

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE SECADOR SOLAR DE PIÑA Y PLÁTANO AUTOMÁTICO

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico, que
presenta el bachiller:

VILCARIMA SABROSO, CARLOS ALBERTO

ASESOR: Cataño Sanchez, Miguel Angel

Lima, 10 de diciembre del 2015



© 2015, Carlos Alberto Vilcarima Sabroso

Se autoriza la reproducción total o parcial,
con fines académicos a través de cualquier
medio o procedimiento, incluyendo la cita
bibliográfica del documento.

RESUMEN

Dado el acelerado crecimiento del sector agroexportador peruano, impulsado por el boom de nuestra gastronomía, un creciente grupo de productores han apostado por la exportación de sus productos con un valor agregado: fruta deshidratada. Apuesta que los ha llevado a tener como clientes al mercado europeo y generado ingresos superiores a la venta de fruta convencional. No obstante, dado el escaso y costoso desarrollo tecnológico de máquinas deshidratadoras, muchos productores que han optado por la construcción de máquinas caseras no han logrado satisfacer la creciente demanda de sus productos, lo cual les impide competir en un mercado donde lo que prevalece es la capacidad de producción.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar una máquina automática de deshidratación (o secado) de piña y plátano que aproveche la energía solar como fuente de energía térmica y que tenga una capacidad de producción mayor a 1.5 ton (plátano) o 0.5 ton (piña) mensual. Para esto se hará uso de una serie de concentradores solares cilíndricos parabólicos (propuesto por el asesor), los cuales concentran la radiación solar en un tubo receptor con el fin de calentar un fluido circulante que luego se encargue de acarrear la humedad de la fruta. Asimismo, gracias a un mecanismo de seguimiento solar se logrará controlar y regular la temperatura de secado a la entrada de la cabina de deshidratación.

Finalmente, se logra diseñar una máquina que cumple con las exigencias pactadas para su diseño y que garantice un deshidrato uniforme en su producto. Se concluye, además, la relevancia que tiene este tipo de máquinas para nuestro contexto agricultor y exportador peruano en cuanto a mejora en la capacidad de producción y la calidad de los productos.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : DISEÑO DE SECADOR SOLAR DE PIÑA Y PLÁTANO AUTOMÁTICO
 Asesor : CATAÑO SANCHEZ, MIGUEL ANGEL
 Alumno : VILCARIMA SABROSO, CARLOS ALBERTO
 Código : 20111009
 Tema N° : # 123
 Fecha : 17/11/15



Descripción y Objetivos

Dado el acelerado crecimiento del sector agroexportador peruano, impulsado por el boom de nuestra gastronomía, un creciente grupo de productores han apostado por la exportación de sus productos con un valor agregado: fruta deshidratada. Apuesta que los ha llevado a tener como clientes al mercado europeo generando ingresos superiores a la venta de fruta convencional. No obstante, dado el escaso y costoso desarrollo tecnológico de máquinas deshidratadoras, muchos productores que han optado por la construcción de máquinas caseras no han logrado satisfacer la creciente demanda de sus productos, lo cual les impide competir en un mercado donde lo que prevalece es la capacidad de producción.

En el presente trabajo se diseñará una máquina automática de deshidratación (o secado) de piña y plátano que aproveche la energía solar como fuente de energía térmica. Para esto se hará uso de una serie de concentradores solares cilíndricos parabólicos, los cuales concentran la radiación solar en un tubo receptor con el fin de calentar un fluido circulante, alineados en dirección de norte a sur. Asimismo, gracias a un mecanismo de pseudo seguimiento solar, el cual otorga un grado de libertad al concentrador solar, se logra controlar y regular la temperatura de secado a la salida del concentrador y entrada de la cabina de deshidratación.

El contenido del trabajo parte, en primera instancia, en el planteamiento del problema, para luego pasar a la recopilación o estudio del funcionamiento de máquinas afines (estado del arte). Se continúa con la conceptualización, organización y evaluación de las funciones que contemplarán el diseño como la propuesta de solución (diseño conceptual). Posteriormente se elabora el diseño y cálculo de los elementos que contemplarán la máquina como su lógica de control. Por último se realiza una estimación de los costos de fabricación y las conclusiones del presente trabajo.

*A Dios, mi familia, amigos y profesores por
todo su apoyo.*



AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas deseo expresar mi agradecimiento a las personas que contribuyeron en mi formación ingenieril y en el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar a mi familia por todo su apoyo y motivación a lo largo de esto años.

A mis profesores por sus buenos consejos y lecciones de vida.

A todos mis amigos y compañeros por la confianza brindada.



ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
NOMENCLATURA	xi
INTRODUCCIÓN	1
I.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1.- CONTEXTUALIZACIÓN	2
1.2.- OBJETIVOS GENERALES	3
1.3.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4.- ALCANCE DEL DISEÑO	3
1.5.- LIMITACIONES DEL DISEÑO	3
1.6.- RESULTADOS DESEADOS	4
II.- ESTADO DEL ARTE	5
2.1.- ESTUDIO DE LA ENERGÍA SOLAR	5
2.1.1.- LA RADIACIÓN SOLAR	5
2.1.2.- ESTUDIO DEL MOVIMIENTO SOLAR	6
2.2.- CONCENTRADORES DE CALOR	9
2.2.1.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	9
2.2.1.1.- REFLECTOR	10
2.2.1.2.- FOCO ABSORBEDOR	11
2.2.2.- TIPOS DE CONCENTRADORES	11
2.2.2.1.- CONCENTRADOR PLANO	11
2.2.2.2.- CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO	11
2.2.2.3.- CONCENTRADOR CÍLINDRICO PARABÓLICO	12
2.2.2.4.- CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL	12
2.2.3.- COMPARACIÓN DE CONCENTRADORES	13
2.3.- TECNOLOGÍAS DE SECADO DE FRUTAS	14
2.3.1.- PRINCIPIO DE DESHIDRATACIÓN	14
2.3.2.- TIPOS DE DESHIDRATADORES O SECADORES	15
2.3.2.1.- SECADOR DE TÚNEL	15
2.3.2.2.- SECADOR DE TIPO TURBO	15
2.3.2.3.- SECADOR DE CABINA	16

2.3.3.-	CURVAS DE SECADO DE FRUTAS	16
2.4.-	MÁQUINAS AFINES	17
2.4.1.-	NESCO FD-60 SNACKMASTER EXPRESS	17
2.4.2.-	EXCALIBUR 3926TB	17
2.4.3.-	GWM-15A\B	18
2.4.4.-	KLAMATH K2	18
2.4.5.-	HARVEST SABER	19
III.-	DISEÑO CONCEPTUAL DEL DESHIDRATADOR SOLAR	20
3.1.-	CONCEPTUALIZACIÓN DEL DISEÑO	20
3.1.1.-	CAJA NEGRA	20
3.1.2.-	PROCESOS TÉCNICOS	20
3.1.3.-	ESTRUCTURA DE FUNCIONES	21
3.2.-	PARÁMETROS DEL DESHIDRATADOR SOLAR	22
3.2.1.-	REQUERIMIENTOS DE CONTROL	22
3.2.2.-	REQUERIMIENTOS MECÁNICOS	22
3.2.3.-	REQUERIMIENTOS ELECTRÓNICOS	23
3.3.-	CONCEPTO ÓPTIMO DE SOLUCIÓN	23
IV.-	DISEÑO Y CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES	24
4.1.-	CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO	24
4.1.1.-	POSICIONAMIENTO DE BANDEJAS	24
4.1.2.-	TIEMPO DE SECADO	25
4.1.3.-	CONCENTRADOR DE CALOR	25
4.1.4.-	CABINA	26
4.2.-	CÁLCULO TÉRMICO Y DE RESISTENCIA	26
4.2.1.-	PÉRDIDAS POR CALOR Y TUBERÍAS	26
4.2.2.-	ÁNÁLISIS DE RESISTENCIA DE MATERIALES	27
4.3.-	CÁLCULO DE SEGUIMIENTO SOLAR	27
4.3.1.-	CÁLCULO SOLAR POR UBICACIÓN Y TIEMPO	28
4.3.2.-	SELECCIÓN DEL MOTOR Y TRANSMISIÓN	28
4.4.-	SELECCIÓN DE ACTUADORES Y SENSORES	28
4.5.-	DISEÑO ELECTRÓNICO	29
4.6.-	CONTROL DEL PROCESO	29
4.6.2.-	ESTRATEGIA DE CONTROL	30
4.6.1.-	LÓGICA DEL PROGRAMA	30
V.-	ESTIMADO DE COSTOS	31
	CONCLUSIONES	32
	RECOMENDACIONES	33

CRÉDITOS DE FIGURAS	34
CRÉDITOS DE TABLAS	36
BIBLIOGRAFÍA	37



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	2
Figura 2.1	5
Figura 2.2	6
Figura 2.3	6
Figura 2.4	7
Figura 2.5	7
Figura 2.6	8
Figura 2.7	9
Figura 2.8	10
Figura 2.9	10
Figura 2.10	11
Figura 2.11	12
Figura 2.12	12
Figura 2.13	13
Figura 2.14	15
Figura 2.15	15
Figura 2.16	16
Figura 2.17	16
Figura 2.18	17
Figura 2.19	17
Figura 2.20	18
Figura 2.21	18
Figura 2.22	19
Figura 3.1	20
Figura 3.2	21
Figura 3.3	23
Figura 4.1	24
Figura 4.2	25
Figura 4.3	25
Figura 4.4	26
Figura 4.5	26
Figura 4.6	27
Figura 4.7	28
Figura 4.8	29
Figura 4.9	29
Figura 4.10	30

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Comparación de precios de fruta normal vs deshidratada	2
Tabla 2.1 Comparación entre concentradores de calor	13
Tabla 5.1 Costo de materiales	31



NOMENCLATURA

λ	: Latitud (rad)
Γ	: Ángulo diario (rad)
δ	: Declinación (rad)
τ	: Ángulo horario (rad)
γ	: Altura solar (rad)
θ	: Ángulo cenital (rad)
ψ	: Ángulo azimutal (rad)
β	: Ángulo de inclinación (rad)
T_s	: Temperatura de salida (°C)
T_i	: Temperatura de ingreso (°C)
\dot{m}	: Flujo másico (kg/s)
C_v	: Calor latente del agua (kJ/kg)
C_a	: Calor específico del aire a presión cte. (kJ/kg K)
ϕ	: Humedad relativa del aire húmedo(%)
N	: Cantidad (und)
M	: Masa (kg)
d	: Diámetro (mm)
v_h	: Volumen específico (m ³ /kg)
ρ	: Densidad (kg/m ³)
G	: Velocidad característica del fluido (kg/m ² s)
d_e	: Diámetro equivalente (m)
Re	: Número de Reynolds
h_c	: Coeficiente de convección (W/m ² K)
k	: Coeficiente de conducción (W/mK)
Y	: Humedad absoluta (%)
v	: Velocidad (m/s)

- Q : Caudal (m³/s)
•
Q : Calor entregado (W/s)
h_s : Entalpía específica (kJ/kg)
F : Distancia focal (mm)
S : Superficie (m²)
C : Área de apertura (m²)
A : Área (m²)
R_{th} : Resistencia térmica (W/K)



INTRODUCCIÓN

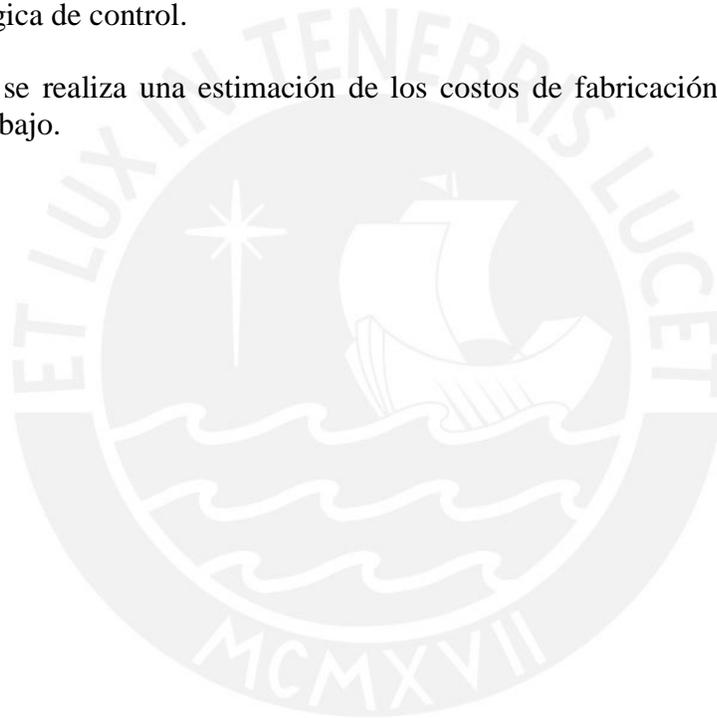
El contenido del trabajo parte, en primera instancia, en el planteamiento del problema o contextualización de la necesidad de esta máquina.

Luego se pasará a la recopilación o estudio del funcionamiento de máquinas afines (estado del arte).

Se continúa con la conceptualización, organización y evaluación de las funciones que contemplarán el diseño como la propuesta de solución (diseño conceptual).

Posteriormente se elabora el diseño y cálculo de los elementos que contemplarán la máquina como su lógica de control.

Por último se realiza una estimación de los costos de fabricación y las conclusiones del presente trabajo.



CÁPITULO 1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.- CONTEXTUALIZACIÓN

En la actualidad, el sector agro exportador peruano crece a tasas de entre 18 a 20% anual y genera ingresos anuales que superan los US\$ 5 mil millones, según El Ministerio de la Producción ^[1]. Siendo sus principales productos de exportación la uva, el mango, la palta y el plátano; frutas que presentan un adecuado crecimiento en nuestras condiciones climáticas andinas.

Este acelerado crecimiento no fue desapercibido por los productores, quienes apostaron por no solo vender fruta, sino, también, darle un valor agregado: deshidratado. Valor que ha obtenido una gran aceptación en el mercado europeo (siendo Austria, Alemania, Francia y Suiza sus principales clientes) ^[2].

Su principal característica, y la cual le da mayor valor monetario, es que se puede vender directamente como healthy snacks o golosina saludable, producto preciado en Europa dadas sus política de promoción de comida saludable.

Tabla 1.1.- Comparación de precios de fruta normal vs deshidratada ^[3]

Comparación de precios – Mercado europeo			
Fruta		Fruta Deshidratada	
Piña	1.25 €/Kg	Piña	10 €/Kg
Arándano	2.95 €/Kg	Arándano	23.95 €/Kg
Mango	3.5 €/Pieza	Mango	9 €/Kg
Plátano	1.95 €/Kg	Plátano	10 €/Kg
Fresa	3.7 €/Kg	Fresa	15 €/Kg

Para los productores, optar por la venta de fruta deshidratada les permite tener mayor flexibilidad en el mercado, frente a los efectos de la sobreproducción; reducir los costos de almacenamiento; y aumentar el tiempo de vida de sus productos; dado que la deshidratación, al reducir la humedad relativa, previene la descomposición y el crecimiento microbiano.

Produit Productos	Extra durée de conservation Vida útil adicional en días	Produit Productos	Extra durée de conservation Vida útil adicional en días
 Pomme Manzana	+ 7-10	 Papaya	+ 2-6
 Abricot Albaricoque	+ 3-5	 Pêche Melocotón	+ 2-6
 Banane Plátano	+ 3-5	 Poire Peras	+ 4-7
 Mûres Zarzamora	+ 4-6	 Ananas Piña	+ 1-3
 Myrtilles Arándano	+ 4-6	 Prunes Ciruela	+ 2-5

Figura 1.1.- Fragmento de tablas de duración de frutas

Dado que muchos productores no tienen acceso a recursos básicos que le permitan alimentar un deshidratador adecuado, han optado por mecanismos caseros de secado, que utilizan energía solar como fuente de alimentación, los cuales no logran satisfacer la creciente demanda del mercado ni tampoco garantizan una adecuada deshidratación (al no contar con un control de temperatura la fruta tiene mayor probabilidad de perder propiedades nutritivas o tan solo deshidratarse superficialmente).

Es por ello que nace la necesidad del diseño de un mecanismo que pueda deshidratar frutas, en este caso, plátanos y piñas, y que tenga como fuente de energía el sol.

1.2.- OBJETIVOS GENERALES

- Diseñar una máquina de deshidratación de piñas y plátanos mediante el uso de energía solar que sea accesible y funcional para los productores peruanos.

1.3.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las necesidades de una máquina de deshidratación para el contexto geográfico, social y económico peruano.
- Analizar el proceso tradicional de secado de piña y plátano y proponer una solución de mejora mediante el diseño de una máquina.
- Controlar las condiciones dentro de la cámara de deshidratación en base a los parámetros de las curvas de secado para garantizar un correcto deshidratado sin perder los valores nutritivos del producto.

1.4.- ALCANCE DEL DISEÑO

El diseño de la máquina de deshidratación de plátano y piña mediante el uso de la energía solar abarcará un estudio sobre el estado del arte y de la tecnología de mecanismos afines.

Por último, se presentará un informe técnico final el cual contendrá cálculos mecánicos y electrónicos, planos, diagramas del proyecto y catálogo de componentes escogidos para el diseño.

1.5.- LIMITACIONES DEL DISEÑO

El presente diseño no incluirá el sistema de alimentación; es decir, la máquina deberá ser alimentada por alguna fuente eléctrica externa. Tampoco se incluirá el código de control del proceso, tan solo se presentará su algoritmo vía diagrama de flujo.

Finalmente, se detalla que la presente no incluye la construcción del proyecto.

1.6.- RESULTADOS DESEADOS

- Consumo energético de la máquina menor a 300 W.
- Capacidad de producción estimada mayor a 1.5 ton (plátano) o 0.5 ton (piña) mensual.
- Capacidad de operación en el departamento de Piura.
- Funcionamiento con suministro eléctrico de 220 v – 60 Hz.

Pedidos por el asesor.



CÁPITULO 2.- ESTADO DEL ARTE

2.1.- ESTUDIO DE LA ENERGÍA SOLAR

En la actualidad, existe una corriente mundial para impulsar el uso de energías renovables, tales como eólica, hidráulica y solar; debido, no solo, a los beneficios que genera para el medio ambiente, sino como a su disponibilidad y accesibilidad.

La energía solar, si bien con diferentes intensidades, es un recurso renovable presente en todo el planeta Tierra, siendo aprovechado en diferentes países para generar electricidad y abastecer ciudades ^[4], requiere un estudio profundo sobre la energía solar y una comprensión de los diferentes eventos que influyen en su comportamiento.

El objetivo de esta sección es presentar los conceptos de la energía solar que determinarán el análisis de los factores y requerimientos que serán necesarios para el diseño de la máquina automatizada de secado solar de piña y plátano.

2.1.1.- LA RADIACIÓN SOLAR

La energía solar es el producto de un grupo de reacciones de fusión nuclear, que transforman el hidrógeno en helio, las cuales emiten o propagan su energía desde el núcleo hasta la superficie solar en forma de ondas electromagnéticas o conocidas mayormente como radiación solar ^[5].

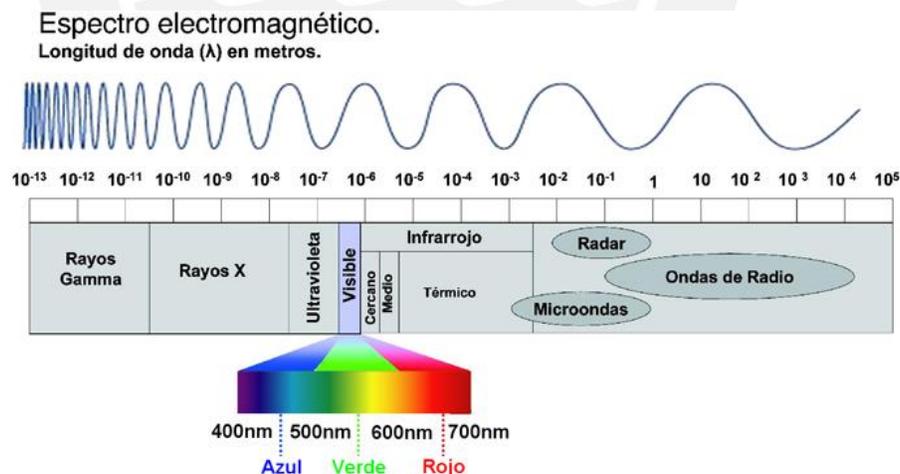


Figura 2.1.- Tipos de ondas electromagnéticas

Gracias a la reacción, se genera una serie de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes, de las cuales algunas son absorbidas por la Tierra y otras son reflejadas de nuevo al espacio.

La capa de ozono en combinación con otros gases presentes en nuestra atmósfera limita el paso de longitudes de onda entre 200 a 3000 nanómetros, las cuales en conjunto generan la

constante solar de irradiación por unidad de tiempo igual a $1.37 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ (Propuesto por Thekaekara y Drummond).

Sin embargo, la constante solar solo representa un valor estadístico global y esto se debe a que la radiación solar varía por los siguientes factores:

- **Ubicación y Fecha:** Dado que el Sol y la tierra tienen movimientos particulares; es decir, no viajan juntos, la radiación solar no se mantendrá constante todo el año.

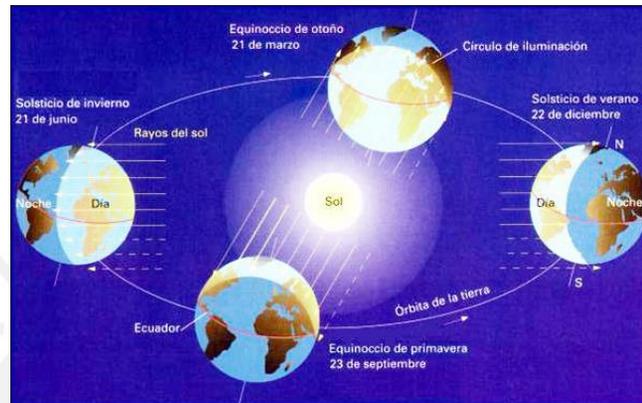


Figura 2.2.- Movimiento de la Tierra con respecto al Sol

- **Albedo:** Es un parámetro que representa el porcentaje de radiación solar que es reflejada por una superficie, en otras palabras, es un parámetro de atenuación de la radiación solar en base a una condición ambiental.

Superficie	Albedo %
Agua	5 – 70
Arena	20 – 45
Bosque	5 – 0.15
Carretera	5 – 10
Cemento	20
Cultivos	10 – 25
Hielo	20 – 40
Nieve	80
Nube densa	75

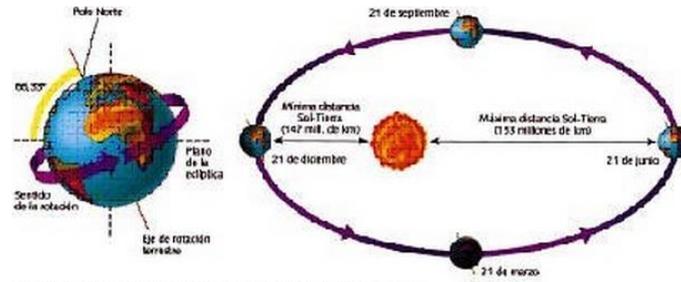
Figura 2.3.- Cuadro estadístico del albedo de algunos materiales

Así mismo se detalla los siguientes términos: *radiación directa*, la que es enviada por el sol y que no ha sido absorbida ni dispersada por ningún cuerpo o fenómeno; *radiación difusa*, la que ha sido reflejada y difundida en otras direcciones ^[6].

2.1.2.- ESTUDIO DEL MOVIMIENTO SOLAR

El movimiento de la tierra con respecto al Sol está descrito en la literatura, como un parámetro certero y confiable que es esencial para cualquier diseño que utilice la energía

solar como fuente de alimentación; movimiento que se modela mediante la traslación y rotación de la Tierra con respecto al Sol.



Movimientos de rotación y traslación de la Tierra.
Figura 2.4.- Movimiento de rotación y traslación de la Tierra

Para describirla es necesario detallar los siguientes parámetros:

- **Latitud λ :** Es la ubicación de un punto en la superficie terrestre con respecto a la línea ecuatorial, cuyo ángulo es positivo al situarse sobre dicha línea y negativo en el caso contrario.
- **Longitud b :** Es la ubicación de un punto en la superficie terrestre con respecto al meridiano de Greenwich, cuyo ángulo es positivo a la derecha de dicha línea y negativo en el caso contrario.

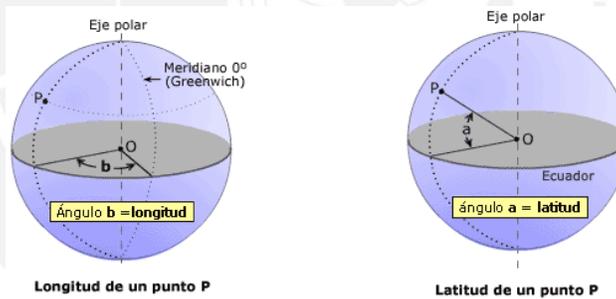


Figura 2.5.- Latitud y longitud de un punto sobre la superficie terrestre

- **Ángulo diario Γ :** Ángulo que representa la ubicación de la tierra con respecto a la Eclíptica de traslación.

$$\Gamma = 2 * \pi * \frac{d_n - 1}{365} \tag{2.1}$$

Donde “ d_n ” corresponde al número de día juliano del año ($1 \leq d_n \leq 365$), el cual parte desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre.

- **Declinación δ :** Dado que la tierra gira alrededor de su propio eje, el cual está inclinado con respecto a la normal de la Eclíptica, se tiene un ángulo que se forma entre la línea que une el centro del Sol y la tierra con el plano ecuatorial. Este ángulo

varía entre $\pm 23.45^\circ$ por día. Se presenta a continuación la fórmula de Spencer, la cual tiene un error inferior a 3 minutos [7].

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 * \cos(\Gamma) + 0.070257 * \text{sen}(\Gamma) - 0.006758 * \cos(2 * \Gamma) + 0.000907 * \text{sen}(2 * \Gamma) - 0.002697 * \cos(3 * \Gamma) + 0.00148 * \text{sen}(3 * \Gamma) \quad (2.2)$$

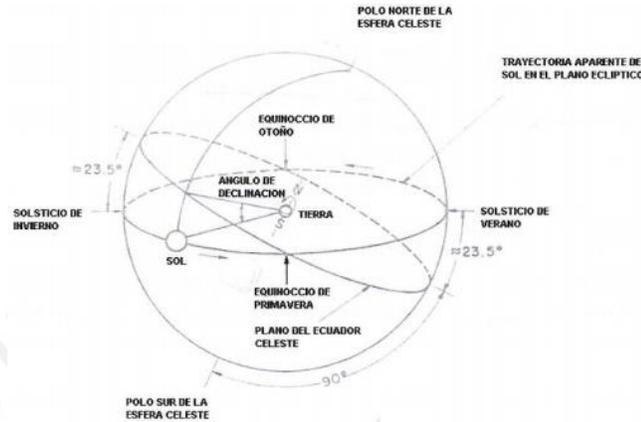


Figura 2.6.- Movimiento aparente del Sol y variación del ángulo de declinación

- **Ángulo Horario τ :** Es el ángulo que representa la posición del Sol con respecto al mediodía (donde es 0°). Cada hora varía en $\pm 15^\circ$.

$$\tau = 15 * (h_s - 12) \quad (2.3)$$

Donde “ h_s ” representa la hora. Se suele tomar en cuenta la hora dentro del rango de 6am a 6pm.

- **Altura Solar γ :** Es el ángulo que marca la altura del Sol con respecto al plano vertical del lugar.

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (2.4)$$

- **Ángulo Cenital θ :** Es el ángulo que forma el sol con la vertical del lugar.

$$\cos\theta = \text{sen}\delta * \text{sen}\lambda + \cos\delta * \cos\lambda * \cos\tau \quad (2.5)$$

- **Ángulo Azimutal ψ :** Es el ángulo que forma la componente horizontal del Sol con el eje Norte - Sur.

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) = \frac{-\text{sen}\tau}{\tan\delta * \cos\lambda - \text{sen}\lambda * \cos\tau} \quad (2.6)$$

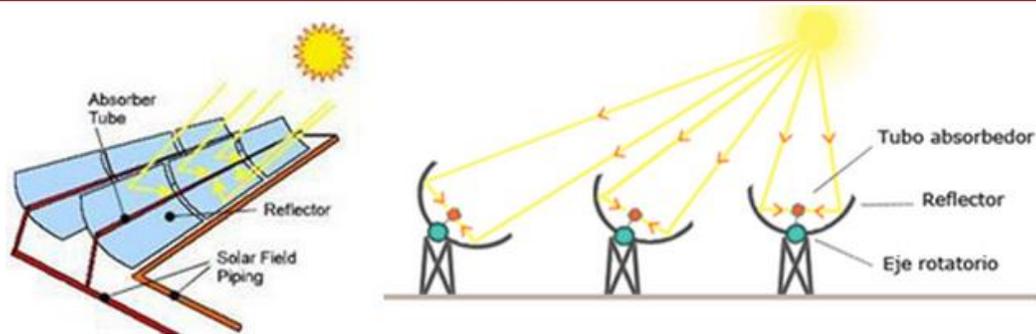


Figura 2.8.- Componentes de un concentrador solar

2.2.1.1.- REFLECTOR

Es un material cuya superficie es capaz de reflejar la luz o algún tipo de onda electromagnética a un foco absorbedor. Esto se debe a que todo cuerpo o material posee las siguientes características:

- **Reflectancia (p):** Es la capacidad de una superficie de reflejar la luz que recibe. Por la primera ley de reflexión se tiene que el ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado.

$$\theta_i = \theta_r \tag{2.8}$$

La ley de Snell estipula que cuando una onda incide sobre la superficie, parte de la energía se refleja y la otra entra en el segundo medio.

$$n_i * \text{sen}\theta_i = n_{tr} * \text{sen}\theta_{tr} \tag{2.9}$$

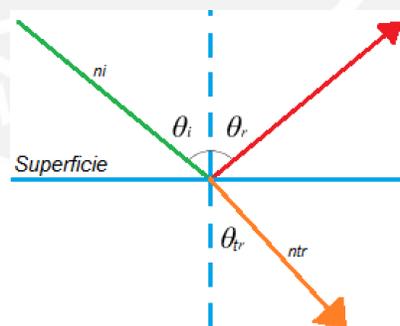


Figura 2.9.- Reflectancia

- **Transmitancia (t):** Es la capacidad de un material para ceder el paso de la luz a través de él.
- **Absortancia (α):** Es la capacidad de un material para absorber la energía que le llega.

De igual forma se sabe que la unidad es la suma de la reflectancia (p), transmitancia (t) y la absortancia (α).

$$p + t + \alpha = 1 \tag{2.10}$$

2.2.1.2.- FOCO ABSORBEDOR

Es un foco lineal o plano, el cual tiene como objetivo recepcionar la energía reflejada por el o los reflectores de manera que luego la transmita a un fluido circulante en su interior. Suele constar de dos tubos concéntricos; el exterior sirve de aislante térmico y el interior de intercambiar calor.

2.2.2.- TIPOS DE CONCENTRADORES

Los concentradores de calor se clasifican en base a sus características de focalización, ya sea planos o lineales; al rango de obtención de temperatura (baja, media, alta temperatura); y al movimiento del reflector (con o sin seguimiento solar).

A continuación se detallará cada uno de los concentradores de calor más utilizados en la actualidad.

2.2.2.1.- CONCENTRADOR PLANO

Este tipo de colector es el más utilizado por pequeños productores, debido a su sencillo y bajo costo de construcción. Consta de un receptor de placa plana el cual almacena la energía solar y la transfiere hacia un fluido que circula por un serpentín o laberinto en su interior. Usualmente es usado para hervir agua, calefacción y deshidratar pequeñas cantidades de frutas, debido a que se clasifica como concentrador de baja temperatura. No suele diseñarse con seguimiento solar ^[9].

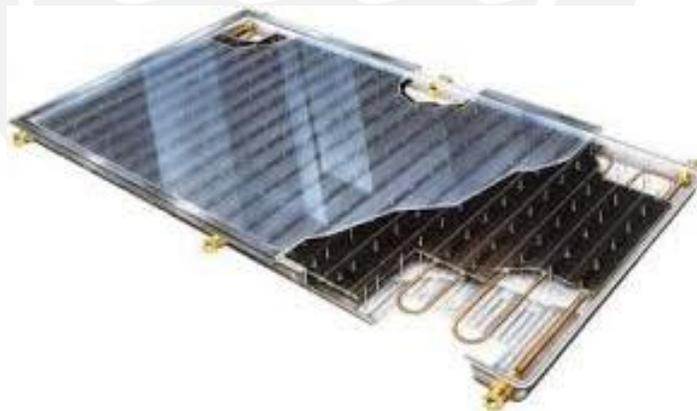


Figura 2.10.- Concentrador Solar de Tipo Plano (CP)

2.2.2.2.- CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO

Este tipo de colector es poco utilizado debido a su compleja forma y es conocido como un concentrador de no imagen, debido a que no necesita contar con un seguimiento solar, lo cual disminuye sus costos considerablemente. Otra ventaja de este diseño es que la forma del tubo receptor depende de su perímetro y su ángulo de aceptación ^[10].

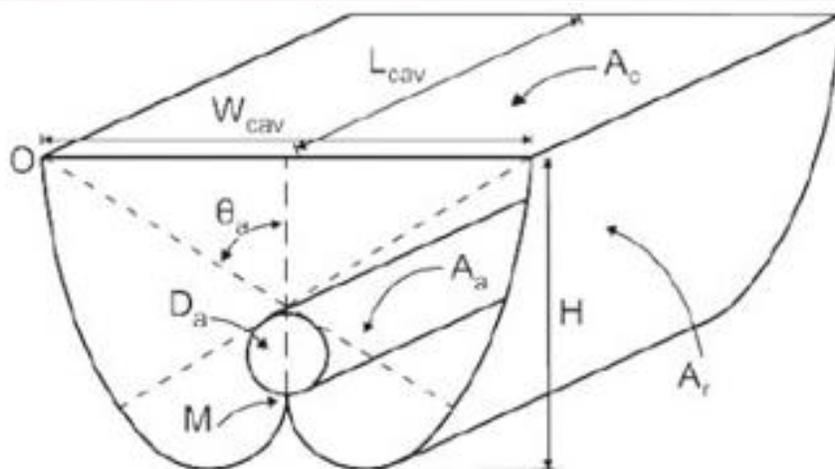


Figura 2.11.- Concentrador Solar Parabólico Compuesto (CPC)

2.2.2.3.- CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO

Este tipo de colector es el más utilizado en plantas de energía eléctrica y se basa en la concentración de la energía solar en un foco lineal, en el cual se transfiere la energía térmica a un fluido circulante. Este tipo de concentrador solar se clasifica como colector de media temperatura, a pesar de que solo aprovecha la componente directa de la radiación. Suele operar con seguimiento solar, pero hay aplicaciones en las que no se necesita ^[11].



Figura 2.12.- Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico (CCP)

2.2.2.4.- CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL

Este tipo de colector se instala con un foco lineal a altura y una serie de espejos móviles situados a su lado izquierdo y derecho. Las distancias de los espejos están delimitadas por la eficiencia óptica, como al efecto de obstrucción del flujo solar.

Presenta ventajas notables en cuanto a mantenimiento, al no necesitar de estructuras pesadas para sostener todo el sistema; y limpieza. El factor principal en su diseño es el ángulo de incidencia solar, el cual define la dimensión o el ángulo de los espejos ^[12].



Figura 2.13.- Concentrador Solar Tipo Fresnel Lineal (CFL)

2.2.3.- COMPARACIÓN DE CONCENTRADORES

En la siguiente tabla se describen las principales características de cada uno de los concentradores descritos anteriormente.

Tabla 2.1.- Comparación entre concentradores de calor

	<i>Temperatura</i>	<i>Geometría</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Movilidad</i>	<i>Eficiencia Óptica</i>
CP	Baja	Sencilla	Extensa	---	Baja
CPC	Media	Complicada	Mediana	---	Alta
CCP	Media	Sencilla	Mediana	Estructura	Alta
CFL	Media	Sencilla	Extensa	c/Espejo	Media

2.3.- TECNOLOGÍAS DE SECADO DE FRUTAS

La deshidratación no es un fenómeno reciente que haya surgido con la revolución industrial, su conocimiento y aprovechamiento se remonta a muchos siglos anteriores; por ejemplo, los Incas deshidrataban sus productos para poder conservarlos y consumirlos en épocas de escasez ^[13].

A lo largo de esta sección se explicará el principio de deshidratación como las principales máquinas deshidratadoras de alimentos.

2.3.1.- PRINCIPIO DE DESHIDRATACIÓN

Los principios de deshidratación se basan en los principios de la psicrometría, rama que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y sus efectos.

El aire húmedo se describe para la psicrometría como una mezcla de aire seco y vapor de agua, esta relación se caracteriza como humedad relativa. La condición natural del aire húmedo es saturarse, en otras palabras, alcanzar el 100% de humedad relativa, por ello el aire

con baja humedad relativa al entrar en contacto con un objeto, alimento o fruta, está obligado a absorber su humedad y por consecuencia deshidratarlo. El porcentaje máximo de humedad relativa que asegura una correcta conservación de los alimentos es de 18% [14].

A continuación se detallará los parámetros por objeto de estudio (fluido y fruta/alimento):

- **Fluido Circulante:** Es el fluido que se encarga de absorber la humedad de la fruta. Sus características son temperatura de ingreso y salida de la cámara de deshidratación, calor específico a presión constante, entalpía del aire a la entrada y salida, flujo másico, masa de aire presente en la cámara para cualquier instante dado.
- **Fruta o Alimento:** Es el objeto que deberá deshidratarse. Sus características son masa, calor latente a temperatura media, humedad relativa con la que ingresa y deseada,

De igual manera se presentan las ecuaciones que modelan el comportamiento del deshidratador:

- **Energía de Deshidratación:** Energía necesaria para deshidratar la fruta (kW).

$$Q_d = \dot{m}_{fp} * C_v = \dot{m}_a * C_a * (T_i - T_s) \quad (2.11)$$

Donde “ \dot{m}_{fp} ” es la masa de agua perdida en el proceso (kg); “ C_v ”, el calor latente del agua a temperatura media (kJ/kg); “ \dot{m}_a ”, la masa del aire en un instante dado; “ C_a ”, el específico del aire a presión constante (kJ/kg*K); y “ T_i/T_s ”, temperatura de ingreso y salida del aire (°C).

- **Masa de Agua Perdida:** Condicionada por la humedad relativa deseada (m_{fp}).

$$m_{fp} = m * \frac{\phi_i - \phi_s}{100 - \phi_s} \quad (2.12)$$

Donde la masa del objeto está representada por m ; y su humedad relativa, al ingreso y a la salida del proceso, definida por “ ϕ ”.

- **Potencia de Absorción:** La cantidad de agua vaporizada por tiempo define la potencia de absorción (P_a en kW).

$$P_a = \dot{m}_a * C_a * (T_i - T_s) = \dot{m}_a * (h_i - h_s) \quad (2.13)$$

\dot{m}_a : flujo másico del aire.

h_i : entalpía de ingreso al sistema.

h_s : entalpía de salida del sistema.

2.3.2.- TIPOS DE DESHIDRATADORES O SECADORES

Se presentan los tipos de deshidratadores más utilizados y promovidos por la literatura [15] [16].

2.3.2.1.- SECADOR DE TÚNEL

Secador directo y continuo, el cual consiste en un túnel largo a través del cual se mueven bandejas cargadas del sólido a secar y el gas encargado de evaporar la humedad. El tiempo dentro del secador debe asegurar que a la salida se obtenga el sólido a la humedad deseada, el cual varía en base a las características y propiedades del sólido

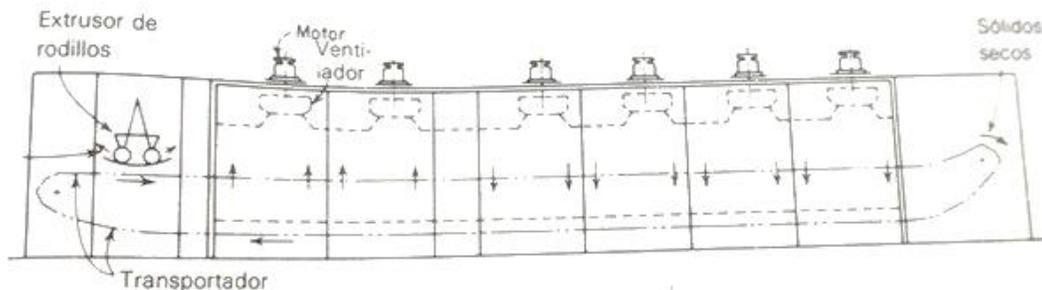


Figura 2.14.- Secador de túnel

2.3.2.1.- SECADOR DE TIPO TURBO

Es un secador de tipo continuo el cual es utilizado generalmente para materiales en polvo o granulares. Su principio de operación es que el producto gire sobre un eje a una velocidad baja de manera que se genere un flujo de aire, el cual absorba la humedad de manera pareja de cada sólido. (No se utiliza para frutas)

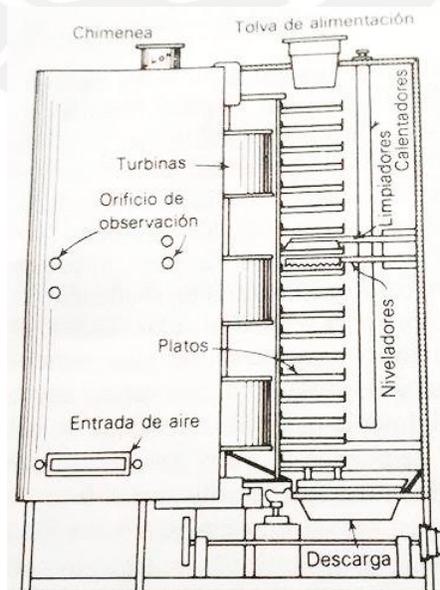


Figura 2.15.- Secador de tipo turbo

2.3.2.1.- SECADOR DE CABINA

Es un secador por lote, en el cual se ingresa el sólido en bandejas para que este, luego en contacto con el aire caliente pierda humedad a lo largo de un determinado tiempo. En muchos diseños se aprecia que este tipo de secador gira las torres de bandeja para asegurar un secado o deshidratado uniforme.

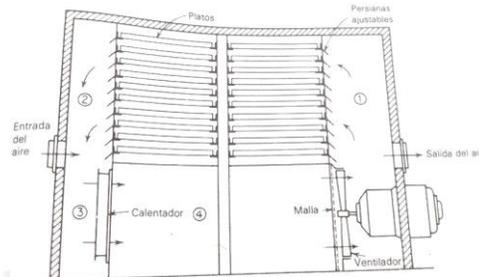


Figura 2.15.- Secador de cabina

2.3.3.- CURVAS DE SECADO DE FRUTAS

Las curvas de secado de fruta han sido obtenidas mediante la experimentación y describen una función de humedad relativa del sólido vs tiempo de exposición, la cual garantiza un deshidratado uniforme tanto en las capas internas como superficiales de la fruta, siempre y cuando se mantengan las condiciones en las que se obtuvo dicha gráfica.

Cabe resaltar que a mayor tiempo de exposición, la fruta pierde mayor cantidad de valores nutritivos; por el otro lado, al trabajar con altas temperaturas crece el riesgo que se deshidrate solo la superficie de la fruta y no su centro, esto no atenuaría la descomposición ni permitiría su conservación [17].

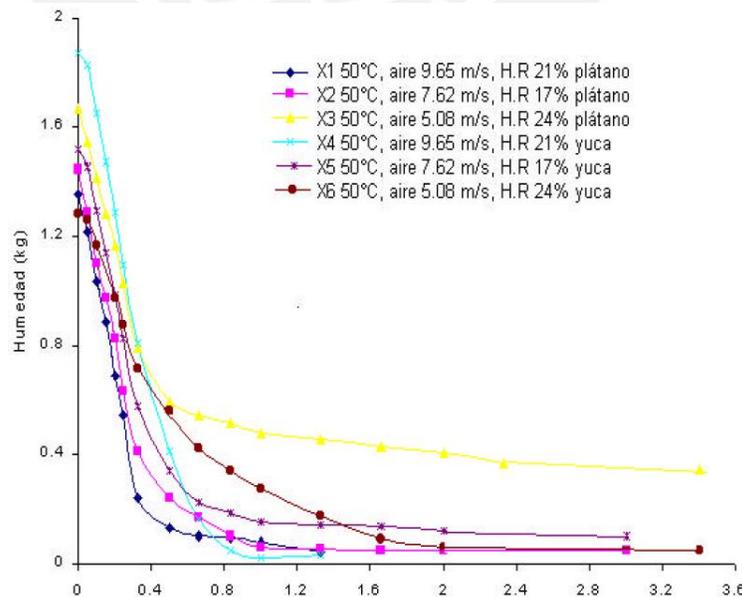


Figura 2.17.- Curva de secado plátano y yuca a temperatura constante

En la siguiente gráfica se presenta una curva de secado experimental para el plátano, y la yuca, para un juego de velocidades de aire, las cuales determinarán el tiempo de exposición para una temperatura constante. (Ver Anexo E)

2.4.- MÁQUINAS AFINES

En esta sección se describirá algunas máquinas deshidratadoras de alimentos.

2.4.1.- NESCO FD-60 SNACKMASTER EXPRESS

Este diseño tiene como característica que el aire caliente circula de arriba hacia abajo por los niveles de forma horizontal, lo cual garantiza que los goteos no caerán en el ventilador; esto beneficia considerablemente la limpieza y aumenta el tiempo de vida de la máquina ^[18].

Características:

- Capacidad para 4 bandejas (Extensible hasta 12).
- Rango de temperatura comprendido entre 35 – 72 °C.
- Rotación de bandejas.
- Potencia: 500 W.
- Dimensión de 33 cm x 33 cm x 23 cm.



Figura 2.18.- Nesco FD-60 Snackmaster Express

2.4.2.- EXCALIBUR 3926TB

Este diseño se caracteriza por tener una distribución uniforme de calor a lo largo de sus niveles, por lo que no requiere de un sistema rotatorio de bandejas ^[18].

Características:

- Capacidad para 9 bandejas de 457 cm² de espacio.
- Rango de temperatura comprendido entre 41 – 74 °C.
- Potencia: 600 W.
- Dimensión de 30 cm x 43 cm x 48 cm.



Figura 2.19.- Excalibur 3926TB

2.4.3.- GWM-15A\B

Máquina de deshidratación mediante horno en forma de túnel, en el cual el producto circula a lo largo de su interior. Cuenta con un control mediante PLC, y está compuesta por acero inoxidable ^[19].

Características:

- Capacidad de trabajo entre 40 – 75 kg/h.
- Periodo de Trabajo: 2450 ± 50 MHz.
- Potencia: 15 kW.
- Dimensión de 9.8m x 1.2m x 1.6m



Figura 2.20.- GWM-15A\B

2.4.5.- KLAMATH K2

Esta máquina se basa tecnología de cabinas; cabinas que ingresan en grupo de pares. Opera mediante calentadores de gas natural: propano o butano. Cuenta también con un sistema automático de control de humedad ^[20].

Características:

- Capacidad para 186 bandejas de 66cm x 46cm.
- Máxima temperatura: 105 °C.
- Peso: 2177 kgf.
- Dimensión: 2.8m x 1.2m x 4.2 m.



Figura 2.21.- Klamath K2

2.4.6.- HARVEST SAVER

Es una máquina de deshidratación que puede trabajar con frutas, vegetales, carne y comida cruda. Su diseño es compacto y móvil [20].

Características:

- Capacidad para 14 bandejas de 60.96cm x 91.44cm.
- Máxima temperatura: 93 °C.
- Potencia: 9.2 kW.
- Peso de 241 kgf sin carga, 362 kgf con carga.
- Dimensiones: 1.52 m x 0.86m x 1.52m.



Figura 2.22.- Harvest Saver

CAPITULO 3.- DISEÑO CONCEPTUAL DEL DESHIDRATADOR SOLAR

3.1.- CONCEPTUALIZACIÓN DEL DISEÑO

En esta sección se detallará las etapas que albergará el presente diseño. Se indicará, también, la secuencia de operaciones que la máquina deberá realizar, lo cual permitirá esquematizar los procesos y seleccionar sus componentes.

3.1.1.- CAJA NEGRA



Figura 3.1.- Caja negra

Definiciones:

- Caja Negra: Deshidratador Solar de plátano y piña.
- Entrada:
 - Energía: eléctrica y solar.
 - Material: plátano o piña en rodajas, y aire.
 - Señal: iniciar la máquina.
- Salida:
 - Energía: energía cinética y calor.
 - Material: plátano o piña deshidratada en rodajas, y aire caliente.
 - Señal: fin del proceso.

3.1.2.- PROCESOS TÉCNICOS

Mediante el estudio del estado del arte y de la tecnología de máquinas afines se determinó las principales funciones que este diseño debe incluir, como su secuencia de operaciones.

Secuencia de operaciones:

- 1) Colocar la fruta (plátano o piña) en rodajas en las bandejas del alimentador.
- 2) Accionar la máquina.
- 3) Succionar el aire a condiciones ambientales.
- 4) Concentrar la energía solar en un tubo receptor (o intercambiador de calor).
- 5) Circular aire caliente a través de las bandejas.
- 6) Controlar la temperatura – mediante movimiento del concentrador solar.
- 7) Indicar proceso finalizado.

3.1.2.- ESTRUCTURA DE FUNCIONES

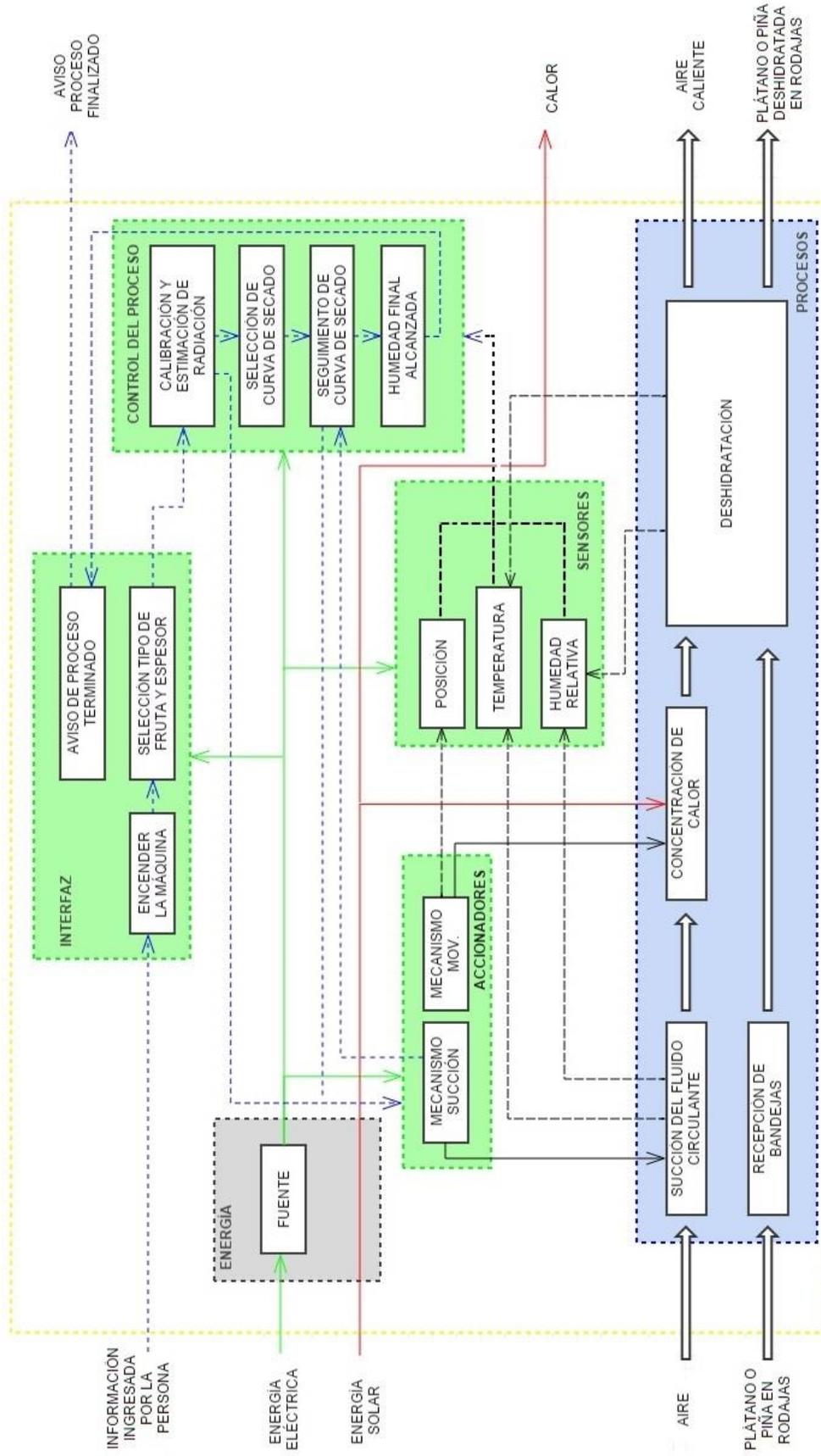


Figura 3.2.- Estructura de funciones

3.2.- PARÁMETROS DEL DESHIDRATADOR SOLAR

Gracias al estudio realizado en la sección anterior sobre el estado de arte (máquinas afines), como también al análisis de la secuencia de procesos técnicos que debe englobar una máquina de deshidratación, tanto para plátano y piña, como en general (análisis descrito en la sección anterior), se determinó la lista de requerimientos que el diseño deberá cumplir. (Las tablas de exigencias y deseos se presentan en el Anexo B)

3.2.1.- REQUERIMIENTOS DE CONTROL

Dado que los procesos de deshidratación se basan estrictamente en el seguimiento de las curvas de secado, las cuales son halladas mediante la experimentación, se enlista a continuación los requerimientos de control:

- Asegurar el seguimiento de las curvas de secado (humedad relativa vs tiempo de exposición).
- La materia de ingreso será fruta cortada en rodajas, cuyas dimensiones estarán dadas por las curvas de secado.
- Capacidad de operación a temperaturas de entre 30 a 100 °C, rango de temperatura de exposición en las que oscilan las curvas de secado para el plátano y la piña de la referencia.
- Los parámetros de control son la fecha, hora, ubicación, temperaturas (al exterior e interior), humedad relativa (al ingreso y a la salida), y posición angular del concentrador de calor con respecto al sol.

Así mismo la máquina deberá dar aviso de que el proceso de secado ha concluido.

3.1.2.- REQUERIMIENTOS MECÁNICOS

El presente diseño requiere de una cámara de deshidratación y de una etapa de concentración de calor, las cuales deberán cumplir los siguientes requerimientos. (A pedido del asesor)

- Capacidad de operación en zonas con irradiancia mínima de 183 W/m² (Piura).
- La cámara de deshidratación no deberá superar la dimensión de 20 m x 10 m x 2.5 m.
- Las dimensiones del concentrador de calor no deberán superar los 2 m x 2 m x 2 m.
- El concentrador de calor deberá contar con al menos un grado de libertad para realizar un seguimiento solar, el cual permita variar la temperatura del fluido a su salida.
- El peso bruto de la máquina no deberá superar los 1500 kgf.
- La carga de fruta de ingreso mínima es 20 kgf.
- Capacidad de producción máxima de 60 kgf de fruta diaria.
- Capacidad de operación de 7am a 5 pm.
- Diseño agradable y elegante.
- Diseño modular para su transporte.

3.2.3.- REQUERIMIENTOS ELECTRÓNICOS

Para asegurar un correcto control de los procesos, el diseño debe incluir estos requerimientos eléctricos y electrónicos:

- Contar con un sensor de humedad relativa al exterior del sistema.
- Contar con tres sensores de temperatura: al exterior, al ingreso de la cámara de deshidratación y a su salida.
- Capacidad de operación a 220 V ~ 60 Hz.

3.3.- CONCEPTO ÓPTIMO DE SOLUCIÓN

En base a la lista de exigencias y la estructura de funciones del diseño se determinó que el concepto óptimo de solución es el que será presentado a continuación. (Para más información revisar el Anexo C)

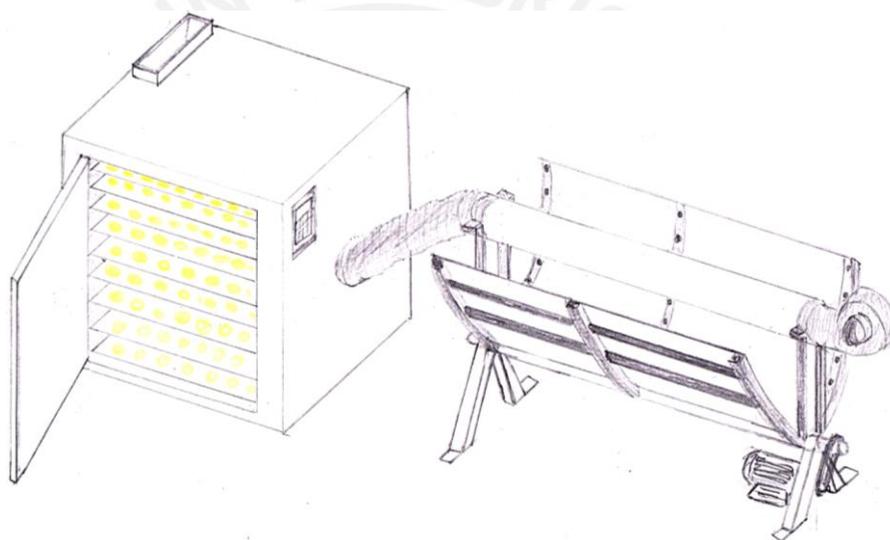


Figura 3.3.- Concepto de solución óptimo

La máquina se divide en un proceso de intercambio de calor mediante un CCP (Concentrador Cilíndrico Parabólico) compuesto por un motor, el cual le proporciona un grado de libertad para el seguimiento solar, cuya función principal es mantener constantes las condiciones de deshidratación dada por las curvas de secado de frutas (ver Anexo E).

El segundo proceso se da dentro de la cabina, en la cual se recibe las bandejas provistas de la fruta cortada en rodajas para su posterior deshidratación.

Los componentes más resaltantes del diseño son un motor, un sensor de humedad relativa, tres sensores de temperatura, y una turbina de succión, los cuales servirán para controlar y asegurar un correcto desempeño de la máquina.

CAPITULO 4.- DISEÑO Y CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES

4.1.- CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO

El cálculo de las dimensiones de la máquina se basa en tres criterios principales:

- Capacidad de producción: Cantidad de fruta que albergará la máquina por ciclo de trabajo.
- Curva de Secado (Plátano y Piña): Condiciones que se deben mantener dentro de la cámara de deshidratado, por ejemplo: la temperatura con la que debe ingresar el fluido circulante a la cámara de deshidratación.
- Capacidad de aprovechamiento solar: El concentrador solar debe satisfacer el calor necesario para alcanzar la temperatura mínima de producción; calor que está condicionado por sus propias características geométricas y ópticas.

A lo largo de esta sección se hará las estimaciones de las dimensiones considerando las pérdidas de energía, de manera que se garantice un adecuado funcionamiento.

4.1.1.- POSICIONAMIENTO DE BANDEJAS

La distribución, el número y las dimensiones de las bandejas delimitan el área de deshidratación, el área del flujo circulante y el tipo de circulación; parámetros que son de suma importancia para determinar el tiempo de secado y por ende, las dimensiones del sistema de deshidratación (ver Anexo F).

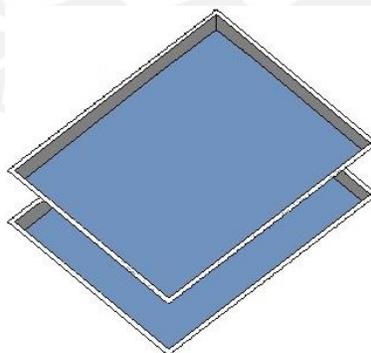


Figura 4.1.- Bandejas

Luego de analizar e iterar para un juego de dimensiones de rodajas de piña y plátano, se determinó que para satisfacer la demanda se debe contar con lo siguiente:

- 24 bandejas planas de 40 cm x 60 cm con profundidad de 2.5 cm.
- Área de circulación del fluido de 5 cm x 60 cm (8 niveles).
- Circulación tipo paralela entre las bandejas.

4.1.2.- TIEMPO DE SECADO

El tiempo de secado se basa en los principios de transferencia de masa y utiliza como parámetros de entrada la temperatura, la velocidad del fluido, la humedad absoluta del aire húmedo, la masa de la fruta y el área superficial de secado.

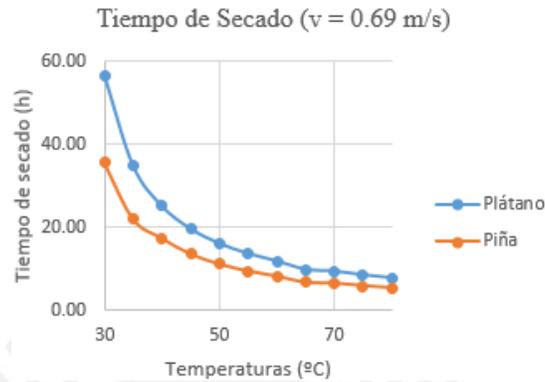


Figura 4.2.- Tiempo de secado.

En base a un análisis iterativo de las posibles condiciones de operación que cumplan las especificaciones de diseño se determinó lo siguiente (ver Anexo G):

- Condiciones de trabajo: $v = 0.69 \text{ m/s}$ (entre bandejas) y $T = 65 \text{ °C}$.
- Rango de temperatura admisible: $30 - 100 \text{ °C}$ (dado por las curvas de secado y resistencia de algunos materiales).

4.1.3.- CONCENTRADOR DE CALOR

El calor entregado por el concentrador solar depende de su geometría, sus materiales y su orientación con respecto al sol.

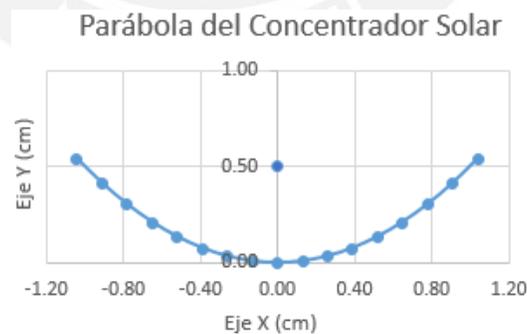


Figura 4.3.- Concentrador de calor

Se contará con 2 concentradores que funcionarán en paralelo acoplados en serie a otro posterior y cumplirán con las siguientes condiciones (ver anexo H):

- La parábola del concentrador tendrá como función: $f(x) = \frac{x^2}{2}$.
- Para un concentrador de calor se utilizará 12 placas de aluminio de $1.2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$.

- El diámetro del tubo receptor consta de un tubo aislante (vidrio) y un intercambiador de calor (acero).

4.1.4.- CABINA

La cabina es un sistema de volumen control (FEUS) en el cual se sitúa el porta bandejas que soportará el peso de la fruta, y cuya posición garantiza las condiciones de operación de diseño descritas en el anexo F y G.



Figura 4.4.- Cabina

Las características de la cabina se describen a continuación (ver anexo H):

- El porta bandejas se basa en la tecnología de racks selectivos.
- La dimensiones de la cabina son de 1.78 m x 0.78 m x 1.46 m.
- Las paredes exteriores están compuestas por madera y el interior de teflón y acero inoxidable.

4.2.- CÁLCULO TÉRMICO Y DE RESISTENCIA

El cálculo térmico de la máquina nos permite estimar la eficiencia de operación, mientras que el cálculo de resistencia indicará su viabilidad.

En este subcapítulo se presentará lo más resaltante del cálculo realizado en el anexo J (pérdidas) y M (resistencia de materiales).

4.2.1.- PÉRDIDAS POR CALOR Y TUBERÍAS

Ni la cabina ni el tubo receptor del concentrador solar son adiabáticos, por lo que es de suma importancia determinar sus pérdidas de energía, y con mayor énfasis, las pérdidas generadas en la etapa de concentración de calor, etapa que presenta mayor área (a mayor área, mayor transferencia de energía).



Figura 4.5.- Tubería

Mediante el cálculo realizado en el anexo J se determinó lo siguiente:

- La tubería para un tubo interior de aluminio de 15 cm con espesor de 1 mm y un tubo exterior de vidrio de 25 cm con espesor de 5 mm se generan 304.19 W en pérdidas por transferencia de calor.
- Las paredes de la cabina compuesta por la combinación de 4 mm de fibra de madera, 40.5 mm de vacío y 0.5 mm de teflón generan 158 W en pérdidas térmicas.
- Las pérdidas de presión por turbulencia al interior del tubo receptor generan una caída de 30.3 Pa según la teoría de Blasius (1911).
- Mientras que las pérdidas por la utilización de un tubo flexible (unión concentrador - cabina) son de 98 Pa.

Por tanto la eficiencia de la máquina, considerando la radiación incidente real; es decir, sin considerar la eficiencia óptica de la etapa de concentración de calor, es de 85.7 %.

4.2.2.- ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE MATERIALES

En este subcapítulo se presentará los resultados obtenidos del análisis realizado para el eje del concentrador solar, el cual no es continuo (ver figura 4.6), debido a que este no debe obstruir el paso de la radiación solar a la superficie reflectora. La importancia de este análisis recae en que esta pieza se encargará de recibir el momento torsor generado por el motor y girar los concentradores solares sobre su propio centro de masa.

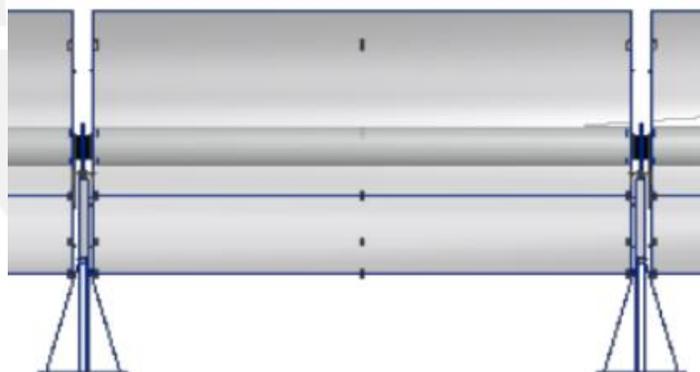


Figura 4.6.- Concentrador solar

Los resultados obtenidos (ver anexo M) indican que el factor de seguridad para un eje de St-60 con 15 cm de diámetro es de 1.71, valor que indica que el eje no fallará para los requerimientos de esfuerzo torsor.

4.3.- CÁLCULO DE SEGUIMIENTO SOLAR

La importancia del seguimiento solar, como ya se ha explicado antes, recae en obtener una radiación constante durante las horas de trabajo (7 am – 5 pm), tal que al interior de la cabina de deshidratación la temperatura se mantenga constante y genere un deshidratado uniforme en la fruta.

4.3.1.- CÁLCULO SOLAR POR UBICACIÓN Y LUGAR

El lugar de análisis escogido para el diseño de la máquina es la ciudad de Piura, en Piura, Perú, (sugerido por el asesor) lugar que al estar muy próximo a la línea ecuatorial presente unos ingresos superiores de radiación promedio anual con respecto a otros departamentos. Piura se encuentra a una latitud de -5.19° y longitud de -80.63° .

Se iteró para todos los días del año (desde el 1-Enero al 31-Diciembre) para el rango de horas de 7 am – 5 pm y se determinó lo siguiente (ver anexo D – cálculo teórico):

- La máxima radiación ocurre en octubre y es de 471 W/m^2 .
- La mínima radiación ocurre en julio y es de 183 W/m^2 .

4.3.2.- SELECCIÓN DEL MOTOR Y TRANSMISIÓN

Dada las características de las fajas planas (bajo nivel de ruido, no requiere lubricación, absorbe vibraciones) se decidió hacer uso de ellas como medio de transmisión.

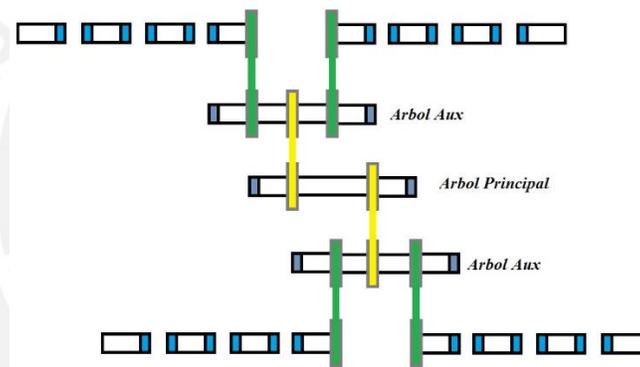


Figura 4.7.- Distribución del torque

Por lo que para el arreglo mostrado en la figura 4.7 (y sustentado en el anexo K) se determinó que la potencia requerida para mover todo el sistema es de 32.65 W y un torque de 657 N m .

En base a esto se decidió utilizar un motor PD86-1180, el cual tiene integrado un encoder y un driver TMCM-1180. Así mismo se hará uso de una caja reductora 90JB con relación de 1:100 y potencia admisible de 60 W .

4.4.- SELECCIÓN DE ACTUADORES Y SENSORES

En base al análisis ya desarrollado en el anexo H (caudal ideal requerido: $290 \text{ m}^3/\text{h}$) y al anexo J (análisis de pérdidas: 128.3 Pa) se decidió utilizar una turbina de succión SV 125/H la cual es capaz de entregar un caudal de $400 \text{ m}^3/\text{h}$.

La selección de esta turbina también parte de que se debe calibrar el caudal de salida de la turbina para contrarrestar las pérdidas que se generan en el cambio de régimen turbulento a

laminar entre el ingreso del fluido a la cabina y a su posterior división entre los niveles de bandejas, tal que el fluido tenga la velocidad deseada (Etapa de Calibración).

Por otro lado, se ha seleccionado un sensor de temperatura RTD (Ni1000SOT), el cual tiene una sensibilidad de 3178 ppm/K (ppm: partes por millón) y un rango de operación entre -55 a 160 °C; y un sensor de humedad HIH-6130 cuyo rango de operación oscila entre $0 - 50$ °C con resolución de 0.025.

4.5.- DISEÑO ELECTRÓNICO

Los diferentes sensores se sitúan estratégicamente de acuerdo a la siguiente distribución, tal que las muestras de temperatura no se vean afectadas por perturbaciones producto de las pérdidas de las máquinas.

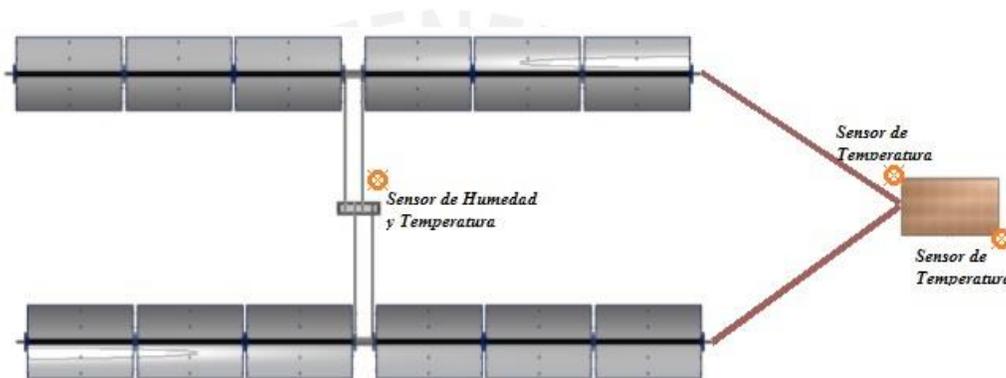


Figura 4.8.- Distribución de sensores

Dada la distancia entre los sensores y el controlador, el cual se situará debajo de la cabina, se infiere que una conexión directa conllevaría muchas pérdidas de información, por ello se ha decidido utilizar un controlador auxiliar (Atmega 8), el cual se encargue de sensar y luego transmitir la información al controlador principal mediante comunicación serial.

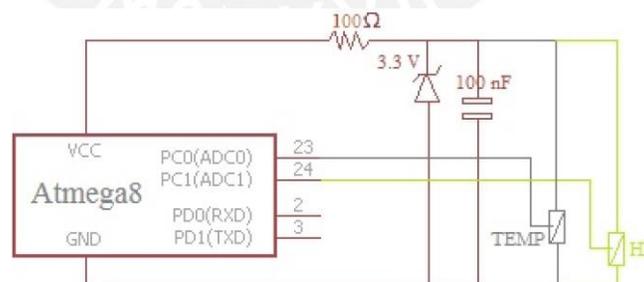


Figura 4.9.- Esquemático de sensores

De esta forma se garantiza que no haya pérdida significativa de información (ver anexo P).

4.6.- CONTROL DEL PROCESO

El control del proceso es la parte que asegurará el correcto funcionamiento de la máquina y se divide en la estrategia de control y el algoritmo del programa.

4.6.1.- ESTRATEGIA DE CONTROL

Como se ha explicado con anterioridad en el capítulo 2 (estado del arte), existen diferentes factores que afectan el paso de la radiación solar:

- La concentración de nubes: facto climático y aleatorio por su movimiento.
- Densidad de las nubes: factor climático y temporada.
- Movimiento de la tierra con respecto al sol: factor predecible, gracias al seguimiento solar.

Factores que pueden ser vistos como perturbaciones en la etapa de concentración de calor.

La estrategia de control, en primera instancia, dado que se desea controlar la temperatura al interior de la cabina, hará uso de un control por realimentación negativa (feedback), el cual se encarga de realizar las correcciones para mantener la temperatura dentro del rango deseado ($\pm 5^\circ \text{C}$). (Ver anexo O)

Pero, también, es necesario un control en cascada, el cual se encargue de controlar las variables secundarias del proceso: posición del concentrador solar y radiación real incidente, para reducir el efecto de las perturbaciones “internas” del proceso.

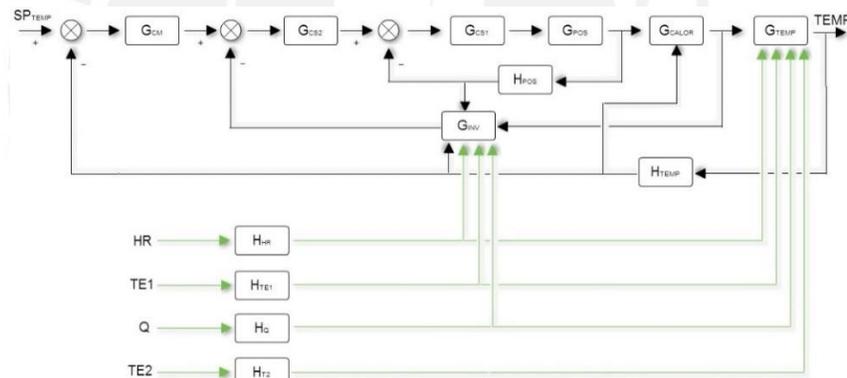


Figura 4.10.- Diagrama de bloque de control

4.6.2.- LÓGICA DEL PROGRAMA

La lógica del programa se divide en los siguientes procesos o tareas:

- Calibración inicial: Encargada de estimar la radiación del día para brindar al usuario el rango de temperaturas de trabajo (en las que se asegura que se podrá mantener constante la temperatura al interior de la cabina).
- Selección: El usuario podrá seleccionar el tipo de fruta a deshidratar, la cantidad y la temperatura de trabajo.
- Sensado: Etapa de sensado de las variables del proceso.
- Control del proceso: Etapa que se encarga de estimar la radiación futura, calcular la radiación real, controlar los actuadores y ejecutar la estrategia de control deseada.
- Gestor de usuario: Permite al usuario la capacidad de cancelar el proceso.

CAPITULO 5.- ESTIMADO DE COSTOS

La estimación de los costos de diseño se presenta en el siguiente cuadro. (Para mayor detalle ver anexo R)

Tabla 5.1.- Costo de materiales

<i>Costos Mecánicos</i>		<i>Costos Electrónicos</i>	
<i>Producto</i>	<i>Precio Total (S/.)</i>	<i>Producto</i>	<i>Precio Total (S/.)</i>
Plancha de acero 1.5 m x 3 m x 2 mm	50.00	Resistencia 330 Ω	1.10
Plancha de acero 1 m x 3 m x 1 mm	25.00	Resistencia 100 Ω	0.30
Plancha de aluminio 1.2 m x 3 m x 0.5 mm	600.00	Condensador 100 nF	1.50
Plancha de aluminio 1.2 m x 3 m x 2 mm	50.00	Diodo Zener 1N5226B	4.50
Plancha de teflón de 1.7 m x 1 m x 0.5 mm	125.00	Displays 7 Segmentos	12.00
Fibra de madera de 1.5 m x 2.45 m x 4 mm	107.70	Potenciómetro 50 k Ω	3.00
Vigas de pino de 41mm x 41 mm x 2.4 m	360.00	Selector	1.50
Rodamiento UCP202	1,636.80	Pulsador	0.80
Tubo cuadrado de aluminio 25 mm x 2.4 m (e = 2 mm)	1,700.00	Leds	1.00
Tubo cuadrado de aluminio 50 mm x 2.4 m (e = 2 mm)	1,600.00	Optotriac MOC-3010M	4.86
Tubo redondo de aluminio 15 cm x 3 m (e = 1 mm)	500.00	Motor PD86-1180 + Driver TMCM-1180	2,269.10
Tubo redondo de vidrio de 25 cm x 3 m (e = 5 mm)	2,500.00	Decodificador 74LS247	1.00
Tubo flexible VENAIR 15 cm x 10 m	500.00	Demultiplexor NS74ALS156	1.00
Guía cremallera 66.8 cm x 3.2 cm x 1 mm (8 orificios de 35 mm)	80.00	Bornera de 2	8.00
Bandejas de acero inoxidable de 40 cm x 60 cm x 0.8 mm	576.00	Transformador 24V - 1092A017	100.54
Bisagra estrecha 30 mm x 25 mm	12.00	Transformador 12V - 640212	60.00
	10,372.50	Atmega 8	40.00
		Arduino 1	150.00
		Ni1000SOT	23.13
		HIH-6130	22.42
		SAV-125/H	1,381.86
			4,087.61

Luego de añadir los 4, 000 nuevos soles de costo de diseño conceptual (precio a pagar al tesista) más el costo de mano de obra asociado al ensamble y preparación de las piezas (8, 720.00 nuevos soles) al costo de materiales, el costo final de la máquina es de 27,180.11 nuevos soles.

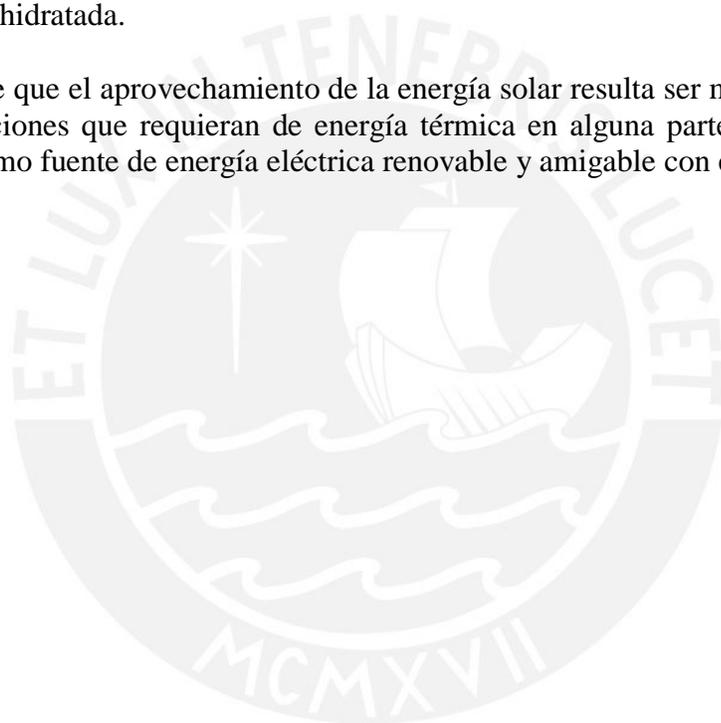
CONCLUSIONES

Se logró que el consumo energético de la máquina (280 W) este dentro de los parámetros deseados.

Gracias a la estrategia de control y la lógica de programación se logró diseñar una máquina automática que no requiera de la asistencia perenne de un operario durante todo el proceso de deshidratado.

La capacidad de producción mensual de 950 kg de piña o 1.87 toneladas de plátano, no solo presenta una considerable ventaja productiva con respecto a máquinas caseras, sino, también les permite a los productores competir en el creciente y competitivo sector agroexportador de fruta deshidratada.

Se concluye que el aprovechamiento de la energía solar resulta ser muy beneficioso no solo para operaciones que requieran de energía térmica en alguna parte de sus procesos, sino también como fuente de energía eléctrica renovable y amigable con el medio ambiente.



RECOMENDACIONES

Dado que las máquinas de deshidratación han sido diseñadas para operar bajo temperatura constante, no hay información sobre deshidratación para juegos de temperatura variable, por lo que se recomienda realizar investigaciones experimentales en este campo para así aprovechar los picos de radiación que se generan al mediodía y que la máquina, en la actualidad, rechaza.

Se sugiere anexar una etapa de generación eléctrica que sea capaz de alimentar el presente diseño, y por ende hacerla autosostenible.



CRÉDITOS DE FIGURAS

- Figura 1.1 extraída de <http://perfotec.com/es/produccion/>
- Figura 2.1 extraída de <http://farmaciaastrabudua.com/2014/05/04/radiacion-solar/>
- Figura 2.2 extraída de <http://www.icarito.cl/enciclopedia/articulo/primer-ciclo-basico/ciencias-naturales/tierra-y-universo/2009/12/26-4466-9-2-bienvenida-primavera.shtml>
- Figura 2.3 extraída de <http://energiaenlasociedadcmc.blogspot.com.es/2012/11/conviviendo-con-el-enemigo.html>
- Figura 2.4 extraída de <http://mimosa.pntic.mec.es/~jfreiye/Clima%20y%20Climas.htm>
- Figura 2.5 extraída de http://www.catalonia.org/cartografia/Clase_01/index_clase_01.html
- Figura 2.6 extraída de <http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6839/10Nvm10de17.pdf?sequence=11>
- Figura 2.7 extraída de <http://www.laenergiadelcambio.com/sol-de-invierno-y-la-energia-solar>
- Figura 2.8 extraída de <http://www.energiabase.cl/energiabase.html>
- Figura 2.9 realizada por el autor.
- Figura 2.10 extraída de http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11610.pdf
- Figura 2.11 extraída de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000100013
- Figura 2.12 extraída de <http://www.es.lowtechmagazine.com/2012/03/el-brillante-futuro-de-las-fabricas-alimentadas-con-energia-termosolar.html>
- Figura 2.13 extraída de <http://www.es.lowtechmagazine.com/2012/03/el-brillante-futuro-de-las-fabricas-alimentadas-con-energia-termosolar.html>
- Figura 2.14 extraída de “Operaciones de transferencia de masa”
- Figura 2.15 extraída de “Operaciones de transferencia de masa”
- Figura 2.16 extraída de “Operaciones de transferencia de masa”
- Figura 2.17 extraída de “Cinética de secado de *Musa paradisiaca* L. Plátano y *Manihot esculenta* Grantz Yuca”
- Figura 2.18 extraída de <http://www.greendehydrators.com/nesco-fd-60-snackmaster-express/>
- Figura 2.19 extraída de <http://www.greendehydrators.com/excalibur-3926tb/>
- Figura 2.20 extraída de <http://www.huayuan-tech.com/en/product/dryer/2015/06/332.html>
- Figura 2.21 extraída de <http://www.dryer.com/dehydrators/klamath.html>
- Figura 2.22 extraída de http://www.dryer.com/dehydrators/harvest_saver.html
- Figura 3.1 realizada por el autor.
- Figura 3.2 realizada por el autor.
- Figura 3.3 realizada por el autor.
- Figura 4.1 realizada por el autor.
- Figura 4.2 realizada por el autor.
- Figura 4.3 realizada por el autor.
- Figura 4.4 realizada por el autor.
- Figura 4.5 realizada por el autor.
- Figura 4.6 realizada por el autor.
- Figura 4.7 realizada por el autor.
- Figura 4.8 realizada por el autor.

Figura 4.9 realizada por el autor.
Figura 4.10 realizada por el autor.



CRÉDITOS DE TABLAS

Tabla 1.1 extraída de <http://www.froitasxeitosina.com/tienda>

Tabla 2.1 realizada por el autor.

Tabla 5.1 realizada por el autor.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ghezzi Solís Piero (2015), “En cinco años el Perú puede ser una potencia mundial en agro exportación”. Ministerio de la Producción.
<http://www.produce.gob.pe/index.php/prensa/noticias-del-sector/3767-piero-ghezzi-en-cinco-anos-el-peru-puede-ser-una-potencia-mundial-en-agroexportacion>
- [2] Julio Cárdenas Sánchez. “Crea tu empresa – frutas deshidratadas”. Ministerio de la Producción y Universidad del Pacífico. Ficha 18.
- [3] Froitas Xeitosiña S.L.U., <http://www.froitasxeitosina.com/tienda>
- [4] Zabalza Gustavo (2010). “Proyecto de Generación Energía con Disco Parabólico - Stirling”.
- [5] Bazán Díaz, Jorge (2009). “Diseño de Sistema Concentrador Solar Cilíndrico-Parabólico para proceso de deshidratación de alimentos”. Universidad de Piura – Área de Ingeniería Mecánico-Eléctrica.
- [6] Solartronic, S.A. de C.V (2003). “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, para la república mexicana”.
- [7] Varo Martínez, Marta (2006). “Modelización de la radiación ultravioleta solar”. Universidad de Córdoba – Escuela Politécnica Superior – Departamento de Física Aplicada.
- [8] Pujol Nadal, Ramón (2012). “Comportamiento Óptico y Térmico de un Concentrador Solar Lineal con Reflector Estacionario y Foco Móvil”. Universidad de les Illes Balears – Departamento de Física.
- [9] “Construcción de un Secador Solar de frutas y verduras: una experiencia ciudadana”. Grupo Ciudadano, Cuernavaca, Morelos, México, 2009.
- [10] S Tapia S y J.A. del Río P (2009). “Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica”. Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [11] Paredes Velasco, Carmen (2012). “Diseño de Captador Solar Cilíndrico Parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- [12] Erich Saettone O. (2012). “Diseño, Construcción y Utilización de un Concentrador Solar Tipo Fresnel Lineal para Desalinización”. XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XIX-SPES).

[13] Gamio Lora, Christian (2008). “Conservación de Alimentos Incas”. Enciclopedia temática del Perú.

<http://historiagastronomia.blogia.com/2008/122404-conservacion-de-alimentos-incas.php>

[14] Coultate TP (1996). “Food: the chemistry of its components”. Tercera edición, Cambridge, Royal Society of Chemistry.

[15] O. V. Ekechukwu y B. Norton (1999). “Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology”. Energy Research Centre, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria.

[16] Robert Treybal (1988). “Operaciones de Transferencia de Masa”, 2 da edición, editado por McGraw-Hill, México.

[17] Jorge Carranza y Manuel Sánchez (2002). “Cinética de Secado de *Musa paradisiaca* L. Plátano y *Manihot esculenta* Grantz Yuca”. Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la UNAP, Iquitos, Perú.

[18] GreenDehydrators.

<http://www.greendehydrators.com/nesco-fd-60-snackmaster-express/>

[19] Nanjing national prestige Electric Equipment Co., Ltd.

http://www.njguowei.com/eng/p_3414.html

[20] Commercial Dehydrator Systems, Inc. (CDS)

http://www.dryer.com/about_us.html

[21] Job Fiestas, Manuel Jiménez y Benito Lizárraga (2013). “Estudio experimental para el diseño y evaluación de un Secador de Bandejas Móvil”. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

[22] José Pérez (2010). “Modelos de curvas de deshidratado de plátano Roatán en verde (*musa acuminata*)”. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, Córdoba, España.

[23] Minh-Hue Nguyen y William Price (2007). “Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season”. Faculty of Science, Medicine and Health; University of Wollongong.

[24] S.E. Agarry, A.O. Ajani y M.O. Aremu. (2013) “Thin layer drying kinetics of pineapple: effect of blanching temperature – time combination”. Biochemical Engineering and Biotechnology Research Laboratory, Department of Chemical Engineering, Ladoke Akintola University of Technology, Ogbomoso, Nigeria.

[25] María Rodríguez. “Una revisión de las propiedades térmicas de los alimentos”.

[26] GAISMA.

<http://www.gaisma.com/en/location/piura.html>

[27] Código de prácticas de higiene para las frutas y hortalizas en conserva.
(CAC/CRP 2 -1969)

[28] Igor Gonzales Martin. “Connecting a Parallax GPS module to Arduino”

<http://playground.arduino.cc/Tutorials/GPS>

