sol a través de

las moléculas de aire esta descrita por la masa de aire (m). Las partículas de agua y polvo encontradas por la radiación dependen de la masa de aire y de las cantidades de polvo y humedad-dependientes del tiempo y la localización-presentes en la atmósfera.

Los efectos de la atmósfera en la dispersión y la absorción de la radiación son variables con respecto al tiempo, así como con las condiciones atmosféricas y los cambios de la masa gaseosa. Es útil definir entonces un cielo claro común. Hottel (1976) presentó un método para estimar la radiación directa transmitida a través de la atmósfera clara, el cual toma en cuenta el cenit del ángulo y la latitud para una atmósfera normal y para cuatro tipos climatológicos.

6.4.8 Dirección de la Radiación Solar Directa.

Las relaciones geométricas entre un plano en cualquier orientación, ya sea fijo o con movimiento relativo a la Tierra y la radiación solar directa incidente, que es la posición relativa del Sol con respecto al plano, se describen en términos de varios ángulos [Benford y Bock (1939)], los cuales se indican en la figura 6.7 y son los siguientes:

Φ **Latitud**, la locación angular norte o sur del ecuador; norte positivo; $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$.

δ **Declinación**, la posición angular del Sol al mediodía solar (p. ej. cuando el Sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte es positiva; Se comprende en $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq 23.45^{\circ}$.

β **Pendiente**, el ángulo entre el plano en cuestión y la superficie horizontal. Se comprende en $0^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ}$.

γ **Ángulo Acimut de Superficie**, la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local, con cero apuntado al sur, al Este negativo y Oeste positivo. Se comprende en: $-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$.

- ω **Ángulo Horario**, el desplazamiento angular del Sol de este a oeste del meridiano local debido a la rotación de la Tierra (15° por hora), por la mañana negativo y positivo por la tarde.
- θ **Ángulo de Incidencia**, el ángulo entre la radiación directa y la normal del plano de incidencia.

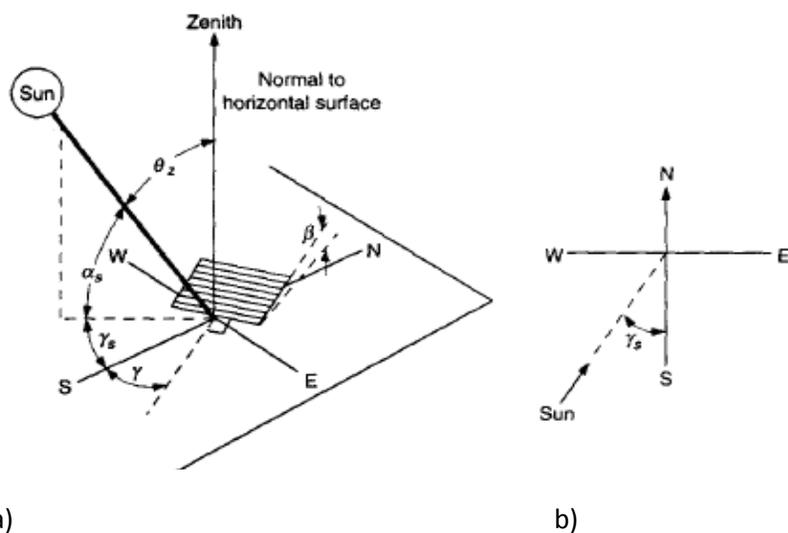


Figura 6.7: (a) Ángulo cenit, pendiente, ángulo acimut de la superficie y ángulo acimut solar para una superficie inclinada. (b) Vista superior que muestra al ángulo acimut [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].

En la Figura 7 se definen los ángulos para describir la posición del Sol en el cielo [Duffie y Beckman (1991)].

- θ_z **Ángulo Cenit**, el ángulo entre la vertical y la línea que apunta hacia el Sol.
- α_s **Ángulo de Altitud Solar**, el ángulo entre la horizontal y la línea que apunta hacia el Sol, (complemento del ángulo cenit).

γ_s **Ángulo de Acimut Solar**, el desplazamiento angular con respecto al sur de la proyección de radiación directa en el plano horizontal.

La declinación δ puede ser determinada de la ecuación de Cooper(1969):

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

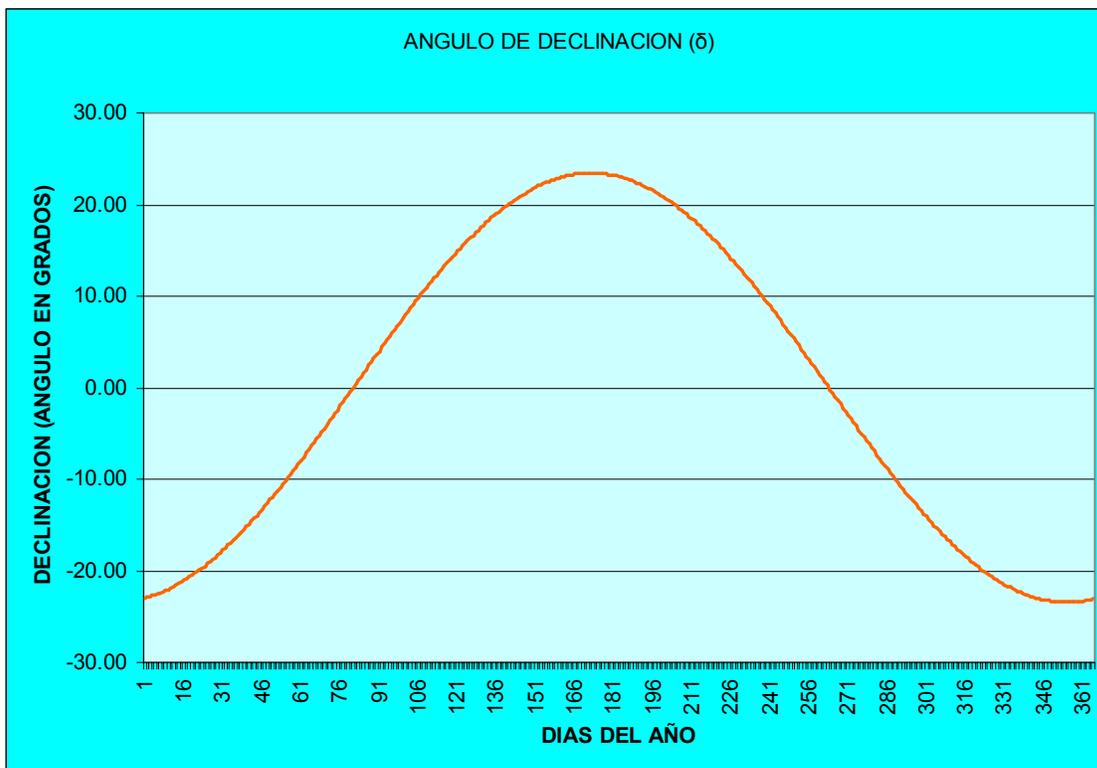


Figura 6.8: Nomograma para determinar el tiempo de la puesta del sol y de la duración del día. [Adaptado de Duffie y Beckman (1991) y Whillier (1965)]

Se presentan en las siguientes dos Ecuaciones las relaciones que existen entre estos ángulos. Así, las ecuaciones relacionan el ángulo de incidencia de la radiación directa θ en una superficie con otros ángulos;

$$\cos(\theta) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi)\cos(\beta) - \text{sen}(\delta)\cos(\phi)\text{sen}(\beta)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega) \\ + \cos(\delta)\text{sen}(\phi)\text{sen}(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \cos(\delta)\text{sen}(\beta)\text{sen}(\gamma)\text{sen}(\omega)$$

O

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z)\cos(\beta) + \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\beta)\cos(\gamma_s - \gamma)$$

6.4.9 Relaciones Angulares

Para describir el movimiento aparente del sol, usamos dos ángulos: el ángulo zenital, θ_z , formado por la línea Tierra-Sol con la vertical en el punto del observador y el ángulo horario, ω , que indica el desplazamiento angular del sol, de este a oeste, a una tasa de 15 grados/hora (o $\pi/12 \approx 0.2618$ rad/h) debida a la rotación de la Tierra. Por convención, se considera el ángulo horario nulo en el mediodía solar, negativo en la mañana y positivo por la tarde. Este ángulo se define sobre el plano del ecuador, como el ángulo entre los meridianos del Sol y del observador. En la Fig. 9, se indican ambos ángulos referidos a un observador O ubicado en el hemisferio norte. También se indican la latitud ϕ y la declinación solar δ .

Los vector \hat{n}_O y \hat{n}_S refieren a la posición del observador (O) y del Sol (S), respectivamente, y el ángulo entre ellos es θ_z por definición. Su producto escalar, $\hat{n}_O \cdot \hat{n}_S = \cos(\theta_z)$, nos permite relacionar este ángulo con la latitud del observador, ϕ , y con la declinación δ . De la Fig. 6.9 surge que estos vectores se pueden expresar en coordenadas cartesianas como:

$$\hat{n}_O = \hat{e}\sin(\phi) + \hat{x}\cos(\phi)$$

$$\hat{n}_S = \hat{e}\sin(\delta) + \cos(\delta)\left(\hat{x}\cos(\omega) + \hat{y}\sin(\omega)\right)$$

De estas expresiones, resulta la relación:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)$$

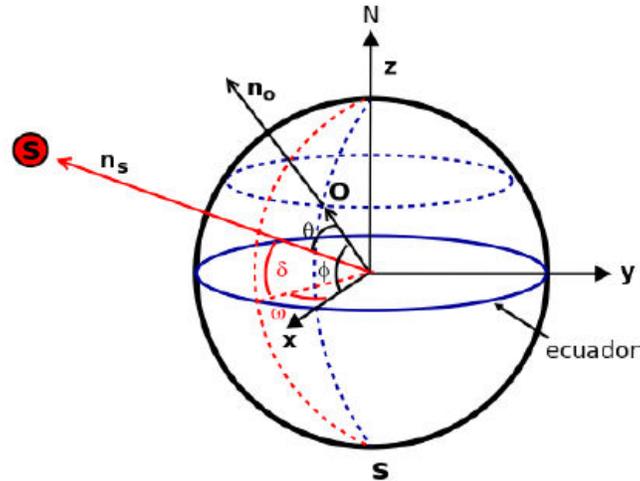


Figura 6.9: Relaciones entre los ángulos que describen el movimiento aparente del Sol [Gonzalo Abal].

Los versores \hat{n}_o y \hat{n}_s apuntan en las direcciones del observador (O) y del Sol (S) respectivamente, en relación a un sistema de coordenadas cuyo eje z coincide con el eje de rotación de la Tierra y cuyo eje x esta en el meridiano del observador.

La expresión $\cos(\theta_z)$ nos será de utilidad para el cálculo de la irradiancia solar sobre plano horizontal.

A la salida y puesta del sol, $\theta_z = \pm \frac{\pi}{2}$ y $\cos(\theta_z) = 0$, por lo que, usando la ecuación $\cos(\theta_z)$, el ángulo horario a la salida ($\omega = -\omega_s$) o puesta ($\omega = \omega_s$) del Sol, es:

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\phi)\tan(\delta)$$

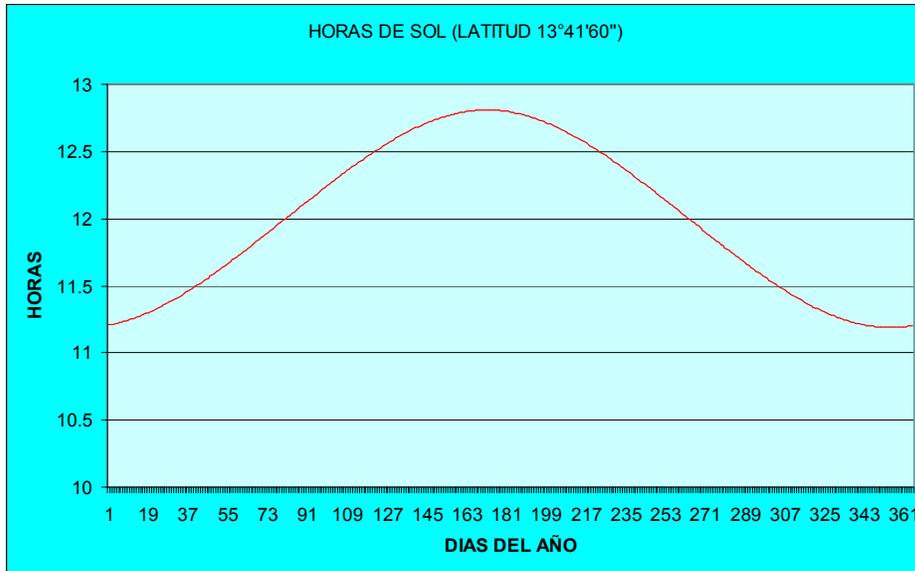


Figura 6.10: Horas de sol diarias para una latitud $\phi = 13.71$, de San Salvador [Adaptado de Duffie y Beckman (1991)].

6.4.10 Tipos de Radiación.

El tipo de radiación se clasifica según como llegue la luz solar a la superficie de la tierra, puede ser en tres tipos diferentes: Directa, Dispersa o Difusa y Albedo.

6.4.11 Radiación Solar Directa.

La radiación solar directa es la que llega directamente del sol, es una radiación que tiene una dirección bien definida, es decir que viaja en línea recta hacia el sistema de captación, este puede reflejarse y concentrarse para su utilización.

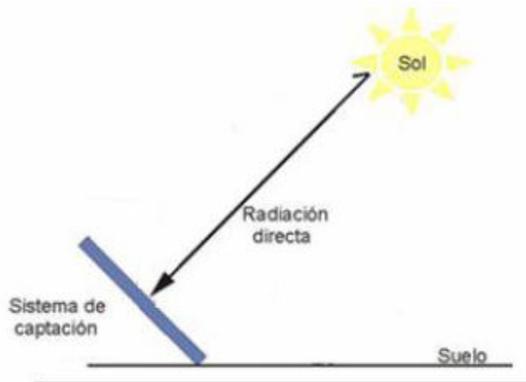


Figura 6.11: Esquema de la radiación solar directa sobre un plano inclinado [Fuente: J.C.Y y J.M. Lopez].

6.4.12 Radiación Solar Difusa.

La radiación solar difusa es aquella que son interceptados por partículas y moléculas contenidas en el aire, se dispersan en la atmósfera, esta radiación proviene de las nubes, esta no es direccional y su distribución es uniforme, es decir los gases y partículas desvían la radiación o lo dispersan.

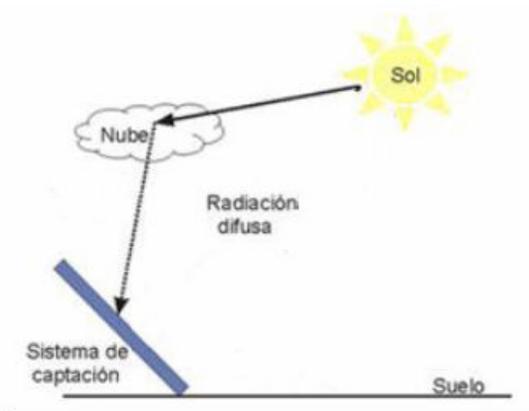


Figura 6.12: Esquema de la radiación solar difusa sobre un plano inclinado [Fuente: J.C.Y y J.M. Lopez].

6.4.13 Radiación Solar Albedo.

Se llama albedo a la fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie. El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro. La radiación solar albedo es la que llega a la superficie una vez reflejada en la superficie del entorno, esta no es claramente diseccionada.

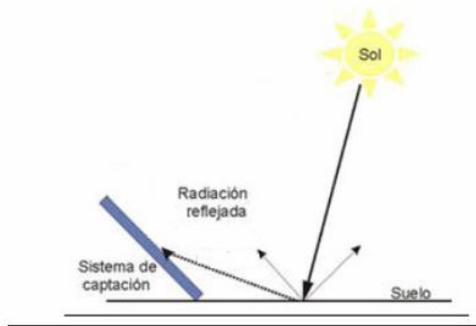


Figura 6.13: Esquema de la radiación solar difusa sobre un plano inclinado [Fuente: J.C.Y y J.M. Lopez].

6.5 La Radiación Solar en El Salvador.

Geográficamente el país se encuentra ubicado en latitud del Hemisferio Norte. Sus coordenadas geográficas son entre 13° y 14° latitud norte, y entre 87° y 90 longitud occidental. La precipitación anual que oscila entre 1200 mm. y 2800 mm. y una temperatura anual entre 12.7 °C y 26.9 °C

6.5.1 Comportamiento de la Temperatura Ambiente Anual.

En promedio la temperatura media anual para el 2015 en las 24 estaciones colocadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Recurso Natural fue de 24.2 °C, mayor a la normal (23.8 °C).

El mayor promedio de temperatura máxima anual se registro en la estación del puente Cuscatlán con 37.0 °C, lo que indica una anomalía levemente mayor a la temperatura normal (35.9°C) y en el mismo lugar también se registró la temperatura máxima absoluta de 42.2 °C, registrada el día 19 de Abril de 2015.

6.5.2 Comportamiento normal de la luz Solar y el Brillo Solar.

Para cada zona geográfica del país (planicie bajas, valles intermedios y valles de altura) se presentan los mapas de comportamiento normal de las variables: Luz solar y radiación solar anual, se observa que para las planicies bajas y valles intermedios de la zona oriente del país, la cantidad de la luz solar es mayor, superando las 8.2 horas, con respecto a la radiación solar, se observa que en las planicies costeras de la zona central, para central y oriental del país, las cantidades son mayores de 5 KW/m²/día y para San Salvador de 5.20 KW/m²/día.

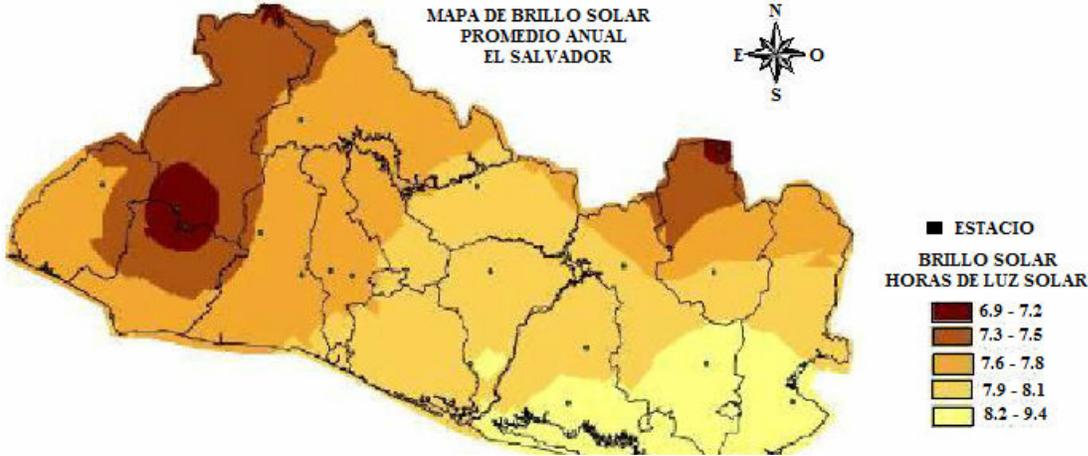


Figura 6.14: Esquema del brillo solar en EL Salvador [Fuente: MMARN].

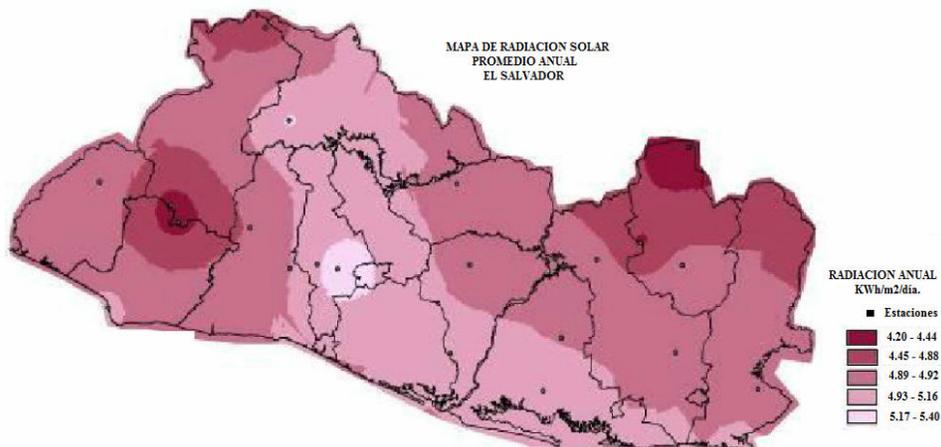


Figura 6.15: Esquema de la radiación solar anual en EL Salvador [Fuente: MMARN].

6.5.3 Temperaturas máximas absolutas diarias, periodo del 01 al 10 de diciembre de 2015.

En el siguiente cuadro se muestran valores de temperatura máxima para estaciones climatológicas que se encuentran ubicadas en diferentes lugares del territorio nacional. La temperatura absoluta más alta se midió en la estación de La Hachadura con 37.8 °C, el día 7 de diciembre.

CODIGO DE LA ESTACIÓN	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	Temperatura °C Según Normal Climatológica 1981-2010			Máx. Abs. hist. Diciembre	Año de Máx. Abs. Histórica	Temperaturas máximas absolutas diarias °C del mes de diciembre 2014										Máx del mes
		Máx. Promedio	Extrema Máxima	Extremo Mínima			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A-37	Santa Ana UNICAES	30.3	31.7	27.8	35.8	1999	30.2	30.6	30.2	29.6	28.8	30.0	29.8	29.6	31.2	31.2	31.2
B-10	Cerrón Grande	34.6	37.1	32.4	38.6	1992	32.8	33.4	34.0	34.5	32.4	34.9	34.0	34.3	34.0	34.2	34.9
G-03	Nueva Concepcion	33.6	35.3	31.3	38.0	1987	33.0	33.0	33.4	34.0	31.4	32.8	33.8	34.5	33.8	33.8	34.5
H-14	La Hachadura	34.9	36.8	33.2	40.0	1993	34.7	35.2	36.9	36.3	36.8	37.0	37.8	37.5	35.4	35.4	37.8
M-24	San Miguel UES	35.8	38.0	33.4	40.0	1957	33.6	33.8	35.2	36.0	34.2	36.0	35.7	36.0	35.0	35.4	36.0
N-02	La Unión	34.4	35.9	25.5	40.2	2000	35.5	35.8	36.0	37.4	-	-	36.6	37.0	36.0	36.7	37.4
S-10	Aerop. Ilopango	30.3	32.7	27.7	34.6	2008	30.4	30.8	31.2	30.9	30.0	30.8	30.9	31.0	31.0	31.8	31.8
T-06	Acajutla	32.8	33.7	30.9	38.4	1976	33.4	33.4	33.6	34.2	36.4	37.2	34.2	34.2	33.6	33.8	37.2
V-09	Puente Cuscatlán	35.5	37.7	33.7	41.5	1973	35.0	35.0	34.0	34.4	33.5	34.4	34.0	36.0	36.5	35.0	36.5
Z-02	San Francisco Gotera	34.7	37.4	33.1	38.2	1986	33.2	32.8	32.0	33.4	32.8	34.4	34.2	33.0	34.6	33.6	34.6

Tabla 6.1: Tabla de temperaturas, registradas en El salvador [Fuente: MMARN].

NOMBRE DE LA ESTACION	TEMPERATURA °C SEGÚN NORMAL CLIMATOLOGICO 1981 - 2010		
	MAX. PROMEDIO	EXTREMA MAXIMA	EXTREMA MINIMA
SANTA ANA UNICAES	30.3	31.7	27.8
CERRON GRANDE	34.6	37.1	32.4
NUEVA CONCEPCION	33.6	35.3	31.3
LA HACHADURA	34.9	36.8	33.2
SAN MIGUEL UES	35.8	38	33.4
LA UNION	34.4	35.9	25.5
AEROPUERTO ILOPANGO	30.3	32.7	27.7
ACAJUTLA	32.8	33.7	30.9
PUENTE CUSCATLAN	35.5	37.7	33.7
SAN FRANCISCO GOTERA	34.7	37.4	33.1

Tabla 6.2: Tabla de temperaturas máxima, registradas por estaciones metereologicas en El salvador [Fuente: MMARN].

La estación de Ilopango se encuentra a unos 10 kilómetros hacia el Este de la Ciudad de San Salvador. Presenta condiciones climáticas y edáficas similares, caracterizadas por terrenos en planicie y alomados, suelo con ceniza volcánica y zonas urbanas en los alrededores. La región donde se ubica la estación y la ciudad se zonifica climáticamente según Koppen, Sapper y Laurer como Sabana Tropical Caliente o Tierra Caliente (0 – 800 msnm) la elevación es determinante (635 msnm). Considerado la regionalización climática de Holdridge, la zona de interés se clasifica como Bosque Húmedo subtropical, transición a tropical, (con bio-temperatura mayor a 24 °C).

Los rumbos de los vientos son predominantes del Norte durante la estación seca y la estación lluviosa, la brisa marina del sur y sureste ocurre después del mediodía, la velocidad promedio anual es de 8 kilómetros por hora.

UBICACIÓN GEOGRAFICA.

Latitud Norte: 13°41.9'

Longitud Oeste: 89°07.1'

Elevación: 615 msnm.

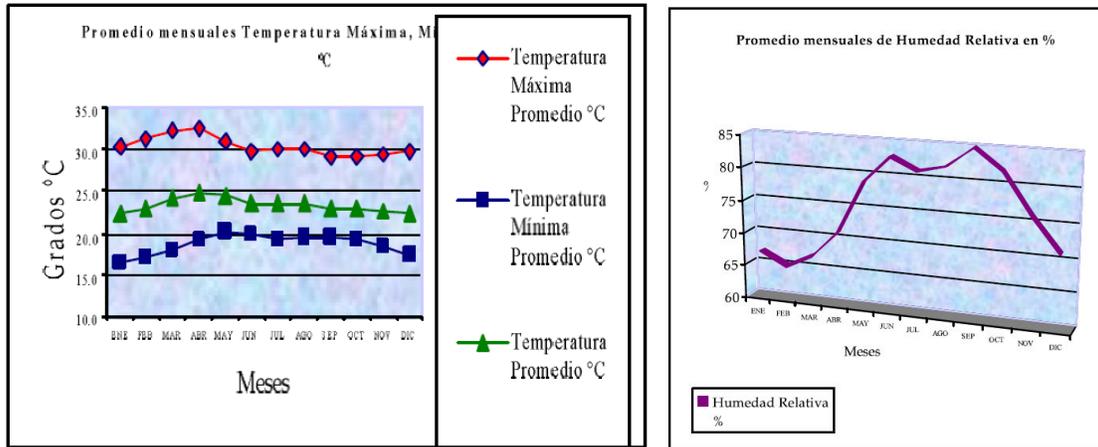


Figura 6.16: , Representación de temperatura y humedad [Fuente: MMARN].

6.6 Transferencias de Calor.

6.6.1 Transferencias de Calor por Conducción.

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x = L$ y área A , como se muestra en la figura 6.17. La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$.

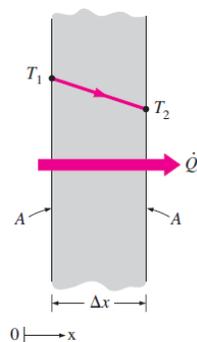


Figura 6.17: , Representación de trasferencias de calor por conducción [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].

Los experimentos han demostrado que la razón de la transferencia de calor, Q , a través de la pared se duplica cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de

ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de la transferencia de calor; pero se reduce a la mitad cuando se duplica el espesor L de la pared. Por lo tanto, se concluye que la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa; es decir,

$$RAZON DE CONDUCCION DE CALOR \propto \frac{(AREA)(DIFERENCIA DE TEMPERATURA)}{ESPESOR}$$

O bien.

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W)$$

Donde la constante de proporcionalidad k es la **conductividad térmica** del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial.

$$Q_{cond} = kA \frac{dT}{dx} \quad (W)$$

La cual se llama **ley de Fourier de la conducción del calor**, en honor de J. Fourier, quien la expresó por primera vez en su texto sobre transferencia de calor en 1822. Aquí, dT/dx es el **gradiente de temperatura**, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama T-x (la razón de cambio de T con respecto a x), en la ubicación x. La relación antes dada indica que la razón de conducción del calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer x. El signo negativo en la ecuación diferencial garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva.

El área A de transferencia de calor siempre es *normal* (o perpendicular) a la dirección de esa transferencia.

6.6.2 Transferencias de Calor por Convección.

La experiencia muestra que la transferencia de calor por convección depende con intensidad de las propiedades viscosidad dinámica μ , conductividad térmica k , densidad ρ y calor específico c_p del fluido, así como de la velocidad del fluido V . También depende de la configuración geométrica y aspereza de la superficie sólida, además del tipo de flujo del fluido (el que sea laminar o turbulento). Por lo tanto, se espera que las relaciones de la transferencia de calor por convección sean un tanto complejas debido a su dependencia de tantas variables. Esto no es sorprendente, ya que la convección es el mecanismo más complejo de transferencia de calor.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la *transferencia de calor por convección* es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la **ley de Newton del enfriamiento** como

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2 \cdot ^\circ C$ o $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. Note que en la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. En la tabla 2 se dan valores típicos de h .

Tipo de Convección	h, W/m ² .°C*
Convección libre de gases	02-may
Convección libre de líquidos	10 -1000
Convección forzada de gases	25 - 250
Convección forzada de líquidos	50 - 20000
Ebullición y condensación	2500 - 100000

* Multiplíquese por 0.176 para convertir a Btu/h.ft².°I

Tabla 6.3: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por Convección [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].

Algunos no consideran a la convección como un mecanismo fundamental de transferencia del calor ya que, en esencia, es conducción de calor en presencia de un movimiento de fluido. Pero todavía se necesita dar un nombre a este fenómeno combinado, a menos que se desee seguir refiriéndose a él como “conducción con movimiento de fluido”. Por lo tanto, resulta práctico reconocer a la convección como un mecanismo separado de transferencia de calor, a pesar de los argumentos válidos en contra.

La razón de la transferencia de calor por este mecanismo es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa de manera conveniente por la *ley de Newton de enfriamiento* como:

$$q_{CONV.} = h(T_S - T_\infty) \quad \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

O bien.

$$Q_{CONV.} = hA_S(T_S - T_\infty) \quad (W)$$

Donde

h coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

A_S área superficial de transferencia de calor, m^2 .

T_S temperatura de la superficie, $^\circ C$.

T_∞ temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, $^\circ C$.

A juzgar por sus unidades, el **coeficiente de transferencia de calor por convección** h se puede definir como la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura.

6.6.3 Transferencias de Calor por Radiación.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o $^\circ R$) es expresada por la **ley de Stefan-Boltzmann** como

$$\dot{Q}_{emitida,m\acute{a}x} = \sigma A_S T_S^4 \quad (W)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, o bien, $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4$ es la *constante de Stefan-Boltzmann*. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama **cuerpo negro** y la radiación emitida por éste es la **radiación del cuerpo negro**. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (W)$$

En donde ε es la **emisividad** de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$. En la tabla 1 se dan las emisividades de algunas superficies. Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su **absortividad** α , la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Como la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él. Es decir, un cuerpo negro es un absorbente perfecto ($\alpha = 1$) del mismo modo que es un emisor perfecto.

En general, tanto ε como α de una superficie dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. La **ley de Kirchhoff** de la radiación afirma que la emisividad y la absortividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. En muchas aplicaciones prácticas, las temperaturas de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud, y la absortividad promedio de una superficie se considera igual a su emisividad promedio. La razón a la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de (figura 6.18)

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (W)$$

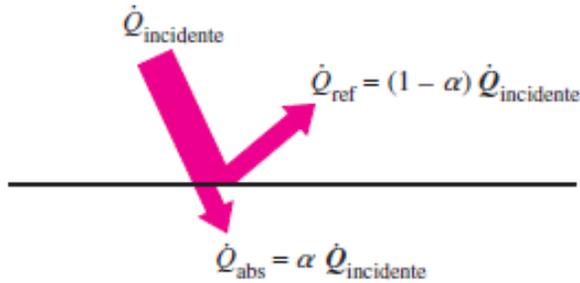


Figura 6.18: Absorción de la radiación incidente sobre una superficie opaca de absorptividad α [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].

Emisividades de algunos materiales a 300 K		Emisividades de algunos materiales a 300 K	
Material	Emisividad	Material	Emisividad
Hoja de Aluminio	0.07	Papel blanco	0.92 - 0.97
Aluminio Anodizado	0.82	Pavimento de asfalto	0.85 - 0.93
Cobre pulido	0.03	Ladrillo Rojo	0.93 - 0.96
Oro pulido	0.03	Piel humana	0.95
Plata pulida	0.02	Madera	0.82 - 0.92
Acero Inoxidable pulido	0.17	Suelo	0.93 - 0.96
Pintura Negra	0.98	Agua	0.96
Pintura blanca	0.9	Vegetación	0.92 - 0.96

Tabla 6.4 de Emisividades [Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel].

Cuando una superficie de emisividad ϵ y área superficial A_S , a una temperatura termodinámica T_S , está por completo encerrada por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura termodinámica T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_S (T_S^4 - T_{\text{alred}}^4) \quad (W)$$

En este caso especial la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación. La transferencia de calor por radiación hacia una superficie, o desde ésta, rodeada por un gas como el aire, ocurre paralela a la conducción (o convección, si se tiene un movimiento masivo del gas) entre esa

superficie y el gas. Por lo tanto, la transferencia total de calor se determina al sumar las contribuciones de los dos mecanismos de transferencia. Por sencillez y conveniencia esto se lleva a cabo con frecuencia mediante la definición de un **coeficiente combinado de transferencia de calor**, $h_{combinado}$, que incluye los efectos tanto de la convección como de la radiación. Entonces, la razón total de transferencia de calor hacia una superficie, o desde ésta, por convección y radiación se expresa como

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = h_{conv} A_S (T_S - T_{alred}) + \varepsilon \sigma A_S (T_S^4 - T_{alred}^4)$$

$$\dot{Q}_{total} = h_{combinado} A_S (T_S - T_{\infty}) \quad (W)$$

$$h_{combinado} = h_{conv} + h_{rad} = h_{conv} + \varepsilon \sigma (T_S + T_{alred}) (T_S^2 + T_{alred}^2)$$

Note que, en esencia, el coeficiente combinado de transferencia de calor es un coeficiente de transferencia de calor por convección modificado para incluir los efectos de la radiación.

La radiación suele ser significativa con relación a la conducción o a la convección natural, pero despreciable con relación a la convección forzada. Por lo tanto, en las aplicaciones de convección forzada se suele descartar la radiación, en especial cuando las superficies que intervienen tienen emisividades bajas y temperaturas de bajas a moderadas.

6.7 Dimensionamiento y diseño del Sistemas.

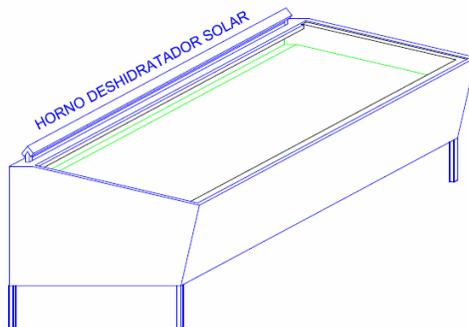


Figura 6.19: Diseño de horno solar para deshidratación de productos agrícolas [Diseño: Edgardo E. M.].

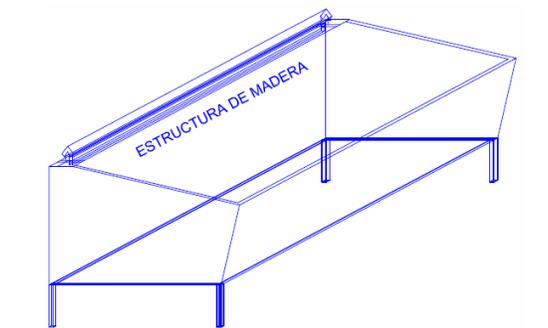


Figura 6.20: Diseño del cuerpo externo del horno de deshidratación. Vista de la parte externa de la cocina solar. (Recubrimiento de Madera) [Diseño: Edgardo E. M.].

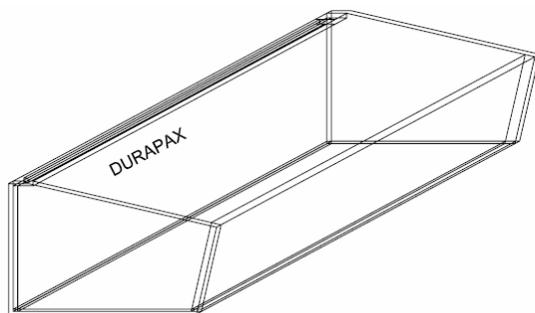


Figura 6.21: Diseño de aislamiento entre el cuerpo del horno y cámara de deshidratación [Diseño: Edgardo E. M.].

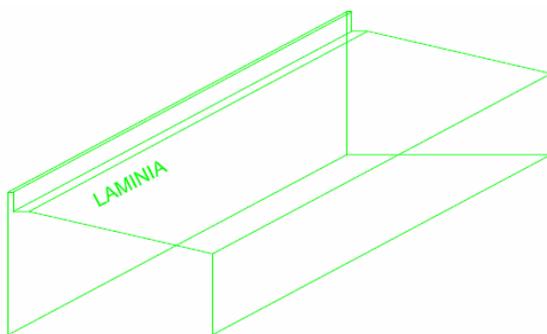


Figura 6.22: Diseño de cámara de deshidratación (estructura metálica.) [Diseño: Edgardo E. M.].

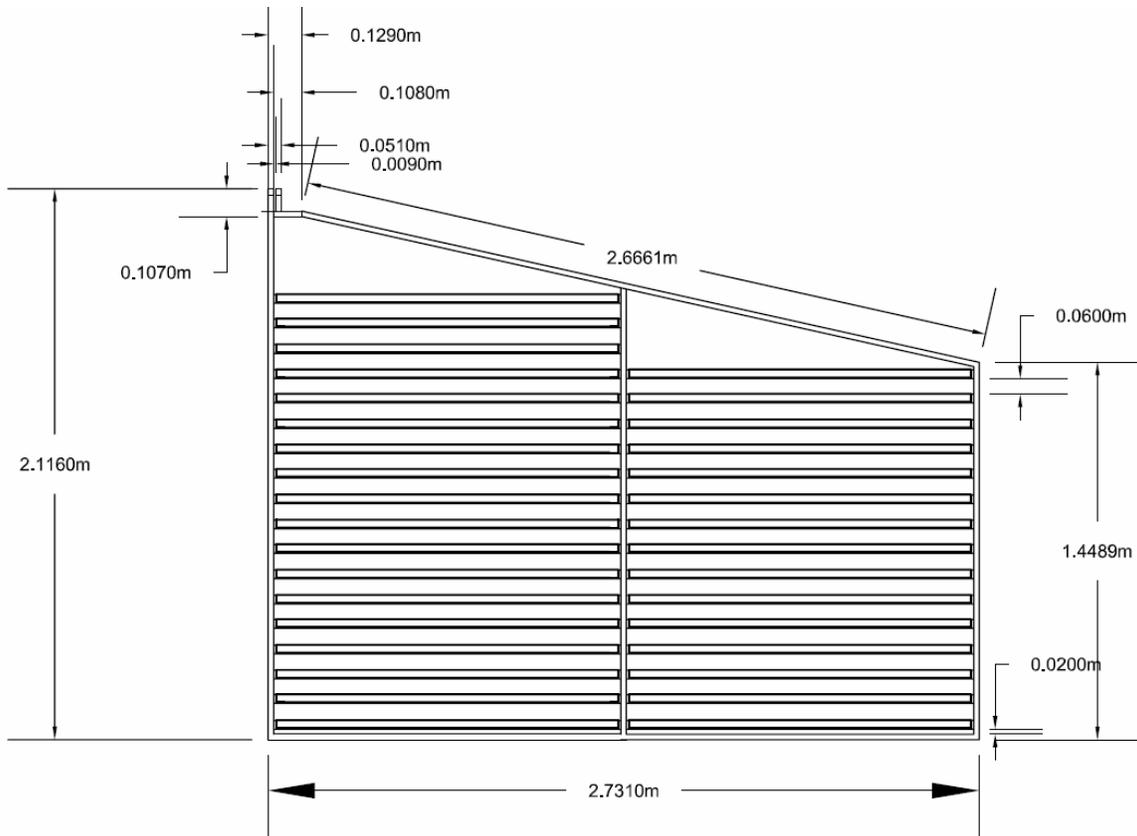


Figura 6.23: Dimensiones de diseño de cámara de deshidratación (estructura metálica.)
[Diseño: Edgardo E. M.].

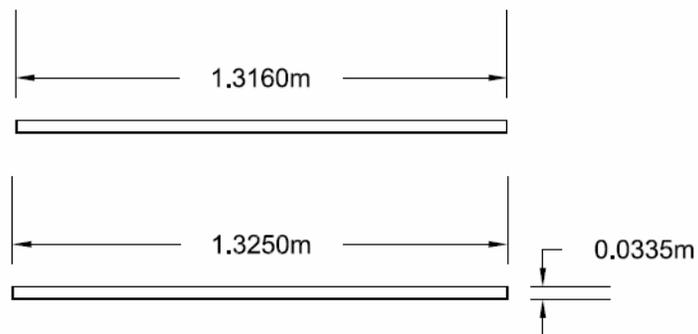


Figura 6.24: Dimensiones de bandejas de cámara de deshidratación (estructura metálica.)
[Diseño: Edgardo E. M.].

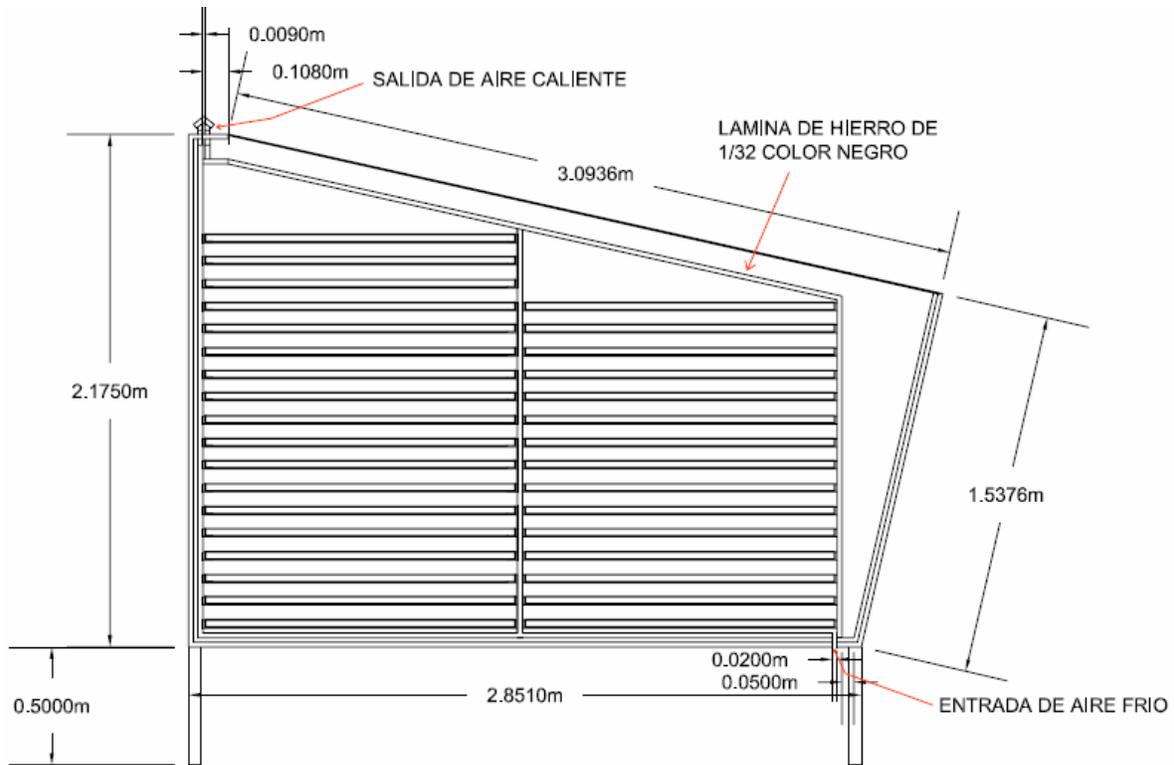


Figura 6.25: Dimensiones del cuerpo del horno deshidratador (estructura de madera) [Diseño: Edgardo E. M.].

6.8 Cálculo del consumo de energía

Numero de Reynolds critico	Re	5.00E+05
Numero de Reynolds	Laminar	$Nu=0.453Re^{(0.5)}Pr^{(1/3)}$
	Turbulento	$Nu=0.0308Re^{(0.8)}Pr^{(1/3)}$

Propiedades del Aire a 1 atm y 50 °C			
Conductividad termica del aie	K =	0.02735	W/m°K
Calor especifico del aire	Cp =	1007	J/Kg.°K
Energia	1 J =	0.000277778	Wh/Kg.°K
Calor especifico del aire	Cp =	0.279722446	Wh/Kg°K
Viscosidad dinamica del aire	μ =	1.963E-05	Kg/m.s
Dencidad	ρ =	1.092	Kg/m3
Viscosidad cinetica del aire	$V = \mu/\rho$ =	1.798E-05	m2/s

AREA		A1	A2	A3	A4	A5	COLECTOR
Velocidad del aire	V (m/s) =	0.0854	0.0854	0.0854	0.0854	0.085	0.0854
Longitud caracteristica	L (m)=	47	47	47	47	47	47

AREA		A1	A2	A3	A4	A5	COLECTOR
Numero de Reynolds ($\rho \cdot V \cdot L_c / \mu$)	Re =	223237	223236.9	223237	223237	223236.9	223236.9299
Numero de Prandtl ($\mu \cdot C_p / K$)	Pr =	0.7228	0.7228	0.7228	0.7228	0.7228	0.7228
Numero de Nusselt ($h \cdot L_c / K$)	Nu =	192.082	192.0823	192.08	192.08	192.0823	192.0822661

Propiedades del Aire a 1 atm y 35 °C				
Conductividad termica del aie	K =	0.02625		W/m°K
Calor especifico del aire	Cp =	1007		J/Kg.°K
Energia	1 J =	0.000277778		Wh
Calor especifico del aire	Cp =	0.279722446		Wh/Kg°K
Viscosidad dinamica del aire	μ =	1.90E-05		Kg/m.s
Dencidad	ρ =	1.145		Kg/m3
Viscosidad cinetica del aire	$\nu = \mu / \rho$ =	1.66E-05		m2/s

AREA		A1	A2	A3	A4	A5	COLECTOR
Velocidad del aire	V (m/s) =	133	133	133	133	133	133
Longitud caracteristica	L (m)=	1.77	1.77	1.65	2.11	0.2999	2.7946

AREA		A1	A2	A3	A4	A5	COLECTOR
Numero de Reynolds ($\rho \cdot V \cdot L_c / \mu$)	Re =	14223982	14223982	13259644	16956272	2410041	22457818.52
Numero de Prandtl ($\mu \cdot C_p / K$)	Pr =	0.7268	0.7268	0.7268	0.7268	0.7268	0.7268
Numero de Nusselt ($h \cdot L_c / K$)	Nu =	14614.119	14614.12	13815.96	16819.77	3531.63	21059.58185

COEFICIENTE DE CONVECCION.							
AREA		A1	A2	A3	A4	A5	COLECTOR
Numero de Nusselt	Nu=hL/K						
AMBIENTE	h1 (W/m2°K)	216.73481	216.7348	219.7994	209.2507	309.1207	197.8150804
CAMARA DE SECADO	h2 (W/m2°K)	0.1117755	0.111776	0.111776	0.111776	0.111776	0.111775531

TEMPERATURA	°C	°K
AMBIENTE	37.8	310.8
CAMARA DE SECADO	50	323

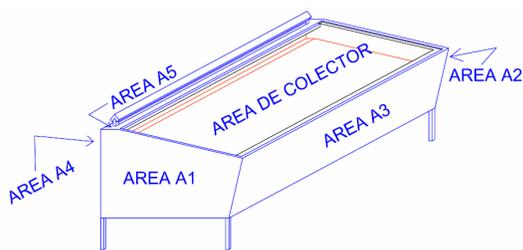


Figura 6.8: Áreas para el cálculo de transferencias de calor, [Diseño: Edgardo E. M.].

AREAS	H (m)	L (m)	A (m2)
COLECTOR	3.0936	4.27	13.209672
AREA A3	1.66	4.27	7.0882
AREA A4	2.1705	4.27	9.268035
AREA A5	0.2499	4.27	1.067073
AREA 1	2.781	1.62	4.50522
AREA 2	2.781	0.5778	0.8034309
AREA A1			5.3086509
AREA A2			5.3086509

AREA			A1 (m2)	A2 (m2)	A5 (m2)
			5.14131	5.14131	1.067073
MATERIALES	K (W/m ² K)	ΔX (m)	R1 (°K/W)	R2 (°K/W)	R5 (°K/W)
MADERA	0.13	0.02	0.029923532	0.029923532	0.144175847
DURAPAX	0.04	0.01905	0.092632033	0.092632033	0.446314357
PAPEL ALUMINIO	237	0.000013	1.06689E-08	1.06689E-08	5.14045E-08
AIRE	0.0234	0.05	0.41560461	0.41560461	2.002442323
LAMINA	79.5	0.004	9.78631E-06	9.78631E-06	4.71518E-05
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA EXTERIOR			0.000897424	0.000897424	0.003031641
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA DE TRABAJO			1.740121071	1.740121071	8.384151658
RESISTENCIA TERMICA TOTAL			2.279188467	2.279188467	10.98016303
CALOR PERDIDO			-5.352782439	-5.352782439	-1.111094614

AREA			A3 (m2)
			7.0882
MATERIALES	K (W/m ² K)	ΔX (m)	R3 (°K/W)
MADERA	0.13	0.02	0.021704545
DURAPAX	0.04	0.01905	0.067189131
PAPEL ALUMINIO	237	0.000013	7.73854E-09
AIRE	0.0234	0.25075	1.51178183
LAMINA	79.5	0.004	7.09834E-06
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA EXTERIOR			0.000641856
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA DE TRABAJO			1.262168373
RESISTENCIA TERMICA TOTAL			2.863492841
CALOR PERDIDO			-4.260530994

AREA			A4 (m2)
			9.268035
MATERIALES	K (W/m ² K)	ΔX (m)	R4 (°K/W)
MADERA	0.13	0.02	0.016599652
DURAPAX	0.04	0.01905	0.051386297
PAPEL ALUMINIO	237	0	0
AIRE	0.0234	0	0
LAMINA	79.5	0.004	5.42882E-06
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA EXTERIOR			0.000515639
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA DE TRABAJO			0.965307302
RESISTENCIA TERMICA TOTAL			1.033814319
CALOR PERDIDO			-11.80095863

AREA			COLECTOR (m2)
			13.209672
MATERIALES	K (W/m ² K)	ΔX (m)	R6 (°K/W)
MADERA	0.13	0.02	0.011646478
DURAPAX	0.04	0.01905	0.036053128
PAPEL ALUMINIO	237	0	4.15244E-09
AIRE	0.0234	0.1	0.323513277
LAMINA	79.5	0.004	3.80891E-06
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA EXTERIOR			0.000349284
RESISTENCIA POR CONVECCION TERMICA DE TRABAJO			0.677269039
RESISTENCIA TERMICA TOTAL			1.04883502
CALOR PERDIDO			-11.63195333

6.9 Cálculo del sistema.

HORAS SOL	5.2	HORAS
AREA DEL CAPTADOR	13.209672	m2
CALOR TOTAL PERDIDO	-39.51010244	W
	-0.205452533	KWh
MASA A DESHIDRATAR	2268	Kg
ENERGIA REQUERIDA	204914.5939	Wh
	204.9145939	KWh
ENERGIA SOLAR DISPONIBLE	3.297560976	KW/m2/dia
ENERGIA SOLAR EN CAPTADOR	43.55969889	KWh
ENERGIA DISPONIBLE EN HORNO	43.35424636	KWh
TIEMPO NECESARIO DEL PROCESO	4.726517266	Días

7. Diseño metodológico de la investigación.

La metodología estará orientada a una investigación metodológica, utilizando aspectos teóricos bibliográficos, proyecciones y datos de mediciones de campo.

El enfoque de la investigación se centra en la construcción de un horno deshidratador solar prototipo, para poder caracterizar y escalar a un deshidratador solar de producto agrícola maíz, que permita que el producto deshidratado pueda ser almacenado en condiciones adecuadas de humedad con sus propiedades y no tenga contaminación en el proceso de secado, de tal manera que posteriormente el producto se pueda comercializar.

7.1 Investigación metodológica.

El diseño basado en la Indagación sobre los aspectos teóricos y aplicación de medición, recolección y análisis de datos de fuentes como el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Con esta metodología y el estudio de campo con un prototipo se podrán combinar las variables, de tal manera que se pueda desarrollar el estudio y evaluación para caracterización de diseño del horno como un sistema de generación de calor a partir de energía solar, que permitirá la implementación de deshidratación de productos agrícolas de tal manera que estos puedan ser almacenados.

Para la recolección de datos, es necesaria la utilización de los siguientes equipos:

Obtención de Irradiancia solar se requiere de un Piranómetro de irradiancia directa, Piranómetro de irradiancia difusa y Piranómetro de irradiancia global.

- a) Medición de Humedad y temperatura.
- b) Anemómetro o Medidor de velocidad del viento
- c) Medidor y termocuplas para medición de temperaturas.
- d) Termómetro ambiental.
- e) Balanza, para la medición de peso.

8.0 Proceso experimental.

Para los ensayos se utiliza maíz blanco H53, cultivado en la zona de El Jabalí, municipio de San Juan Opico departamento de la libertad, además se realizó un ensayo con frijol fresco, en la Universidad de El Salvador en el área de Ingeniería de Mecánica.

Los datos experimentales que se necesitan para el análisis son la temperatura ambiente, temperatura de bulbo húmedo, temperatura en cámara de secado, humedad relativa, velocidad del viento, irradiancia solar directa, difusa y global.

Los datos experimentales se obtendrán a partir de poner en funcionamiento el horno solar prototipo, en el cual el proceso consiste en colocar aproximadamente un quintal de maíz dentro de la cámara de secado del prototipo, repartido en tres bandejas, con una orientación del área colectora hacia el sur, las datos se toma cada quince minutos durante el día, aproximadamente desde las 7 horas hasta las 17 horas del día. Se utilizará una báscula para determinar el peso del producto colocado en las bandejas, se instalan termocuplas en la parte superior de cada bandeja para la obtención de temperatura, se instalan tres piranómetros para medir irradiancia global, directa y difusa, con un anemómetro obtendremos la velocidad del viento en la zona donde se está realizando el ensayo experimental, con un medidor de humedad se obtendrá la humedad relativa y temperatura en el ambiente y ha la salida de la cámara de deshidratación, con un termómetro ambiental se obtendrá la temperatura de bulbo húmedo colocándole al bulbo del termómetro un algodón húmedo. En cada en sayo al inicio de cada día del proceso experimental se pesa el producto a deshidratar y también se pesa el producto al finalizar el ensayo de cada día, esto para determinar la cantidad de humedad retirada al producto.

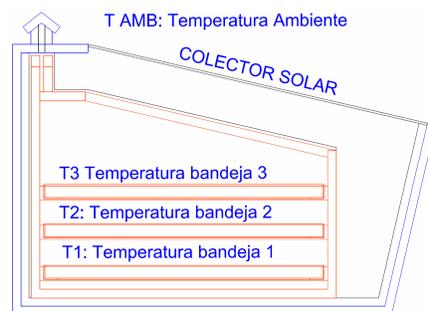


Figura 8.0: Ubicación de la toma de temperatura T1, T2, T3 y T AMB, en los ensayos del horno deshidratador prototipo (estructura de madera) [Diseño: Edgardo E. M.].

8.1 Dimensiones de Horno Prototipo.

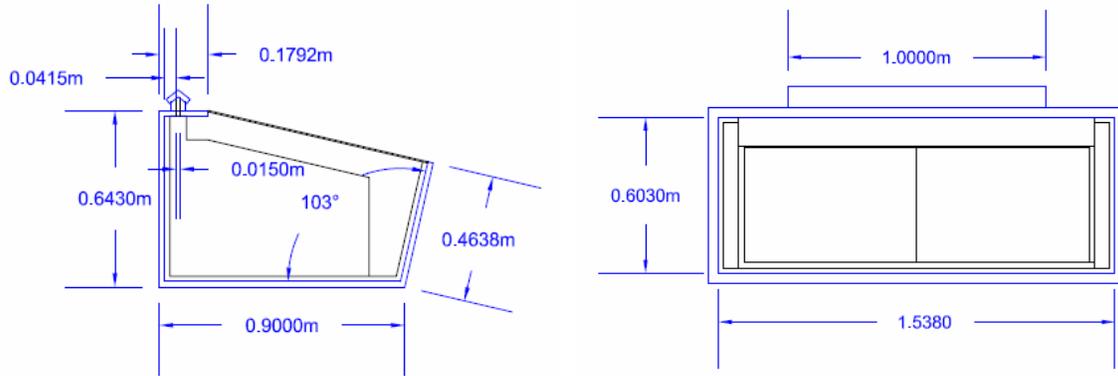


Figura 8.1: Dimensiones del cuerpo del horno deshidratador prototipo (estructura de madera) [Diseño: Edgardo E. M.].

8.2 Dimensiones de Cámara de secado del Prototipo.

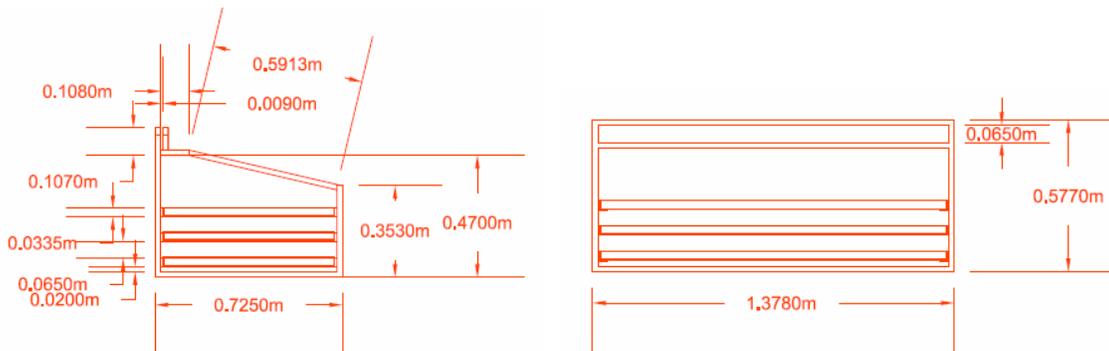


Figura 8.2: Dimensiones de cámara de secado del horno deshidratador prototipo (estructura metálica) [Diseño: Edgardo E. M.].

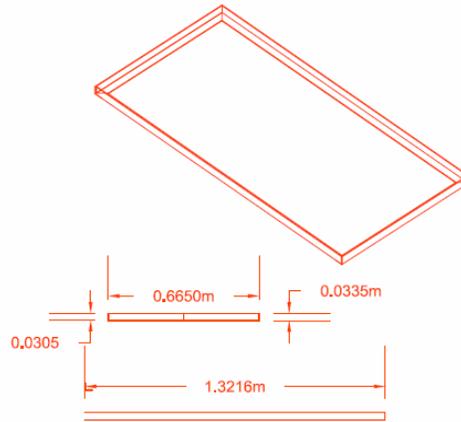


Figura 8.3: Dimensiones de las bandejas de la cámara de secado del horno deshidratador prototipo [Diseño: Edgardo E. M.].

8.3 Materiales de construcción de Prototipo.

MATERIALES DE CONSTRUCCION DE PROTOTIPO	CANTIDAD
TUBO EST. CUADRADO DE 3/4" CH16x6MTS	4
ANGULO DE 1 1/4 x 1/8 x 6 MTS	3
LAMINA HO. 1/32 COMERCIAL (0.50 mm x 2 x 1)	4
1/4 DE ANTICORROSIVO 4000 COLONIAL MATE	1
LAMINA PLANA MOSQUI RED 3x7 CAL 27	3
PEGAMENTO RESISTOL 850 1/4 GLN	1
AEROSOL NEGRO MATE	7
MUEBLE DE MADERA DE PINO	1
VIDRIO DE 5mm	1
PLIEGOS DE DURAPAX 3/4" 4x8	2
PAPEL ALUMINIO	1

Tabla 8.0: Listado de Materiales [Diseño: Edgardo E. M.].



Figura 8.4: Protótipo Construído [Foto: Edgardo E. M.].

8.4 Resultados de Proceso experimental.

En un captador solar, los parámetros de mayor importancia son, sin duda, la temperatura de salida del fluido y la eficiencia, ambos estrechamente relacionados. Éstos dependen de diversas variables, siendo algunas de las principales la radiación solar global incidente sobre el colector y el flujo másico de aire a través del mismo.

Es necesario conocer la radiación solar incidente en el plano inclinado del colector. En los siguientes gráficos se muestran las correspondencias entre la radiación directa sobre el plano horizontal, la radiación difusa y la radiación global para los días 27, 28, 29, 31 de octubre y el día 01 de noviembre, los primeros tres días con poca nubosidad, mientras que los días 31 de octubre y 01 de noviembre fueron días con mucha nubosidad. El captador solar del horno deshidratador tiene una área de 1.0656 m^2 , con una inclinación de 13 grados y colocada con una orientación sur. Se puede apreciar cómo al aumentar el nivel de radiación se incrementa la temperatura en la cámara de deshidratado en cada una de las bandejas con la diferencia entre los valores de temperatura en las diferentes bandejas.

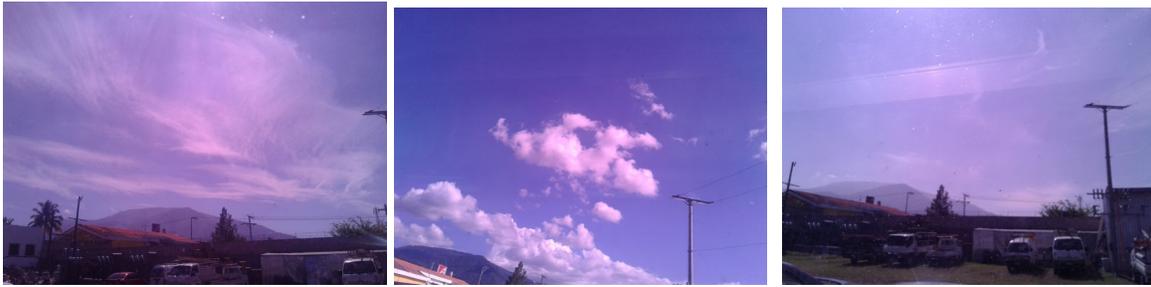


Figura 8.5: Condiciones de los días de ensayo, 27, 28 y 29 de octubre [Foto: Edgardo E. M.].



Figura 8.6: Condiciones de los días de ensayo, 31 de octubre y 01 de noviembre [Foto: Edgardo E. M.].

8.4.1 Calculo de la Irradiancia solar Directa a partir de los datos experimentales (IB).

La irradiancia solar directa se determina con la siguiente expresión.

$$IG = IB \cdot \cos(\theta_z) + ID$$

$$IB = \frac{IG - ID}{\cos(\theta_z)}$$

Primeramente debemos de conocer el ángulo de incidencia, para superficie horizontal, con la siguiente expresión

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)$$

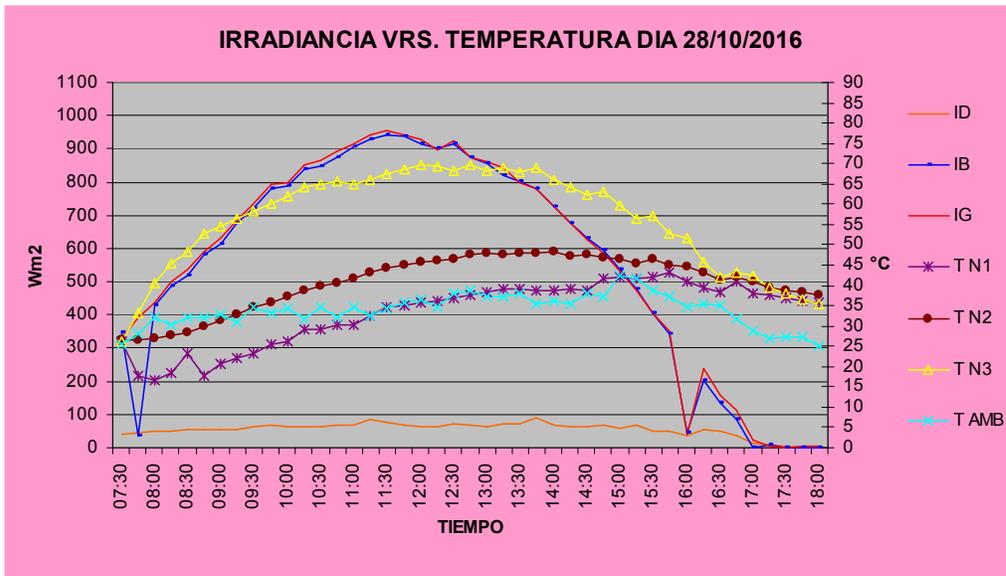


Figura 8.7: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.

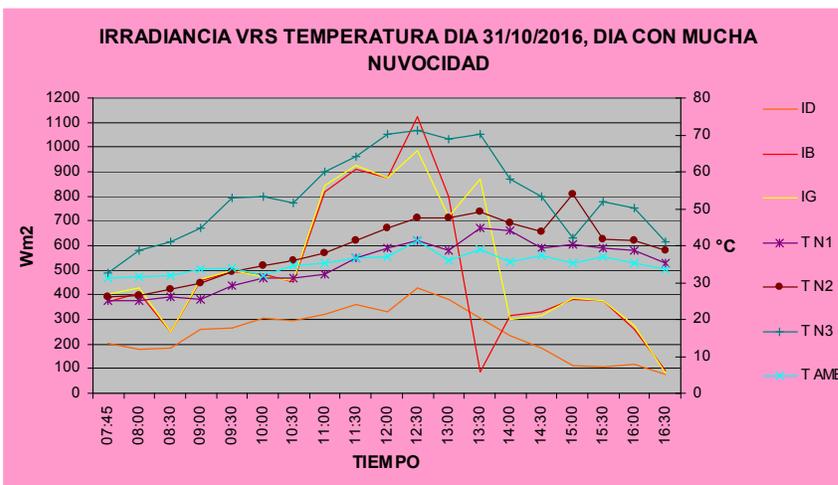


Figura 8.8: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

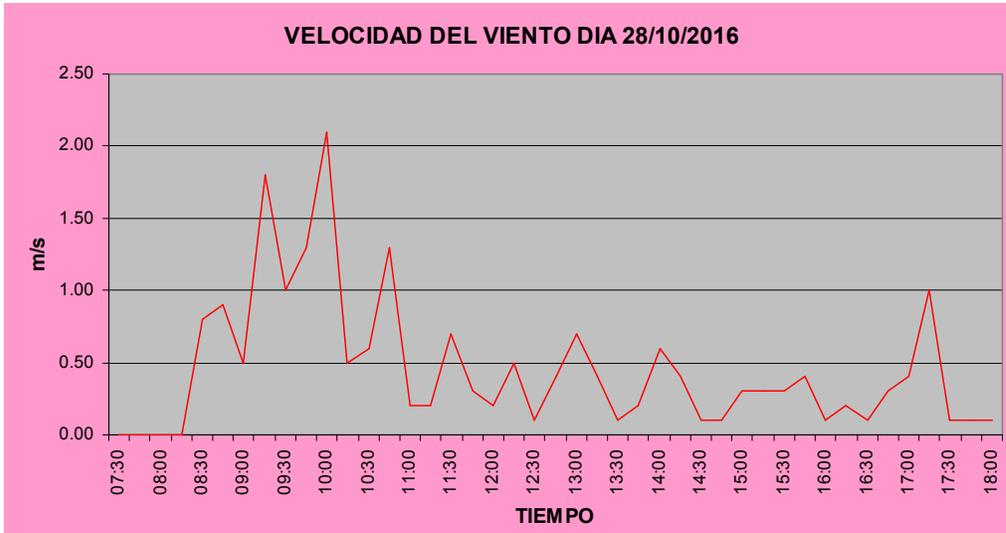


Figura 8.9: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.

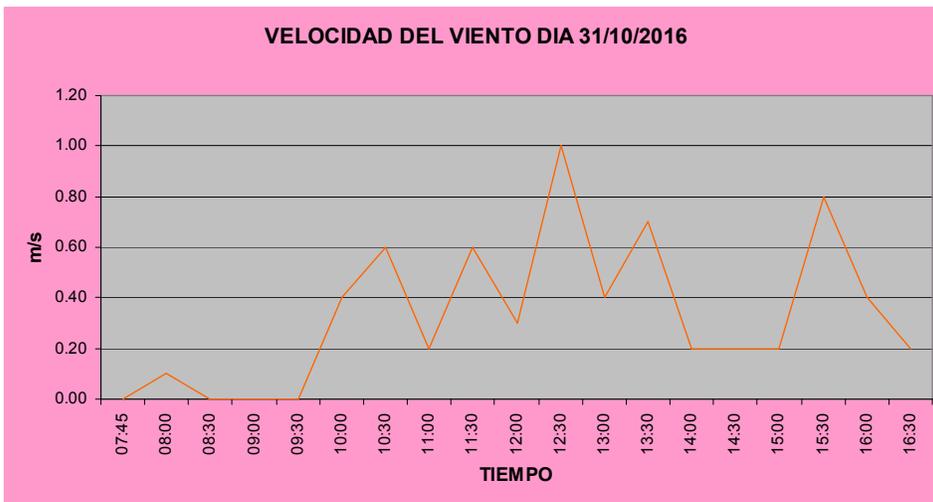


Figura 8.10: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

En el funcionamiento dependiendo de las condiciones climáticas existentes en el momento de ensayo se obtiene un incremento de temperatura diferente, en valores de irradiación global máxima de 957 a 961 W/m² la temperatura alcanza valores de 70 °C, y con una velocidad promedio de viento de 0.41 m/s, durante cinco días de ensayo. Como hemos podido observar, el incremento de temperatura está relacionada con la irradiación que incide en el captador del horno, de igual manera podemos relacionar la potencia de funcionamiento en

comparación con la temperatura debido a que la potencia esta directamente relacionada con las variaciones de irradiancia solar, ver las siguientes figuras.

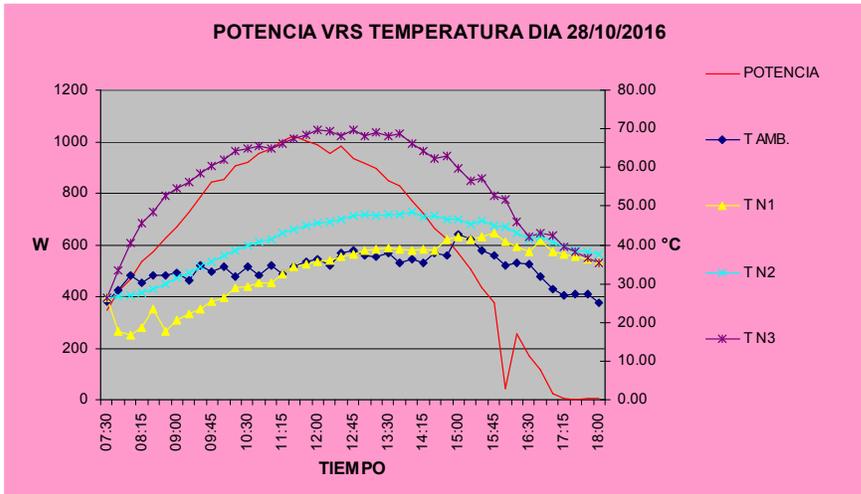


Figura 8.11: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.

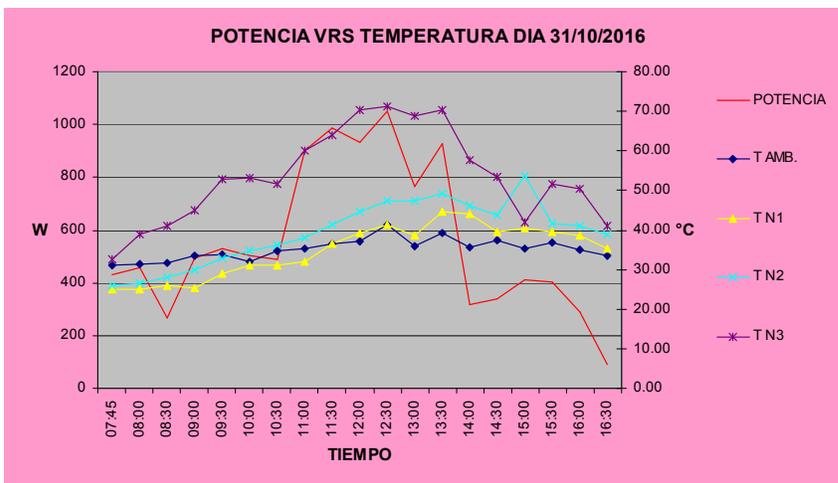


Figura 8.12: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

Los valores de humedad también varían con las variaciones de temperatura, como se puede apreciar en las siguientes graficas.

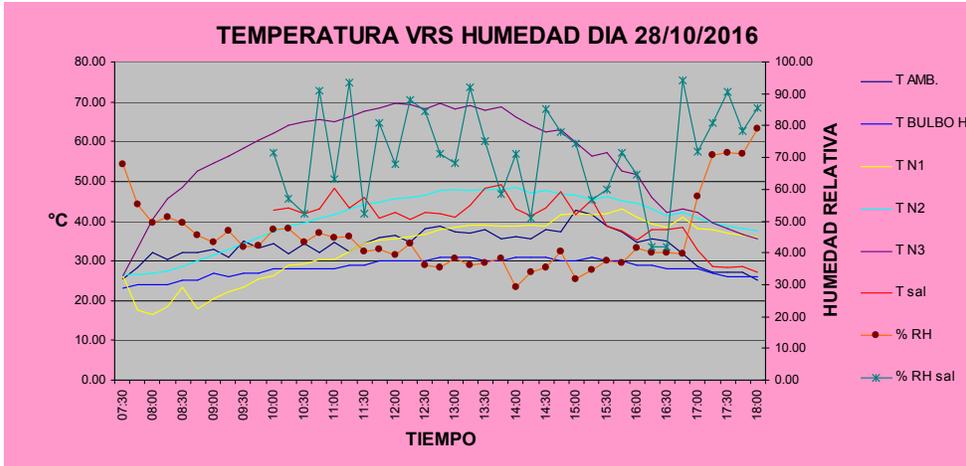


Figura 8.13: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 28 de octubre de 2016.

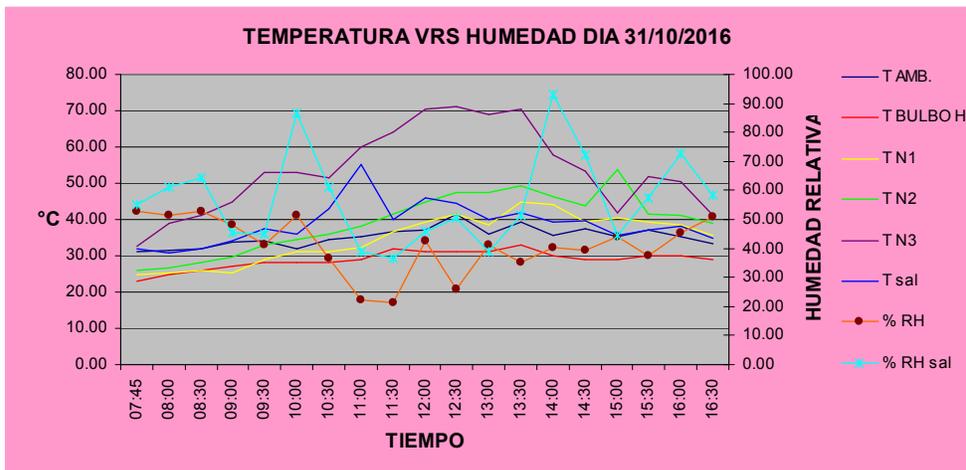


Figura 8.14: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

8.5 Relación de la Temperatura e Irradiancia.

Dentro de la cámara de secado la temperatura máxima se da cuando alcanza el valor de irradiancia máxima durante el día, este periodo del día se da entre la 11 horas hasta las 13 horas estándar, es decir dentro del periodo cuando se tiene el mediodía solar. En las figuras 8.15 y 8.16, la correlación lineal está arriba del 90%, el cual nos indica que el cambio de temperatura dentro de la cámara de secado es lineal con respecto a las variaciones de irradiancia.

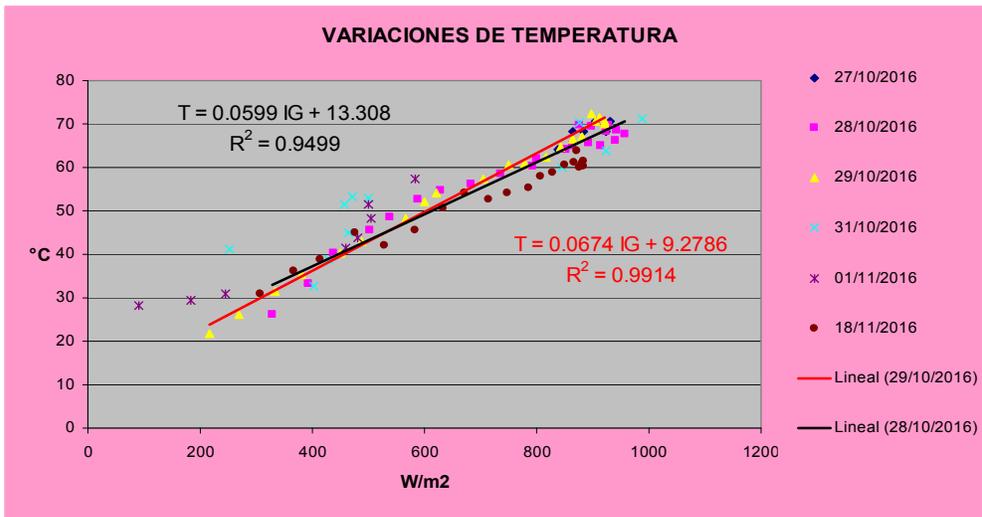


Figura 8.15: Correlación lineal desde la salida del sol hasta aproximadamente al mediodía solar.

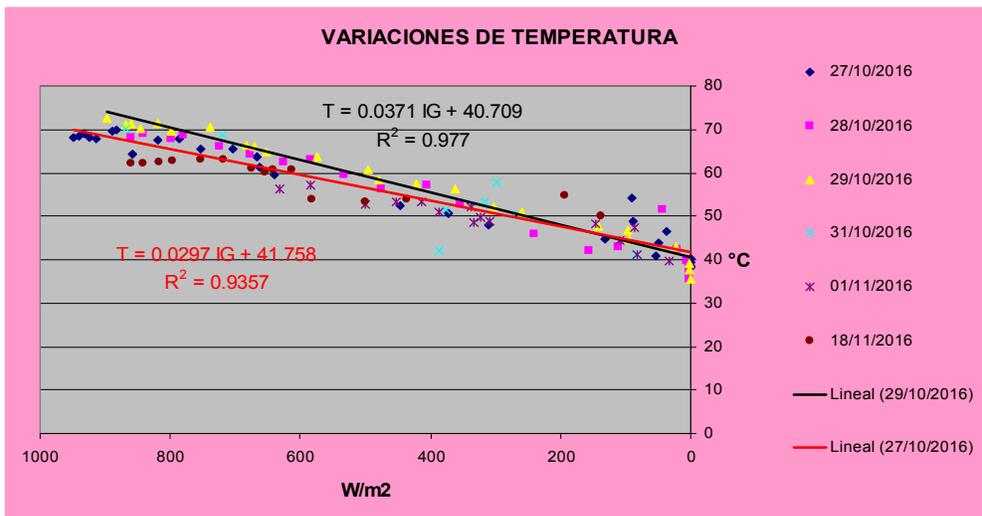


Figura 8.16: Correlación línea desde el mediodía solar hasta la puesta del sol.

8.6 Pérdidas de Humedad en el proceso de deshidratación.

El ensayo del horno prototipo se realizó por un periodo de tres días, iniciando el primer día con una masa de 120.075 Lb de maíz húmedo, después de tres días de ensayo, el producto de la tercera bandeja estaba completamente seca y el resto de bandejas todavía tenía

humedad finalizándose con un peso total de 102.25 Lb, al tercer día, teniendo una diferencia de humedad retirada de 17.825 Lb. En el cuarto día no se realizó el ensayo, si no que hasta el quinto día, el maíz que aún estaba seco absorbió más humedad en el cuarto día, continuando el ensayo solamente con el maíz húmedo iniciando con un total de 72.5 Lb finalizando el ensayo a los dos días después, con una masa de 68.4 Lb con una diferencia de humedad retirada de 4.1 Lb, tal y como se muestra en el siguiente cuadro.

DIA	BANDEJA 1			BANDEJA 2			BANDEJA 3			TOTAL
	PESO INICIAL (lb)	PESO FINAL (lb)	DIFERENCIA (lb)	PESO INICIAL (lb)	PESO FINAL (lb)	DIFERENCIA (lb)	PESO INICIAL (lb)	PESO FINAL (lb)	DIFERENCIA (lb)	
27/10/2016	42.575	42.4625	0.1125	39	36.875	2.125	38.5	34.125	4.375	6.61
28/10/2016	42.4625	42.4	0.0625	36.875	35.28	1.595	34.125	31.5	2.625	4.28
29/10/2016	42.4	39.375	3.025	35.28	33.375	1.905	31.5	29.5	2	6.93
31/10/2016	0	0	0	39.25	39.2	0.05	33.25	31.5	1.75	1.80
01/11/2016	0	0	0	31.5	31	0.5	39.2	37.4	1.8	2.30

Tabla 8.1: Peso de la masa al inicio y al final del ensayo, por días. Ensayo con maíz.

DIA	BANDEJA 1			BANDEJA 2			BANDEJA 3		
	PESO INICIAL (lb)	PESO FINAL (lb)	DIFERENCIA (lb)	PESO INICIAL (lb)	PESO FINAL (lb)	DIFERENCIA (lb)	PESO INICIAL (lb)	PESO FINAL (lb)	DIFERENCIA (lb)
18/11/2016	0	0	0	0	0	0	26.25	20.5	5.75

Tabla 8.2: Peso de la masa al inicio y al final del ensayo, por días. Ensayo con frijol.

Calculo de Humedad en el producto.

Humedad en Base Húmeda (M_{wb}): El contenido de humedad en base húmeda, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material sin secar

$$M_{wb} = \frac{W_o - W_d}{W_o} \cdot 100\%$$

Humedad en Base Seca (M_{db}): Es el contenido de humedad en base seca, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material seco.

$$M_{wb} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \cdot 100\%$$

Donde:

W_o : es el peso inicial de material sin secar

W_d : es el peso de la materia seca en el producto

DIA	Lb	gm	Humedad en base húmeda	Humedad en base seca
27/10/2016	6.6125	2999.3771	5.45%	5.76%
28/10/2016	4.2825	1942.50774	4.33%	4.52%
29/10/2016	6.93	3143.39256	5.40%	5.71%
31/10/2016	1.8	816.4656	0.13%	0.13%
01/11/2016	2.3	1043.2616	1.59%	1.61%

Tabla 8.3: Perdidas de humedad por días, deshidratación de maíz.

Durante los cinco días de ensayo, en el maíz se retiró un porcentaje de humedad de 18.47% en base a masa húmeda y un 22.65% en base a masa seca.

Cuadro resumen de perdidas de humedad por días, deshidratación de frijol.

DIA	Lb	gm	Humedad en base húmeda	Humedad en base seca
18/11/2016	5.75	2608.154	21.90%	28.05%

Tabla 8.4: Perdidas de humedad por días, deshidratación de frijol.

Con el ensayo realizado el día 18 de noviembre, en el frijol se retiró un porcentaje de humedad de 21.90% en base a masa húmeda y un 28.05% en base a masa seca.

9.0 Caracterización de Horno deshidratador solar.

El proceso de deshidratado del producto maíz y frijol, es para almacenarlo en condiciones de cada una de las propiedades del maíz o el frijol, y que el grano no tenga contaminación para su posterior comercialización, por lo que en el ensayo, el prototipo arrojó como resultado los siguientes valores promedios.

CARACTERIZACION DE HORNO PROTOTIPO VARIABLES	DESHIDRACION DE MAIZ					D. FRIJOL
	DIA 27/10/2016	DIA 28/10/2016	DIA 29/10/2016	DIA 31/10/2016	DIA 01/11/2016	DIA 18/11/2016
TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	33.03	33.86	34.03	35.11	32.80	30.97
TEMPERATURA BANDEJA 1 (°C)	35.68	33.28	34.02	34.88	32.67	38.48
TEMPERATURA BANDEJA 2 (°C)	41.57	40.61	40.24	39.36	36.13	43.17
TEMPERATURA BANDEJA 3 (°C)	58.59	55.99	56.35	53.45	46.74	55.28
TEMPERATURA DE SALIDA (°C)	-	40.32	42.70	38.77	35.22	75.90
IRRADIANCIA GLOBAL (W/m2.dia)	566.13	573.56	560.19	522.75	337.93	662.77
IRRADIANCIA DIRECTA (W/m2.dia)	541.92	558.06	533.93	487.56	348.83	641.29
IRRADIANCIA DIFUSA (W/m2.dia)	45.18	54.57	70.85	244.03	213.08	67.77
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%HR)	39.55	45.23	39.15	41.07	48.89	48.22
HUMEDAD RELATIVA SALIDA DE HORNO (%HR)	-	71.64	52.60	56.76	65.61	75.90
HUMEDAD AMBIENTAL ABSOLUTA (gH2O/Kg aire)	12.16	14.42	12.56	14.08	14.81	13.52
POTENCIA (W.dia)	603.27	611.19	596.94	557.05	360.09	706.25
ENERGIA UTILIZADA (KWh.dia)	5.13	6.57	6.72	5.07	3.58	6.18
HUMEDAD EN BASE HUMEDA	5.45%	4.33%	5.40%	0.13%	1.59%	21.90%
HUMEDAD EN BASE SECA	5.76%	4.52%	5.71%	0.13%	1.61%	28.05%
VELOCIDAD DE VIENTO PROMEDIO (m/s)	0.80	0.46	0.38	0.33	0.10	0.49

Tabla 9.0: Caracterización del horno deshidratador solar.

A partir de los valores obtenidos de los ensayos, resultados mostrados en el cuadro anterior, se puede establecer que, durante un periodo experimental de cinco días, donde se obtiene un retiro de humedad 17.63% en base seca de al maíz durante cinco días y un 28.05% en base seca de frijol durante un día de ensayo, por lo que el prototipo se puede escalar a un deshidratador con la misma geometría y naturaleza, y un área de captación solar de 13.21 m², la cantidad de 50 quintales de maíz, para un periodo de deshidratación de cinco días de exposición solar, para obtener valores de humedades adecuado para el almacenamiento del producto agrícola.

2. Las temperaturas alcanzadas por el horno solar son suficientes para el proceso de deshidratar para casi cualquier tipo de producto agrícola, ya que en la cámara de secado se alcanzan valores máximos de temperaturas de 70 °C en los momentos de mayor insolación según las pruebas de los ensayos. El comportamiento de las temperaturas alcanzadas por el horno dentro de la cámara de secado durante las horas de ensayos fueron ascendentes a medida que la radiación iba en incremento.

3. Una vez alcanzada la temperatura máxima en la cámara de secado en función de la máxima radiación obtenida durante el día, se puede concluir que la temperatura dentro de la cámara de secado desciende lentamente aunque la radiación descienda mas rápido, esto debido a que la perdidas de calor son pequeñas de acuerdo a la hermeticidad a la que está la cámara de secado.

4. También se puede concluir que de acuerdo al diseño, la construcción del horno se puede escalar tomando en cuenta factores sociales que ayuden a determinar el mejor dimensionamiento de acuerdo a la necesidad de producción que tenga cada agricultor sin dejar de lado el área que va a utilizar el equipo ya construido.

5. El horno solar es efectivo para la deshidratación de productos agrícolas cuando se cuenta con un clima sin nubes y valores de radiación solar elevados, entre 700 y 900 W/m², aunque el equipo también es funcional en días donde haya mucha nubosidad, esto fue comprobado con los ensayos realizados con el prototipo.

6. También se concluye que se tienen mejores condiciones el uso del horno deshidratador solar en comparación al método de deshidratación tradicional

Actividades	Método tradicional	Horno deshidratador
exposición a la radiación UV	✓	
Secado en tandas	✓	✓
Mayor tiempo en el proceso de secado	✓	
Exposición directa del producto al Sol.	✓	
Producto expuesto al medio,	✓	
Las condiciones higiénicas son necesariamente malas, acumulando heces y polvo.	✓	
Arriesga a pérdidas graves si llueve.	✓	
Pérdida de en la producción a causa de la ingestión por roedores, aves e insectos;	✓	
Pérdida de producción por deterioro del producto durante el proceso de secado, a las orillas de carreteras	✓	
Exposición a sufrir un accidente por un automóvil cuando el proceso se realiza en la calzada de una carretera	✓	

Tabla 10: Comparación del diseño de horno deshidratador solar y el método tradicional de sacado al sol.

11. Recomendaciones.

1. Se recomienda que el horno solar se puede utilizar en cualquier día y estación del año, el factor más importante en el uso es brillo solar, ya que principalmente la temperatura en la cámara de secado depende de la radiación solar, Incluso, un día frío de invierno pero seco y con cielo claro, permitirá el funcionamiento del horno, aunque en el verano hay más horas útiles disponibles para deshidratar que en los días de invierno.

2. También es recomendable que en la construcción del horno solar, para reducir las pérdidas de calor lo menos posible, buscar materiales aislantes que le permita mayor hermeticidad a la cámara de secado, de tal manera que durante la noche, el producto a deshidratar no gane humedad, si no que, continúe el proceso de deshidratación y en el peor de los casos que se logre mantener la humedad con la que finalizó el día del proceso de secado.

3. Es recomendable hacer ensayos con el horno solar prototipo, para ver como desciende la temperatura en la cámara de secado cuando la radiación solar al final del día alcanza valores de cero (durante la noche)

12. Referencias Bibliográficas

[Fuente:Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel]

Transferencia de Calor y masa.

Fundamentos y Aplicaciones.

4° Edición.

Yunus A. Cengel

Afshin J. Ghajar.

[Adaptado de Duffie y Beckman (1991)]

Solar Engineering Of Thermal Processes.

Segunda Edición.

John A. Duffie.

William A. Beckman.

[Gonzalo Abal]. Fundamentos de Energía Solar

RADIACION SOLAR

Gonzalo Abal

Instituto de Física, Facultad de Ingeniería

Universidad de la Republica

Versión 2.31

https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/54561/mod_resource/content/1/Curso-FES-Radiacion-solar-v2.3.pdf

[Propiedades de carta Psicrométrica]

http://repositorio.sena.edu.co/sitios/manejo_almacenamiento_granos_nivel_rural/pdf/capitulo3.pdf

[Fuente J. C. Rodriguez 2004].

www.cosechaypostcosecha.org/data/folletos/FolletoSecadoGranos.pdf

[El sol nuestra estrella]

<http://recursos.march.es/culturales/documentos/conferencias/pp2809.pdf?v=22891639>

[Fuente: J.C.Y y J.M. Lopez]. TESIS- Instituto Politécnico Nacional 2009.

<http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICACION.pdf>.

[Fuente: MARN] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

www.marn.gob.sv/

- Boletín Climatológico, Octubre 2015
- www.snet.gob.sv/ Perfil Climatológico de Aeropuerto de Ilopango (S-10), Departamento de San Salvador.
- Boletín Agrometeorológico Decádico, Del 01 al 10 de Diciembre de 2015.

[Foto: Edgardo E. M.] Fotografías tomadas por Ing. Edgardo E. Méndez.

[Diseño: Edgardo E. M.] Diseño realizado por Ing. Edgardo E. Méndez.

13. Anexos.

13.1 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 27 de octubre de 2016.

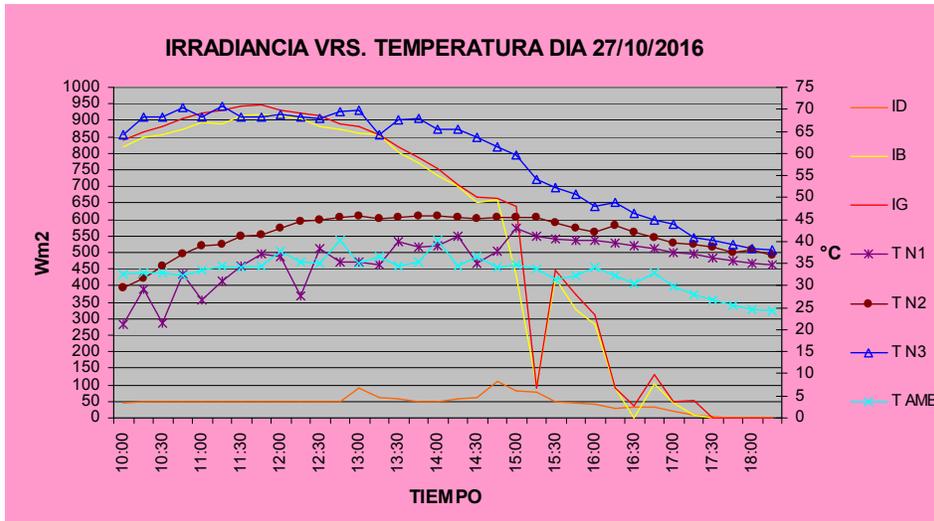


Figura 13.1.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.

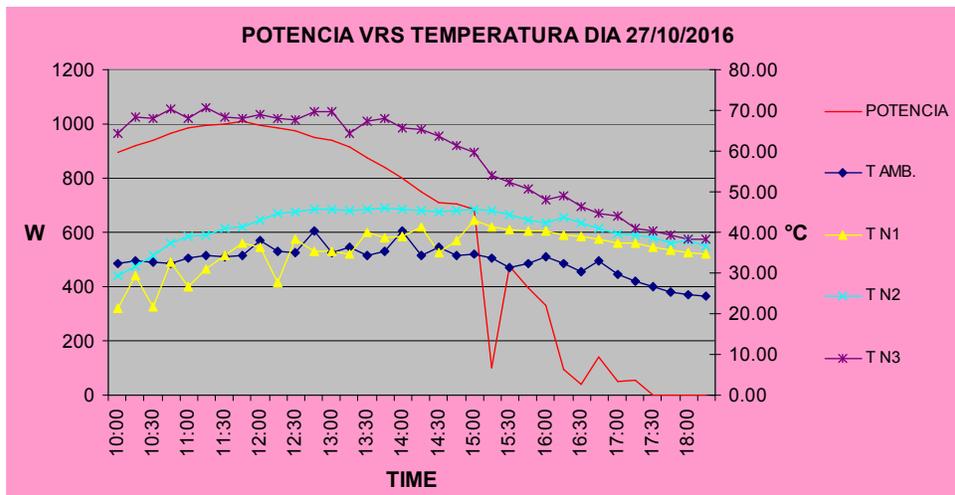


Figura 13.1.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.

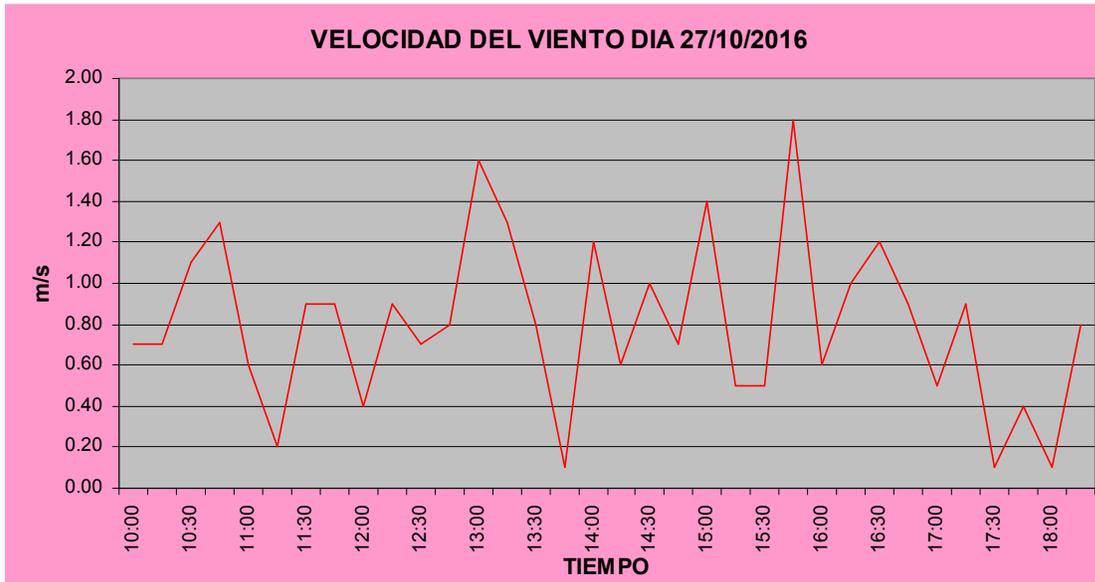


Figura 13.1.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.

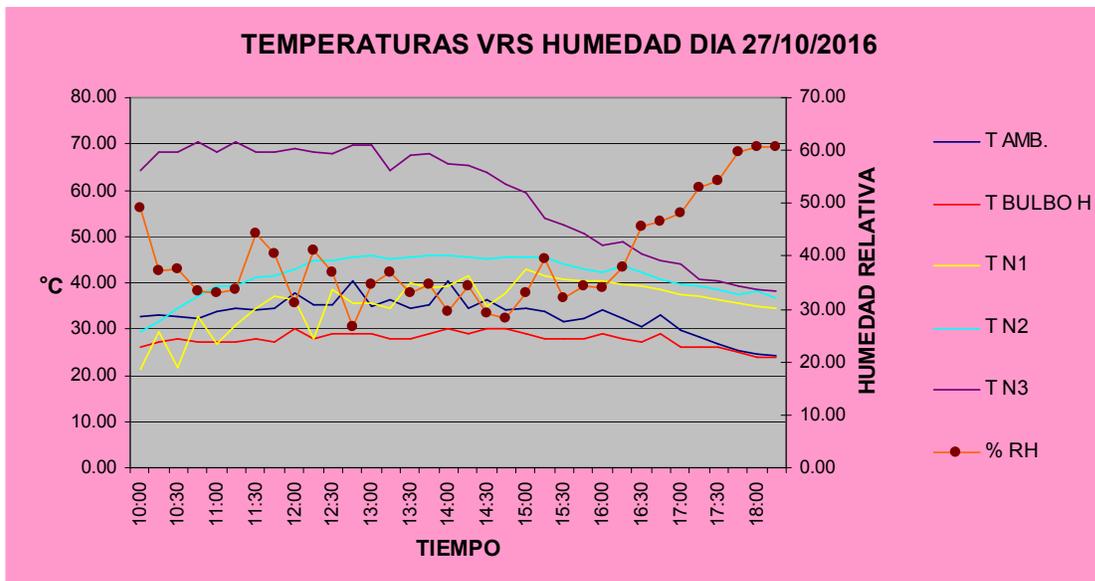


Figura 13.1.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 27 de octubre de 2016.



Figura 13.1.4: Preparación de maíz en el primer día de ensayo.



Figura 13.1.5: Montajes del los equipos para el ensayo del horno deshidratador.



Figura 13.1.6: Montajes del los equipos para el ensayo del horno deshidratador, tomas de lecturas de Irradiancia.

13.2 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 29 de octubre de 2016.

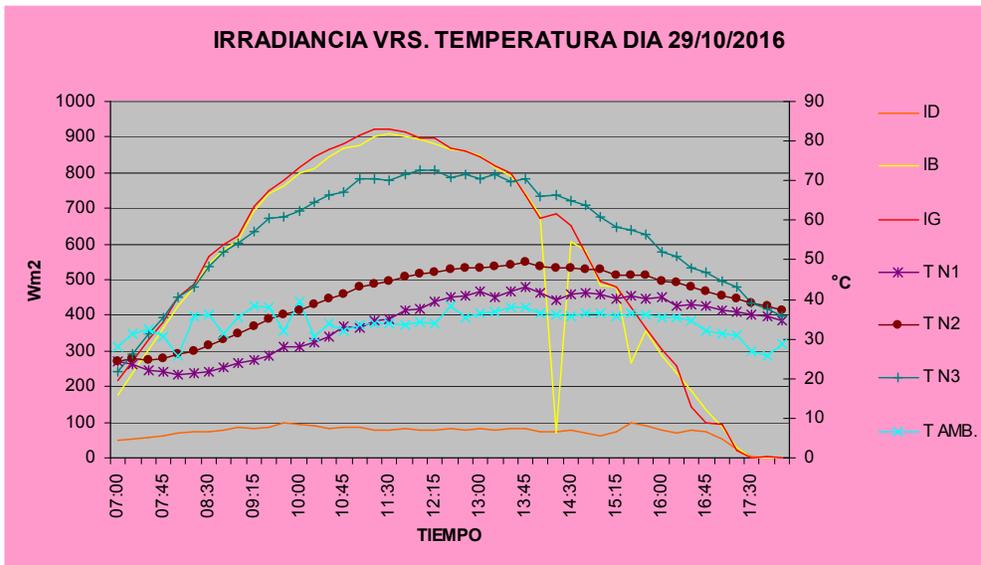


Figura 13.2.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.

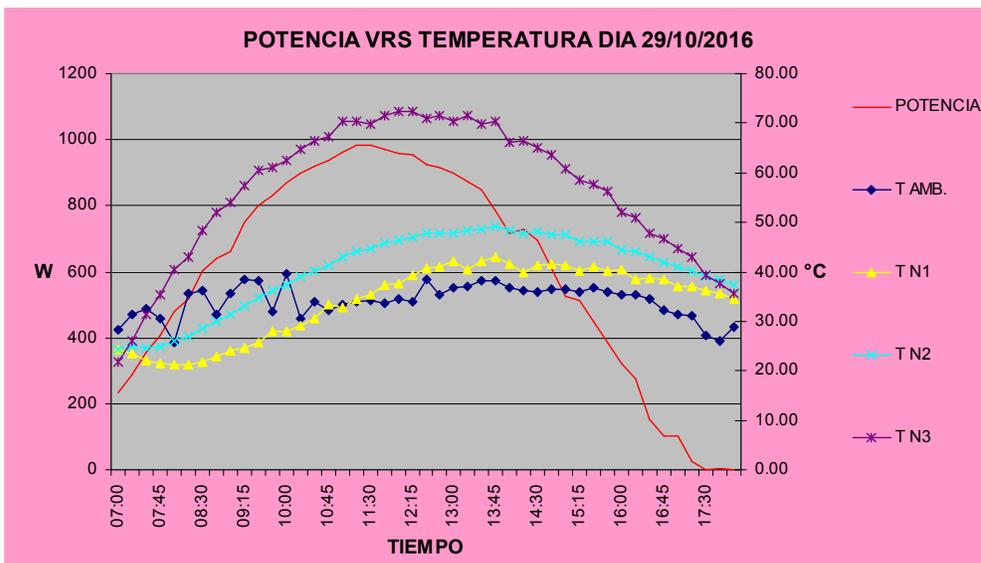


Figura 13.2.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.

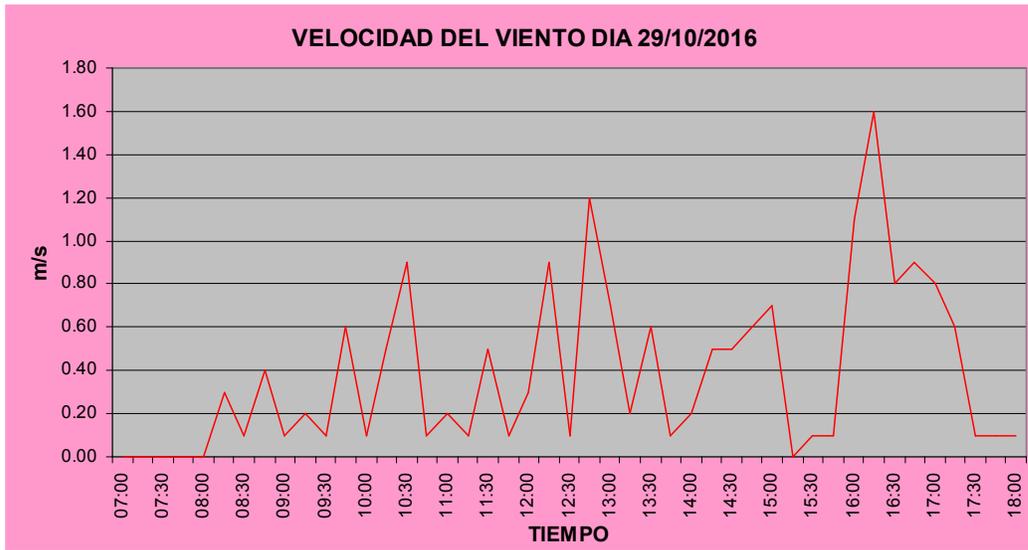


Figura 13.2.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.

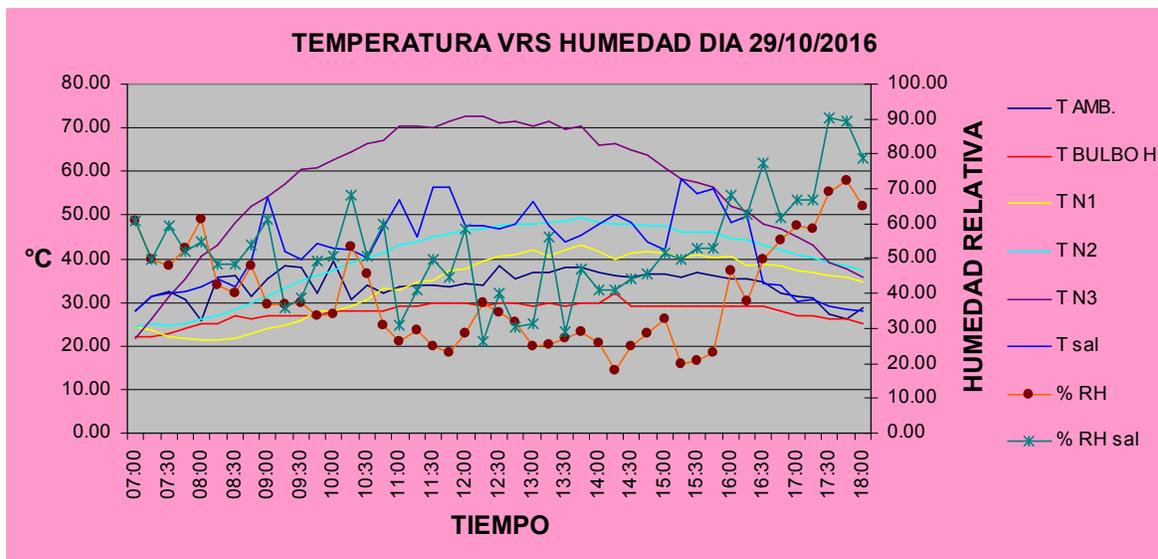


Figura 13.2.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 29 de octubre de 2016.



Figura 13.2.4: Preparación de maíz en el tercer día de ensayo y preparación de equipos de medición de irradiancia.



Figura 13.2.5: Tomas de temperatura en la cámara deshidratación del horno



Figura 13.2.5: Resultados obtenidos en el secado de maíz al final del tercer día de ensayo del horno.

13.3 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 31 de octubre de 2016.

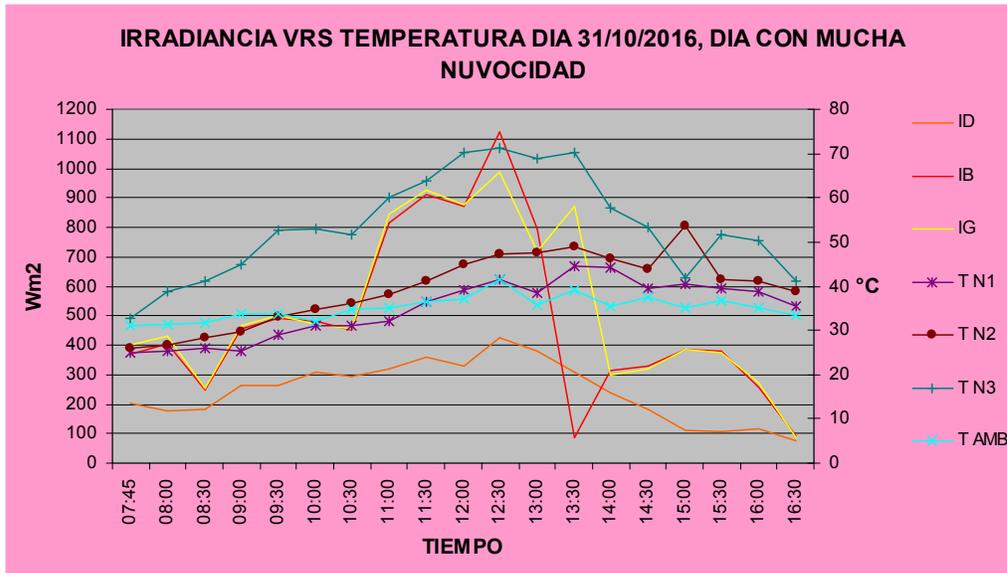


Figura 13.3.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

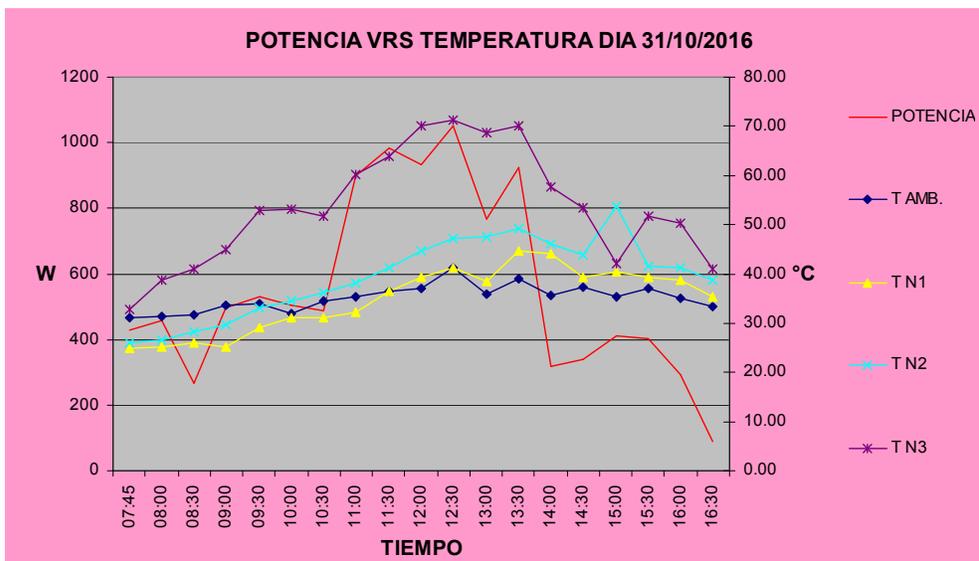


Figura 13.3.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

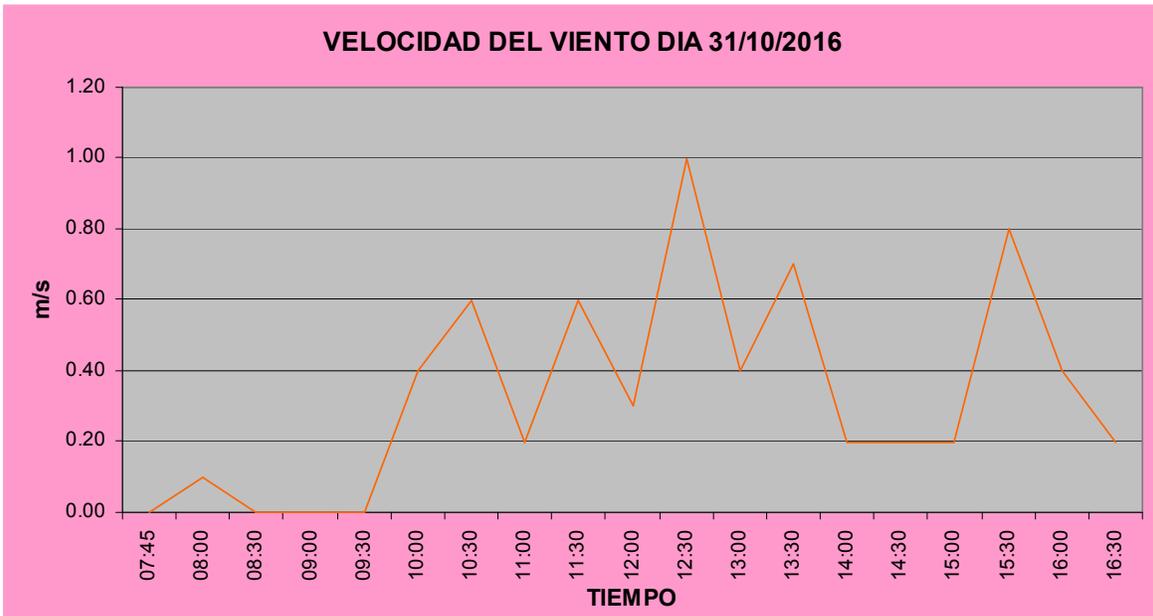


Figura 13.3.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

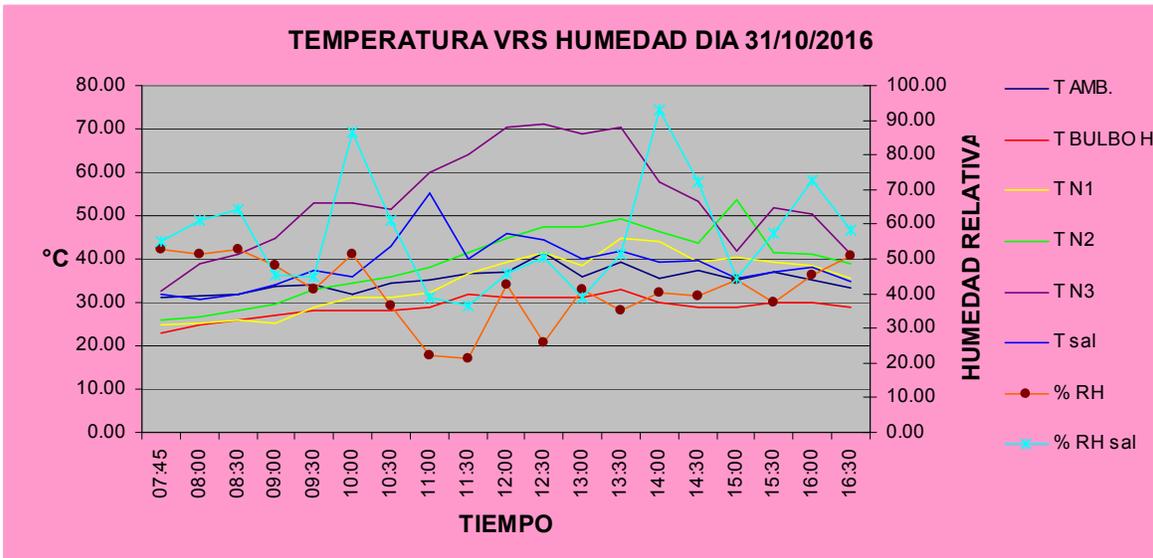


Figura 13.3.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 31 de octubre de 2016.

13.4 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 01 de noviembre de 2016.

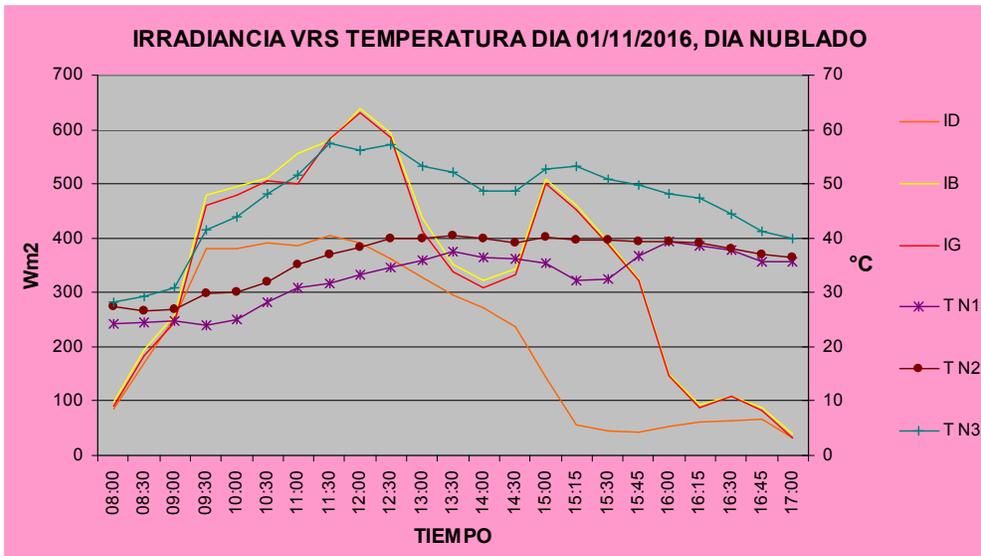


Figura 13.4.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.

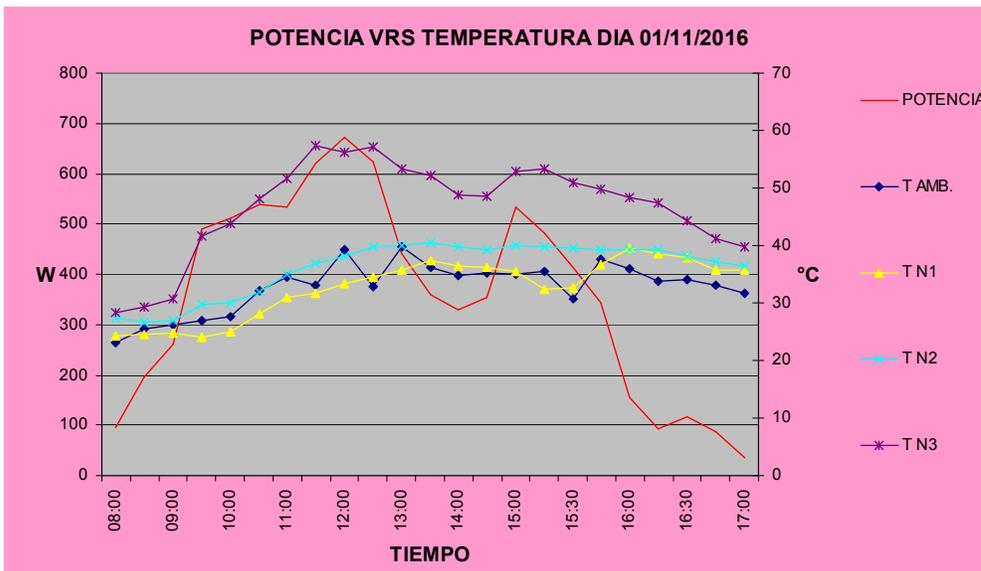


Figura 13.4.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.

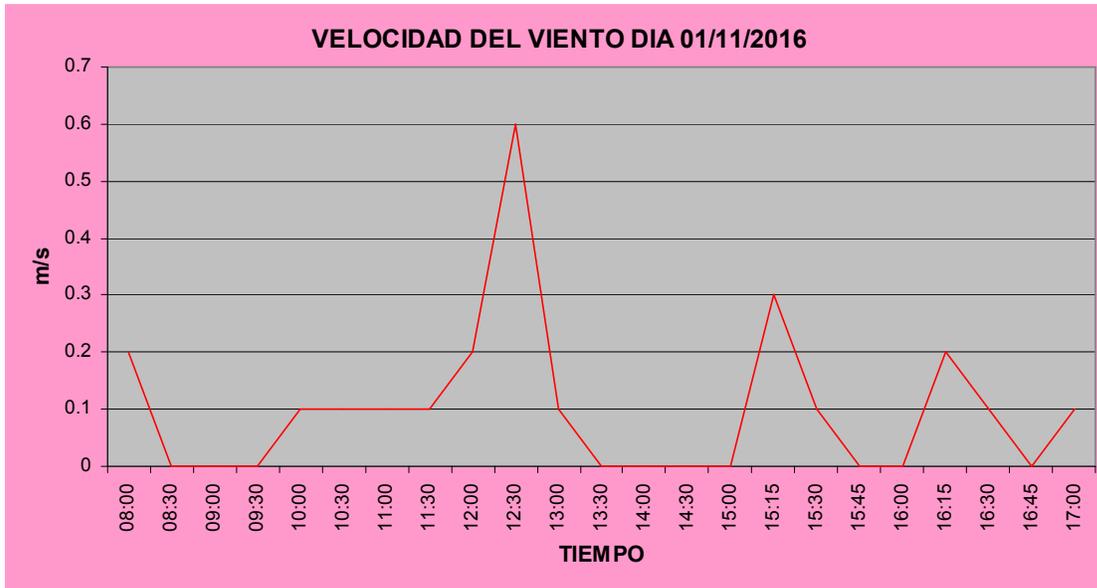


Figura 13.4.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.

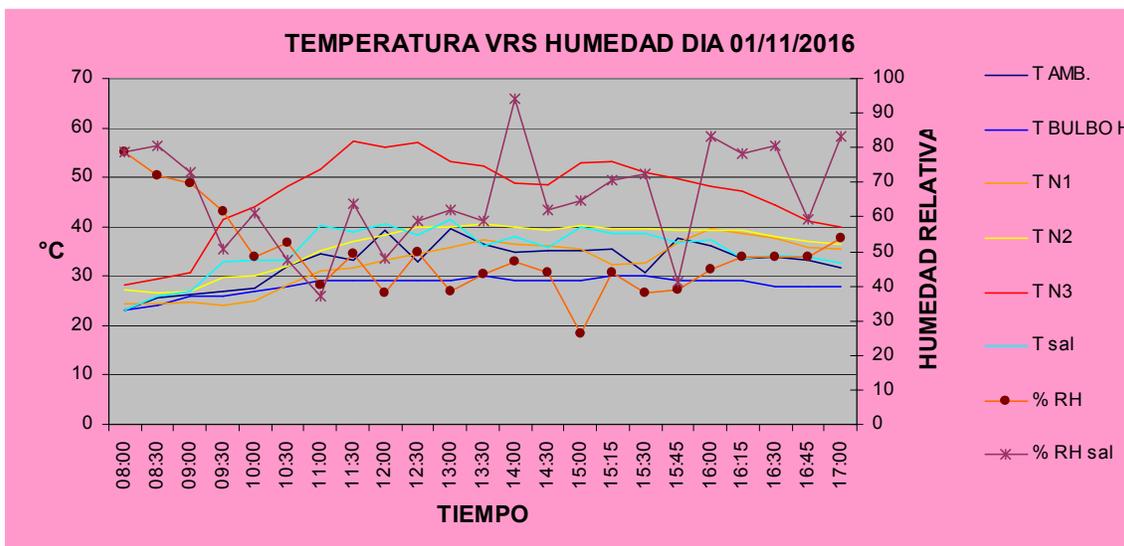


Figura 13.4.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Maíz el día 01 de noviembre de 2016.

13.5 Resultados obtenidos del ensayo realizado el día 18 de noviembre de 2016.

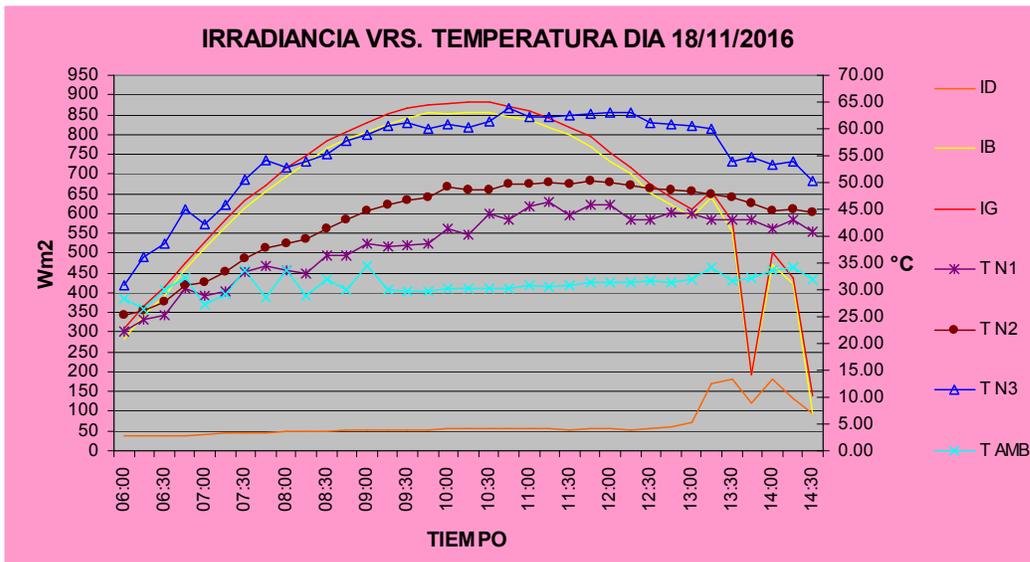


Figura 13.5.0: Representación de la variación de la Irradiancia solar en comparación de la Temperatura, ensayo realizado con Fríjol el día 18 de noviembre de 2016.

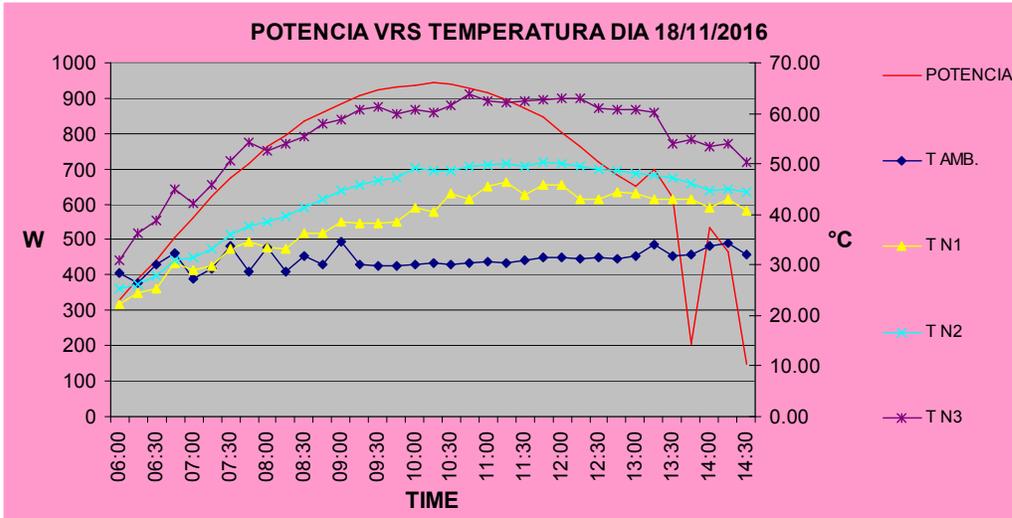


Figura 13.5.1: Representación de la variación de temperatura en comparación a la potencia del deshidratador, ensayo realizado con Fríjol el día 18 de noviembre de 2016.

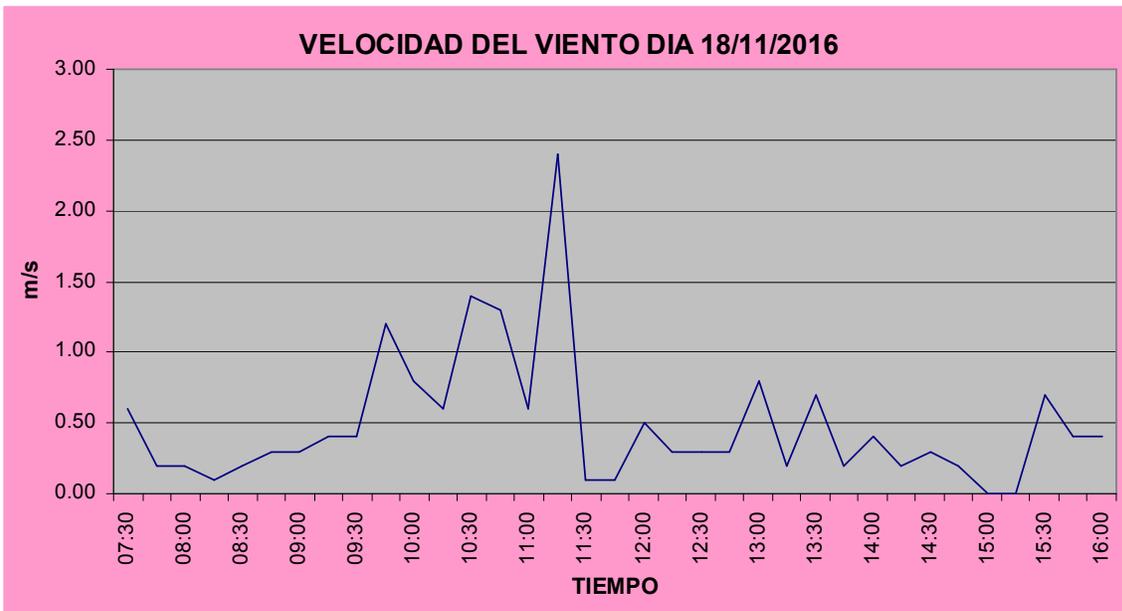


Figura 13.5.2: Representación de la variación del viento durante el ensayo realizado con Fríjol el día 18 de noviembre de 2016.

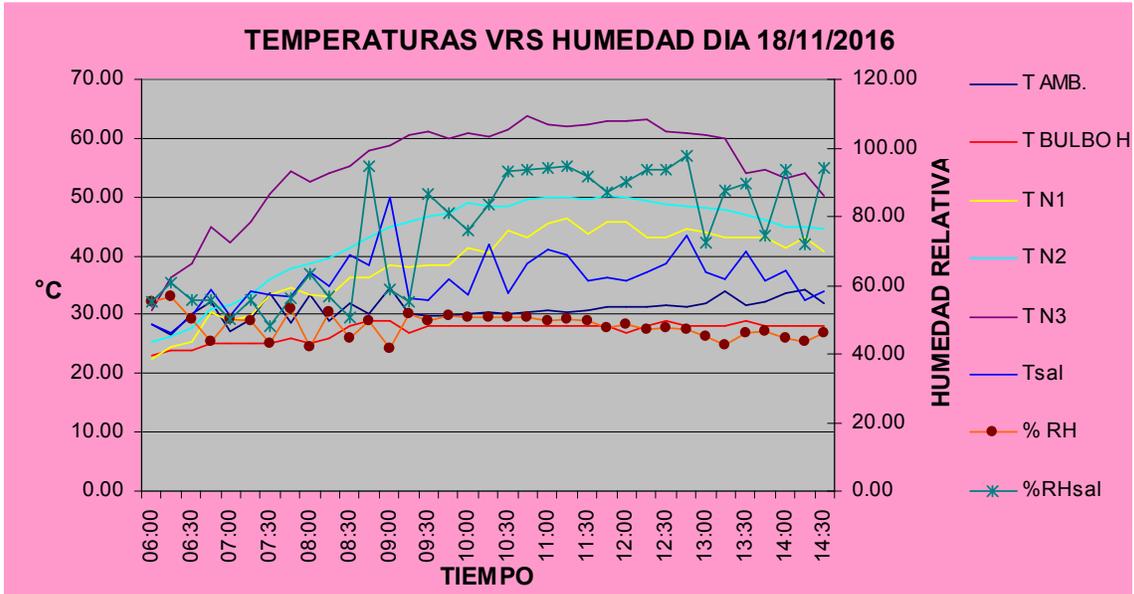


Figura 13.5.3: Representación de la variación de temperatura en comparación a las variaciones de humedad durante el ensayo realizado con Fríjol el día 18 de noviembre de 2016.



Figura 13.5.4: Preparación del fríjol en las bandejas de la cámara de secado del horno deshidratador el día 18 de noviembre de 2016.



Figura 13.5.5: Preparación horno deshidratador con orientación sur y equipamiento para medir temperaturas, Irradiancias, Humedad y Velocidad de viento, ensayo realizado en Universidad Nacional el día 18de noviembre de 2016.



Figura 13.5.6: Horno Solar para Deshidratación de productos agrícolas, ensayo realizado el día 18de noviembre de 2016.



Figura 13.5.7: Finalización del en sayo día 18de noviembre de 2016.



Figura 13.5.7: Tomas de lecturas de irradiancia solar, Humedad relativa ambiente, ensayo día 18de noviembre de 2016.



Figura 13.5.8: Presión atmosférica de 101.3 mb, y 688 msnm en el lugar de ensayo el día 18de noviembre de 2016.



Figura 13.5.9: Finalización del ensayo en Universidad Nacional de El Salvador, Escuela de Ingeniería de Mecánica, día 18 de noviembre de 2016.

13.6 Equipos utilizados para toma de datos en los ensayos de Horno Deshidratador.



Figura 13.6.0: Amperímetros para la tomo de lecturas de la Irradiancia solar en mV.



a) Amperímetro

b) Anemómetro.

Figura 14.6.1: (a) Amperímetros tipo Clamper para la tomo de lecturas de temperaturas en °C, (b) Anemómetro para lecturas de velocidad de viento.



Figura 13.6.2: Pyranometer para medición de irradiancia solar global.



Figura 13.6.3. Pyranometer para medición de irradiancia solar difusa en conjunto del arco generador de sombra.



a) Pyranometer

b) Medidor de Humedad y temperatura.

Figura 13.6.4: (a) Pyranometer para la toma de lecturas de Irradiancia solar directa, y (b) medidor de Humedad relativa y la temperatura asociada a la humedad en el punto de medicion.



Figura 13.6.5: GPS para toma de las coordenadas, altura y presión atmosférica en el lugar de ensayo.