

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN”**

Facultad de ciencias



TESIS

**“ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL
TUNEL DE SECADO PARA DESHIDRATAR ALIMENTOS FRUTALES EN LA
UNJFSC- HUACHO 2015”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

LICENCIADO(a) EN FÍSICA

AUTORA:

RUTH NOEMI MALVAS RAMÍREZ

ASESOR

Msc. Carlos Job Fiestas Urbina

HUACHO – PERÚ

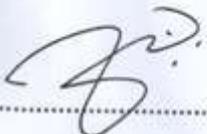
2015

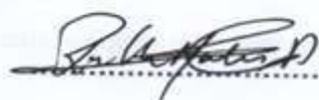
UNIVERSIDAD NACIONAL
“JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN”
Facultad de ciencias



TESIS

**“ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL
TUNEL DE SECADO PARA DESHIDRATAR ALIMENTOS FRUTALES EN LA
UNJFSC- HUACHO 2015”**


.....
MSc. Carlos Job Fiestas Urbina
Asesor


.....
Ruth Noemí Malvas Ramírez
Tesista

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios, quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ello soy lo que soy. A mis padres Santos y Cirila, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mis hermanas Angélica y Cristina por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar.

A todos mis amigos, profesores por confiar en mí y a Micher una persona especial en mi vida que me dio el aliento a pesar de no estar a mi lado.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Ruth

AGRADECIMIENTO

A la vida que me ha dado la fortaleza, confianza y seguridad para seguir en el duro camino que he enfrentado para alcanzar mis propósitos.

A mi familia que siempre está presente en las ideas y juegan un papel importante en la toma de mis decisiones, su apoyo es de suma importancia en el desarrollo de este proyecto.

A mi asesor Msc. Carlos Job Fiestas Urbina, gracias por su paciencia, dedicación, motivación y criterio que ha hecho fácil lo difícil culminar la presente tesis. Ha sido un privilegio poder contar con su guía y ayuda.

A mis jurados Ms. Eladio Cesar Gallardo Bazán, Mo. Jhonny Javier Albitres Infantes, Dr. Cristian Iván Escurra Estrada; por el interés, apoyo y crítica, necesarios para la realización de este proyecto. Un agradecimiento por este privilegio, por los comentarios y sugerencias a la presente tesis

A la UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN de manera especial a la facultad de Ciencias, por brindarme la oportunidad de obtener una profesión.

A mis profesores y amigos que siempre me apoyaron de una u otra manera y culminar con éxito mis estudios superiores.

Ruth

INDICE

Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento	iv
Índice.....	v
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Presentación.....	4
Introducción.....	5
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1. Descripción de la realidad problemática	6
1.2. Formulación del problema	6
1.2.1 Problema general.....	6
1.2.2 Problemas específicos	7
1.3. Objetivos del proyecto de tesis.	7
1.3.1 Objetivo General.....	7
1.3.2 Objetivo específico.....	7
1.4. Justificación	8
1.5 Delimitación del estudio... ..	8
1.6 Viabilidad del estudio.....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO... ..	9
2.1 Antecedentes de la investigación.....	9
2.1.1 Antecedentes relacionados con el estudio.....	9
2.2 Bases teóricas.....	11
2.2.1 Mezcla de gases perfectos.....	11

2.2.1.1	Propiedades de las mezclas de los gases perfectos...	8
2.2.1.2	Ley de los gases para mezclas de gases perfectos.....	10
2.2.1.3	Calor específico a volumen constante de la mezcla... ..	12
2.2.1.4	Calor específico a presión constante de la mezcla... ..	13
2.2.2	Humedad atmosférica	16
2.2.2.1	Humedad Atmosférica Relativa	17
2.2.2.2	Humedad Absoluta	18
2.2.2.3	Temperatura de rocío	19
2.2.3	PSICROMETRIA	21
2.2.3.1	TERMINOLOGIA	21
2.2.4	MODELOS DE SECADO DE SOLIDOS EN BANDEJAS	28
2.2.4.1	Definiciones.....	28
2.2.5	APLICACIONES DE LA PSICROMETRIA A LA DESECACION	39
2.2.6	PERIODO DE DESECACION... ..	41
2.2.7	PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE	44
2.2.8	PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE	46
2.2.9	DIFUSION DE LIQUIDOS	46
2.2.10	TEORIA CAPILAR.....	47
2.2.11	ECUACIONES APROXIMADAS PARA PERIODOS DE VELOCIDAD DECRECIENTE	47
2.3	CONCEPTOS FÍSICOS Y TECNOLÓGICOS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	49
2.3.1	DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE SECADO.....	49

2.3.1.1	INTRODUCCIÓN.....	49
2.3.1.2	SISTEMA DE IMPULSIÓN DE AIRE.....	51
2.3.1.3	SISTEMA DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE.....	52
2.3.1.4	SISTEMA DE CALEFACCION.....	54
2.3.1.5	TUNEL DE SECADO.....	55
2.3.1.6	Evaluación del secador de productos agrícolas.....	56
2.4	Definición de términos básicos.....	57
2.4.1	Términos físicos.....	57
2.5	FORMULACIÓN DE LAS HIPÓTESIS.....	60
2.5.1	HIPÓTESIS GENERAL.....	60
2.5.2	HIPOTESIS ESPECÍFICAS.....	60
2.6	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	61
2.6.1	Sistema de variables.....	61
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		61
3.1	Diseño de la investigación.....	61
3.1.1	Tipo de diseño de investigación.....	61
3.1.1.1	Forma.....	61
3.2	Población y Muestra.....	61
3.2.1	Población.....	61
3.2.2	Muestra.....	61
3.3	Técnicas de recolección de datos.....	61
3.4	Técnicas para el procedimiento de investigación.....	61
3.5	Resultados, tablas y gráficos.....	63
ANEXOS.....		71
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		89

4.1	CONCLUSIONES	82
4.2	SUGERENCIAS.....	82
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	90

RESUMEN

En el presente trabajo la decisión de diseñar un sistema de deshidratación de frutas como la uva, tuvo como **objetivo**: desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño del túnel de secado para diferentes condiciones de operación, entonces el deshidratado se convierte en un factor importante para conservarlas el mayor tiempo posible que puede ser usado por pequeños productores para mejorar su productividad y participación en el mercado nacional.

El **método** del diseño de investigación usado es cuasi experimental y tipo de diseño experimental fue pre experimental para deshidratar uvas en el túnel de secado.

Los datos de secado de la uva son obtenidos mediante pruebas realizadas en el laboratorio de física y bajo diferentes condiciones.

Se realizaron todos los cálculos necesarios, desde la selección del producto, intercambiador de calor, selección de ventilador, que permitan a ser posible el secado del producto con la calidad necesaria para competir con los productos existentes en el mercado. Se obtuvo como **resultado**: se estimó la temperatura y la humedad de aire antes de la etapa de calefacción; en la salida de aire de la etapa de calefacción Anexo 4; se halló la velocidad de secado en la fase creciente y decreciente, luego se obtuvo la gráfica de la velocidad en dos fases; se pudo obtener el coeficiente total de transmisión de calor $H_t = 750.43 \text{ (J/ h cm}^2 \text{ °C)}$ y por ultimo encontramos la difusividad: $D_t = 0.06993 \text{ (cm}^2 \text{/h)}$

Llegando a **conclusión**: que si se puede lograr desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño de un túnel de secado para diferentes condiciones de operación.

Palabras claves: Deshidratación, Algoritmos de Cálculos, temperatura, velocidad, difusividad, transmisión de calor.

ABSTRACT

In the present work, the decision to design a dehydration system for fruits such as grapes, had as its **objective**: to develop calculation algorithms that allow evaluating the performance of the drying tunnel for different operating conditions, then dehydration becomes an important factor. to keep them as long as possible that can be used by small producers to improve their productivity and participation in the national market.

The **method**: the research design used is quasi-experimental and the type of experimental design was pre-experimental to dehydrate grapes in the drying tunnel.

Grape drying data are obtained through tests carried out in the physics laboratory and under different conditions.

All the necessary calculations will be carried out, from the selection of the product, heat exchanger, selection of the fan, which will allow the drying of the product with the necessary quality to compete with the existing products on the market. The following **results** were obtained the temperature and humidity of the air before the heating stage were estimated; at the air outlet of the heating stage Annex 4; the drying speed in the increasing and decreasing phase was found, then the graph of the speed in two phases was obtained; it was possible to obtain the total heat transmission coefficient $H_t = 750.43 \text{ (J/ h cm}^2 \text{ °C)}$ and finally we found the diffusivity: $D_t = 0.06993 \text{ (cm}^2 \text{ /h)}$

Concluding: that if it is possible to develop calculation algorithms that allow evaluating the performance of a drying tunnel for different operating conditions.

Keywords: Dehydration, Calculation Algorithms, temperature, velocity, diffusivity, heat transmission.

PRESENTACIÓN

La deshidratación o secado puede describirse como un método de conservación industrial que se utiliza para reducir el contenido o actividad de agua de los alimentos por contacto con aire caliente, con la finalidad de minimizar su deterioro bioquímico, químico o microbiológico. Aunque el principal objetivo de la deshidratación o secado de los productos alimenticios es la reducción de su contenido de humedad a un nivel que permita su conservación segura durante largos periodos de almacenamiento, otras de las grandes ventajas del empleo de dicha tecnología es la gran funcionalidad de los productos generados mediante su aplicación, además de minimizar los requerimientos de empaque y los costos de transportación.

En la presente investigación se revisarán las temáticas relativas a los fundamentos, métodos, equipos y aplicaciones de la deshidratación de alimentos, con el propósito de desarrollar algoritmos de cálculo que permitan generar una visión general de dicha tecnología y evaluar su potencialidad en la conservación de alimentos, así como el desarrollo de nuevos productos.

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos es la conservación de la fruta, entonces el deshidratado se convierte en un factor importante para conservarlas el mayor tiempo posible, por lo tanto la primera parte de este proyecto consistirá en obtener los parámetros de proceso de forma experimental usando un secador de bandejas que servirá para obtener dichos resultados. Este proyecto se enfoca al deshidratado de frutas que es muy usada en nuestro medio con diferentes fines.

Se utilizará distintas metodologías del cual se obtendrá la humedad luego se obtendrá las curvas de la velocidad del secado.

Los instrumentos aplicados al campo muestral fueron:

En el Capítulo I: En efecto presentamos el planteamiento del problema, identificación, determinación, formulación del problema, asimismo los objetivos de la investigación general y específica, luego la justificación de la investigación.

En el Capítulo II: Ofrecemos un nutrido Marco Teórico, soporte de la investigación, se estudian con cierto detenimiento. Contenido de humedad en la entrada y salida del túnel, temperaturas en la entrada y salida, velocidad de flujo de aire, humedades en la entrada y salida, tiempo de paso por el secador.

En el Capítulo III: Describimos de manera sintética pero contundente sobre metodología de la investigación, tipo y enfoque, describimos el diseño y construcción del equipo la toma de datos y la Operacionalización de las variables.

En el Capítulo IV: Se describe los instrumentos aplicados, su correspondiente validación y confiabilidad, análisis y discusión de resultados, finalmente presentamos las conclusiones que arribamos, así como nuestras sugerencias; al respecto; con el simple propósito no sólo de aportar y coadyuvar al mejoramiento en la formación académica en el marco de competencia de los alumnos de la escuela de Física de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión- Huacho.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Existen diversidad de productos frutales como la uva, la manzana, plátano, higo e algunas hojas como el orégano que pueden deshidratarse con el fin de conservarlos más tiempo.

Se han intentado soluciones previas en nuestro laboratorio de física; como el secado solar, la cual es efectiva pero solamente es viable en algunas regiones dependiendo al clima.

Como un complemento estamos diseñando un túnel de secado para alimentos frutales y otros cuya energía de calefacción proviene de la energía eléctrica para calentar el aire y bajándole su humedad. Luego a través de un ventilador se impulsa el aire a través de los alimentos para extraer su humedad. Los alimentos estarán colocados en bandejas a lo largo del túnel de secado.

En un primera etapa se ha construido un túnel de secado y se le esta perfeccionando para aumentar su eficiencia.

Como una de la mejora que se está organizando se ha propuesto el estudio de algoritmos de cálculo que permitan evaluar el funcionamiento y operación de este túnel de secado en sus diferentes etapas del funcionamiento.

1.2. **Formulación del problema.**

1.2.1 **Problema general.**

¿En qué medida es factible desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño del túnel de secado para diferentes condiciones de operación?

1.2.2 Problemas específicos.

- a. ¿En qué medida será posible estimar el gasto de aire, expresado en kg/s que ingresa al tubo de secado en condiciones del ambiente circundante impulsado por el ventilador?
- b. ¿En qué medida será posible estimar la temperatura y humedad del aire antes de la etapa de calefacción?
- c. ¿En qué medida será posible estimar la temperatura y la humedad del aire de salida de la etapa de calefacción?
- d. ¿En qué medida será posible estimar el desempeño del flujo del aire en el interior del túnel de secado para unas muestras de alimentos de frutas ubicadas en las bandejas en el interior del túnel de secado?
- e. ¿En qué medida será posible estimar la cantidad de agua que han perdido los alimentos en el interior del túnel de secado?

1.3. Objetivos del proyecto de tesis

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño del túnel de secado para diferentes condiciones de operación.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Estimar el gasto de aire, expresado en kg/s que ingresa al tubo de secado en condiciones del ambiente circundante impulsado por el ventilador.
- b) Estimar la temperatura y humedad del aire antes de la etapa de calefacción.

- c) Estimar la temperatura y la humedad del aire de salida de la etapa de calefacción.
- d) Estimar el desempeño del flujo del aire en el interior del túnel de secado para unas muestras de alimentos de frutas ubicadas en las bandejas en el interior del túnel de secado.
- e) Estimar la cantidad de agua que han perdido los alimentos en el interior del túnel de secado.

1.4. Justificación.

Con el desarrollo de los algoritmos de cálculo se pudo aplicar el túnel de secado para la deshidratación de alimentos frutales, estimando el tiempo de deshidratación necesario para extraer la humedad requerida de los alimentos.

1.5. Delimitación del estudio

El estudio se realizó en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión-Huacho.

1.6 Viabilidad del estudio

Es viable porque Es viable porque ya está desarrollado una parte del sistema, es necesario mejorar algunos aspectos tecnológicos e implementar lo algoritmos de cálculo para evaluar el desempeño del sistema que es el motivo de la presente tesis.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes relacionados con el estudio

Busso, A., Aeberhard, A., Figueredo, G. y Martina, P., & Cocca, V. (1994), *Optimización de un secadero solar por convección natural: análisis del colector solar de aire*. Argentina.

Resumen:

Se presenta la modelización del colector solar de aire de un secadero de madera mediante el uso del formalismo matemático válido para colectores planos. Se comparan temperaturas predichas por el modelo con resultados experimentales obtenidos bajo diferentes condiciones de trabajo del sistema. Se interpretan las causantes físicas de los rasgos presentados por los perfiles de temperatura experimentales y, en base a esta, se aplican factores de corrección al modelo teórico mejorando la precisión en las predicciones.

Pontin, M. y Morsetto, J. & Barral, J. (2004). *Aplicación del índice Capacidad evaporativa” para evaluar el comportamiento de un sistema de secado integrado por un colector solar y una cabina de secado*.

Resumen:

El presente trabajo recopila la información, experiencias y conclusiones que permiten formar la base técnica y teórica para la optimización de la geometría de un secador de plantas aromáticas dividido por bandejas. La optimización fue realizada con base en un modelo matemático del secador y las mediciones experimentales obtenidas en un secador industrial. Se planteó el sistema de ecuaciones diferenciales necesarias para modelar el fenómeno de secado en el equipo, estas ecuaciones fueron resueltas usando el software libre OpenFOAMR y los resultados fueron validados con las medidas experimentales realizadas en

el secador. Un modelo simplificado del flujo del aire a través del secador, fue usado para la optimización de la geometría.

Alvarado, I. & Walkiria, L. (2011). *Diseño del sistema de control difuso de una máquina secadora de café que emplea energía solar* (Doctoral dissertation).

Resumen.

Abstract this project shows the development of a diffused control system for the desired temperature and humidity conditions of the air used for drying coffee. The system allows the input and output of air into the heating chamber. By using a parabolic cylindrical solar collector, which converges into the chamber, the air is heated up until it reaches temperatures above 160°C, guaranteeing that the air that comes out has a temperature between 60°C and 65°C and a relative humidity of 12%, conditions that are ideal for a good drying process of the product. The integration of the system is carried out by the LabVIEW Software. Through an acquisition data card the communication between the sensors that monitor the behavior of the variables (temperature, pressure and humidity) and the algorithm of the control applied for starting the valves that let the input and output of the air takes place. The design of the control system for the coffee drying machine was used as an alternative taking into account that this drying process is a complex system where lots of variables are involved. In addition it was necessary to consider the easiness and flexibility that are typical of the diffused control system in comparison with other control systems. The results obtained depict that the air reached the adequate conditions to be used in the coffee drying process, proving that the algorithm used for diffused logic responds to the dynamics of the process whose parameters are adjustable to the required conditions by the system.

Haro, A., & Llosas, Y. (2013). *Modelo matemático de un colector solar bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba.*

Resumen:

Presentamos el diseño de un modelo matemático de colector solar bajo condiciones físicas y meteorológicas típicas de la ciudad de Riobamba, para uso en secadores solares de convección natural o forzada el cual se lo adapta a las condiciones particulares de altitud respecto al nivel del mar, posición geográfica y condiciones meteorológicas, el colector solar diseñado es un colector indirecto de convección natural usando cálculos termodinámicos y de transferencia de calor basados en las variables meteorológicas como: velocidad del viento, irradiación solar, flujos térmicos, latitud, humedad y temperatura del aire de la zona; mediante el uso de un colector solar de placa plana, tomando en cuenta el calor absorbido, el calor útil, y las pérdidas en la parte superior e inferior del colector solar, para lo cual se emplea las ecuaciones de transferencia de calor y se realiza el balance de energía que permite simular el comportamiento del aire dentro del colector, se ejecuta el cálculo teórico de la eficiencia del colector solar, determinándose el área de captación óptima y el área de paso (flujo de aire), con lo cual se puede optimizar las dimensiones para el colector (largo, ancho y alto).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1 MEZCLA DE GASES PERFECTOS

2.2.1.1 Propiedades de las mezclas de gases perfectos

En muchas aplicaciones de la tecnología se emplean mezclas de diferentes gases. El aire es un ejemplo de dichas mezclas. Puesto que los gases componentes, considerados individualmente, se comportan con mucha aproximación como gases ideales es, pues, de mucha importancia estudiar las mezclas de gases perfectos y sus propiedades.

- **Presión:** Cada gas componente ejerce su propia presión, llamada presión parcial del gas particular. La ley de Dalton establece que en una mezcla de gases ideales, la presión de esta última es igual a la suma de las presiones parciales de los componentes. En la forma de ecuación se tiene.

$$P_m = P_a + P_b + P_c + \dots + P_n \dots \dots \dots (2-1)$$

Donde,

P_m : presión total de la mezcla de gases.

$P_a, P_b, P_c, \dots, P_n$: presiones parciales de los gases componentes de la mezcla.

- **Volumen:** La experiencia y los experimentos nos enseñan que, generalmente, en las mezclas de gases cada componente se comporta como si los otros gases no existieran, cada gas ocupa el volumen total de la mezcla a la temperatura de la misma. si V_m es el volumen de la mezcla entonces el volumen de los componentes es.

$$V_a = V_b = V_c = \dots \dots = V_m \dots \dots \dots (2-2)$$

- **Temperatura:** Si T_m es la temperatura de la mezcla, entonces la temperatura de los gases componentes es la misma que la de la mezcla.

$$T_a = T_b = T_c = \dots \dots = T_m \dots \dots \dots (2-3)$$

- **Masa, energía interna, entalpía, y entropía de la mezcla:** La masa (M_m), la energía interna (U_m), la entalpía (H_m) y la entropía (S_m) de la mezcla. Cada una por separado es igual a la suma de las propiedades de sus componentes gaseosos.

$$M_m = M_a + M_b + M_c + \dots + M_n \dots\dots\dots(2-4)$$

$$U_m = U_a + U_b + U_c + \dots + U_n \dots\dots\dots(2-5)$$

$$H_m = H_a + H_b + H_c + \dots + H_n \dots\dots\dots(2-6)$$

$$S_m = S_a + S_b + S_c + \dots + S_n \dots\dots\dots(2-7)$$

2.2.1.2 Ley de los gases para mezclas de gases perfectos.

Considérense los componentes como gases perfectos; las presiones parciales en la mezcla de los gases a, b y c pueden calcularse mediante las expresiones siguientes.

$$P_a = \frac{M_a R_a T_a}{V_a} \dots\dots\dots(2-8)$$

$$P_b = \frac{M_b R_b T_b}{V_b} \dots\dots\dots(2-9)$$

$$P_c = \frac{M_c R_c T_c}{V_c} \dots\dots\dots(2-10)$$

Por lo tanto, sabiendo que la presión de la mezcla es igual a la suma de las presiones de su componente, obtenemos.

$$P_m = \frac{M_a R_a T_a}{V_a} + \frac{M_b R_b T_b}{V_b} + \frac{M_c R_c T_c}{V_c}$$

A partir de que, el volumen y la temperatura de la mezcla es igual al volumen y la temperatura de su componentes, la expresión anterior queda.

$$P_m = (M_a R_a + M_b R_b + M_c R_c) \frac{T_m}{V_m} \dots \dots \dots (2-11)$$

Y como la mezcla es un gas perfecto.

$$P_m = (M_m R_m) \frac{T_m}{V_m} \dots \dots \dots (2-12)$$

Donde,

$$R_m = \frac{(M_a R_a + M_b R_b + M_c R_c)}{M_m} \dots \dots \dots (2-13)$$

Que permite calcular la constante del gas para la mezcla.

2.2.1.3 Calor específico a volumen constante de la mezcla

De la expresiones.

$$Um = Ua + Ub + Uc + \dots + Un \dots\dots\dots(2-14)$$

$$U = M u \dots\dots\dots(2-15)$$

Obtenemos la expresión para la energía interna específica de la mezcla.

$$Um = Ma u_a + Mb u_b + Mc u_c \dots\dots\dots(2-16)$$

Diferenciando ambos miembros.

$$Mm du_m = Ma du_a + Mb du_b + Mc du_c \dots\dots\dots(2-17)$$

Para todo gas ideal un diferencial energía interna específica es igual calor específico a volumen constante por el diferencial de temperatura.

$$du = c_v dT \dots\dots\dots(2-18)$$

En consecuencia, (2-17) queda del modo siguiente;

$$Mm c_{vm} dT = Ma c_{va} dT + Mb c_{vb} dT + Mc c_{vc} dT$$

Resultando la expresión para el calor específico a volumen constante para la mezcla,

$$c_{vm} = \frac{Ma c_{va} + Mb c_{vb} + Mc c_{vc}}{Mm} \dots\dots\dots(2-19)$$

2.2.1.4 Calor específico a presión constante de la mezcla.

Utilizando la ecuación:

$$H_m = H_a + H_b + H_c \dots\dots\dots(2-20)$$

Diferenciando:

$$\begin{aligned} dH_m &= M_m c_{pm} dT = dH_a + dH_b + dH_c \\ &= M_a c_{pa} dT + M_b c_{pv} dT + M_c c_{pc} dT \dots\dots\dots(2-21) \end{aligned}$$

Resultando la expresión para el calor específico de la mezcla a presión constante:

$$c_{pm} = \frac{M_a c_{pa} + M_b c_{pv} + M_c c_{pc}}{M_m} \dots\dots\dots(2-22)$$

Con todas estas expresiones obtenidas previamente la mezcla de gases perfectos puede considerarse un único gas perfecto.

2.2.2 HUMEDAD ATMOSFÉRICA

Muy a menudo, la mezcla de gases contiene una o más sustancias en estado de vapor. Por vapor se entiende una sustancia que se encuentra próxima a su temperatura de saturación y todo enfriamiento de la mezcla puede producir su condensación o solidificación. Las propiedades de los vapores se determinan a partir de las tablas para vapor.

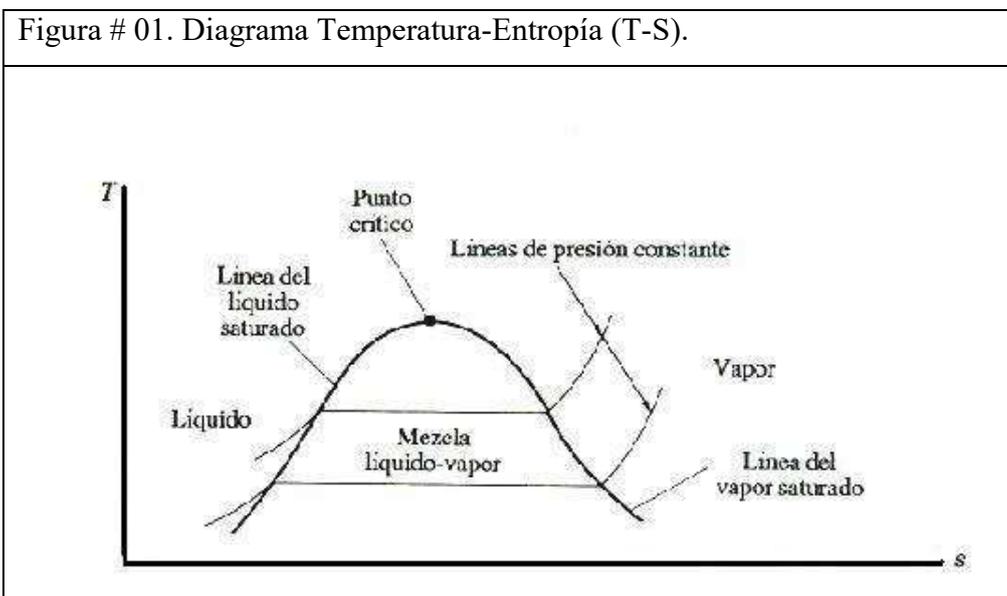
2.2.2.1 Humedad atmosférica relativa

El aire es el ejemplo más común de una mezcla de gases y vapor, el vapor es el vapor agua a baja presión, y los gases son principalmente el oxígeno y el nitrógeno. Se puede aceptar que el vapor es con bastante aproximación un gas perfecto. En consecuencia, también la mezcla puede considerarse como si fuese una mezcla de gases perfectos.

La humedad relativa representada con ϕ , se define como la relación entre la presión parcial de vapor de agua P_v , en el aire y la presión de saturación del vapor de agua P_s , en el aire a la temperatura de la mezcla. Por supuesto P_s es la presión del vapor de agua en el aire cuando este se encuentre saturado (contiene todo el vapor que es capaz de contener) a la temperatura de la mezcla. En forma de ecuación esto se expresa así:

$$\phi = \frac{P_v}{P_s} \dots\dots\dots (2-23)$$

Esta relación se muestra en el diagrama temperatura- entropía (T-S)



Considerando el vapor como un gas perfecto:

$$\phi = \frac{P_v}{P_s} = \frac{RT/V_v}{RT/V_s} = \frac{V_s}{V_v} \dots\dots\dots (2-24)$$

En resumen, el termino humedad relativa de la atmosfera se refiere al grado de saturación del aire con el vapor de agua.

Para saturar una mezcla de aire y vapor (es decir, hacer $\phi = 1$ cuyo humedad relativa inicial es menor que la unidad, es necesario evaporar agua en el aire, aumentando la presión parcial del vapor de agua hasta que sea igual a la presión de saturación a la temperatura de la mezcla. Por definición la humedad relativa se refiere a una relación de presiones.

2.2.2.2 Humedad Absoluta.

Otra magnitud de importancia en las mezclas de aire y vapor de agua es la humedad absoluta o relación de mezclas, cuyo símbolo es ω .

La humedad absoluta se define como la relación entre la masa de vapor de agua, M_v en el aire y la masa del aire seco M_{aire} , para un volumen dado de mezcla.

$$\omega = \frac{M_v}{M_{aire}} \dots\dots\dots (2-25)$$

Obsérvese que M_{aire} refiere únicamente a la masa de aire seco. Por lo tanto la masa de la mezcla es:

$$M_m = M_{aire} + M_v \dots\dots\dots(2-26)$$

El termino humedad absoluta puede aplicarse, también a la mezcla de todo otro gas y vapor; este término se refiere siempre a la relación entre la masa del vapor y la masa del gas sin contenido del vapor.

De acuerdo con la relación de estado de los gases ideales se puede indicar:

$$M_v = \frac{P_v V}{R_v T} \dots\dots\dots(2-27)$$

$$M_{aire} = \frac{P_{aire} V}{R_{aire} T} \dots\dots\dots(2-28)$$

Dividiendo miembro a miembro ambas expresiones obtenemos la humedad absoluta.

$$\omega = \left(\frac{P_v}{P_{aire}} \right) (R_{aire} / (R_v)) \dots\dots\dots (2-29)$$

Dado que $R_{aire} = 29.26$ (kgf m/kgm/k) y $R_v = 47.06$ (kgf m/kgm/k)

Se tiene que la humedad relativa es dada por la siguiente expresión:

$$\omega = \left(\frac{29.26 P_v}{47.06 P_{aire}} \right) = 0.622 \frac{P_v}{P_{aire}}$$

Esta expresión también se puede correlacionar con la humedad relativa dado que $P_v = \phi P_s$. Sustituyendo esta expresión en la anterior se obtiene;

$$\omega = 0.622 \phi \frac{P_s}{P_{aire}} \dots\dots\dots (2-30)$$

2.2.2.3 Temperatura de rocío

Otro termino común empleado al referirse a las mezclas de gas y vapor es la temperatura de rocío. La temperatura de rocío es la temperatura a la cual la mezcla de un gas y vapor es la temperatura de saturación correspondiente a la presión parcial del vapor de la mezcla, en otras palabras es la temperatura hasta la cual debe enfriarse la mezcla, a presión constante, para condensar el vapor. Enfriar la mezcla a presión

constante significa enfriar el vapor manteniendo constante su presión parcial.

Esto puede demostrarse del modo siguiente.

Puesto que la presión total P_m , es constante,

$$P_m = P_{aire} + P_v = Constante$$

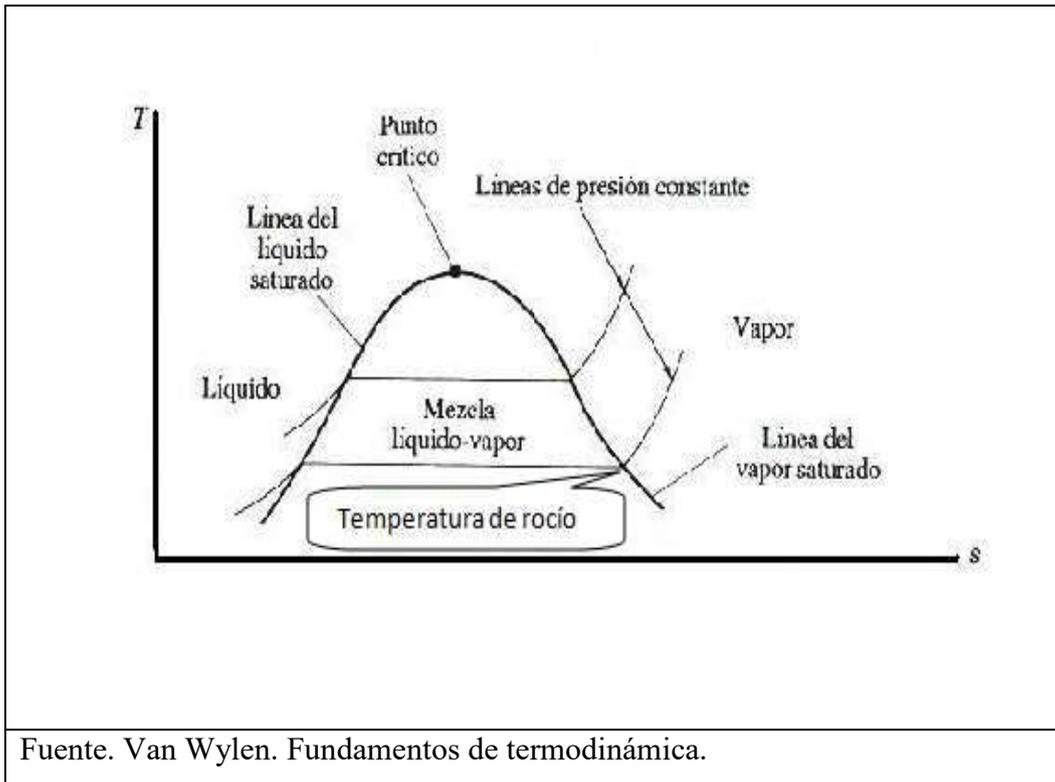
Pero para el aire,

$$P_{aire} = \frac{M_{aire} R_{aire} T_m}{V_M}$$

M_{aire} , R_{aire} y la relación T_m / V_m permanecen constante durante el proceso de enfriamiento; por lo tanto, P_{aire} es constante y como consecuencia directa P_v también debe ser constante.

Enfriar la mezcla manteniendo P_v constante significa que el vapor (en el estado sobrecalentado) se condensará cuando se alcance la temperatura de saturación correspondiente a P_v . Esta temperatura de saturación se conoce con el nombre de temperatura de rocío y se indica en la Figura # 02.

Figura # 02. Diagrama Temperatura-Entropía (T-S), Indicando La temperatura de rocío.



2.2.3 PSICROMETRÍA

Se ocupa de la determinación de las propiedades de las mezclas de un gas y un vapor. El sistema aire vapor de agua es, por mucho, el que se encuentra con mayor frecuencia.

2.2.3.1 TERMINOLOGÍA

- Humedad absoluta, (H): Es igual a las libras de vapor de agua transportadas por una libra de aire seco. Si se presupone un comportamiento de gas ideal.

Las masa del vapor de agua y aire seco son dadas por las expresiones siguientes

$$M_v = \left(\frac{P_{Mv}}{R}\right) \frac{V}{T} P_v \dots\dots\dots(2-31)$$

$$M_a = \left(\frac{P M_a}{R}\right) \frac{V P_a}{T} \dots\dots\dots(2-32)$$

Dividiendo (1) entre (2), obtenemos.

$$\frac{M_v}{M_a} = \left(\frac{P M_v}{P M_a}\right) \frac{P_v}{P_a} \dots\dots\dots(2-33)$$

Dado que la presión atmosférica P es dada por:

$$P = P_a + P_v \dots\dots\dots(2-34)$$

Despejando Pa de (4) y reemplazando en (3), y conociendo que PMv = 18(g/mol) y PMA = 28.9 (g/mol), obtenemos:

$$H = \frac{M_v}{M_a} = 0.6228374 \left(\frac{P_v}{P - P_v}\right) \dots\dots\dots(2-35)$$

- **Humedad relativa, (HR):** Se define como la razón de la presión parcial de vapor de agua en el aire a la presión de vapor saturado a la temperatura del ambiente.

$$HR = \frac{P_v}{P_{VS}(T)} \dots\dots\dots(2-36)$$

- **Punto de rocío o temperatura de saturación, (Tr):** Es la temperatura a la cual una mezcla dada de vapor de agua y aire se satura, es decir, la temperatura a la que el agua ejerce una presión de vapor saturado igual a la presión de vapor de agua en la mezcla dada.
- **Calor húmedo, (Cs):** es la capacidad calorífica de 1 (lb) de aire seco y la humedad que contiene. Para la mayoría de los cálculos de ingeniería.

$$C_s = C_a + C_v H \dots\dots\dots(2-37)$$

Donde,

Cs: calor húmedo, (BTU/Lb aire seco/°F).

Ca: calor específico del aire seco, 0.24 (BTU/Lb aire seco/°F).

Cv: calor específico del vapor de agua, 0.45 (BTU/Lb de vapor de agua/°F).

H: humedad absoluta del aire atmosférico, (Lb de vapor de agua/Lb de aire seco).

➤ **Volumen húmedo:** Es el volumen expresado en pies cúbicos ocupado por una libra de aire seco y el vapor de agua que contiene.

➤ **Volumen saturado:** Es el volumen húmedo cuando el aire está saturado.

➤ **Temperatura de bulbo húmedo:** Es la temperatura de equilibrio de equilibrio dinámico obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor por convección, a la misma, es igual que la velocidad de transferencia de masa que se aleja de tal superficie.

Estando en equilibrio y suponiendo un cambio despreciable en la temperatura de bulbo seco, el balance de calor en la superficie es:

$$K_g \lambda (P_s - P) = h_c (t - t_w) \dots\dots\dots(2-38)$$

Donde,

Kg: coeficiente de transferencia de masa, (Lb/h/p²/atm).

λ: calor latente de evaporación, (BTU/Lb de agua).

Ps: presión de vapor saturado del agua a la temperatura de bulbo húmedo, (atm).

P: presión parcial de vapor del agua del ambiente, (atm).

hc: coeficiente total de transferencia de calor, (BTU/h/p²/°F).

t: temperatura de la mezcla aire-vapor de agua, temperatura de bulbo seco, (°F).

tw: temperatura de bulbo húmedo, (°F).

En condiciones ordinarias, la presión parcial y la presión de vapor son pequeñas comparadas con la presión atmosférica total, y la ecuación de bulbo húmedo se puede escribir del modo siguiente.

$$H_s - H = \frac{hc}{\lambda K'} (t - tw) \dots\dots\dots (2-39)$$

$$K' = \left(\frac{PM_a}{PM_v} \right) Kg = 1.6 Kg \dots\dots\dots (2-40)$$

Donde,

Hs: humedad absoluta a la temperatura de bulbo húmedo, (Lb de vapor de agua/ Lb de aire seco).

H: humedad absoluta a la temperatura ambiente, (Lb vapor de agua/Lb de aire seco).

K': unidad de diferencia de humedad, (Lb vapor de agua/h/p²/unidad de diferencia de humedad).

λ: calor latente de evaporación del agua, 1051.6 (BTU/Lb de agua).

- **Temperatura de saturación adiabática o línea de entalpía constante:** Si una corriente de aire se mezcla perfectamente con una cantidad de agua a la temperatura ts, en un sistema adiabático, la temperatura del aire descenderá y su humedad aumentará. Si ts es tal que el aire que sale del sistema está en

equilibrio con el agua, t_s es la temperatura de saturación adiabática y la línea que relaciona la temperatura con la humedad del aire es la llamada línea de saturación adiabática. La ecuación de dicha línea es.

$$H_s - H = \frac{C_s}{\lambda}(t - t_w) \dots\dots\dots (2-41)$$

- **Relación entre la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de saturación:** Se ha demostrado experimentalmente que para sistemas de aire-agua, el valor del $hc/K'/C_s$ (razón psicrométrica) es aproximadamente igual a 1. En estas condiciones, las temperaturas de bulbo húmedo y de saturación adiabática son aproximadamente iguales y se usan de manera intercambiable.

Para el caso de flujos de aire que atraviesan cilindros, como el de un termómetro de bulbo húmedo, Bedingfield y Drew [Ind. Eng. Chem 42, 1164 (1950)] obtuvieron una correlación para sus datos en la sublimación de cilindros en aire, y para los datos de otros en termómetros de bulbo húmedo. En el caso de estos últimos, en aire, se obtuvo.

$$\frac{hc}{K'} = 0.294 \left(\frac{\mu}{\rho Dv} \right)^{0.56} \dots\dots\dots (2-42)$$

Donde,

$\mu/\rho Dv$: número de Schmith, adimensional, para el aire 0.60.

hc/K' : razón psicrométrica, (BTU (Lb agua/Lb aire seco)/Lb agua/°F).

Ejercicio 1:

Para un sistema aire-agua a presión atmosférica $P = 1$ (atm), los valores medidos de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo son $T = 85$ (°F) y $T_w = 72$ (°F). Determine.

a) La razón psicrométrica.

$$\frac{hc}{K} = 0.294 \left(\frac{\mu}{\rho Dv} \right)^{0.56} = 0.294 (0.60)^{0.56} = 0.220857 \left(\frac{BTU \left(\frac{Lb \text{ agua}}{Lb \text{ aire seco}} \right)}{(Lb \text{ de agua}) \text{ } ^\circ F} \right)$$

b) La temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo en (°C)

$$T(^{\circ}C) = \frac{5}{9} ({}^{\circ}F - 32)$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{5}{9} (85 - 32) = 29.4444 (^{\circ}C)$$

$$T_w(^{\circ}C) = \frac{5}{9} (72 - 32) = 22.22 (^{\circ}C)$$

c) La presión de vapor saturado del agua a la temperatura de bulbo húmedo.

$$PVS(T) = 0.6934515642(1.059586845)^{T(^{\circ}C)}$$

$$PVS(72) = 0.6934515642(1.059586845)^{22.22} = 2.5093 \text{ (KPa)}$$

$$PVS(72) = 2.5093 \text{ (KPa)} \left(\frac{1 \text{ atm}}{101.325 \text{ KPa}} \right) = 0.0247 \text{ (atm)}$$

d) La humedad absoluta a la temperatura de bulbo húmedo (sobre la superficie de evaporación).

$$H_s(T_w) = 0.6228374 \left(\frac{PVS(T_w)}{P - PVS(T_w)} \right)$$

$$H_s(T_w) = 0.6228374 \left(\frac{Lb\ agua}{Lb\ aire\ seco} \right) \left(\frac{0.0247\ (atm)}{(1 - 0.0247)(atm)} \right) = 0.015774 \left(\frac{Lb\ agua}{Lb\ aire\ seco} \right)$$

e) La humedad a la temperatura ambiente.

$$H = H_s - \frac{hc}{\lambda} (t - t_w)$$

$$H = 0.015774 \left(\frac{Lb\ agua}{Lb\ aire\ seco} \right) - \frac{0.220857 \left(\frac{BTU \left(\frac{Lb\ agua}{Lb\ aire\ seco} \right)}{(Lb\ agua)^\circ F} \right)}{1051.6 \left(\frac{BTU}{Lb\ agua} \right)} (85 - 72) (^\circ F)$$

$$H = 0.013044 \left(\frac{Lb\ agua}{Lb\ aire\ seco} \right)$$

f) El calor húmedo a la temperatura ambiente.

$$C_s = C_a + C_v H \dots\dots\dots(2-43)$$

$$C_s = 0.24 \left(\frac{BTU}{Lb\ aire\ seco} \right) + 0.45 \left(\frac{BTU}{Lb\ vapor\ de\ agua} \right) 0.013044 \left(\frac{Lb\ vapor\ de\ agua}{Lb\ aire\ seco} \right)$$

$$C_s = 0.24587 \left(\frac{BTU}{Lb\ aire\ seco} \right)$$

2.2.4 MODELOS DE SECADO DE SÓLIDOS EN BANDEJAS.

El lecho de sólidos en los equipos en que se establece contacto entre sólidos y un gas, existe en cualquiera de las cuatro condiciones siguientes:

1. Estático: Este es un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otras, esencialmente a la densidad de masa de sedimentación de la fase sólida. Dicho de otra manera, *no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas*. Figura # 03.

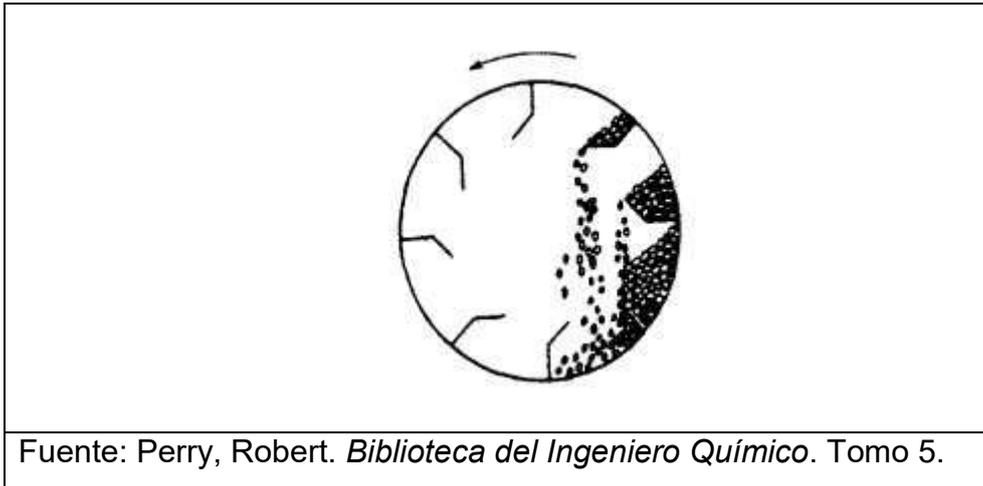
Figura # 03 Lecho de sólidos en condición estática (secador de bandeja).



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

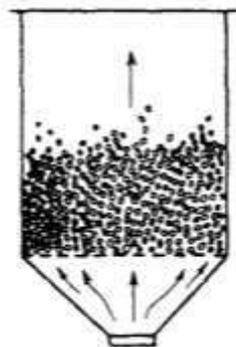
2. Móvil: Este es un tipo de lecho de sólidos un poco menos restringido en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras. Por lo común el flujo es descendente por acción de la fuerza de la gravedad; pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación, generadas dentro del equipo de proceso.

Figura # 04. Lecho de sólidos móviles dentro de un secador rotatorio con alzadores.



3. Fluidificado: Se trata de una condición menos restringida aun en la cual las partículas solidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por las fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad critica dada.

Figura # 05 Lecho de sólidos fluidificados.

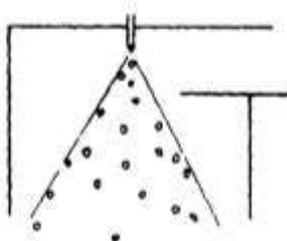


Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

4. Diluido: Esta es una condición irrestricta en la cual las partículas solidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas en otras. A decir verdad, la fase de los sólidos esta tan dispersa dentro

del gas, que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa en lo individual Figura # 06.

Figura # 06. Sólidos en condiciones diluidas cerca de la parte superior de un secador por aspersión.

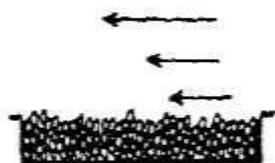


Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

5. Contacto gas-sólido: Los términos que se utiliza en esta sección para describir el método por el cual el gas entra en contacto con un lecho de sólidos se definen a continuación:

5.1 Flujo paralelo: La dirección del flujo de gas es paralelo a la superficie de la fase sólida. El contacto se registra primordialmente en la entrecara comprendida entre dos fases, en donde se produce quizá una leve penetración del gas en los vacíos comprendidos entre los sólidos cercanos a la superficie. El lecho de sólidos generalmente se encuentra en una condición estática Figura # 07.

Figura # 07. Flujo paralelo de gas sobre un lecho estático de sólidos.

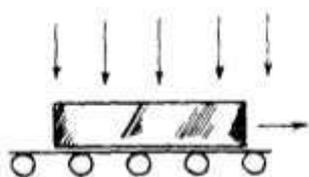


Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

5.2 Flujo perpendicular: La dirección de la corriente de gas es normal a la entrecara de la fase. El gas choca contra el lecho de sólidos y, también en este caso, dicho lecho se encuentra casi siempre en una condición estática.

Figura # 08.

Figura # 08. Gas circundante que choca contra un objeto solido de gran tamaño, siguiendo un flujo perpendicular, dentro de un horno de transportador de rodillos.



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

2.2.4.1 Definiciones

La desecación, el desecado o secado de sólidos, se refiere generalmente a la separación de un líquido, por evaporización.

1. Humedad latente en un sólido es el líquido que ejerce una presión de vapor inferior a la del líquido puro, a una temperatura dada. El líquido puede quedar ocluido por retención en capilares diminutos, por solución en celdas o paredes fibrosas, por solución homogénea a lo largo del sólido y por adsorción química o física en las superficies del sólido.
2. Flujo capilar es el paso de un líquido por los intersticios y sobre la superficie de un sólido provocado por la atracción molecular líquido-sólido.

3. Periodo de velocidad constante es el lapso de desecado durante el cual la velocidad de eliminación de agua por unidad de superficie desecada es constante o uniforme.
4. Contenido crítico de humedad es el contenido de humedad promedio cuando concluye el periodo de velocidad constante.
5. Base de peso: seco es la expresión del contenido de humedad de sólidos mojados en libras de agua por libra de sólidos completamente secos.
6. Contenido de humedad de equilibrio es la humedad limitante a la cual un material dado se puede desecar en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire.
7. Periodo de velocidad decreciente es un lapso de desecación durante el cual la velocidad instantánea de desecado disminuye en forma continua.
8. Punto de saturación de fibra es el contenido de humedad de materiales celulares (por ejemplo, la madera) a la cual las paredes celulares están completamente saturadas, en tanto que las cavidades carecen por completo de líquido. Se puede definir como el contenido de equilibrio de humedad conforme la humedad de la atmósfera circundante se acerca a la saturación.
9. Contenido de humedad libre es el líquido que se puede separar a una temperatura y humedad dadas. Este valor llega a incluir tanto la humedad ocluida como la no ocluida o retenida.

10. Estado funicular es aquella condición en la desecación de un cuerpo poroso en que la succión capilar hace que se absorba aire dentro de los poros.
11. Material higroscópico es aquel que puede contener humedad ocluida.
12. Distribución inicial de humedad se refiere a la distribución de humedad en todo un sólido al iniciarse el proceso de desecado.
13. Difusión interna se define como el movimiento del líquido o el vapor a través de un sólido, como resultado de una diferencia de concentración.
14. Contenido de humedad de un sólido, se expresa por lo común como la cantidad de humedad por unidad de peso de sólido seco o húmedo.
15. Gradiente de humedad se refiere a la distribución de agua dentro de un sólido en un momento determinado del proceso de desecación.
16. Material no higroscópico es aquel que no contiene ninguna humedad ocluida.
17. Estado pendular es el estado de un líquido dentro de un sólido poroso cuando ya no existe una película continua de líquido en torno a partículas discretas, y entre ellas, de modo que no se puede producir un flujo por capilaridad. Este estado sigue al funicular.

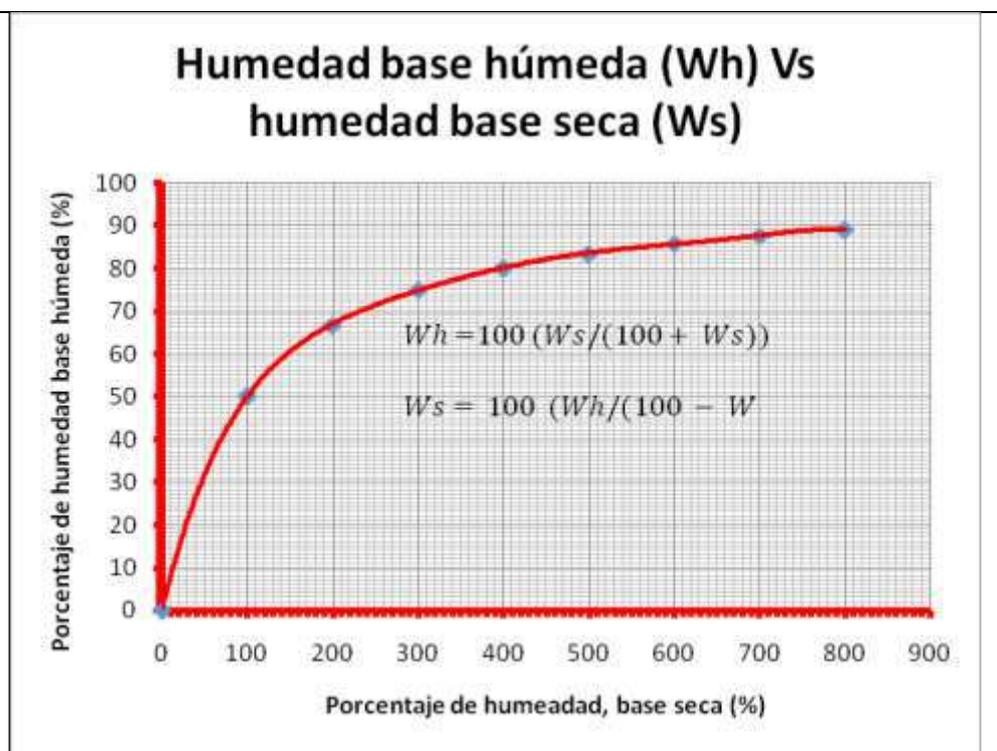
18. Cambio de humedad no realizado es la razón entre la humedad libre presente en cualquier instante dado y la que se encontraba inicialmente presente.
19. Humedad no ocluida en un material higroscópico es la humedad excesiva en relación con el contenido de equilibrio correspondiente a la humedad de saturación. Todo el contenido de agua de un material no higroscópico es agua no ocluida o retenida.
20. Base de peso húmedo es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido mojado. Se recomienda usar la base de peso seco, ya que la variación del porcentaje de humedad es constante para todos los niveles de la misma. Cuando se emplea la base de peso húmedo para expresar el contenido de humedad, un cambio de 2 o 3% a grandes contenidos de humedad (por encima del 70%) representa en realidad un cambio del 15 al 20 % en carga evaporativa. Véase la Figura # 09, en donde se ilustra la relación entre las bases de peso seco y húmedo.

Tabla # 01. Relación entre base húmeda y base seca.

Ws		Wh	
(fr)	(%)	(fr)	(%)
0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	100.00	0.50	50.00
2.00	200.00	0.67	66.67
3.00	300.00	0.75	75.00
4.00	400.00	0.80	80.00
5.00	500.00	0.83	83.33
6.00	600.00	0.86	85.71
7.00	700.00	0.88	87.50
8.00	800.00	0.89	88.89

Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

Figura # 09. Relación entre las bases de peso húmedo y peso seco.

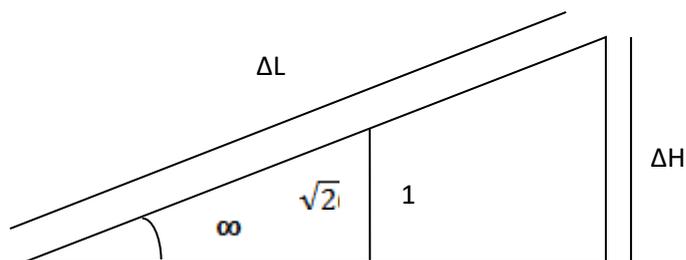
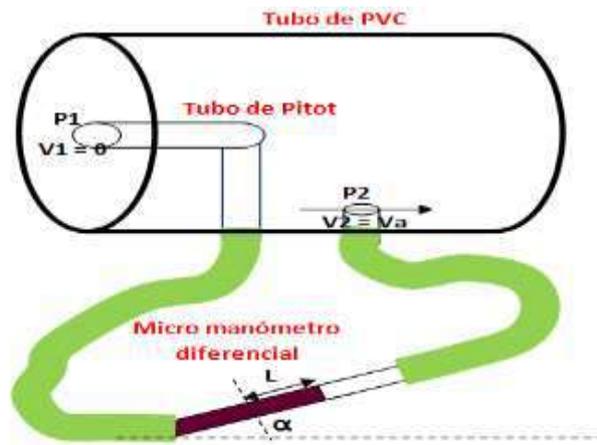


Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

CÁLCULO DEL FLUJO DE AIRE.

VELOCIDAD DE FLUJO (tubo de pitot).

en una operación de prueba sin carga del tunel de secado se evaluaron los siguientes parámetros:



_____ 5 _____

$$P_1 - P_2 = \rho_m g \Delta H$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_m g \Delta H}{\sqrt{2}}$$

$$\rho_m = 0.8072 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$\rho_m = 0.8072 \left(\frac{g}{cm^3} \right) \left(\frac{1Kg}{1000g} \right) \left(\frac{100cm}{1m} \right)^3$$

$$= 807.2 \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$g = 9.8 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

$$\Delta L = (35 - 31)(mm) \left(\frac{1m}{1000mm} \right) = 0.004(m)$$

Aplicamos la ecuación de Bernoulli en los puntos 1 y 2 (la aplicación del principio de conservación de la energía mecánica al flujo de fluidos).

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g Z_1 = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g Z_2$$

$$P_1 + P_2 = \frac{\rho_a V^2}{2} + P_a g(Z_1 - Z_2)$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) + 2\rho_a g(Z_1 - Z_2)}{\rho_a}}$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2\rho_m g \Delta L}{\sqrt{26}\rho_a}}$$

$$V = \sqrt{\frac{2\rho_m g \Delta L}{\sqrt{26}\rho_a}}, \quad \rho_a = \frac{\left(\frac{PM}{R}\right) P}{T}$$

La densidad de aire atmosférica

$$\rho_a = \frac{29 \left(\frac{g}{mol}\right) \times 738 \text{ (torr)} \left(\frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ torr}}\right)}{0.082 \left(\frac{\text{atm} \cdot L}{\text{mol} \cdot K}\right) (23.1 + 273.15) (K)}$$

$$\rho_a = 1.159 \left(\frac{g}{L}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1000g}\right) \left(\frac{1000L}{1m^3}\right) = 1.159 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

La velocidad del aire

$$V = \sqrt{\frac{2 \times 807.2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \times 9.8 \left(\frac{m}{s^2}\right) \times 0.004 (m)}{\sqrt{26} \times 1.159 \left(\frac{kg}{m^3}\right)}}$$

$$V = 3.27.24 \left(\frac{m}{s}\right)$$

Gasto de aire:

El gasto de aire,

$$G = \rho_a V_a$$

$$A = \frac{\pi \varphi^2}{4} \quad G = \frac{\pi \rho_a V_a \varphi^2}{4}$$

$$G = \frac{\pi \times 1.159 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \times 3.2724 \left(\frac{m}{s}\right) (0.16)^2}{4}$$

$$G = 0.076 \left(\frac{kg}{s}\right)$$

HUMEDAD ESPECÍFICA:

La humedad específica se calcula del modo siguiente:

$$w = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de aire seco}}$$

$$P_u V = \left(\frac{m_u}{PM_u} \right) RT$$

$$P_a V = \frac{m_a}{PM_a} RT$$

$$(P - P_u) = \frac{m_a}{PM_a} RT$$

$$\frac{P_u V}{(P - P_u)} = \frac{m_u \left(\frac{R}{PM_u} \right) T}{m_a \left(\frac{R}{PM_a} \right) T}$$

$$\frac{P_u}{P - P_u} = \left(\frac{m_u}{m_a} \right) \frac{PM_a}{PM_u}$$

$$\omega = \left(\frac{PM_u}{PM_a} \right) \frac{P_u}{P - P_u}$$

$$\omega = \frac{18 \left(\frac{g}{mol} \right)}{29 \left(\frac{g}{mol} \right)} \frac{P_u}{P - P_u}$$

$$\omega = 0.622 \left(\frac{P_u}{P - P_u} \right)$$

$$\omega = 0.622 \left(\frac{\varphi \times PV_S(T_a)}{P - \varphi \times PV_S(T_a)} \right)$$

$$PV_S(T) = 0.6934516 + 1.059586845 T^{(aC)}$$

$$r = 0.998$$

$$T_1 = 23.1 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \phi_1 = 80 \%$$

$$\phi_1 = \frac{PV_1 \times 100\%}{PV_S(T_a)}$$

La presión de vapor para el aire a la entrada del túnel

$$PV_1 = \phi_1 \times PV_S(T_a)$$

$$PV_1 = 80\% \times 0.6934516 + 1.059586845 (23.1)$$

$$\llbracket PV \rrbracket_{\downarrow S} (T_1 a) = 0.6934516 \text{ (kPa)} + \llbracket 1.059586845 \rrbracket^{\uparrow 23.1} = 4.5 \text{ KPa}$$

$$PV_1 = \frac{80\% \times 4.5 \text{ (kPa)}}{100 \%} = 3.6 \text{ (KPa)}$$

La humedad específica

$$\omega = 0.622 \left(\frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg aire seco}} \right) \times \frac{6.139 \text{ (kPa)}}{98.071 \text{ (kPa)} - 6.139 \text{ (kPa)}}$$
$$\omega = 0.0415 \left(\frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg aire seco}} \right)$$

2.2.5 APLICACIONES DE LA PSICROMETRÍA A LA DESECACIÓN:

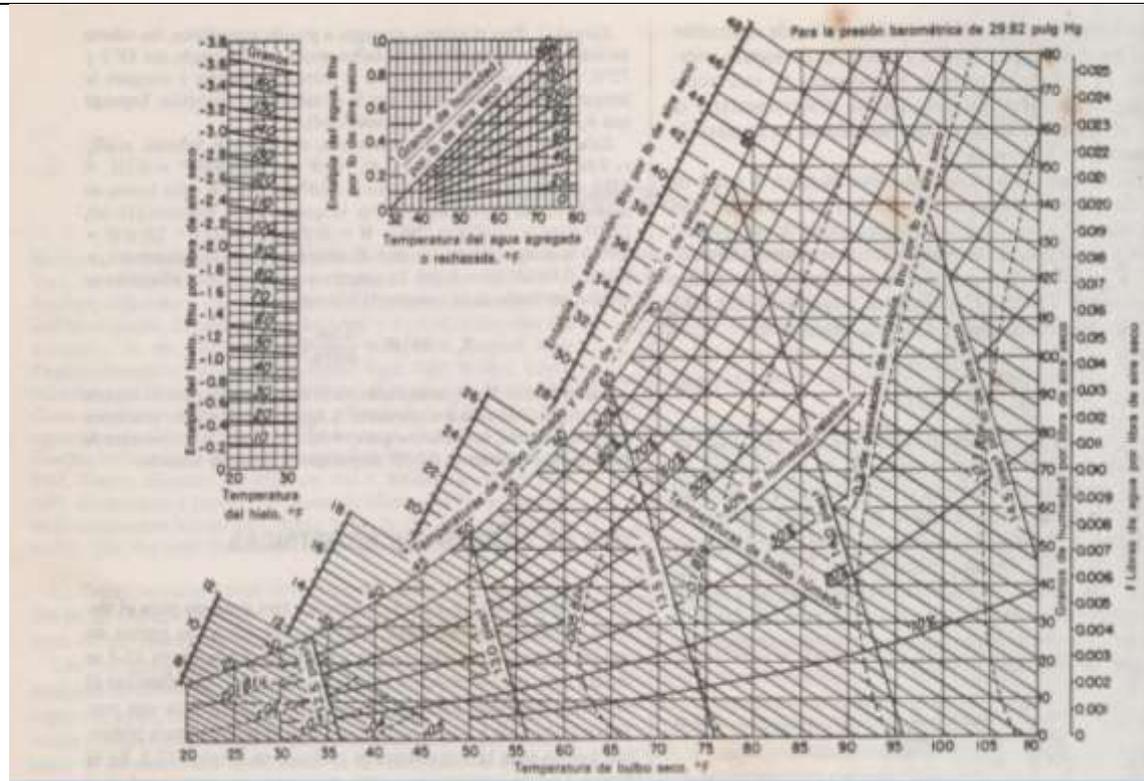
En cualquier proceso de desecado, suponiendo un suministro adecuado de calor, la temperatura y velocidad a las cuales se produce la vaporización del líquido dependen de la concentración de vapor en la atmósfera circundante. En el desecado al vacío u otros procesos que implican atmósferas con 100% de vapor, la temperatura de vaporización del líquido será igual o mayor que la temperatura de saturación del mismo, a la presión del sistema. (Cuando esta presente líquido libre o una superficie mojada, el desecado ocurre a la temperatura de saturación al igual que el agua que el agua libre a 14.7 lb/pulg² de presión absoluta se vaporiza en una atmósfera de vapor al 100%, a 212 °F).

Por otro lado, cuando el vapor desprendido se purga del medio del secador utilizando un segundo gas (inerte), la temperatura a la que se produce la vaporización dependerá de la concentración del vapor en el gas que lo rodea. En efecto, el líquido se debe calentar a una temperatura a la que su presión de vapor sea igual o exceda a la presión parcial de vapor en el gas de purga. En la situación opuesta se producirá una condensación.

En casi todas las operaciones de desecación, el agua es el líquido evaporado y el aire es el gas de purga que se emplea comúnmente. Para fines de desecación, se

ha encontrado una carta psicrométrica de gran utilidad la cual se reproduce en la Figura 10.

Figura # 10. Gráfica psicrométrica. Propiedades de mezclas de aire y vapor de agua.



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

Ejercicio 2:

Encuentre las propiedades de un aire húmedo cuando la temperatura del bulbo seco es 80 (°F) y la temperatura de bulbo seco húmedo es 67 (°F).

Nota: La solución se ilustra en la figura adjunta.

1. Contenido de humedad:

$$0.0112 \frac{\text{lb de agua}}{\text{lb de aire seco}}$$

$$79 \frac{g \text{ de agua}}{lb \text{ de aire seco}}$$

2. Entalpía de saturación:

$$25.2 \frac{BTU}{lb \text{ de aire seco}}$$

3. Desviación de entalpía:

$$-0.105 \frac{BTU}{lb \text{ de aire seco}}$$

4. Entalpía rectificada:

$$25.2 - 0.105 = 25.095 \frac{BTU}{lb \text{ de aire seco}}$$

5. Volumen específico:

$$13.83 \frac{pies^3}{lb \text{ de aire seco}}$$

6. Humedad Relativa:

50%

7. Punto de Condensación o rocío:

50.5 °F

2.2.6 PERIODO DE DESECACIÓN

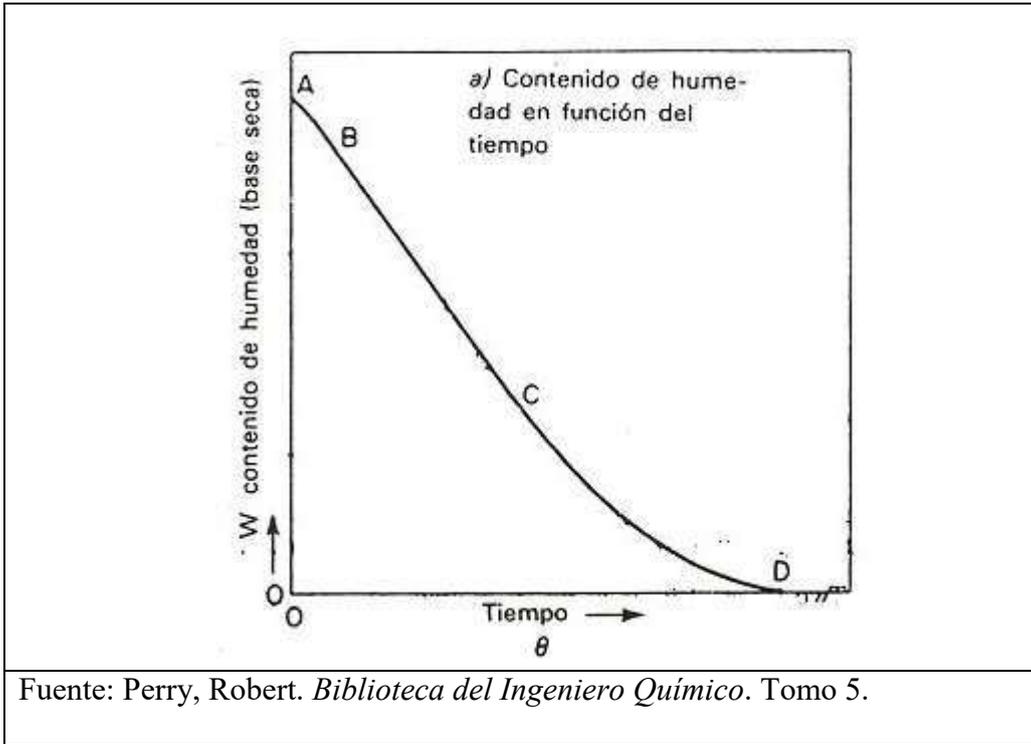
Cuando un sólido se deseca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. A continuación, estos datos se representan gráficamente como el contenido de humedad (base seca) W

en función del tiempo θ , como se ilustra en la Figura # 11. Esta curva representa el caso general en que los sólidos mojados pierden humedad primero por evaporación debido a una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un periodo de evaporación de la superficie saturada que tiene un área gradualmente decreciente y, por último, cuando el agua se evapora en el interior del sólido.

La sección BC de cada curva representa el periodo de velocidad constante. En la Figura # 11 se representa con una recta de pendiente constante $dw/d\theta$, que se convierte en una línea horizontal en las curvas de velocidad que aparecen en la Figura # 12 y 13.

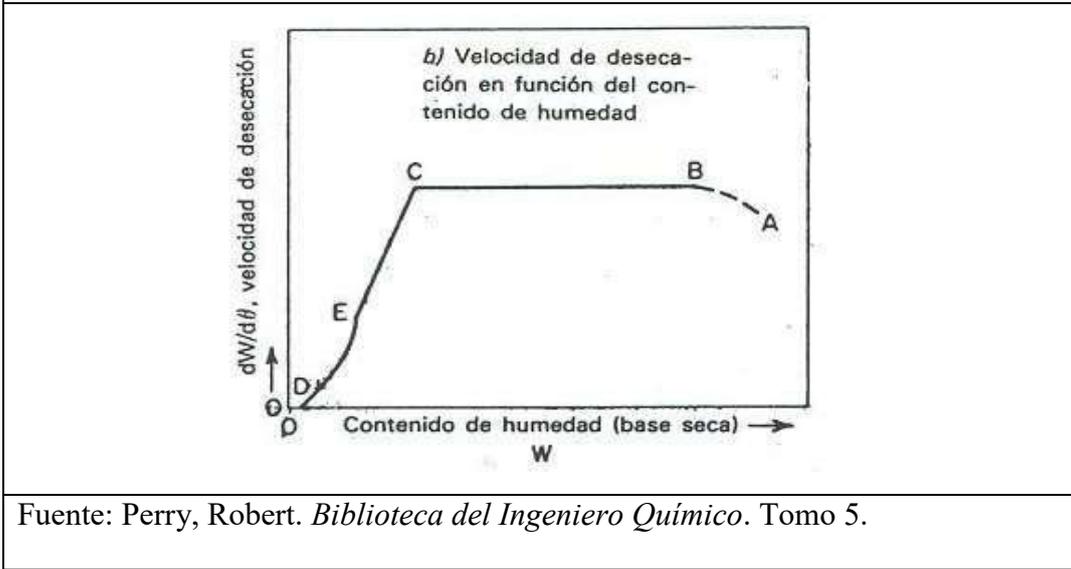
La porción curvada CD de la Figura # 11 se denomina periodo de velocidad decreciente y, como se señala en la Figura # 12 Y 13, se tipifica por una velocidad constantemente variable a lo largo del resto del ciclo de desecación. El punto E (Figura # 12) representa el punto en que toda la superficie expuesta se hace completamente insaturada y marca el principio de la porción del ciclo de desecado durante el cual la velocidad del movimiento de la humedad interna controla la velocidad de desecación. El punto C, en donde concluye la velocidad constante y comienza a descender el índice de desecación, se conoce como contenido crítico de humedad. La porción CE de la figura 1b se define usualmente como el primer periodo de desecación con velocidad decreciente, y la porción DE como el segundo periodo de velocidad decreciente. La porción AB representa un lapso de calentamiento.

Figura # 11. El contenido de humedad (base seca) W en función del tiempo θ .



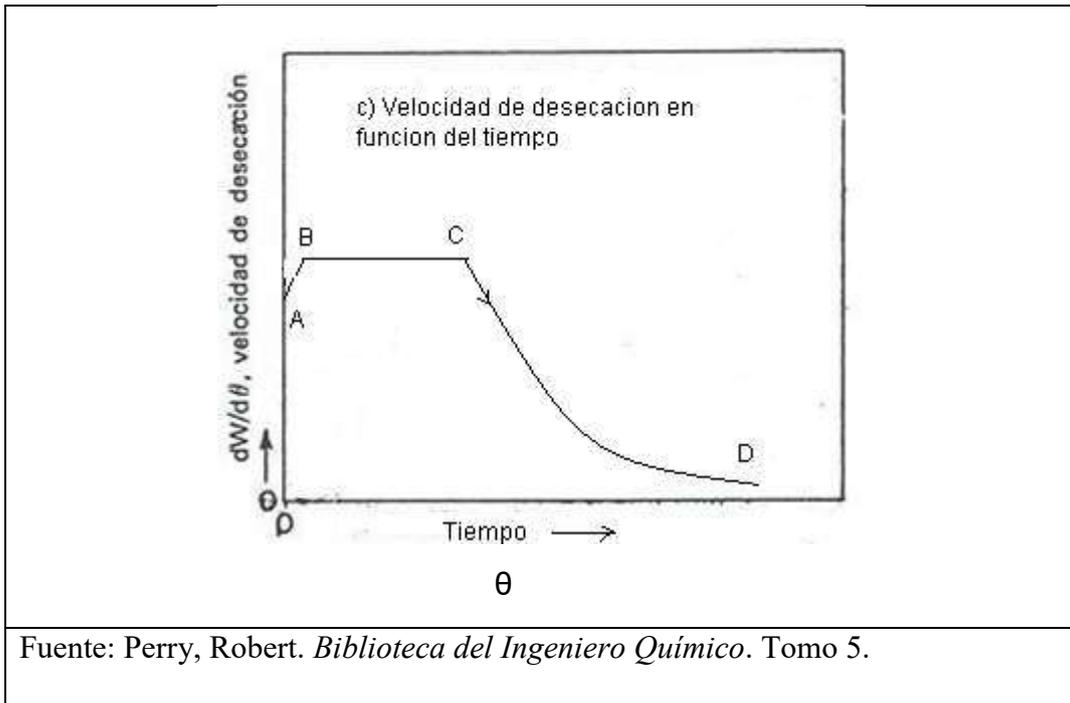
Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

Figura # 12. Velocidad de desecación en función del contenido de humedad.



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

Figura # 13. Velocidad de desecación en función del tiempo.



2.2.7 PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Cuando el calor por evaporación durante el periodo de velocidad constante se suministra a través de un gas caliente, se establece un equilibrio dinámico entre la velocidad de transmisión de calor al material y la velocidad de eliminación de vapor de la superficie.

$$\frac{d\omega}{d\theta} = \frac{h_t A \Delta t}{\lambda} = K_g A \Delta p \dots\dots\dots(2-44)$$

En donde:

$d\omega/d\theta$ = velocidad de secado lb de agua/h.

h_t = coeficiente de la transmisión total de calor, en Btu/ (h) (pie²)(°F).

A = área para la transmisión de calor y evaporación, en pie².

λ = calor latente de evaporación a t_s , en Btu/lib.

K_g = coeficiente de transferencia de masa, en lb/ (h) (pie²)(atm).

$\Delta t = t - t'_s$, en donde;

t = temperatura del gas (bulbo seco), en °F.

t'_s = temperatura de la superficie de evaporación, en °F. (Bulbo húmedo).

$\Delta p = p_s - p$, en donde;

p_s = presión de vapor del agua a la temperatura de superficie t'_s , en atm.

p = presión parcial del vapor de agua en el gas, en atm.

Para hacer cálculos de desecación conviene expresar la ecuación (2-44) en términos de la reducción del contenido de humedad más que en la cantidad de agua evaporada. En el caso de evaporación desde una bandeja de material húmedo, suponiendo que no hay ningún cambio de volumen durante la desecación, la ecuación (2-44) se convierte en la siguiente expresión

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{h_t}{(\rho_s d \lambda)(t - t'_s)} \dots\dots\dots(2-45)$$

En donde:

$dW/d\theta$ = velocidad de desecación, en lb de agua / (h)(lb de sólidos secos).

h_t = coeficiente de transmisión total de calor, en Btu/(h)(pie²)(°F).

ρ_s = densidad volumétrica de material seco, en lb/pie³

d = espesor del lecho, en pies.

λ = calor latente de vaporización, en Btu/lb.

t = temperatura del aire, en °F.

t'_s = temperatura de superficie de evaporación, en °F. (Bulbo húmedo).

Se observara que $dw/d\theta$ es inherentemente negativa.

Se puede escribir una ecuación similar para el caso de circulación directa.

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{h_t a}{(\rho_s \lambda)(t - t'_s)} \dots\dots\dots(2-46)$$

En donde;

a = pie² de área de transmisión de calor /pie³ de lecho, 1/pie.

Los demás símbolos son los mismos que se especifican en la ecuación (2-46).

En el caso particular esféricas,

$$a = \frac{6(1 - F)}{[(D)_p]_m} \dots\dots\dots(2-47)$$

En donde;

F= fracción de vacío

$[(D)_p]_m$ =diámetro armónico medio de las partículas esféricas, en pies.

2.2.8 PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE:

Los periodos de velocidad decreciente principian al concluir los periodos de velocidad constante, al contenido crítico de humedad. Si el contenido final de humedad es superior al contenido crítico (para las condiciones de desecación especificadas), todo el proceso de desecado se desarrollara en condiciones de velocidad constante. Por otro lado, si el contenido inicial de humedad es inferior al crítico, todo el proceso de desecación se desarrollara en el periodo de velocidad decreciente. Por lo común, este periodo se divide en dos zonas: 1) la de la desecación de superficie no saturada y 2) aquella en que el movimiento interno de la humedad es el que ejerce el control.

2.2.9 DIFUSIÓN DE LÍQUIDOS

Cuando la difusión de líquidos es la que controla el periodo de velocidad decreciente, la ecuación de conducción de calor de Fourier sirve para describir la

velocidad de movimiento de la humedad. Sherwood [Ind. Eng. Chem. , 21, 12 (1929)], Resolvió la ecuación de difusión para el periodo de velocidad decreciente en una plancha, suponiendo que la superficie esta seca o bien, que su contenido de humedad se encuentra en su punto de equilibrio, y que la distribución inicial de la misma es uniforme.

2.2.10 TEORÍA CAPILAR

Si el tamaño de poro de un material granular es apropiado, la humedad se puede desplazar de una región de gran concentración a otra de menor magnitud, como resultado de la acción capilar, más que por difusión.

La teoría capilar presupone que un lecho de esfera no porosas se compone de partículas que rodean un espacio determinado pero. Estos poros se conectan por medio de pasajes de varios tamaños, cuyas porciones más reducidas se denominan cinturas.

Conforme el agua se separa progresivamente del lecho, la curvatura de la superficie del agua en los intersticios de la capa superior de esferas aumenta y se establece una presión de succión que resulta de dicha curvatura. Al continuarse la separación o eliminación de agua, la presión de succión adquiere un valor al cual el aire es atraído dentro de los espacios de los poros entre las capas sucesivas de esferas.

2.2.11 ECUACIONES APROXIMADAS PARA PERIODOS DE VELOCIDAD DECRECIENTE:

El tiempo de desecación de cada uno de los casos de periodo de velocidad decreciente se obtiene integrando las ecuaciones:

Para difusión de líquidos:

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{-\pi^2 D_t}{4d^2} (W - W_e) \dots\dots\dots(2-48)$$

Para la teoría capilar:

$$\left(\frac{dW}{d\theta}\right) = -\frac{h_t(t - t'_s)(W - W_e)}{\rho_s \lambda d(W_c - W_e)} \dots\dots\dots(2-49)$$

1. en el caso de materiales en que el movimiento de la humedad se controla a través de la difusión,

$$\frac{\theta_f = \frac{4d^2}{D_t \pi^2} \ln(W_c - W_e)}{W - W_e} \dots\dots\dots(2-50)$$

2. En el caso de materiales en que el movimiento de la humedad se controla por medio del flujo capilar.

$$\frac{\theta_f = \frac{\rho_s d \lambda (W_c - W_e)}{h_t (t - t'_s)} \ln(W_c - W_e)}{W - W_e} \dots\dots\dots(2-51)$$

En la Tabla # 02. Se da una clasificación aproximada de materiales que obedecen las ecuaciones (2-50) y (2-51).

Tabla # 02. Materiales que obedecen a las ecuaciones (2-50) y (2-51).

Materiales que obedecen a la ecuación (2-50)	Materiales que obedecen a la ecuación (2-51)
1. sistemas sólidos de una sola fase, como, por ejemplo, jabón, gelatina, pegamento.	1. Sólidos granulares, gruesos, como arena, pigmentos de pinturas, minerales.
2. madera y sólidos similares por debajo del punto de saturación de fibra.	2. Materiales en que el flujo de humedad ocurre a concentraciones superiores al contenido de humedad, de equilibrio a la saturación atmosférica o por encima del punto de saturación de fibra.
3. Últimas etapas de almidones, textiles, papel, arcilla, sólidos hidrofílicos en desecación, así como otros materiales, cuando se les está extrayendo el agua captada.	

Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5.

2.3 CONCEPTOS FÍSICOS Y TECNOLÓGICOS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

2.3.1 DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE SECADO

2.3.1.1 INTRODUCCIÓN

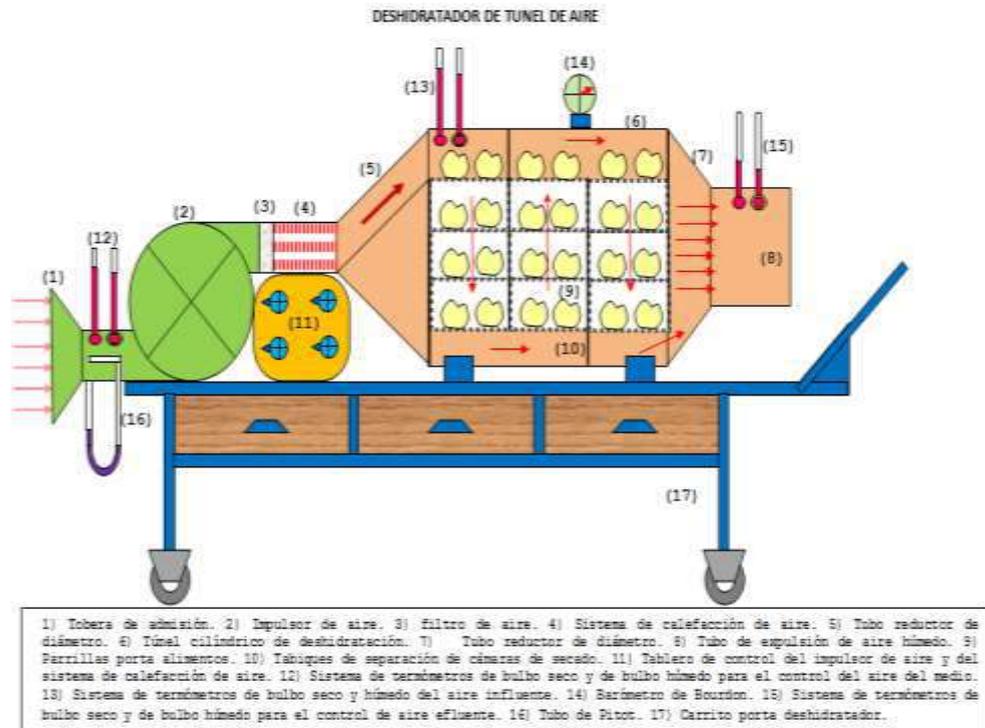
Para presentar el secador de bandejas, su diseño y construcción, usaremos el método reduccionista, en el cual explicaremos el diseño y construcción de cada una de las etapas del sistema por separado.

La primera etapa corresponde a la medición de la velocidad del aire de entrada, conformada por un tubo de PVC de diámetro interno $\phi = 16$ (cm), tubo de Pitot, y un micro manómetro diferencial de alcohol.

La segunda etapa corresponde al sistema de impulsión de aire, consistente en un tubo de PVC de diámetro $\phi = 16$ (cm), un ventilador eléctrico Fem = 110 (VAC), potencia eléctrica = 15 (W).

La tercera etapa corresponde al sistema de calefacción, el cual es un circuito de resistencias óhmicas que irradian calor a un nivel de potencia: 350 (W).

La cuarta etapa es un túnel de secado que contiene dos bandejas, donde se colocan los productos agrícolas que se desea secar.



En la Figura # 14. Presentamos una fotografía de las partes I túnel de deshidratación, construidas hasta el momento.

Figura # 14. Parte I del túnel de deshidratación.



Fuente. Tomadas en el laboratorio de física. UNJFSC.

2.3.1.2 SISTEMA DE IMPULSIÓN DE AIRE

La función del impulsor de aire es crear un flujo de aire a través del túnel de secado.

El sistema de impulsión de aire está conformado por:

- A) Un tubo de PVC de diámetro $\phi = 16$ (cm).
- B) Un ventilador asíncrono, alimentado por energía eléctrica de Fem = 110 (VAC), y potencia eléctrica = 15 (W).
- C) Una fuente de energía eléctrica, Fem = 110 (VAC).

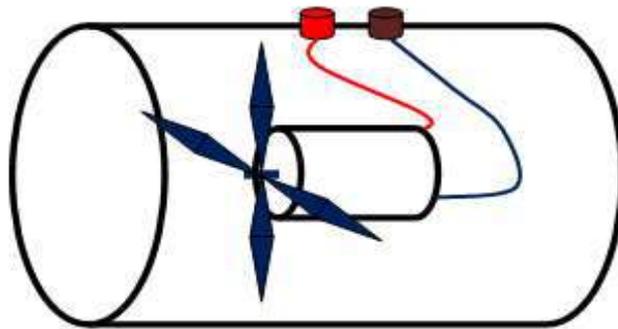


Figura # 15. Sistema de impulsión de aire, Conformado por un ventilador.



Fuente. Tomadas en el laboratorio de física. UNJFSC.

2.3.1.3 SISTEMA DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE:

Su función es proporcionar los datos necesarios para determinar el flujo de aire en el túnel de secado. En el esquema adjunto que se muestra, se presenta el sistema de medición de flujo de aire a la entrada y consiste en: A) Un tubo de PVC de diámetro interno $\phi = 16$ (cm). B) Un tubo de Pitot. C) Un micromanómetro diferencial de alcohol

El flujo de aire se evalúa tomando la siguiente data.

ρ_l : densidad del líquido manométrico (alcohol etílico), (Kg/m^3).

ρ_a : densidad del aire, (Kg/m^3).

α : ángulo de inclinación, ($^\circ$).

L: longitud de la columna de líquido manométrico, (m).

g: aceleración de la gravedad, (9.8 m/s^2).

Va: velocidad del aire, (m/s).

ϕ : Diámetro del tubo de PVC, (m).

F: flujo másico de aire en el tubo, (Kg/s).

En el micro manómetro diferencial, se obtiene la diferencia de presiones que ocurren en los ramales del tubo de Pitot.

$$P_1 - P_2 = \rho_l g L \text{ sen}(\alpha) \quad \dots\dots\dots(2-52)$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli en el tubo de Pitot, obtenemos la velocidad del aire, según la expresión siguiente.

$$V_a = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_a}} \quad \dots\dots\dots(2-53)$$

a) El flujo de aire en el secador será dado por la expresión siguiente.

$$F = \frac{\pi \phi^2 \rho_a V_a}{4} \quad \dots\dots(2-54)$$

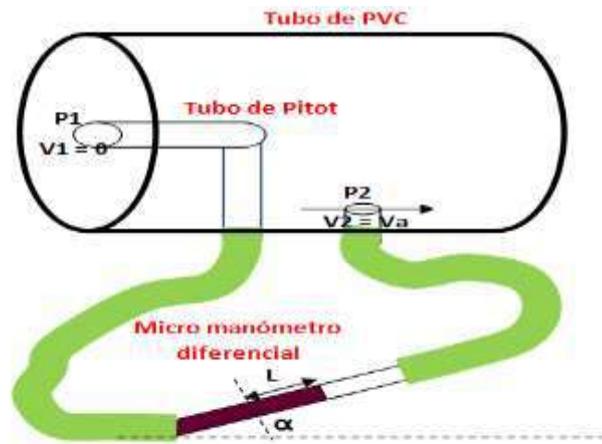


Figura # 16. Sistema de medición de flujo de aire, se encuentra conformado por un tubo de Pitot, y un micromanómetro diferencial de alcohol.



Fuente. Tomadas en el laboratorio de física. UNJFSC.

2.3.1.4 SISTEMA DE CALEFACCIÓN

El sistema de calefacción es aumentar la temperatura del flujo de aire, con el fin de bajar su composición de humedad.

El sistema de calefacción de aire está conformado por:

- a) Un tubo de PVC de diámetro $\Phi= 16$ (cm).
- b) Una resistencia eléctrica que conectada a una Fem = 220 (VAC) irradia 350 (W) de energía calórica.
- c) Una malla de alambre para captar por conducción, el calor de la resistencia eléctrica y transferirlo al flujo de aire circundante por convección.
- d) Un interruptor para conectar el sistema a la fuente de energía eléctrica.

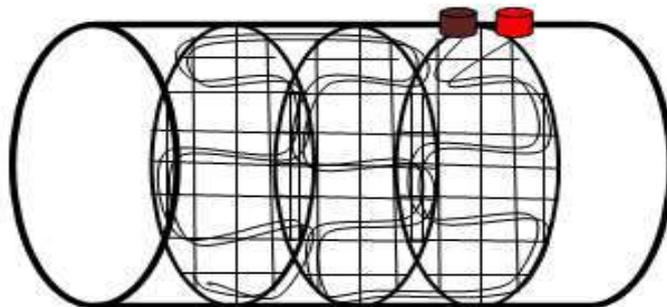


Figura # 17. Sistema de calefacción.



Fuente. Tomadas en el laboratorio de física. UNJFSC.

2.3.1.5 TUNEL DE SECADO

El túnel de secado está conformado por los siguientes elementos:

- a) Un tubo de PVC.
- b) Dos soportes de bandeja.
- c) Das bandejas metálicas porta alimentos.

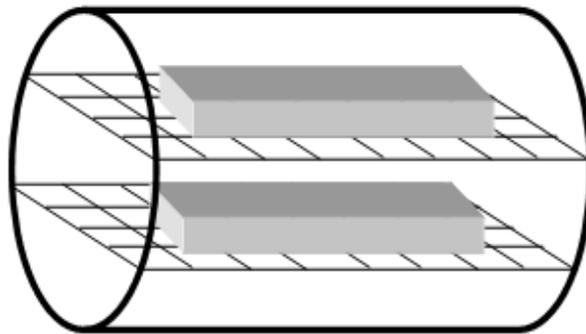
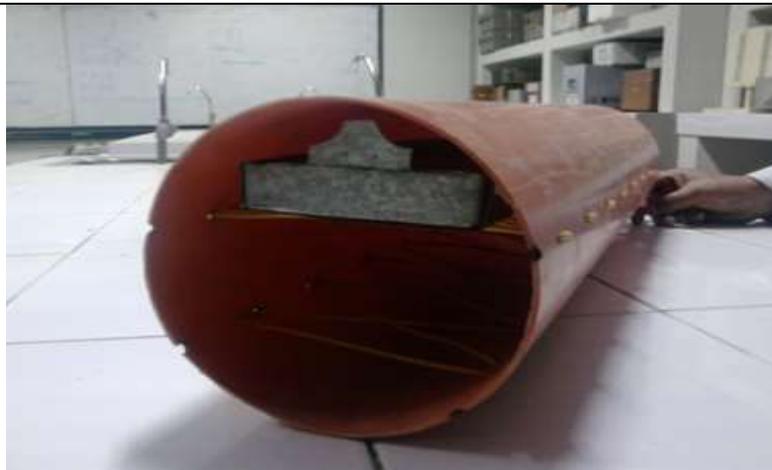


Figura # 17. Túnel de secado.



Fuente. Tomadas en el laboratorio de física. UNJFSC.

2.3.1.6 EVALUACIÓN DEL SECADOR DE PRODUCTOS

AGRÍCOLAS:

En una corrida de prueba se determinaron las siguientes características técnicas del secador de productos agrícolas:

Secador:

La longitud del secador: 114 (cm).

Diámetro interno del secador: 16 (cm).

Sistema de ventilación:

Ventilador eléctrico, 110 (VAC) de 50 – 60 (Hz). Potencia de consumo eléctrico 15 (W). Frecuencia del rotor: 3600 rpm.

Diámetro interno: 16 (cm).

Sistema de medición del flujo de aire:

Tubo de Pitot: tubos de vidrio conformados para tubo de Pitot.

Micro manómetro de alcohol de densidad $0.8072 \text{ (g/cm}^3\text{)}$. Inclinación del tubo manométrico respecto a la horizontal ($5^\circ - 90^\circ$).

Sistema de calefacción del flujo de aire:

Diámetro del tubo de calefacción 16 (cm).

Resistor óhmico, resistencia eléctrica 350 (W), alimentadas con energía eléctrica de 220 (VAC).

2.4 Definición de términos básicos.

2.4.1 Términos físicos:

CALOR ESPECÍFICO: es la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa de una sustancia, para elevar la temperatura en un grado Celsius.

DENSIDAD DEL AIRE: Cantidad de masa de aire por unidad de volumen.

ENERGÍA INTERNA: La energía interna se define como la energía asociada con el movimiento aleatorio y desordenado de las moléculas.

ENTALPIA: Es la combinación de la energía interna de un sistema con el producto presión por volumen $H = U + PV$.

ENTROPÍA: Una medida del desorden de un sistema. Se define como la razón del calor absorbido por el sistema (δQ), entre la temperatura del mismo (T) y se representa por la letra S . $dS = \delta Q/T$

FLUJO MÁSICO: La masa de un fluido en movimiento que atraviesa una sección transversal a la dirección de su movimiento, se expresa en Kg/s.

GASES PERFECTOS: Un gas es perfecto si las interacciones entre partículas se reducen a choques elásticos, las moléculas del gas son partículas puntuales

HUMEDAD ABSOLUTA: La humedad absoluta es la masa del vapor de agua contenido en un volumen de atmósfera entre la masa de aire que contiene el volumen de atmósfera.

HUMEDAD RELATIVA: Es la razón de la presión de vapor de agua contenido en la atmósfera entre la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de la atmósfera. La humedad del aire se debe al vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera

MASA: Es una propiedad fundamental de la materia; es una medida numérica de su inercia; una medida fundamental de la cantidad de materia en el objeto.

PRESIÓN: Según la teoría cinética del gas perfecto, la presión es un flujo de cantidad de movimiento.

TEMPERATURA: Es una magnitud física directamente proporcional a la energía cinética promedio de las moléculas. Para poder definir la temperatura de un sistema es necesario que esté en equilibrio y que sus componentes no intercambien suficiente energía, a través de colisiones, para termalizarse.

TEMPERATURA DE ROCÍO: Si bajamos la temperatura de la atmósfera a presión atmosférica constante, es la temperatura límite a partir de la cual el vapor de agua empieza a condensarse, generándose, de acuerdo a la temperatura, escarcha, neblina o rocío.

TUBO DE PITOT: El tubo de Pitot se utiliza para medir la velocidad del flujo abierto de un fluido. Se realiza a través de la medición de la presión de estancamiento (la presión en una rama paralela a la dirección del flujo) y ocluida en su otro extremo que es igual a la suma de la presión estática y la presión dinámica.

VOLUMEN: Es una magnitud escalar definida como la extensión en tres dimensiones de una región del espacio.

VELOCIDAD DE AIRE: La velocidad del viento es la velocidad con la que el aire de la atmósfera se mueve sobre la superficie de la tierra.

2.5. FORMULACIÓN DE LAS HIPÓTESIS

2.5.1 HIPÓTESIS GENERAL

Es factible desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño del túnel de secado para diferentes condiciones de operación

2.5.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- a. Es factible estimar el gasto de aire, expresado en kg/s que ingresa al tubo de secado en condiciones del ambiente circundante impulsado por el ventilador
- b. Es factible estimar la temperatura y humedad del aire antes de la etapa de calefacción
- c. Es factible estimar la temperatura y la humedad del aire de salida de la etapa de calefacción
- d. Es factible estimar el desempeño del flujo del aire en el interior del túnel de secado para unas muestras de alimentos de frutas ubicadas en las bandejas en el interior del túnel de secado
- e. Es factible estimar la cantidad de agua que han perdido los alimentos en el interior del túnel de secado

2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES:

VARIABLES	INDICADORES
Vi: algoritmo de cálculo para modelar la deshidratación de alimentos frutales.	- Velocidad del flujo.
	- Ecuación de Bernoulli.
	- Ecuación de continuidad.
	- Ecuación del tubo de Pitot.
	- Transmisión del calor desde una resistencia hasta el flujo de aire.
	- Ecuación de balance de energía en el túnel de secado.
	- Ecuación de estado para mezcla de gases.
	- Potencia de calentamiento del flujo de aire.
Vd: Desempeño del túnel de secado.	- Tiempo de secado.
	- Cambio del contenido de la humedad del alimento.
	- Cambio de la humedad del flujo de aire.
	- Temperatura de deshidratación para cada alimento.

2.6.1 Sistema de variables

Variable independiente: Algoritmo de cálculo para modelar la deshidratación de alimentos frutales.

Variable dependiente: Desempeño de túnel de secado.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1 Diseño de la investigación

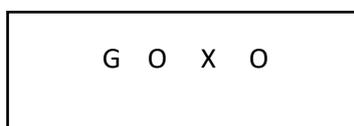
Cuasi experimental

3.1.1 Tipo de diseño de investigación

Diseño pre experimental

3.1.1.1 Forma

Diseño de pre prueba – pos prueba con una sola medición



3.2 Muestra

Se tomó una muestra de 25 uvas red globe para cada proceso.

3.3. Técnicas de recolección de datos.

Utilizaremos las siguientes técnicas:

- a) **La observación:** Permitirá una captación de los problemas existentes y se registrarán para su tratamiento.
- b) **Técnicas de fichaje:** Se aplicarán las distintas clases de fichaje para registrar parcialmente las fuentes bibliográficas, textuales, de resumen, comentario y datos experimentales.
- c) **Validación de expertos:** los instrumentos de recolección de datos serán validados mediante opinión de juicio de expertos. 04 catedráticos con amplia experiencia en campo de la investigación

d) **Confiabilidad:** es la cualidad o propiedad y cualidad de un instrumento de medición, que le permite obtener los mismos resultados, al aplicarse una y más veces

$$\text{Confiabilidad} = \frac{\text{Puntaje verdadero}}{\text{puntaje verdadero} + \text{puntaje observado}}$$

3.4. Técnicas para el procedimiento de investigación

Se realizara el análisis estadístico, mediante las siguientes medidas estadísticas.

Medida estadística	Fórmula	Objetivo
Media Aritmética	$\frac{\sum x_1 n}{n}$	Determinar los promedios.
Desviación Estándar	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \langle x \rangle)^2}{N - 1}}$	Determinar la dispersión de los puntajes obtenidos con respecto al promedio.
T de Student	$t = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$	Contrastar hipótesis

3.5. Resultados, Tablas, Gráficos:

3.5.1. Cálculos realizados en la medición:

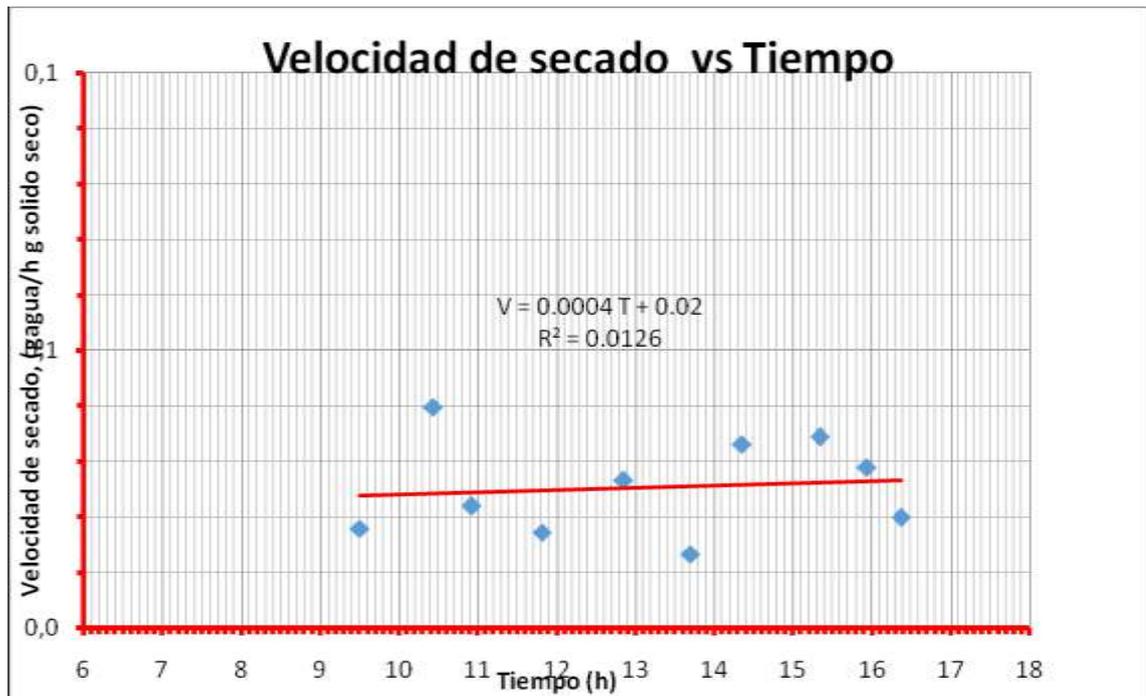
Se obtuvo dos fases una fase constante y una fase decreciente ;

Velocidad constante

Masa de la bandeja = 14 (g)
 Masa de la bandeja con carga = 202.8 (g)

i	T _i ' (h)	M _i (g)	ΔM _i =M _i -M _{i-1} (g)	Δt _i =T _i -T _{i-1} (h)	j	T _j	V _j (g/h)	dw/dθ (gagua/hg _{sol} seco)
1	8.83	178.00						
2	10.17	177.10	-0.90	1.33	1.00	9.50	0.68	0.02
3	10.20	177.10						
4	10.67	176.40	-0.70	0.47	2.00	10.43	1.50	0.04
5	10.68	176.40						
6	11.17	176.00	-0.40	0.48	3.00	10.93	0.83	0.02
7	11.20	176.00						
8	12.43	175.20	-0.80	1.23	4.00	11.82	0.65	0.02
9	12.45	175.20						
10	13.25	174.40	-0.80	0.80	5.00	12.85	1.00	0.03
11	13.30	174.40						
12	14.10	174.00	-0.40	0.80	6.00	13.70	0.50	0.01
13	14.15	174.00						
14	14.55	173.50	-0.50	0.40	7.00	14.35	1.25	0.03
15	15.03	173.50						
16	15.65	172.70	-0.80	0.62	8.00	15.34	1.30	0.03
17	15.67	172.70						
18	16.22	172.10	-0.60	0.55	9.00	15.94	1.09	0.03
19	16.23	172.10						
20	16.50	171.90	-0.20	0.27	10.00	16.37	0.75	0.02

Tabla # 03. Datos obtenidos experimentalmente.



$$V = \frac{d\omega}{d\theta} = \frac{h_t a}{(\rho_s \lambda)(t - t'_s)}$$

Del anexo 3, el área por volumen del lecho

$$a = 0.72 \text{ (1/cm)}$$

Del anexo 4, la densidad

$$\rho_s = 1.433 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$\lambda = 2257 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

Resultado: Hipótesis a.

Luego de haberse obtenido la densidad se puede hallar el gasto de aire

$$G = \rho_s V$$

$$A = \frac{\pi \varphi^2}{4} \quad G = \frac{\pi \rho_s V \varphi^2}{4}$$

$$G = \frac{\pi \times 1.433 \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times 1.03575 \left(\frac{m}{h} \right) (0.16)^2}{4}$$

$$G = 0.0298 \left(\frac{g}{h} \right)$$

Resultado: Hipótesis b y c.

De acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente se obtuvo la temperatura y humedad de aire a la entrada y salida del túnel (Ver anexo 4, Tabla A.1).

A la entrada y salida del túnel la temperatura de bulbo seco.

$$\langle t_e \rangle = 43.4 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\langle t_f \rangle = 31.8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\langle t \rangle = 37.6 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Haciendo uso de la tabla psicrométrica hallamos la temperatura de bulbo húmedo a la entrada y a la salida del túnel de secado.

$$\langle t_e \rangle = 43.4 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad \langle HR_e \rangle = 65.8 \text{ (}\% \text{)}, \quad \langle t_s \rangle_e = 36.7 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\langle t_f \rangle = 31.8 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad \langle HR_f \rangle = 66.5 \text{ (}\% \text{)}, \quad \langle t_s \rangle_f = 26.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\langle t_s \rangle = 31.4 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Resultado: Hipótesis d.

Luego se pasó a hallar la velocidad;

Hallando la velocidad promedio del secado:

$$V = \frac{\Sigma V}{N} = \frac{10.3575 \left(\frac{g}{h} \right)}{10}$$

Posteriormente obtuvimos el coeficiente total de transmisión de calor;

Podemos obtener el coeficiente total de transmisión de calor h_t , para las condiciones dadas en el túnel de secado:

$$h_t = \frac{\langle V \rangle \rho_s \lambda}{a(\langle t \rangle - \langle t_s \rangle)}$$

$$h_t = \frac{1.03575 \left(\frac{g_{\text{agua}}}{g_s h} \right) 1.433 \left(\frac{g_s}{cm^3} \right) 2257 \left(\frac{kJ}{kg} \right)}{0.72 \left(\frac{1}{cm} \right) (37.6 - 31.4) (^{\circ}C)}$$

$$h_t = 750.43 \text{ (J/(h [cm] } ^{\circ}C \text{))}$$

Resultado: Hipótesis e.

Se estimo la cantidad de agua que perdió la fruta en el interior del túnel. (Ver Anexo 7).

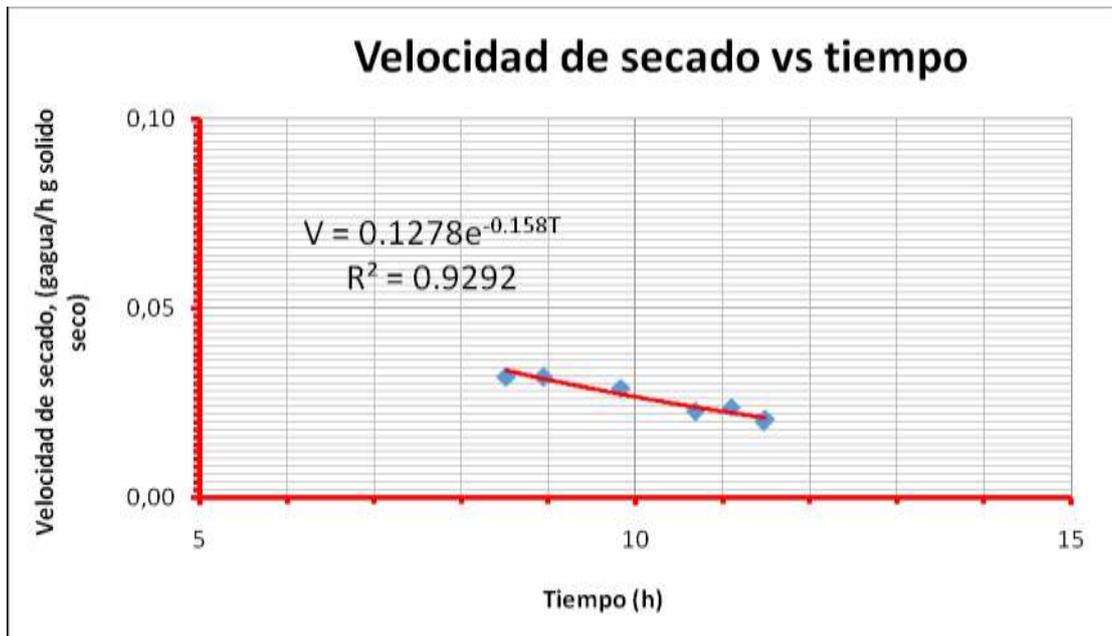
Velocidad decreciente

Masa de la bandeja = 14 (g)
 Masa de la bandeja con carga = 202.8 (g)

i	Ti' (h)	Mi (g)	$\Delta Mi = Mi - Mi-1$ (g)	$\Delta ti = Ti - Ti-1$ (h)	j	Tj	Vj (g/h)	dw/d θ (gagua/hgso _l seco)
1.00	8.35	188.80						
2.00	8.68	188.40	-0.40	0.33	1.00	8.52	1.20	0.03
3.00	8.78	188.40						
4.00	9.12	188.00	-0.40	0.33	2.00	8.95	1.20	0.03
5.00	9.65	188.00						
6.00	10.02	187.60	-0.40	0.37	3.00	9.83	1.09	0.03
7.00	10.45	187.60						
8.00	10.92	187.20	-0.40	0.47	4.00	10.68	0.86	0.02
9.00	11.30	187.20						
10.00	11.68	186.90	-0.30	0.38	5.00	11.49	0.78	0.02
11.00	10.52	186.90						
12.00	10.85	186.70	-0.20	0.33	6.00	10.68	0.60	0.02
13.00	10.93	186.70						
14.00	11.27	186.40	-0.30	0.33	7.00	11.10	0.90	0.02
15.00	11.27	186.40						
16.00	11.67	186.10	-0.30	0.40	8.00	11.47	0.75	0.02
17.00	11.70	186.10						
18.00	12.02	185.80	-0.30	0.32	9.00	11.86	0.95	0.03

Tabla # 04. Datos obtenidos experimentalmente.

i	T	V	dw/d θ
1.00	8.52	1.20	0.03
2.00	8.95	1.20	0.03
3.00	9.83	1.09	0.03
4.00	10.68	0.86	0.02
5.00	11.49	0.78	0.02
6.00	11.10	0.90	0.02
7.00	11.47	0.75	0.02
8.00	11.86	0.95	0.03



$$\frac{d\omega}{d\theta} = -\frac{\pi^2 D_t}{4d^2} (\omega - \omega_e)$$

$$\frac{d\omega}{\omega - \omega_e} = -\left(\frac{\pi^2 D_t}{4d^2}\right) d\theta$$

$$\int_{\omega_c}^{\omega(\theta)} \frac{d\omega}{\omega - \omega_e} = -\left(\frac{\pi^2 D_t}{4d^2}\right) \int_{\theta_c}^{\theta} d\theta$$

$$[\ln(\omega - \omega_e)]_{\omega_c}^{\omega(\theta)} = -\left(\frac{\pi^2 D_t}{4d^2}\right) \theta$$

$$\ln \left[\frac{\omega(\theta) - \omega_e}{\omega_c - \omega_e} \right] = -\left(\frac{\pi^2 D_t}{4d^2}\right) \theta$$

$$\omega(\theta) = \omega_e + (\omega_c - \omega_e) e^{-\left(\frac{\pi^2 D_t}{4d^2}\right) \theta}$$

$$V = \frac{d\omega(\theta)}{d\theta} = -\left(\frac{\pi^2 D_t}{4d^2}\right) (\omega_c - \omega_e) e^{-\left(\frac{\pi^2 D_t}{4d^2}\right) \theta}$$

Hallando la difusividad:

$$0.158(\hbar^{-1}) = \left(\frac{D_1 \pi^2}{4d^2} \right)$$

$$D_1 = \frac{0.158 (\hbar^{-1}) \times 4d^2}{\pi^2}$$

$$D_1 = \frac{0.158 (\hbar^{-1}) \times 4(1.045)^2 (cm^2)}{\pi^2}$$

$$D_1 = 0.06993 \left(\frac{cm^2}{\hbar} \right)$$

Anexo 1. Matriz de consistencia

Título	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Indicadores	Método y técnicas de investigación
<p>ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL TUNEL DE SECADO PARA DESHIDRATAR ALIMENTOS FRUTALES EN LA UNJFSC- HUACHO 2015</p>	<p>Problema general ¿En qué medida es factible desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño del túnel de secado para diferentes condiciones de operación?</p>	<p>Objetivo general Desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño del túnel de secado para diferentes condiciones de operación</p>	<p>Hipótesis general Es factible desarrollar algoritmos de cálculo que permitan evaluar el desempeño del túnel de secado para diferentes condiciones de operación</p>	<p>Vi: algoritmo de cálculo para modelar la deshidratación de alimentos frutales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad del flujo. - Ecuación de Bournulli - Ecuación de continuidad. - Ecuación del tubo de Pitot. - Transmisión del calor desde una resistencia hasta el flujo de aire. - Ecuación de balance de energía en el túnel de secado. - Ecuación de estado para mezcla de gases. - Potencia de calentamiento del flujo de aire. 	<p>Diseño de la investigación Cuasi experimental Tipo de diseño de investigación Pre experimental Forma Diseño de pre prueba – pos prueba con una sola medición</p> <div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 40px; margin: 10px auto; text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">G O X O</div>
	<p>Problemas específicos</p> <p>¿En qué medida será posible estimar el gasto de aire, expresado en kg/s que ingresa al tubo de secado en condiciones del ambiente circundante impulsado por el ventilador?</p> <p>¿En qué medida será posible estimar la temperatura y humedad del aire antes de la etapa de calefacción?</p> <p>¿En qué medida será posible estimar la temperatura y la humedad del aire de salida de la etapa de calefacción será necesario?</p> <p>¿En qué medida será posible estimar el desempeño del flujo del aire en el interior del túnel de secado para unas muestras de alimentos de frutas ubicadas en las bandejas en el interior del túnel de secado será necesario?</p> <p>¿En qué medida será posible estimar la cantidad de agua que han perdido los alimentos en el interior del túnel de secado será necesario?</p>	<p>Objetivos específicos</p> <p>Estimar el gasto de aire, expresado en kg/s que ingresa al tubo de secado en condiciones del ambiente circundante impulsado por el ventilador.</p> <p>Estimar la temperatura y humedad del aire antes de la etapa de calefacción.</p> <p>Estimar la temperatura y la humedad del aire de salida de la etapa de calefacción.</p> <p>Estimar el desempeño del flujo del aire en el interior del túnel de secado para unas muestras de alimentos de frutas ubicadas en las bandejas en el interior del túnel de secado.</p> <p>Estimar la cantidad de agua que han perdido los alimentos en el interior del túnel de secado</p>	<p>Hipótesis específicas</p> <p>Es factible estimar el gasto de aire, expresado en kg/s que ingresa al tubo de secado en condiciones del ambiente circundante impulsado por el ventilador</p> <p>Es factible estimar la temperatura y humedad del aire antes de la etapa de calefacción</p> <p>Es factible estimar la temperatura y la humedad del aire de salida de la etapa de calefacción</p> <p>Es factible estimar el desempeño del flujo del aire en el interior del túnel de secado para unas muestras de alimentos de frutas ubicadas en las bandejas en el interior del túnel de secado</p> <p>Es factible estimar la cantidad de agua que han perdido los alimentos en el interior del túnel de secado</p>	<p>Vd: Desempeño del túnel de secado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de secado - Cambio del contenido de la humedad del alimento - Cambio de la humedad del flujo de aire - Temperatura de deshidratación para cada alimento. 	

Anexo 2. Fotografías del diseño del tunel de secado



Foto 1. Diseño de la entrada de aire del túnel de secado. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 2. Diseño de la parte del calentador del túnel de secado. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 3. Diseño de la parte del calentador del túnel de secado. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 4. Diseño terminado del túnel de secado. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 5. Colocando un aislante en este caso el yeso. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 6. Retocando el túnel de secado. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 7. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 8. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.



Foto 9. Diseño terminado del túnel de secado. Tomadas en el laboratorio de la UNJFSC.

Anexo 3 Micromanómetro.

Figura A.1. Equipo micromanómetro



Fuente. Micromanómetro. *Images google*

Masa del matraz + alcohol: 220 (g)

Masa Del alcohol: 100.9 (g)

Volumen del alcohol: 125 cc

Densidad del alcohol:

$$\frac{g}{cm^3}$$

)

Anexo 4. Tabla A.1. Primera toma de datos

i	TIEMPO		L (mm)	AIRE DE ENTRADA			AIRE DE SALIDA			AIRE SALIDA DEL TUNEL DE SECADO			MASA	
	H	min		P° (Torr)	T° (°C)	TR° (%)	P1 (Torr)	T1 (°C)	HR1 (Torr)	P2 (Torr)	T2 (°C)	HR2 (%)	MT (g)	MP (g)
1	8	21	6	739	22.3	70	739	37	72	739	29	71	202.8	188.8
2	8	41	6	739	22.3	70	739	40	71	739	30	72	202.8	
3	8	45	6	739	22.3	70	739	40	71	739	30	72	202.4	202.4
4	8	47	6	739	22.3	70	739	40	71	739	30	68	202.4	
5	9	7	6	739	22.3	70	739	40	71	739	30	68	202.4	
6	9	11	6	739	22.3	70	739	40	71	739	30	68	202	188
7	9	14	6	739	22.3	69	739	40	71	739	30	68	202	
8	9	34	6	739	23	69	739	40	71	739	30	68	202	
9	9	36	6	739	23	69	739	40	71	739	30	68	201.6	187.6
10	9	39	6	739	23	69	739	40	71	739	30	68	201.6	
11	10	1	6	739	23	69	739	40	71	739	31	68	201.6	
12	10	3	6	738	23	69	739	40	71	739	30	68	201.2	187.2
13	10	4	6	738	23	69	739	40	71	739	31	68	201.2	
14	10	24	6	738	23	69	739	41	70	739	31	68	201.2	
15	10	27	6	738	23	69	739	41	70	739	31	68	200.9	186.9
16	10	31	6	738	23.5	68	738	41	70	738	31	67	200.9	
17	10	51	6	738	23.5	68	738	41	70	738	31	66	200.9	
18	10	55	6	737.9	23.5	68	738	41	70	738	31	66	200.7	186.7
19	10	56	6	737.9	23.5	68	738	41	70	738	31	66	200.7	
20	11	16	6	737.9	23.9	67	738	41	70	738	30.5	66	200.7	
21	11	18	6	737.9	23.9	67	738	41	70	738	31	66	200.4	186.4
22	11	19	6	737.9	24	67	737.9	41	70	737.9	31	66	200.4	
23	11	40	6	737.9	24	67	737.9	41	70	737.9	31	67	200.4	
24	11	41	6	737.9	24	67	737.9	41	70	737.9	31	67	200.1	186.1
25	11	42	6	737.9	24	67	737.9	40	71	737.9	31	67	200.1	
26	12	1	6	737.9	24	67	737.9	40	71	737.9	31	67	200.1	
27	12	3	6	737.9	24	67	737.9	40	71	737.9	31	67	199.8	185.8

Tabla A.2. Segunda toma de datos

i	TIEMPO		L (mm)	AIRE DE ENTRADA			AIRE DE SALIDA			AIRE SALIDA DEL TUNEL DE SECADO			MASA	
	H	min		P° (Torr)	T° (°C)	TR° (%)	P1 (Torr)	T1 (°C)	HR1 (Torr)	P2 (Torr)	T2 (°C)	HR2 (%)	MT (g)	MP (g)
1	8	50	6	738	23.4	72	738	44	71	738	30	71	192	178
2	9	3	6	738	23.4	72	738	44	71	738	30	71	192	
3	10	10	6	738	23.4	72	738	44	71	738	31	71	191.1	177.1
4	10	12	6	738	23.4	72	739	45	68	738	31	71	191.1	
5	10	40	6	738	23.4	72	739	41	68	738	32	71	190.4	176.4
6	10	41	6	737.6	23.4	71	737.6	41	70	737.6	32	66	190.4	
7	11	10	6	737.6	23.4	71	737.6	44	70	737.6	32	66	190	176
8	11	12	6	737.3	23.4	71	737.3	42	66	737.3	31	66	190	
9	11	48	6	737.3	24	71	737.3	42	65	737.3	31	65	189.8	175.8
10	12	26	7	737.3	24	71	737.3	42	65	737.3	32	65	189.8	
11	12	27	7	737.1	24.3	70	737.1	42	65	737.1	32	65	189.2	175.2
12	13	15	7	737.1	24.3	70	737.1	42	65	737.1	32	65	189.2	
13	13	18	8	737.1	25	70	737.1	44	65	737.1	32	66	188.4	174.4
14	14	6	8	737.1	25	70	737.1	44	65	737.1	31	66	188.4	
15	14	9	7	736.8	25	70	736.8	43	64	736.8	32	65	188	174
16	14	33	7	735.8	24.6	70	735.8	44	65	735.8	32	65	188	
17	15	0	7	735.8	24.6	70	735.8	44	65	735.8	32	65	187.5	173.5
18	15	2	6	735.5	24.6	70	735.5	42	65	735.5	32	66	187.5	
19	15	39	6	735.5	24.6	70	735.5	45	65	735.5	32.5	66	186.7	172.7
20	16	13	6	735.5	24.6	70	735.5	45	64	735.5	32.5	66	186.7	
21	16	14	6	735.5	24.8	70	735.5	45	64	735.5	33	66	186.1	172.1
22	16	30	6	735.5	24.8	70	735.5	45	64	735.5	33	66	186.1	
23	16	32	7	735.5	24.9	70	735.5	45	63	735.5	32.3	67	185.9	171.9
24	16	41	7	735.5	24.9	70	735.5	43	63	735.5	32.3	67	189.9	

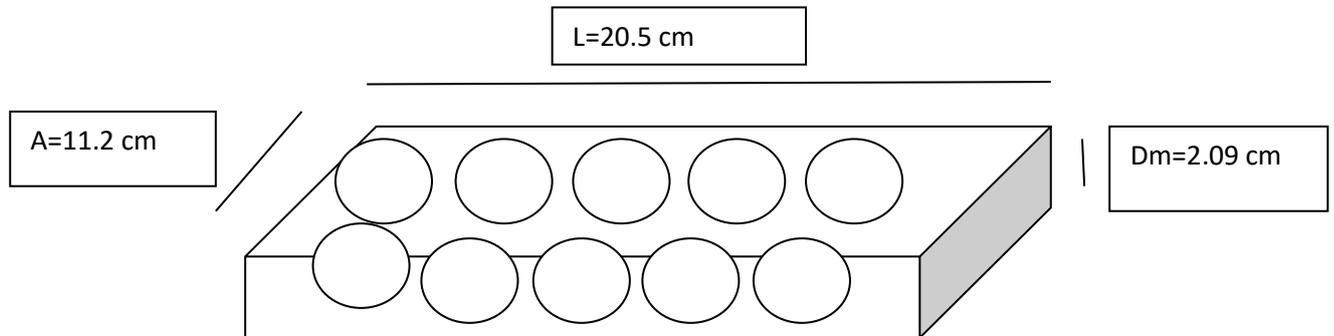
Anexo n° 5 Hallando el diámetro medio armónico de las uvas

Tabla A.3. Datos obtenidos experimentalmente.

i	ai (cm)	bi (cm)	Φ (cm)	1/ Φ
1	2.45	2.38	2.4150	0.4141
2	2.84	2.03	2.4350	0.4107
3	2.40	2.05	2.2250	0.4494
4	2.23	2.13	2.1800	0.4587
5	2.12	1.86	1.9900	0.5025
6	2.20	1.71	1.9550	0.5115
7	2.14	1.19	1.6650	0.6006
8	2.60	2.15	2.3750	0.4211
9	2.45	1.67	2.0600	0.4854
10	2.33	1.88	2.1050	0.4751
11	2.40	1.83	2.1150	0.4728
12	2.00	1.86	1.9300	0.5181
13	2.17	1.61	1.8900	0.5291
14	2.02	1.94	1.9800	0.5051
15	2.53	1.76	2.1450	0.4662
16	2.10	1.96	2.0300	0.4926
17	2.50	1.80	2.1500	0.4651
18	2.57	1.83	2.2000	0.4545
19	2.27	2.22	2.2450	0.4454
20	2.27	1.71	1.9900	0.5025
Σ	46.59	37.57	42.0800	9.5806

Diámetro medio armónico:		
████████████████████	2.08755193	(cm)
	0.06848924	(p)

HALLANDO EL ÁREA DE TRANSMISIÓN DE CALOR POR VOLUMEN DE LECHO



Volumen del paralelepípedo:

$$V_p = A \times L \times D_m = 479.86 \text{ cm}^3$$

Volumen de uvas:

$$V_U = N \left(\frac{4\pi r^3}{3} \right) = 25 \left(\frac{\pi(2.09)^3}{6} \right) = 119.5 \text{ cm}^3$$

$$F = \frac{V_p - V_U}{V_p} = \frac{479.86 - 119.5}{479.86} = 0.75$$

$$a = \frac{6(1 - F)}{D_m} = \frac{6(1 - 0.75)}{2.09(\text{cm})} = 0.72 \left(\frac{1}{\text{cm}} \right)$$

ANEXO N° 6. DENSIDAD DE SÓLIDOS DE FORMA IRREGULAR (MÉTODO DEL VOLUMEN DESALOJADO)

Figura A.2. Material y equipo utilizados para hallar la densidad de sólidos.



FUNDAMENTO TEÓRICO:

a) Densidad: Una de las propiedades de la materia (sólidos, líquidos y gases) es la compactibilidad del material, o sea la densidad, viene a ser la medida de la cantidad de materia contenida en el espacio que ocupa; es decir la masa por unidad de volumen.

$$D = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(A.1)$$

Donde;

D: densidad de la sustancia (Kg/m³)

m: masa de la sustancia (Kg)

V: Volumen ocupado por la sustancia (m³)

B) DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE UN CUERPO SOLIDO DE FORMA IRREGULAR

B.1) El tubo graduado de vidrio se llena de agua destilada hasta un volumen indicado a la mitad de la graduación (V_a)

B.2) Haciendo uso de la balanza de brazos desiguales, medir la masa del tubo graduado + agua (M_{t+a})

B.3) Colocar una cantidad de pasas dentro del tubo lleno de agua, de manera que ocupen un volumen bien determinado, indicado por el nivel del agua en la graduación del tubo (V_{a+p})

B.4) Usando la balanza de brazos desiguales, medir la masa del tubo graduado + agua + pasas (M_{t+a+p})

B.5) Obtener la densidad promedio de las pasas dividiendo la masa de las pasas obtenido por diferencia entre el volumen ocupado por las mismas

$$D_p = \frac{M_{t+a+p} - M_{t+a}}{V_{a+p} - V_a} \dots\dots\dots(A.2)$$

Donde,

D_p: densidad de las pasas, (g/cm³)

M_{t+a+p} : Masa del tubo + agua+ pasas (g)

M_{t+a} : Masa del tubo más agua (g)

V_a : Volumen del agua (cm³)

V_{a+p} : Volumen del agua + pasas (cm³)

c) Análisis de errores aleatorios

c.1) Valor más probable:

$$\langle X \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \dots\dots\dots(A.3)$$

Donde,

$\langle x \rangle$: Valor más probable de la magnitud medida, (u)

X_i : e-nésima medida, (u)

n: numero de medidas

u: unidad de medida de La magnitud

c.2) Desviación estándar:

$$DE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \langle X \rangle)^2}{n - 1}} \dots\dots\dots(A.4)$$

Donde,

DE: Desviación estándar, (u).

C.3) ERROR ABSOLUTO:

$$EA = \frac{DE}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (A.5)$$

Donde,

EA: Error absoluto de la medición (u).

C.4) ERROR PORCENTUAL

$$EP = \frac{100(\%)EA}{\langle X \rangle} \dots\dots\dots (A.6)$$

EP: Error porcentual de la medición, (%)

C.5) REPORTE DE LA MEDICIÓN

$$X = \langle X \rangle (u) \pm (u) \dots\dots\dots(A.7)$$

ó

$$X = \langle X \rangle (u) \pm EP (\%) \dots\dots\dots(A.8)$$

C.6) Cuando el instrumento de medición tiene un límite de sensibilidad de mayor magnitud que las variaciones ocurridas por errores aleatorios ($S \gg EA$); todas las lecturas de la magnitud medida serán iguales.

En estos casos, se toma la sensibilidad del instrumento como error absoluta.

$$EA = S = \frac{Prec}{2} \dots\dots\dots (A.9)$$

$$EP = \frac{100(\%)EA}{\langle X \rangle} \dots\dots\dots (A.10)$$

Donde,

Prec: Precisión del instrumento, equivale al mínimo valor de la magnitud que puede distinguir el instrumento de medición, (u).

PROCEDIMIENTO:

1. Llenar el tubo de vidrio con agua destilada hasta que el agua ocupe un volumen igual al indicado a la mitad de la graduación.
2. Medir la masa del tubo de vidrio lleno de agua.
3. Agregar una cantidad de pasas al tubo de vidrio graduado de modo tal que el nivel de agua indique un volumen bien definido.
4. medir la masa del tubo + agua + pasas.
5. Anotar estos datos en la tabla de datos.
6. Repetir cinco veces el procedimiento indicado en los numerales (1), (2), (3), (4) y (5)

DATOS EXPERIMENTALES

i	V_{ai} (cm^3)	M_{t+ai} (g)	V_{a+pi} (cm^3)	M_{t+a+pi} (g)	D_{Pi} (g/cm^3) ²
01	50	202.9	54	208.9	1.50
02	50	202.9	58.5	214.8	1.40
03	50	202.9	64	221.4	1.32
04	50	202.9	68.5	226.6	1.28
05	50	202.9	71.5	231.1	1.31
Σ	250	1014.5	316.5	1102.8	6.81

i	D_{Pi} (g/cm^3) ²	$D_{Pi}-\langle D_P \rangle$ (g/cm^3)	$(D_{Pi}-\langle D_P \rangle)^2$ (g/cm^3) ²
01	1.50	0.138	0.0190
02	1.40	0.038	0.0014
03	1.32	-0.042	0.0018
04	1.28	-0.082	0.0067
05	1.31	-0.052	0.0027
Σ	6.81	0	0.0316

$$\langle D_p \rangle = \frac{\sum D_{pi}}{N} = \frac{6.81 \left(\frac{g}{cm^3} \right)}{5} = 1.362 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$DE = \sqrt{\left(\frac{\sum (D_{pi} - \langle D_p \rangle)^2}{N - 1} \right)} = \sqrt{(0.0316/4)} = 0.0889 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$EA = \frac{DE}{\sqrt{N}} = \frac{0.0889 \left(\frac{g}{cm^3} \right)}{\sqrt{5}} = 0.0398 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$EP = \frac{EA \times 100(\%)}{\langle D_p \rangle} = \frac{0.0398 \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times 100\%}{1.362 \left(\frac{g}{cm^3} \right)} = 2.92\%$$

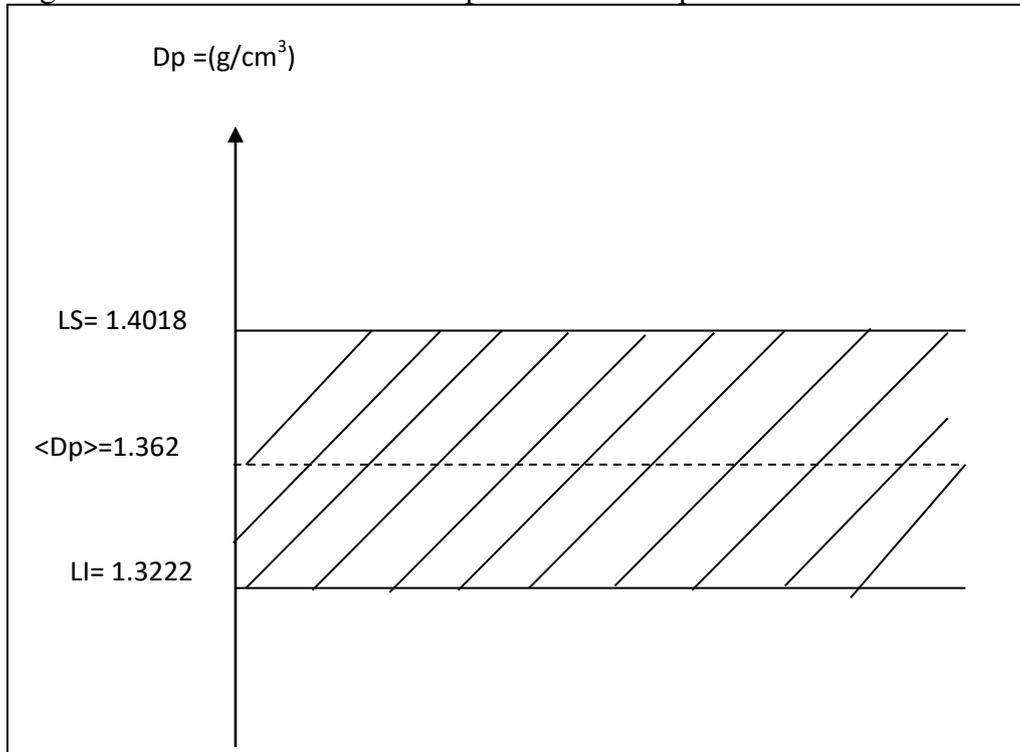
$$D_p = \langle D_p \rangle \pm EA \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$D_p = 1.362 \left(\frac{g}{cm^3} \right) \pm 0.0398 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$LS = 1.4018 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$LI = 1.3222 \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

Figura A.2. Grafica de la densidad promedio de las pasas



Ejemplo 1. Si las pasas poseen una fracción en peso de materia solida de $x=0.88$.

Considere la densidad del agua $D_a= 1(g/cm^3)$, obtener:

1. El volumen ocupado por las pasas:

$$V_p = 71.5 \text{ (cm}^3\text{)} - 50 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$V_p = 21.5 \text{ (cm}^3\text{)}$$

2. La masa de las pasas:

$$M_p = 231.1 \text{ (g)} - 202.9 \text{ (g)}$$

$$M_p = 28.2 \text{ (g)}$$

3. La densidad promedio de los sólidos que forman parte de las sustancias de las pasas.

$$D_p = 1.362 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$D_a = 1 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\frac{1}{D_p} = \frac{\left(\frac{M_s}{M_p} \right)}{D_s} + \frac{\left(1 - \frac{M_s}{M_p} \right)}{D_a}$$

$$\frac{1}{1.362 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)} = \frac{0.88}{D_s} + \frac{0.12}{1 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)}$$

$$0.7342 = \frac{0.88}{D_s} + 0.12$$

$$0.6142 = \frac{0.88}{D_s}$$

$$D_s = \frac{0.88}{0.6142}$$

$$D_s = 1.433 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

4. La masa de los sólidos que conforman las pasas:

$$\frac{M_s}{M_p} = 0.88$$

$$M_s = 0.88 \times 28.2 \text{ (g)}$$

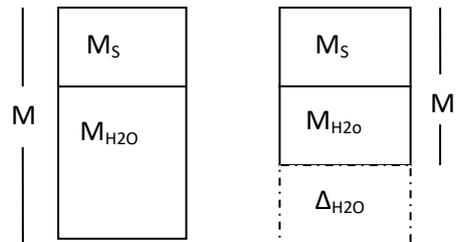
$$M_s = 24.816 \text{ (g)}$$

$$D_s = \frac{M_s}{V_s}$$

$$V_s = \frac{M_s}{D_s} = \frac{24.816 \text{ (g)}}{1.433 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)} = 17.318 \text{ (cm}^3 \text{)}$$

ANEXO N° 7. CANTIDAD DE AGUA EVAPORADA Y COMPOSICIÓN DE AGUA EN ALIMENTOS

La composición de un nutriente en alimentos se expresa en gramos (mg, ug) de nutriente por cada 100 g de alimento.



$$C_{agua} = 80 \left(\frac{g}{100g} \right)$$

$$C'_{agua} = 15 \left(\frac{g}{100g} \right)$$

$$C_a = \frac{M_{a(s)} \times 100}{M_a + M_S(g)} \left(\frac{g}{100g} \right)$$

$$C'_a = \frac{M'_a \times 100}{M_S + M'_a(g)} \left(\frac{g}{100g} \right) \gg C'_a = \frac{M'_a \times 100}{M_S + M_a + \Delta M_a}$$

$$M_a = \frac{C_a(M_a + M_S)}{100} \quad \gg \Delta M_a = M'_a + M_a$$

$$M'_a = \frac{C'_a(M_S + M_a + \Delta M_a)}{100}$$

$$\Delta M'_a = \frac{C_a(M_S + M_a + \Delta M_a)}{100} - \frac{C_a(M_a + M_S)}{100}$$

$$\Delta M_a = \frac{100(C'_a - C_a)}{100 - C'_a}$$

Perdida de masa de H₂O

CAPITULO IV

4.1 CONCLUSIÓN.

En el presente trabajo se estudió el túnel de secado en donde hallamos los algoritmos de cálculo.

Se estimó la temperatura y la humedad de aire antes de la etapa de calefacción; en la salida de aire de la etapa de calefacción Anexo 4.

Se halló la velocidad de secado en la fase creciente y decreciente, luego se obtuvo la gráfica de la velocidad en las dos fases.

Se pudo obtener el coeficiente total de transmisión de calor H_t para las condiciones dadas en el túnel de secado.

También se encontró la difusividad.

4.2 Sugerencias.

Para un satisfactorio funcionamiento de secadores de bandejas depende primeramente del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo el material que se esta secando en este caso la uva.

La corriente de aire adecuada para este tipo de secadores depende de que el ventilador tenga una capacidad potencia mayor de (15 w), (20-25 W), del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados.

Sistema de calefacción 1000 -1500 W.

Fuente de alimentación graduada 220 (V), 140(V), 100(V), 60 (V)

También se prefiere que las bandejas sean metálicas, ya que conducen el calor con mayor facilidad.

CAPITULO V

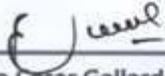
FUENTES DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Berrqcal, M. & Flores, J. (2004). *Desarrollo de un modelo numeric0 que permita simular el comportamiento de sistemas termosifonicos, para calentamiento de agua asistidos con energía solar* (Tesis de Maestría) CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO, cenidet, México.
- Tapia, J. & Soto, G. (2013). *Automatización de un prototipo deshidratador de laboratorio para frutas y hortalizas* (Doctoral dissertation), Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Soto, R. (2012). *Desarrollo de un código computacional para el cálculo dinámico de cargas térmicas en edificaciones* (Doctoral dissertation). Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, N.L., México.
- Vargas, E., & Arce, L. (2014). Uso de algoritmos genéticos para la calibración de un modelo hidrológico precipitación-escorrentía en la cuenca del caplina. *vicerectorado académico oficina general de investigación*, 45.
-
- Jiménez H. (1999). Modelamiento matemático de los procesos de transferencia de momentum, calor y masa en medios porosos. México.

Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/295177441/MODELAMIENTO-MATEMATICO-de-Transferencia-de-Calor-y-Masa-en-Medios-Porosos#scribd>

- Reyna, T. y Lábaque, M. (2008). *Acoplamiento de los procesos de escurrimiento superficial e infiltración*. Argentina. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/779/Tesis%20Teresa%20Reyna%20-5.pdf?sequence=1>.
- Melvin, M. (1973). *Termodinámica: Instrucción programada*. Argentina: Ediciones Marymar.
- Ruiz, C. (2010). *Guía para la elaboración del proyecto de tesis*. Huacho, Perú: Imprenta la Libertad E.I.R.L.
- Perry, R. y Chilton, C. (2007). *Biblioteca del ingeniero químico*. México: Edit. Programas Educativos, S.A.
- Van, G. (2000) *Fundamentos de termodinámica*. México: Editorial Limusa, S.A.

JURADOS EVALUADORES



Msc. Eladio César Gallardo Bazán

PRESIDENTE



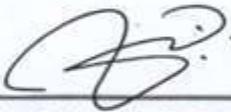
Mo. Jhonny Javier Albitres Infantes

SECRETARIO



Dr. Cristian Iván Ecurra Estrada

VOCAL



Msc. Carlos Job Fiestas Urbina

ASESOR