



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

GUIÓN EXPERIMENTAL DE SECADO  
POR ASPERSIÓN CON DISCO  
CENTRÍFUGO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:  
EDUARDO ALLAN MUÑOZ GUTIÉRREZ



México, D.F.

2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



---

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** ANTONIO VALIENTE BARDERAS

**VOCAL:** JESÚS TORRES MERINO

**SECRETARIO:** MANUEL VÁZQUEZ ISLAS

**PRIMER SUPLENTE:** GENOVEVO SILVA PICHARDO

**SEGUNDO SUPLENTE:** NÉSTOR NOÉ LÓPEZ CASTILLO

**LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA INVESTIGACIÓN:**

- LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE QUÍMICA,  
UNAM

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**DR. JESÚS TORRES MERINO**

**SUSTENTANTE:**

---

**EDUARDO ALLAN MUÑOZ GUTIÉRREZ**



---

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Química y a la UNAM que me brindaron todos y cada uno de los conocimientos necesarios para el término de mis estudios así como las experiencias que contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional.

Al Dr. Jesús Torres Merino por todas sus enseñanzas compartidas, por su asesoramiento, por su tiempo al revisar todos mis trabajos, por su paciencia al corregirlos, por su paciencia al enseñarme y más que nada por haberme brindado su confianza y comprensión. ¡Gracias!

## **DEDICATORIA**

A mi familia querida, Bertha mi madre, Laura y Marco mis hermanos. Gracias porque sin su apoyo e impaciencia esto no habría culminado.

A mi amada Malena Gutiérrez Toledo.

A Martín Aparicio Barrenechea por mostrarme el camino a seguir.



# Índice General

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Resumen</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Introducción General</b>                            | <b>5</b>  |
| <b>3. Fundamentos generales del secado</b>                | <b>7</b>  |
| 3.1. Secado . . . . .                                     | 7         |
| 3.2. Humedad de los productos que deben secarse . . . . . | 8         |
| 3.3. Secado por aspersión . . . . .                       | 9         |
| 3.4. Etapas del secado por aspersión . . . . .            | 10        |
| 3.5. Proceso de secado . . . . .                          | 12        |
| 3.5.1. Atomización . . . . .                              | 13        |
| 3.5.2. Atomizadores rotatorios . . . . .                  | 14        |
| 3.5.3. Contacto aire-gota . . . . .                       | 16        |
| 3.5.4. Evaporación . . . . .                              | 17        |
| 3.5.5. Recuperación del producto . . . . .                | 21        |
| <b>4. Secadores por atomización y boquillas</b>           | <b>25</b> |
| 4.1. Clasificación para los secadores . . . . .           | 25        |
| 4.2. Secadores por convección . . . . .                   | 26        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.3.      | Boquillas para equipos de secado por aspersión . . . . .             | 27        |
| 4.3.1.    | Características básicas . . . . .                                    | 27        |
| 4.3.2.    | Capacidad de las boquillas . . . . .                                 | 27        |
| 4.3.3.    | Gravedad relativa . . . . .  | 31        |
| 4.3.4.    | Tamaño de la Gota de Aspersión . . . . .                             | 31        |
| 4.3.5.    | Ángulo de aspersión . . . . .  | 34        |
| 4.3.6.    | Selección del atomizador . . . . .                                   | 36        |
| <b>5.</b> | <b>Guión Experimental. Secado por aspersión con disco centrífugo</b> | <b>39</b> |
| 5.1.      | Objetivo académico . . . . .   | 39        |
| 5.2.      | Problema . . . . .   | 39        |
| 5.3.      | Parte experimental . . . . .   | 40        |
| 5.3.1.    | Medidas de higiene y seguridad . . . . .                             | 40        |
| 5.4.      | Material requerido del almacén LIQ . . . . .                         | 42        |
| 5.4.1.    | Sustancias . . . . .   | 44        |
| 5.4.2.    | Servicios auxiliares . . . . .                                       | 44        |
| 5.5.      | Descripción del equipo . . . . .                                     | 44        |
| 5.6.      | Preparación del equipo . . . . .                                     | 45        |
| 5.6.1.    | Compresora . . . . .   | 45        |
| 5.6.2.    | Atomizador . . . . .   | 47        |
| 5.6.3.    | Baño de temperatura controlada . . . . .                             | 48        |
| 5.6.4.    | Monta-jugos de vidrio . . . . .                                      | 48        |
| 5.6.5.    | Bomba de succión . . . . .   | 49        |
| 5.6.6.    | Preparación de la solución . . . . .                                 | 51        |
| 5.7.      | Puesta en marcha del secador . . . . .                               | 52        |
| 5.8.      | Paro del equipo . . . . .  | 58        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.8.1. Limpieza del disco centrífugo . . . . .                       | 60         |
| 5.8.2. Limpieza del equipo . . . . .                                 | 61         |
| 5.9. Cuestionario . . . . .  | 62         |
| 5.10. Nomenclatura . . . . .   | 64         |
| <b>6. Memoria de Cálculo</b>   | <b>66</b>  |
| 6.1. El balance de masa . . . . .                                    | 67         |
| 6.2. Balance por componente . . . . .                                | 68         |
| 6.3. Balances de masa a 160 °C . . . . .                             | 70         |
| 6.3.1. Cálculos a 160 °C . . . . .                                   | 75         |
| 6.4. Balances de masa a 180 °C . . . . .                             | 79         |
| 6.4.1. Cálculos a 180 °C . . . . .                                   | 84         |
| 6.5. NUT y eficiencia $[\eta]$ . . . . .                             | 88         |
| 6.5.1. Memoria de cálculo para obtener el NUT y la eficiencia $\eta$ | 88         |
| <b>7. Análisis de Resultados</b>                                     | <b>107</b> |
| <b>8. Conclusiones</b>   | <b>111</b> |
| <b>9. Bibliografía</b>   | <b>113</b> |
| <b>10. Anexo I y II</b>  | <b>115</b> |
| 10.1. Secador por aspersion . . . . .                                | 115        |
| 10.2. Partes constitutivas del secador por aspersion . . . . .       | 117        |
| 10.3. Atomizador o disco centrífugo . . . . .                        | 120        |



# Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Esquema del proceso de secado por aspersión. . . . .   | 9  |
| 3.2. Etapas del secado por aspersión . . . . .  | 11 |
| 3.3. Clasificación de atomizadores. . . . .   | 14 |
| 3.4. Intervalo de tamaño de partículas obtenidas en secadores por as-<br>persión (Filková et al., 2006) . . . . . | 15 |
| 3.5. Atomizador rotatorio (LIQ, Facultad de química, UNAM 2015) .   | 16 |
| 3.6. Tipos de contacto aire-gota . . . . .  | 18 |
| 3.7. Curva típica de velocidad de secado (Treybal, 1996) . . . . .  | 19 |
| 3.8. Etapas de cambios cualitativos en el secado de una gota asperjada<br>(Grajales, 1996) . . . . .              | 20 |
| 3.9. Recuperación del producto en el secador por aspersión . . . . .  | 22 |
| 3.10. Selección del sistema de recolección de polvos . . . . .  | 22 |
| 3.11. Esquema separador ciclónico . . . . .   | 23 |
| 3.12. Separador Ciclónico del equipo Niro Atomizer LIQ Facultad de<br>Química . . . . .                           | 24 |
| 4.1. Boquillas para aspersión . . . . .   | 28 |
| 4.2. Boquillas para aspersión . . . . .   | 29 |

---

|  |    |
|--|----|
| 4.3. Relación capacidad de la boquilla . . . . .   | 30 |
| 4.4. Factores de capacidad para grupos de boquillas específicos . . . . .  | 30 |
| 4.5. Gravedad específica del líquido . . . . .   | 32 |
| 4.6. Tamaño de gotas reales . . . . .  | 33 |
| 4.7. Tamaño de gotas reales . . . . .  | 34 |
| 4.8. Cobertura teórica de aspersión [cm] . . . . .   | 35 |
| 4.9. Esquema de aspersión . . . . .  | 36 |
| 5.1. Tabla datos experimentales . . . . .  | 57 |
| 6.1. Esquema general . . . . .   | 67 |
| 6.2. Esquema para balances a 160 °C . . . . .  | 72 |
| 6.3. Esquema para balances a 180 °C . . . . .  | 81 |
| 6.4. Esquema que muestra cómo se percibe la partícula húmeda al inicio del secado [PA] y cómo se ve la partícula seca al término del mismo [PB]. . . . . | 88 |
| 6.5. Lo que se debe conocer cuándo la partícula se encuentre en el punto PA. . . . .   | 89 |
| 6.6. Muestra que teniendo una $T_{BH}$ y una $T_{BS}$ se puede conocer una [Y] para determinar una $T_{BH,A}$ a una $T_{air-cal}$ fija. . . . .          | 91 |
| 6.7. Ventana de Vaisala©. Entradas de $T_{BS}(ent)$ , $T_{BH}(ent)$ y $P_{atm}$ . . . . .  | 92 |
| 6.8. Ventana de Vaisala©. Entradas de $T_{air-cal}$ , Mixing ratio (x) y $P_{atm}$ . . . . .   | 94 |
| 6.9. Lo que se debe conocer cuando la partícula se encuentre en el punto PB. . . . .   | 97 |
| 6.10. Muestra que teniendo una $T_{BH}$ y una $T_{BS}$ se puede conocer una [Y] para determinar una $T_{BH,B}$ a una TB fija. . . . .                    | 98 |

---

---

*ÍNDICE DE FIGURAS*

|  |     |
|--|-----|
| 6.11. Ventana de Vaisala© Entradas de $T_{BS}(\text{sal})$ , $T_{BH}(\text{sal})$ y $P_{atm}$ . . .  | 99  |
| 6.12. Ventana de Vaisala©. Entradas TB, Mixing ratio (x) y $P_{atm}$ . . .                           | 100 |
| 6.13. Muestra en que sitio del secador se encuentra $\Delta P_{motriz}$ y $\Delta P_{proceso}$ . 103 |     |
| 10.1. Frente del secador por aspersión. . . . .  | 116 |
| 10.2. Diagrama secador vista lateral. . . . .  | 117 |
| 10.3. Diagrama secador vista aerea. . . . .  | 118 |
| 10.4. Diagrama secador vista frontal. . . . .  | 119 |
| 10.5. Disco rotatorio. . . . .   | 121 |
| 10.6. Disco rotatorio detalle. . . . .   | 122 |
| 10.7. Diagrama disco rotatorio. . . . .  | 122 |
| 10.8. Diagrama disco rotatorio. . . . .  | 123 |
| 10.9. Gráfica de presión vs rpm. . . . .   | 123 |
| 10.10 Monta-jugos de vidrio con capacidad de 2 litros. . . . .                                       | 124 |
| 10.11 Bañ térmico de temperatura controlada. . . . .   | 125 |
| 10.12 Bomba dosificadora o de succión. . . . .   | 125 |
| 10.14 Compresora exclusiva del secador por aspersión. . . . .  | 126 |
| 10.13 Relación diámetro manguera - posición compuerta . . . . .                                      | 126 |
| 10.15 Secado a $160^{\circ}\text{C}$ . . . . .   | 127 |
| 10.16 Secado a $180^{\circ}\text{C}$ . . . . .   | 128 |
| 10.17 Potenciales motrices a $160^{\circ}\text{C}$ . . . . .   | 129 |
| 10.18 Potenciales motrices a $180^{\circ}\text{C}$ . . . . .   | 130 |



# Capítulo 1

## Resumen

El secado por aspersión es el proceso de poner en contacto una corriente líquida que puede ser una solución o una suspensión atomizada que se seca con una corriente de aire que está a una temperatura mayor que la corriente de líquido. La temperatura más alta en la corriente de aire causa la evaporación del líquido en las gotitas finamente atomizadas, formando pequeñas partículas.

El contacto entre el aire de calefacción y una corriente líquida se puede lograr ya sea en una co-corriente o de manera contra-corriente. Una partícula atomizada debe permanecer en el secador el tiempo suficiente para la completa evaporación del disolvente (agua generalmente), pero no demasiado tiempo para causar la degradación del producto, por ejemplo, por la carbonización.

El secado por aspersión se ha utilizado ampliamente en la industria alimentaria, por ejemplo, secado de carbohidratos, gomas, lípidos y proteínas; la industria farmacéutica, para formar polvos de peletización; la industria minera para secar polvos y en general la industria química para detergentes, pigmentos y tinturas entre otros. Además, el secado por aspersión permite obtener productos con

características específicas de humedad, densidad, tamaño de partícula, entre otras.

Mediante este proceso simple y rápido, se consigue secar los sólidos y sólidos solubles, con la más alta calidad, preservando las características esenciales de los mismos. Este proceso también ofrece ventajas en la reducción de los pesos y volúmenes.

El secado por aspersión cobra una importancia adicional al tratar el tamaño de la partícula al final del proceso; esto es debido a la combinación de dos factores, la boquilla que se utiliza para asperjar y el tipo de caudal que se utiliza. Existen diferentes tipos de boquillas que nos dan un amplio ángulo de distribución de las partículas asperjadas.

En el secado por atomización descrito en este trabajo se ha establecido como objeto de estudio el número de unidades de transferencia de masa [NUTm] y la eficiencia de secado. Se considera como parámetro de control, la temperatura, siendo posible tomar tres parámetros más en el experimento para determinar el NUTm. Estas variables pueden ser la velocidad del rotor, el flujo de aire y el flujo de la solución.

La eficiencia en este tipo de procesos debe corroborar la necesidad intrínseca de mantener los procesos de secado por atomización como prioritario pues pone de manifiesto que las variables involucradas, su control y los resultados obtenidos son los requerimientos mínimos para obtener resultados satisfactorios en términos de la eficiencia.

En el presente trabajo se propone un guión experimental que involucra un secador por atomización tipo NIRO donde se han medido temperaturas, humedades, flujos, VUT's, NUT's, eficiencia del secado, etc. Con este ensayo se elaboró un guión experimental que permite conocer los parámetros de operación que contro-

---

lan el secado, siendo determinada la temperatura como el parámetro conducente de este estudio.

La humedad del aire es muy importante cuando se trata de obtener un balance de componentes en cuanto a la transferencia de masa se refiere. Debido a esto, se eligen datos experimentales similares de temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco a la entrada cuando el aire de calentamiento del equipo fue de 160 °C y 180 °C. Con esta selección de datos se estableció como parámetro de variación a la temperatura de calentamiento, considerándola, como se ha de describir más adelante, como la conducente del sistema de transferencia de masa.



## Capítulo 2

# Introducción General

Las operaciones de separación tienen gran importancia económica en los procesos puesto que representan entre el 10 % y el 90 % del costo total de producción (Ulloa, 1998). El secado es una operación usada dentro de la etapa de tratamiento final del producto, ya que permite la conservación del mismo; y el método escogido para llevar a cabo el proceso depende del tipo de producto procesado, la calidad que se desea, el costo, etc.

El secado es el proceso más viejo utilizado para la preservación de alimentos, pero sigue siendo uno de los métodos más comunes vigentes de mayor importancia en todos los sectores para la producción de los productos sólidos.

Entre los métodos de secado disponibles, el secado por aspersión tiene gran importancia en la industria química, farmacéutica, biotecnológica y de alimentos entre otras, ya que es particularmente aplicado a materiales termolábiles (usando temperaturas del gas de secado desde 90°C), dando como resultado un producto con características específicas como tamaño y densidad de partícula, humedad, entre otras.

Las primeros indicios del secado por aspersión datan de los años de 1860 (Alamilla, 2001); en seguida se esboza el desarrollo general de los estudios que se realizaron al respecto.

En los años 40's y 60's se realizaron estudios orientados al análisis y desarrollo de ecuaciones para describir el tamaño y forma de la gota asperjada y secada, el tiempo de viaje y el tiempo de secado, las cuales se siguen aplicando en la actualidad; de tal manera que sí se comprende lo que ocurre en el proceso de secado, es posible diseñar equipos que permitan obtener productos con características deseadas.

En los años 70's la tendencia fue establecer condiciones de operación y de diseño de equipos sin que éste haya quedado totalmente explícito (Alamilla, 2001).

Hasta la fecha se siguen desarrollando modelos que permiten describir el proceso de secado (involucrando transferencia de masa y calor, cambios de tamaño de la gota, humedad, temperatura, etc.) auxiliándose para ello de las computadoras; incluso existen en el mercado programas computacionales para determinar los patrones de flujo y perfiles de temperatura como lo es el código de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

# Capítulo 3

## Fundamentos generales del secado

### 3.1. Secado

El secado es la operación unitaria en la cual el contenido de humedad del material es eliminado hasta alcanzar la humedad de equilibrio mediante evaporación como resultado de la aplicación de calor bajo condiciones controladas. La conservación de productos de tipo biológico se debe a que la actividad acuosa se reduce a un nivel donde no se presenta actividad microbiológica y tanto el deterioro químico como las reacciones bioquímicas se reducen al mínimo. La reducción de la actividad acuosa se logra a través de la aplicación de calor al producto. En esta operación se involucra transferencia de calor y masa produciendo transformaciones físicas y químicas. Estos cambios pueden ser de tipo físico como: encogimiento, inflado, cristalización; o bien pueden ocurrir reacciones químicas o bioquímicas deseables o indeseables con cambios de color, textura, olor, sabor y en otras propiedades del producto sólido (Alamilla, 2001; Alamilla et al., 2005). Entre los equipos de secado más comúnmente utilizados se encuentran los seca-

dores de tambor, secadores rotatorios, secador de charolas, de túnel, de banda, de lecho fluidizado y de aspersion (Treyball, 2000).

## **3.2. Humedad de los productos que deben secarse**

La humedad contenida en los cuerpos sólidos o líquidos se presenta en forma de líquido puro, o en forma de una solución en la que el agua constituye por lo general el disolvente. Se trata entonces de una solución capaz de cristalizar o de una solución coloidal. Según la naturaleza de la unión entre la humedad y la materia seca, se distinguen el líquido adherente, el líquido capilar y el líquido de hinchado. El líquido adherente se presenta en forma de una película unida a los fragmentos gruesos de la superficie exterior de la materia, existiendo por todas partes un contacto libre entre la superficie húmeda y el agente secador. En el fenómeno de secado, el detalle característico será que la tensión de vapor del líquido adherente corresponderá para cada temperatura a su valor de saturación.

El líquido capilar es aquel que queda retenido por los intersticios de una materia porosa y que, en el momento del secado, se desplaza hacia la superficie bajo la acción de fuerzas capilares. En las materias de poros gruesos, el líquido capilar, como el líquido adherente conserva una tensión de vapor en relación a la temperatura del producto. En este caso nos encontramos con un comportamiento higroscópico.

En las materias de poros finos el diámetro capilar es muy reducido (inferior a  $10^{-7}$  m); la tensión de vapor es sensiblemente menor y desciende aun más en el transcurso del secado, porque el líquido queda retenido en los capilares más

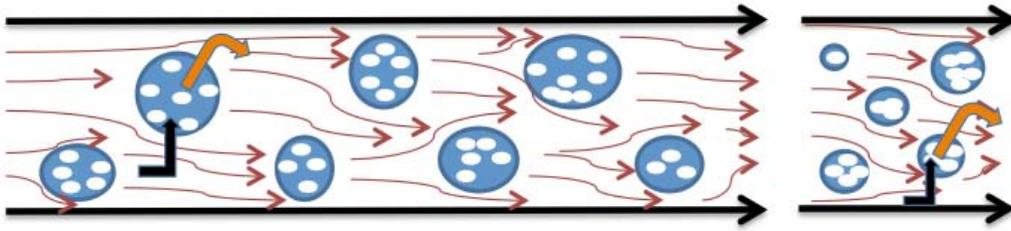


Figura 3.1: Esquema del proceso de secado por aspersión.

finos. Una materia que presenta estas características se denomina higroscópica. Con la denominación de líquido de hinchado entendemos toda clase de humedad que provoca en un cuerpo un hinchamiento o aumento de volumen. Mientras que el líquido adherente y el líquido capilar mojan las superficies externa e interna del producto, el líquido de hinchado forma parte integral de la fase del producto. Las superficies que la limitan son permeables tanto al agua como al vapor.

### 3.3. Secado por aspersión

La operación de secado por aspersión consiste en la transformación de una alimentación en estado líquido, solución o suspensión, a un producto en estado sólido y seco, poniendo en contacto dicha alimentación en forma de gotas finas con una corriente de aire caliente. El tiempo de contacto entre el fluido atomizado y la corriente de aire es muy corto, en consecuencia el daño al material asperjado es mínimo. (Masters 1985)

Como se puede observar en la (Fig. 3.1) la flecha oscura simboliza la transferencia de calor a la gota, mientras que la flecha parda la transferencia de materia, es decir, el agua de la gota a la corriente de aire caliente; al transcurrir del tiempo

se observa una reducción del tamaño de la gota debido a la pérdida de agua.

### **3.4. Etapas del secado por aspersión**

El secado por aspersión consiste en cuatro etapas (Fig. 3.2)(Masters, 1985):

1. Atomización
2. Contacto aire-gota
3. Evaporación
4. Recuperación del producto seco

Las ventajas que representa el secar un producto en un secador por aspersión son (Nonhebel y Moss, 2002):

- Puesto que los tiempos de secado son muy cortos, muchos materiales termo sensibles pueden ser secados satisfactoriamente, mientras que otros tipos de equipos de secado resultarían inadecuados.
- En el secado el material no está en contacto con las paredes del equipo hasta que está seco y, además, las paredes se encuentran aproximadamente a la temperatura de del aire de salida; por lo tanto se reducen los problemas de pegado y corrosión del equipo.
- El producto es obtenido como un polvo fluido finamente dividido y en forma fácilmente soluble en un disolvente apropiado.
- El tamaño de partícula de algunos productos es ajustable dentro de ciertos límites, variando las condiciones de atomización.

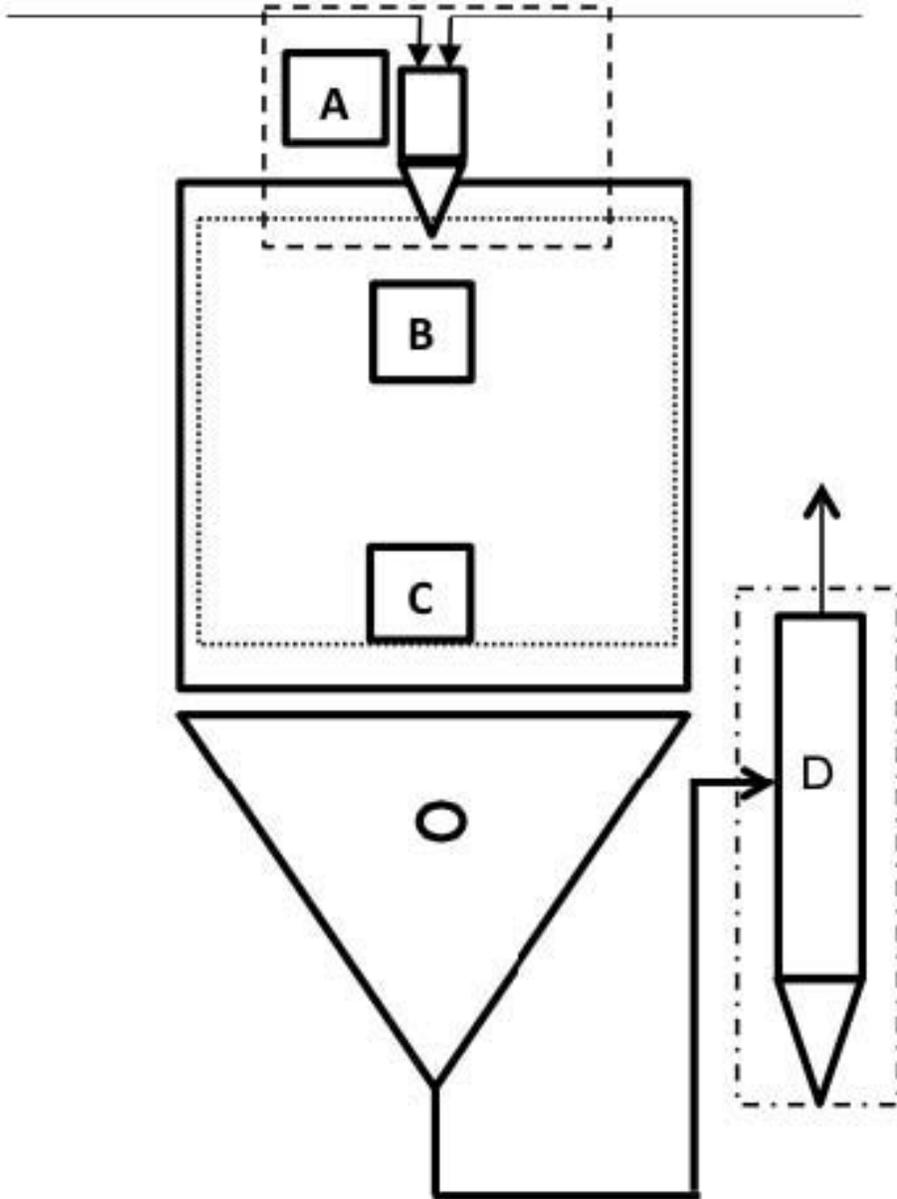


Figura 3.2: Etapas del secado por aspersión

- El proceso es adecuado para el secado continuo de cantidades relativamente grandes de material.
- En ciertos casos el proceso puede eliminar la necesidad de filtración o molidura, aunque en forma alternativa éstos pueden resultar necesarios.
- En ciertos casos, donde es conveniente obtener una baja densidad aparente del producto, es ventajoso el secado por aspersión.
- Permite usar altas temperaturas sin afectar las cualidades del producto.
- El proceso es continuo y constantemente controlado.
- Las condiciones de limpieza y semi-esterilidad son más fácilmente obtenidas que en la mayoría de los otros equipos de secado.
- Se aumenta el tiempo de vida útil del producto.
- Se reducen los costos de almacenamiento y embarque.

### **3.5. Proceso de secado**

Cuando un sólido húmedo es sometido a un proceso de secado, se presentan dos subprocesos:

- a) Transferencia de masa. La humedad interna del sólido va hacia la superficie de éste y se evapora. El movimiento de la humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física del sólido, su temperatura y su contenido de humedad.

b) Transferencia de energía. El calor del aire de calentamiento que rodea al sólido evapora la humedad de su superficie. Este segundo subproceso depende de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo del aire, presión, área de exposición y el tipo de secador empleado.

### **3.5.1. Atomización**

La atomización se logra al aplicar energía a la masa de líquido que va a ser procesado. Esta operación debe producir una nube de líquido con alta relación superficie-masa y la dispersión del tamaño de partícula debe mantenerse al mínimo. La atomización es la operación más importante en el proceso de secado por aspersión (Masters, 1985). El tipo de atomizador determina la energía requerida para formar la nube, el tamaño y la distribución de las partículas atomizadas, así como su trayectoria y velocidad; siendo estos los factores de los que depende el tamaño final de la partícula seca. En general existen 4 tipos de atomizadores. Los más comunes son los atomizadores de disco rotatorio y los de boquillas de presión para fluidos simples. También están las boquillas neumáticas y las boquillas sónicas (Filková et al., 2006).

Los aspersores/atomizadores se muestran en la figura 3.3

- Atomizadores rotatorios: originan una descarga de líquido a alta velocidad desde el eje de un disco rotatorio.
- Boquillas a presión: descargan líquido bajo presión a través de un orificio pequeño.
- Boquillas neumáticas: logran la aspersión por medio del uso de aire u otro gas a alta velocidad en contacto con la alimentación.

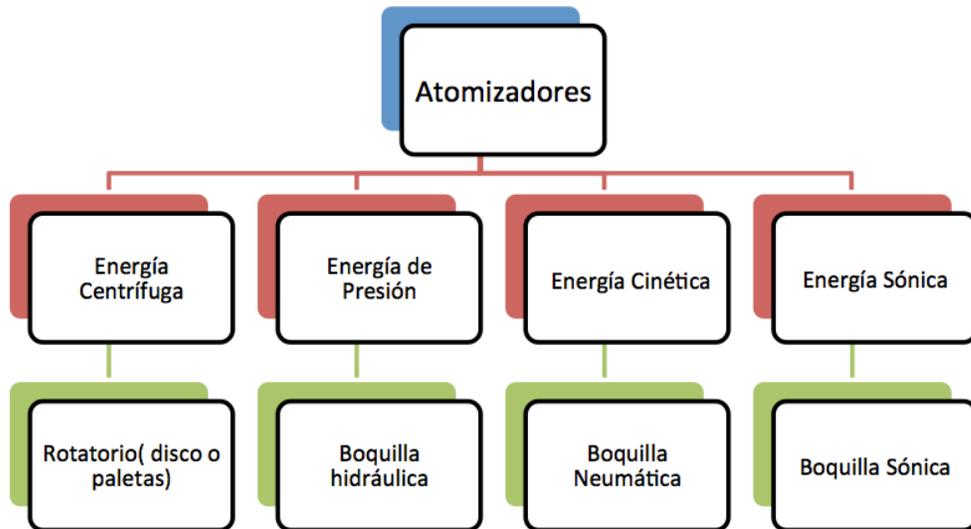


Figura 3.3: Clasificación de atomizadores.

- Boquillas sónicas: energía ultrasónica es utilizada al hacer pasar el líquido sobre una superficie vibrando a frecuencias ultrasónicas.

Los intervalos típicos de tamaño de partículas obtenidos en secadores por aspersión se muestran en la (Fig. 3.4).

### 3.5.2. Atomizadores rotatorios

En un atomizador rotatorio el líquido es alimentado en el centro del disco rotatorio, se mueve al borde del disco por acción de la fuerza centrífuga y allí es desintegrado en gotas (Fig. 3.5). El ángulo de atomización es aproximadamente  $180^\circ$  y forma una nube. Debido a su trayectoria horizontal estos atomizadores requieren cámaras con diámetros grandes (Filková et al., 2006). Generalmente este tipo de atomizadores producen una nube de alta homogeneidad dentro de

| <b>Atomizador</b>    | <b>Tamaño de partícula [<math>\mu\text{m}</math>]</b> |
|----------------------|---|
| Discos rotatorios    | 1-600   |
| Boquillas de presión | 10-800  |
| Boquilla neumática   | 5-300   |
| Boquilla sónica      | 5-1000  |

**Figura 3.4:** Intervalo de tamaño de partículas obtenidas en secadores por aspersion (Filková et al., 2006)

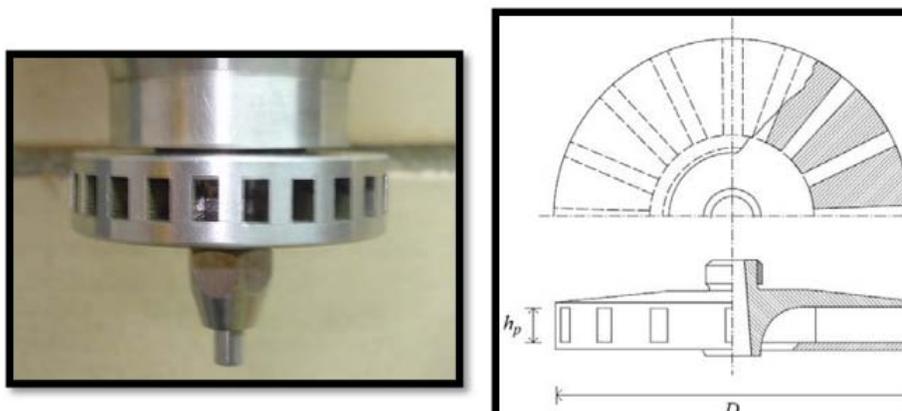
un corto intervalo de tamaño de partículas. La distribución de gotas puede ser controlada cambiando la velocidad de rotación, o bien, el flujo de la alimentación.

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas importantes del atomizador rotatorio (Filková et al., 2006)

Ventajas:

- a) Puede manejar altas velocidades de alimentación.
- b) Recomendado para materiales abrasivos.
- c) Despreciable tendencia a la obstrucción.
- d) El control del tamaño de la gota se realiza al cambiar la velocidad angular del atomizador.

Desventajas:



**Figura 3.5:** Atomizador rotatorio (LIQ, Facultad de química, UNAM 2015)

- a) Alto consumo de energía en comparación con las boquillas de presión.
- b) Alto costo de capital en comparación con las boquillas de presión.
- c) Requiere cámaras de secado con diámetros grandes.

### 3.5.3. Contacto aire-gota

Existen tres formas básicas de contacto aire-gota (Masters, 1985; Filková et al., 2006):

- 1) Flujo paralelo. El asperjado y el aire caliente se introducen por la parte superior de la cámara y viajan en la misma dirección a través del secador (Fig. 3.6). El aire caliente contacta inicialmente a las gotas atomizadas. Los atomizadores rotatorios son necesarios cuando se tienen materiales sensibles al calor. El gas de secado se va enfriando al pasar a través de la cámara y las partículas secas

se encuentran con aire más frío a la salida del equipo. Cuando se utiliza un atomizador rotatorio se presenta un perfil homogéneo de temperaturas dentro de la cámara de secado.

- 2) Flujo a contracorriente. El aire de secado y el asperjado se mueven en direcciones opuestas en la cámara de secado (Fig. 3.6). Debido a que las partículas secas se ponen en contacto con el gas más caliente y el tiempo de exposición es mayor, el diseño se propone para productos no termolábiles. En estos casos, el producto seco sale a una temperatura más alta que la del aire de salida. Este arreglo se utiliza cuando se quiere impartir ciertas cualidades al producto, como por ejemplo, una alta densidad a granel para el caso de detergentes.
- 3) Flujo mixto. Una boquilla se coloca en el fondo de la cámara, dirigida hacia arriba, dentro de la corriente descendente del gas, cuya entrada se encuentra en el techo de la cámara (Fig. 3.6). Este arreglo no se recomienda para productos termolábiles ya que las partículas secas están en contacto con el aire más caliente, sin embargo se recomienda para partículas gruesas en cámaras pequeñas, ya que la longitud del patrón de viaje de las partículas es grande. Se ha observado que estas partículas pueden presentar movimiento dentro de la cámara tanto del tipo paralelo como en contracorriente.

#### **3.5.4. Evaporación**

La velocidad de evaporación se lleva a cabo en dos períodos (Masters, 1985; Treybal, 1996)

- 1) Período de velocidad constante. La difusión de humedad desde dentro de las gotas permite tener la superficie saturada de líquido, el tamaño de la gota va

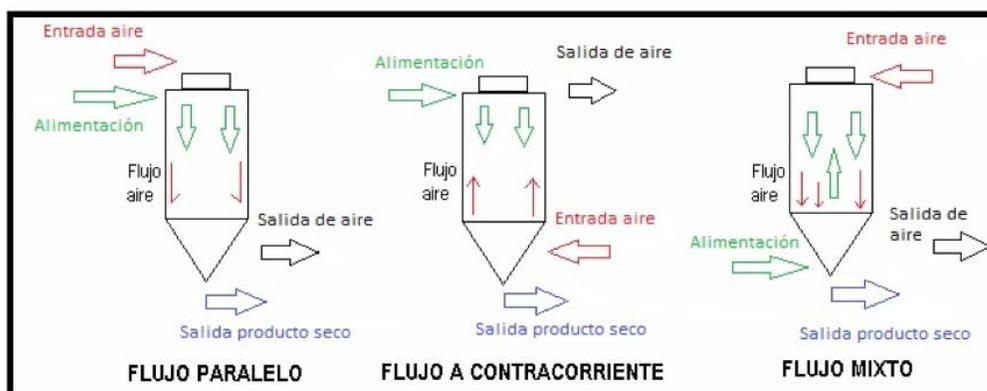


Figura 3.6: Tipos de contacto aire-gota

disminuyendo y en la superficie la temperatura permanece constante. El aire de secado disminuye su temperatura a medida que gana humedad.

- 2) Período de velocidad decreciente. La velocidad de migración de la humedad a la superficie no es suficiente para mantenerla saturada, en este momento aparecen áreas secas sobre la superficie, alcanzándose el punto crítico de humedad en donde la gota ya no puede contraerse más en volumen y su temperatura empieza a ascender. En este punto el aire de secado llega a la temperatura crítica y a una humedad crítica, su temperatura sigue disminuyendo hasta la fijada por el final del proceso aumentando su humedad.

La velocidad de secado y el tiempo requerido para el secado son dependientes de la temperatura del aire de secado, el coeficiente de transferencia de calor y el diámetro de la gota a secar (Alamilla, 2001). En la (Fig. 3.7) se muestra la curva típica de velocidad de secado y en la (Fig. 3.8) los principales cambios cualitativos en el secado de una gota asperjada.

En la (Fig. 3.8) se pueden observar tres etapas diferentes por las cuales la

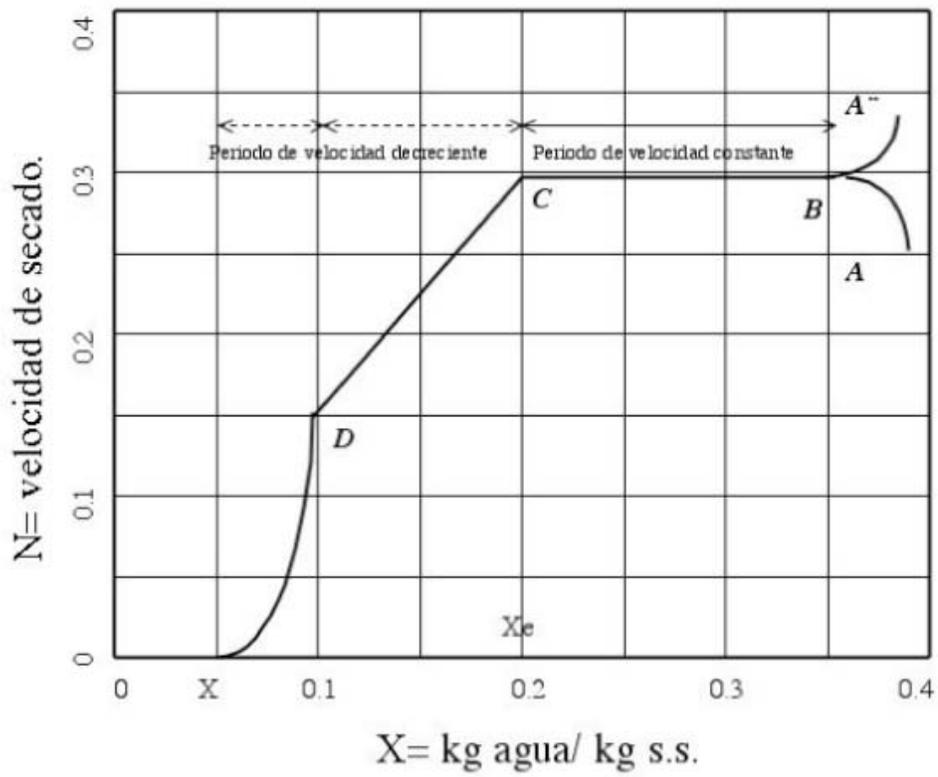


Figura 3.7: Curva típica de velocidad de secado (Treybal, 1996)

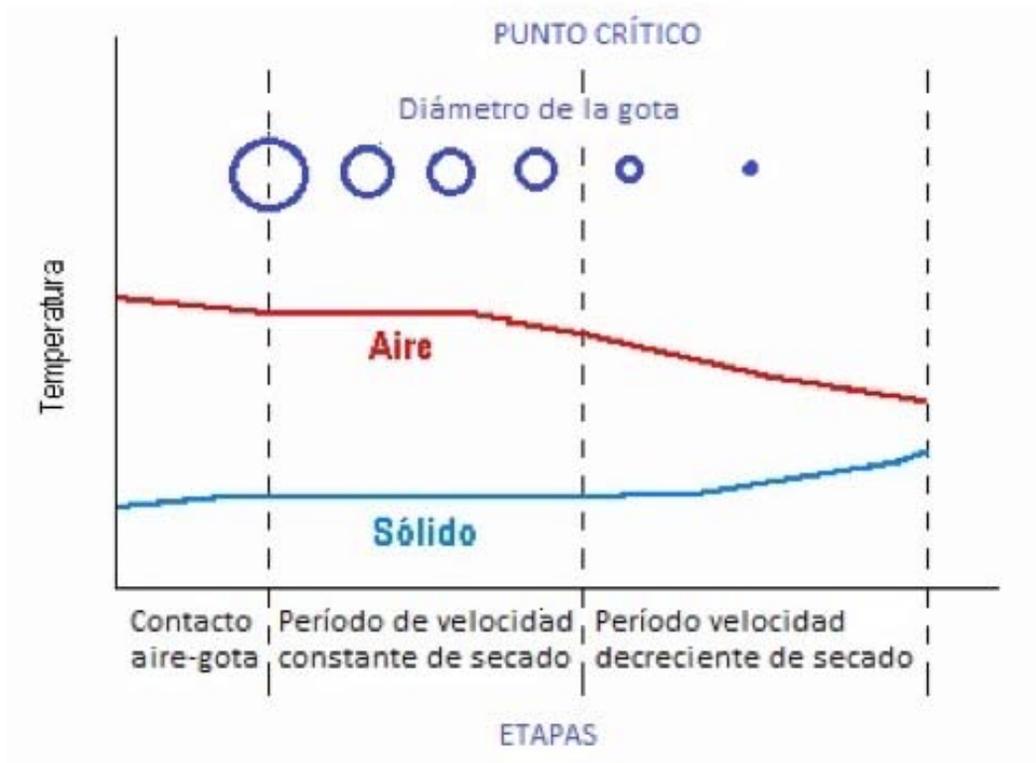


Figura 3.8: Etapas de cambios cualitativos en el secado de una gota asperjada (Grajales, 1996)

gota asperjada sigue un comportamiento bien definido cuando ésta se encuentra en contacto con el aire caliente. En la primera etapa donde ocurre el contacto aire-gota la temperatura del aire es mucho mayor que la del sólido; sugiere que va a haber una transferencia de calor entre el aire y la gota, y una transferencia de masa (agua) desde la gota hacia el aire. En la segunda etapa existe un período de velocidad de secado constante, donde la gota asperjada se mantiene estable perdiendo humedad, lo que se traduce en pérdida de masa y ganancia de calor. Contrariamente, el aire va a ganar masa y perder calor. La etapa tres, a partir de dónde se marca el punto crítico de la gota o temperatura crítica describe que en ese punto la gota ya no puede perder más humedad y es entonces cuándo comienza a ganar más rápidamente calor. Contrariamente, el aire ha ganado humedad y no puede ganar más humedad además de la que recibe del sólido. El aire se enfría. Pero puede verse que desde la etapa dos el aire comienza a ganar humedad de la gota, debido a eso, la temperatura del aire empieza a descender.

### **3.5.5. Recuperación del producto**

La separación del producto se puede realizar primero en la base de la cámara de secado (denominada separación primaria), seguida de la recuperación de finos (denominada separación secundaria), (Fig. 3.9), que puede estar constituido por ciclones, filtros bolsa, precipitadores electrostáticos o filtros húmedos. En la (Fig. 3.10) se presentan algunos criterios para la selección de estos separadores (Masters, 1985)

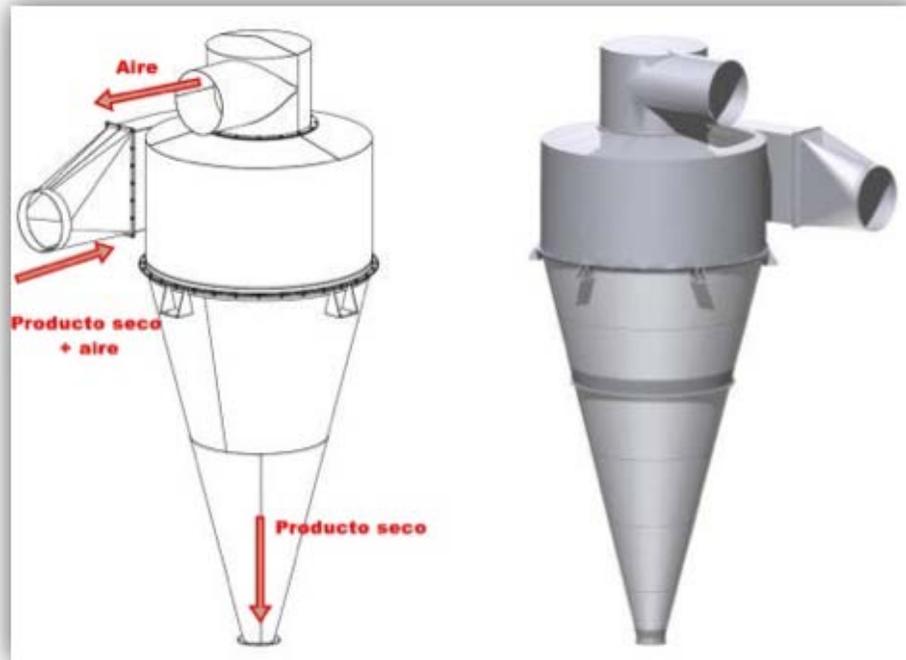
Los separadores ciclónicos son los más empleados para la separación y recolección de polvos. En estos el aire cargado de polvo entra en forma tangencial a una cámara cilíndrico-cónica girando rápidamente y sale por la parte central



Figura 3.9: Recuperación del producto en el secador por aspersion

| Requerimientos                           | Sistema recomendado    |
|--|------------------------|
| Bajo costo, eficiente, fácil limpieza    | Ciclones               |
| Costo medio, muy eficiente               | Filtro bolsa           |
| Grandes volúmenes de aire electrostático | Precipitador           |
| Recuperación de productos finos          | Ciclón + filtro húmedo |

Figura 3.10: Selección del sistema de recolección de polvos



**Figura 3.11:** Esquema separador ciclónico

superior. El producto seco, debido a su inercia, tiende a moverse hacia la pared exterior del separador donde continúa hasta caer en un receptor (Masters, 1985)



**Figura 3.12:** Separador Ciclónico del equipo Niro Atomizer LIQ Facultad de Química

# Capítulo 4

## Secadores por atomización y boquillas

### 4.1. Clasificación para los secadores

Debido a que la humedad es uno de los factores que contribuyen seriamente a la descomposición de alimentos, se han diseñado secadores orientados al secado de cierto tipo de alimentos. Por ejemplo: granos, polvos, carne, frutas y vegetales, entre otros. Dichos dispositivos constan con las características necesarias para lograr el secado óptimo (Geankoplis, 1999) La clasificación para los secadores es muy amplia, sin embargo, la más general esta dada por el método con el que se lleva a cabo la transferencia de calor, que puede ser:

- a) Conducción
- b) Convección
- c) Radiación

A su vez, los secadores se subdividen de acuerdo al tipo de contenedor del secador: charolas, tambor, túnel, aspersion, entre otros.

## **4.2. Secadores por convección**

Los secadores por aspersion están dentro de esta clasificación pues su transferencia de calor es por convección. Ellos son utilizados para secar partículas y alimentos en forma laminar o en pasta. El calor se suministra a través de aire caliente o gas, el cual fluye sobre la superficie del sólido. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado, o gases de combustión directa pueden ser utilizados en sistemas de secado convectivos (Mujumdar,2000). Algunos ejemplos de secadores convectivos o directos son: (Geankoplis,1999)

- a) Secadores en bandejas o charolas: funciona mediante un ventilador que recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las charolas, también puede usar calor eléctrico.
- b) Secadores de túnel: suelen ser compartimientos de bandejas que operan en serie, en donde las bandejas se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. Un ventilador extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera.
- c) Secadores rotatorios: consta de un pequeño cilindro que gira sobre su eje con una ligera inclinación. El calentamiento se lleva por contacto directo de gases caliente mediante un flujo a contracorriente, también puede ser a través de la pared calentada del cilindro.

d) Secadores por aspersión: un líquido se atomiza o rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez, y se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. Las partículas obtenidas son porosas y ligeras.

## **4.3. Boquillas para equipos de secado por aspersión**

### **4.3.1. Características básicas**

Las boquillas de aspersión son componentes de precisión diseñados para cumplir con un desempeño específico bajo ciertas condiciones. Para determinar cuál es la mejor boquilla para su aplicación, la siguiente tabla de referencias resume el desempeño para el cual fue diseñado cada tipo de boquilla (Spraying Systems Co., 2015).

### **4.3.2. Capacidad de las boquillas**

La capacidad de la boquilla varía con la presión de trabajo. En general, la relación entre la capacidad y la presión es la siguiente.

Todas las tablas de capacidad que se muestran aquí están basadas en agua. Dado que la gravedad específica de un líquido afecta a su caudal, las capacidades indicadas en las tablas se deben multiplicar por el factor de conversión correspondiente a la gravedad específica del líquido asperjado tal y como se explica en la sección de Gravedad Específica.

|   |  |   |
|---|--|---|
|    | <p><b>CONO HUECO (TIPO RECÁMARA DE TURBULENCIA)</b></p> <p><b>Características Principales de la Aspersión</b><br/>                     Disponible en una amplia gama de capacidades y tamaños de gota. Proporciona una buena interfase entre el aire y la superficie de las gotas.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>                     Por la gran gama de capacidades y tamaños de gota, las boquillas de cono hueco son muy útiles en una gran variedad de aplicaciones en donde se requiera combinar gotas y capacidades pequeñas.</p> <p>Patrón de aspersión:</p> |  <p>Ángulos de Aspersión:<br/>40° a 165°</p>   |
|    | <p><b>CONO HUECO (TIPO DEFLECTOR)</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>                     Utiliza una tapa deflectora para formar un patrón de aspersión de cono hueco tipo "paraguas".</p> <p><b>Comentarios</b><br/>                     Las de capacidades mayores se pueden utilizar para drenar o limpiar el interior de tuberías y tanques pequeños.</p> <p>Patrón de aspersión:</p>  |  <p>Ángulos de Aspersión:<br/>100° a 180°</p>  |
|   | <p><b>CONO HUECO (TIPO ESPIRAL)</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>                     Proporciona un patrón de aspersión de cono hueco con gotas ligeramente más gruesas que aquellas producidas por otras boquillas de cono hueco.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>                     Boquilla de tamaño compacto que proporciona un alto flujo de líquido. Su diseño de una pieza permite un paso máximo para un tamaño de tubo dado.</p> <p>Patrón de aspersión:</p>   |  <p>Ángulos de Aspersión:<br/>50° a 180°</p>  |
|  | <p><b>CONO LLENO</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>                     Utiliza una vena interna para proporcionar un patrón de aspersión de cono lleno, uniforme y redondo con gotas de medianas a grandes.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>                     Proporciona un cono lleno con flujos de medianos a grandes. También hay disponibilidad de modelos sin vena y de aspersión ovalada.</p> <p>Patrón de aspersión:</p>   |  <p>Ángulos de Aspersión:<br/>15° a 125°</p> |
|  | <p><b>CONO LLENO (TIPO ESPIRAL)</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>                     Proporciona gotas relativamente gruesas en un patrón de aspersión de cono lleno con un mínimo de obstrucción.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>                     La cobertura de la aspersión no es tan uniforme como en boquillas convencionales con vena interna. Boquilla compacta que proporciona un alto flujo.</p> <p>Patrón de aspersión:</p>  |  <p>Ángulos de aspersión:<br/>50° a 170°</p> |

Figura 4.1: Boquillas para aspersión

### 4.3. Boquillas para equipos de secado por aspersión

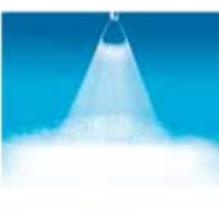
|   |   |   |
|---|---|---|
|    | <p><b>ASPERSIÓN PLANA (BORDES AHUSADOS)</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>Una boquilla de patrón de aspersión plano de bordes ahusados generalmente se instala en un cabezal para lograr una cobertura uniforme a todo lo ancho como resultado del traslape.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>Diseñada para usarse en cabezales para lograr una cobertura uniforme a todo lo largo del área de impacto.</p>  | <p>Patrón de aspersión:</p>  <p>Ángulos de aspersión:<br/>15° a 110°</p>   |
|    | <p><b>ASPERSIÓN PLANA (UNIFORME)</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>Proporciona una distribución uniforme a todo lo largo del patrón de aspersión. Produce gotas medianas. Ideal para aplicaciones en donde se requiere un gran impacto uniforme.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>El patrón de aspersión delgado y rectangular de esta boquilla proporciona una cobertura uniforme. Al instalarse en cabezales, las boquillas deben colocarse con cuidado para que los bordes de los patrones se toquen entre sí. Diseñadas para aplicaciones de alto impacto.</p> | <p>Patrón de aspersión:</p>  <p>Ángulos de aspersión:<br/>25° a 85°</p>    |
|   | <p><b>ASPERSIÓN PLANA (TIPO DEFLECTOR)</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>Produce un patrón de aspersión plano uniforme con gotas medianas. El patrón de aspersión se forma al salir el líquido por un orificio redondo y chocar con una superficie deflector.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>El diseño de amplio paso libre del orificio redondo reduce los taponamientos. Los ángulos de aspersión estrechos proporcionan un mayor impacto mientras que las versiones de ángulo ancho producen un bajo impacto.</p>   | <p>Patrón de aspersión:</p>  <p>Ángulos de Aspersión:<br/>15° a 150°</p>   |
|  | <p><b>CHORRO SÓLIDO</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>Las boquillas de chorro sólido proporcionan el mayor impacto por unidad de área.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>Ideales para aplicaciones en donde se requiera una aspersión de alto impacto.</p>  | <p>Patrón de aspersión:</p>  <p>Ángulos de aspersión: 0°</p>             |
|  | <p><b>ASPERSIÓN FINA (HIDRÁULICA, NIEBLA FINA)</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>Una atomización hidráulica, fina, de baja capacidad en un patrón de aspersión de cono hueco.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>Se utiliza para producir aspersiones finamente atomizadas en aplicaciones en donde no es recomendable utilizar aire comprimido.</p>   | <p>Patrón de aspersión:</p>  <p>Ángulos de Aspersión:<br/>35° a 165°</p> |
|  | <p><b>ATOMIZACIÓN CON AIRE Y ASISTIDA POR AIRE</b></p> <p><b>Características Generales de la Aspersión</b><br/>Atomización producida por la combinación de presiones de aire y líquido. Las boquillas asistidas por aire cuentan con un diseño interno que ayuda a la formación de gotas finas.</p> <p><b>Comentarios</b><br/>Estas boquillas son las más comúnmente utilizadas para lograr aspersiones finas en un amplio rango de capacidades.</p>  | <p>Patrón de aspersión:</p>    |

Figura 4.2: Boquillas para aspersión

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(P_1)^n}{(P_2)^n}$$

**Q:** Capacidad (en gpm o l/min)

**P:** Presión de líquido (en psi o bar)

**N:** Exponente según el tipo específico de boquilla

Figura 4.3: Relación capacidad de la boquilla

| FACTORES DE CAPACIDAD<br>PARA GRUPOS ESPECÍFICOS DE<br>BOQUILLAS   |               |
|--|---------------|
| Tipo de Boquilla   | Exponente "n" |
| Boquillas de Cono Hueco (Todas)<br>Boquillas de Cono Lleno (Sin Vena)<br>Boquillas de Cono Lleno (Serie 15° y 30°)<br>Boquillas de Aspersión Plana (Todas)<br>Boquillas de Chorro Sólido (Todas)<br>Boquillas de Espiral (Todas) | .50           |
| Boquillas de Cono Lleno (Estándar)<br>Boquillas de Cono Lleno (Aspersión Cuadrada)<br>Boquillas de Cono Lleno (Aspersión Ovalada)<br>Boquillas de Cono Lleno (Gran Capacidad)  | .46           |
| Boquillas de Cono Lleno (Ángulo Ancho)<br>Boquillas de Cono Lleno (Aspersión Cuadrada<br>Ángulo Ancho)   | .44           |

Figura 4.4: Factores de capacidad para grupos de boquillas específicos

### 4.3.3. Gravedad relativa

La gravedad relativa o gravedad específica (del inglés) es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de otra que se toma como referencia. Ambas densidades se expresan en las mismas unidades y en iguales condiciones de temperatura y presión. La gravedad relativa es adimensional ya que queda definida como el cociente de dos densidades. En la aspersión, el mayor efecto de la gravedad relativa de un líquido (diferente al agua) es en la capacidad de la boquilla. Dado que los valores aquí dados están basados en aspersión de agua, se puede utilizar un factor de conversión o una fórmula para determinar la capacidad de una boquilla asperjando un líquido distinto al agua.

$$C_{la} = C_a \times \frac{1}{(G_e)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.1)$$

$C_{la}$  = Capacidad del líquido asperjado.  $C_a$  = Capacidad del agua.  $G_e$  = Gravedad específica.

El factor de conversión multiplicado por la capacidad de la boquilla cuando se asperja agua da como resultado la capacidad de la boquilla cuando se asperja un líquido con la gravedad relativa correspondiente al factor de conversión. Este factor de conversión se tiene en cuenta solamente por los efectos de la gravedad relativa sobre la capacidad y no aplica para otros factores que afecten a la capacidad.

### 4.3.4. Tamaño de la Gota de Aspersión

- a) La información precisa sobre el tamaño de gota es un factor importante en la efectividad de la operación de la boquilla de aspersión particularmente en

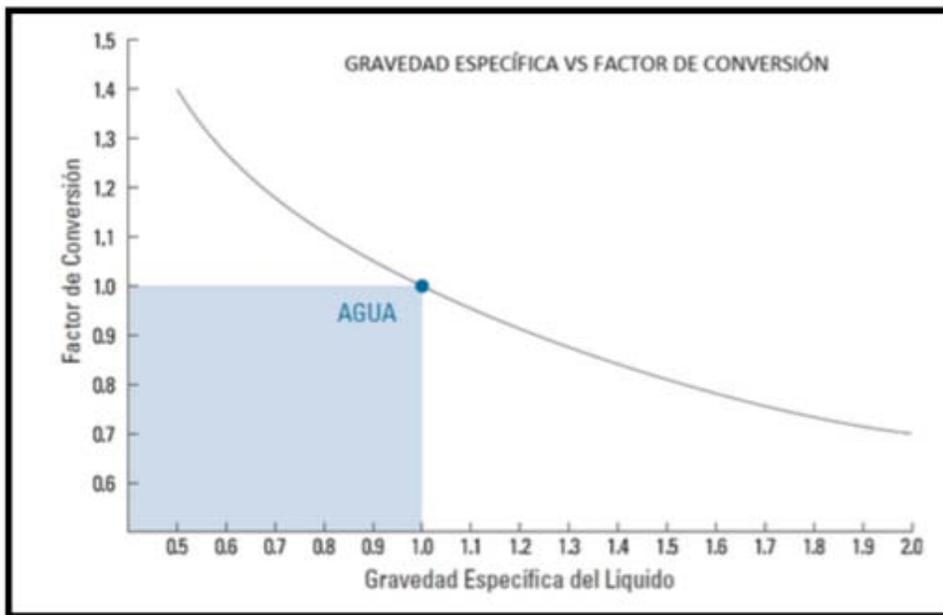
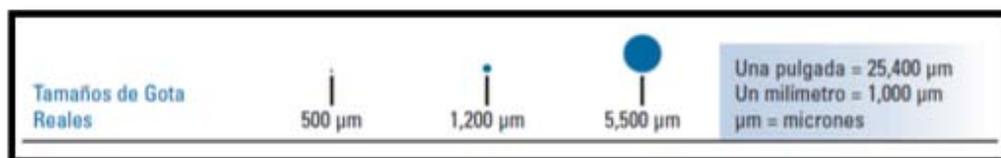


Figura 4.5: Gravedad específica del líquido

### 4.3. Boquillas para equipos de secado por aspersión



**Figura 4.6:** Tamaño de gotas reales

aplicaciones industriales como son enfriamiento de gases, acondicionamiento de gases, supresión de fuego y secado por aspersión.

- b) El tamaño de gota se refiere al tamaño individual de las gotas que forman un patrón de aspersión.
- c) Cada aspersión proporciona un intervalo de tamaño de gota. Este intervalo es referido como la distribución del tamaño de la gota.
- d) El tamaño de gota depende del patrón de aspersión y varía significativamente de un tipo de patrón a otro.
- e) El tamaño de gota más pequeño se logra con las boquillas de atomización con aire mientras que las gotas más grandes se producen por boquillas de aspersión hidráulicas de cono lleno.

Las propiedades del líquido, la capacidad de la boquilla, la presión y el ángulo afectan el tamaño de gota. A menor presión de trabajo se obtienen gotas más grandes. A mayor presión de trabajo el tamaño de gota será más pequeño. Dentro de cada intervalo de aspersión, las capacidades menores producen gotas más pequeñas y a mayor capacidad el tamaño de gota será mayor.

Tamaño de gota por patrón de aspersión:

| <b>TAMAÑO DE GOTA</b><br>por Patrón de Aspersión a Diversas Presiones y Capacidades |                  |                 |              |                  |                 |              |                 |                 |              |
|---|------------------|-----------------|--------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Tipo de Patrón de Aspersión   | 10 psi (0.7 bar) |                 |              | 40 psi (2.8 bar) |                 |              | 100 psi (7 bar) |                 |              |
|   | Capacidad gpm    | Capacidad l/min | DMV micrones | Capacidad gpm    | Capacidad l/min | DMV micrones | Capacidad gpm   | Capacidad l/min | DMV micrones |
| Aspersión con Aire  | .005<br>.02      | .02<br>.08      | 20<br>100    | .008<br>8        | .03<br>30       | 15<br>200    | 12              | 45              | 400          |
| Aspersión Fina  | .22              | .83             | 375          | .03<br>.43       | .1<br>1.6       | 110<br>330   | .05<br>.69      | .2<br>2.6       | 110<br>290   |
| Cono Hueco  | .05<br>12        | .19<br>45       | 360<br>3400  | .10<br>24        | .38<br>91       | 300<br>1900  | .16<br>38       | .61<br>144      | 200<br>1260  |
| Aspersión Plana   | .05<br>5         | .19<br>18.9     | 260<br>4300  | .10<br>10        | .38<br>38       | 220<br>2500  | .16<br>15.8     | .61<br>60       | 190<br>1400  |
| Cono Lleno  | .10<br>12        | .38<br>45       | 1140<br>4300 | .19<br>23        | .72<br>87       | 850<br>2800  | .30<br>35       | 1.1<br>132      | 500<br>1720  |

Figura 4.7: Tamaño de gotas reales

#### 4.3.5. Ángulo de aspersión

Los ángulos de aspersión indican las coberturas aproximadas asperjando agua. En la aspersión real, el ángulo efectivo de aspersión varía con la distancia. Los líquidos más viscosos que el agua forman ángulos de aspersión relativamente mas pequeños (o incluso un chorro sólido), dependiendo de la viscosidad, la capacidad de la boquilla y la presión de trabajo. Los líquidos con tensión superficial menor que la del agua producirán ángulos de aspersión relativamente más anchos que aquellos que figuran en la lista para agua. La tabla de la (Fig. 4.8) muestra la cobertura teórica de los patrones de aspersión calculada según el ángulo de aspersión y la distancia desde el orificio de la boquilla. Estos valores suponen que el ángulo de aspersión se mantenga a todo lo largo de la distancia de aspersión. En la práctica, el ángulo de aspersión tabulado no se mantiene en largas distancias.

Esquema representativo (Fig. 4.9) de la cobertura teórica de aspersión [cm] teniendo un ángulo de aspersión y la distancia recorrida por el líquido asperjado.

### 4.3. Boquillas para equipos de secado por aspersión

| Angulo de Aspersión |   | COBERTURA TEÓRICA DE LA ASPERSIÓN<br>a Distancias Distancias en Pulgadas [cm] desde el Orificio de la Boquilla |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|---------------------|---|--|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                     |   | 2"   | 3" | 4" | 5" | 6" | 7" | 8" | 10" | 12" | 15" | 20" | 25" | 30" | 40" | 50" | 60" | 70" | 80" | 90" | 100" |
| 5°                  | 2 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 10°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 15°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 20°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 25°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 30°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 35°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 40°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 45°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 50°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 55°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 60°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 65°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 70°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 75°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 80°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 85°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 90°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 95°                 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 100°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 110°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 120°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 130°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 140°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 150°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 160°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |
| 170°                | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1    |

Figura 4.8: Cobertura teórica de aspersión [cm]

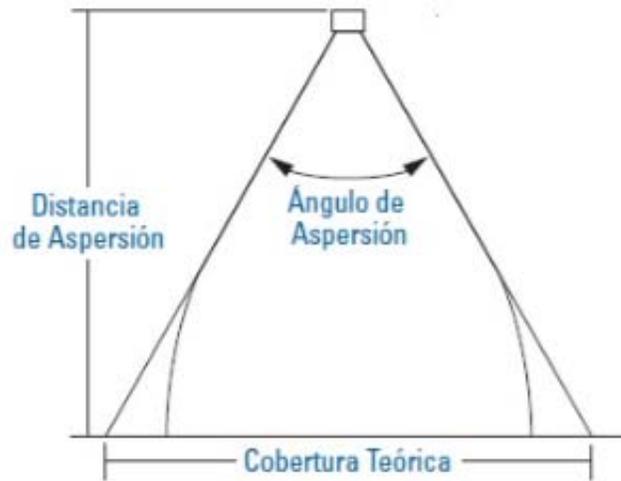


Figura 4.9: Esquema de aspersión

#### 4.3.6. Selección del atomizador

La selección del atomizador o boquilla depende de la naturaleza del alimento y de las características del producto deseado. En todos los tipos de atomizadores la cantidad de energía se incrementa cuando se requieren tamaños de gota pequeños. El grado de atomización depende de las propiedades del fluido, cuando se tienen altos valores de viscosidad y tensión superficial resultan tamaños grandes de gotas para la misma cantidad de energía disponible para la atomización. Cuando se desea una distribución de tamaño de partícula se pueden utilizar discos rotatorios o boquillas.

Comparación boquillas atomizadoras de presión y rotatorias. Spray Drying Handbook (Masters, 1991)

##### **Rotatorio:**

- a) Fácil control de tamaño de partícula

### 4.3. Boquillas para equipos de secado por aspersión

- b) Gran área de flujo
- c) Atomizador simple para alta y baja capacidad
- d) Tamaño de partícula virtualmente independiente de la velocidad de alimentación
- e) Capacidad independiente de la presión de alimentación
- f) Tendencia a depositarse en las paredes del disco
- g) Maneja mezclas y alimentos cristalinos

#### **Presión:**

- a) Menor control de tamaño de partícula
- b) Pequeña área de flujo
- c) Duplicación de la boquilla para alta capacidad
- d) Opera en rango reducido con velocidad de alimentación
- e) Capacidad proporcional a la raíz cuadrada de la presión
- f) Menor tendencia a depósito en la paredes
- g) Requiere de filtros para el alimento



# Capítulo 5

## Guión Experimental. Secado por aspersión con disco centrífugo

### 5.1. Objetivo académico

Poner de manifiesto que el secado de un producto depende del potencial motriz de transferencia de masa (fuerza impulsora) entre el contenido de "humedad del sólido" y el contenido de agua en el aire de proceso.

### 5.2. Problema

Una solución acuosa saturada de bicarbonato de sodio se procesa en un secador por aspersión para obtener un producto en polvo con una humedad menor al 5%. El experimento se realizará en dos sesiones para comparar el secado a dos temperaturas distintas de aire de secado. El flujo de la solución será el mismo para ambos experimentos. Se requiere definir cuál es la mejor opción de secado

para obtener una humedad del producto seco menor al 5%. Se empleará como criterio de selección el número de unidades de transferencia de masa NUT.

## **5.3. Parte experimental**

### **5.3.1. Medidas de higiene y seguridad**

#### **Los riesgos químicos**

Los productos utilizados son:

- a) Bicarbonato de sodio
- b) Agua destilada.

Se consideran estos compuestos en su concentración máxima a la temperatura de alimentación de la solución hacia el equipo de aspersion.

Se aconseja:

- c) Leer las fichas de seguridad de los productos
- d) Usar protección personal: bata de algodón y guantes.
- e) Respetar las instrucciones descritas en el gui3n paso a paso.

#### **Los riesgos mecánicos**

La unidad est3 dise1ada con los siguientes materiales:

- a) C3mara de secado, Disco centrífugo, Tuberías y accesorios, y Cicl3n de Acero INOX 316.

- b) Monta-jugos y vaso recuperador de polvos están hechos de vidrio.
- c) Calentador de aire por medio de resistencias eléctricas.

Estos equipos son compatibles con los productos químicos utilizados.

### **Fijación de los equipos**

- a) Asegúrese que las conexiones rápidas en las tomas de aire estén debidamente conectadas.
- b) Cuando el equipo esté en funcionamiento no toque las tuberías directamente ya que se calientan a temperaturas similares al aire de calentamiento de la cámara de secado.
- c) El funcionamiento del disco centrífugo debe ponerse en marcha cuando éste se encuentre dentro de la cámara de secado. De otro modo puede causar daños al disco o a su persona.
- d) Revise y asegure todas las conexiones en los demás equipos como son el monta-jugos, la bomba peristáltica y el baño térmico.
- e) Revise que todos los instrumentos estén debidamente calibrados y listos para usarse.

### **Riesgos eléctricos**

- a) La unidad de secado será conectada a una corriente eléctrica de 220 V.
- b) La bomba peristáltica será conectada a una corriente de 220 V.
- c) La balanza, la parrilla eléctrica y el baño térmico serán conectados a 110 V.

d) Nunca rocíe agua sobre el tablero de instrumentos o el arreglo de luces.

### **Riesgo de presión**

El riesgo de presión está presente en la unidad cuando:

- a) El equipo de secado por atomización no tiene una alimentación de aire continuo de al menos  $17\text{m}^3/\text{h}$ . Es necesario mantener encendido el interruptor de energía eléctrica que alimenta la compresora del equipo.
- b) El atomizador y el techo del equipo requieren al menos  $5\text{-}6\text{ kg/cm}^2$  ( $70\text{-}90\text{ lbs/in}^2$ ) para dar la potencia necesaria para su buen funcionamiento. No desconecte, mientras se usa el equipo, las conexiones rápidas de alimentación de aire del equipo, tanto en la parte trasera del tablero de control, como en el disco centrífugo. Esto puede ocasionar lesiones personales como al equipo.

### **Límites de funcionamiento de la unidad**

El equipo de secado por atomización no se recomienda usar bajo las siguientes circunstancias:

- a) Soluciones que requieren temperaturas de secado mayores a los 300 grados centígrados.

## **5.4. Material requerido del almacén LIQ**

- a) Anemómetro (medición de la velocidad del aire en el ducto de descarga)
- b) 2 Psicrómetros  $[-5\text{ a }55]^\circ\text{C}$

#### 5.4. Material requerido del almacén LIQ

---

- c) Probeta de 100 ml
- d) Probeta de 1 litro
- e) Cronómetro
- f) Termómetro
- g) Parrilla eléctrica
- h) Termo-balanza (determinación de humedad del sólido)
- i) Baño térmico de temperatura controlada
- j) Bomba de succión o peristáltica
- k) Balanza (para medir Bicarbonato de Sodio,  $\text{NaHCO}_3$ )
- l) Flexo-metro (medición del diámetro del ducto de descarga)
- m) Embudo (p/vaciar la solución al monta-jugos)
- n) Monta-jugos con soporte
- ñ) 3 Conectores de plástico
- o) Mangueras para bomba peristáltica (alimentación de la solución)
- p) Manguera para aire de servicio al disco centrífugo
- q) Disco Centrífugo
- r) Martillo de hule (p/golpear el yunque)
- s) Llave de nariz

- t) Vaso 2 L
- u) Vaso graduado para recolección de polvos
- v) Extensión eléctrica
- w) Franela
- x) Hidrolavadora de alta presión. Karcher
- y) Jalador de agua o escoba

#### **5.4.1. Sustancias**

- a) Bicarbonato de sodio  $\text{NaHCO}_3$
- b) Agua destilada

#### **5.4.2. Servicios auxiliares**

- a) Aire comprimido
- b) Corriente eléctrica

### **5.5. Descripción del equipo**

El equipo está constituido principalmente por la cámara de secado, el disco centrífugo, un separador ciclónico, un ventilador, una compresora, un tablero de control y equipo auxiliar. Los equipos auxiliares son un monta-jugos de vidrio, una parrilla eléctrica, una balanza, baño térmico y una bomba dosificadora o peristáltica.

## 5.6. Preparación del equipo

Verificar como sigue que todos los equipos auxiliares estén conectados y listos para funcionar correctamente.

### 5.6.1. Compresora

- a) Verificar que la compresora que suministra el aire de servicio (aire limpio y seco) opere correctamente. Accione la palanca del interruptor de energía eléctrica hacía arriba. Abra la válvula de paso de aire hacía el secador.



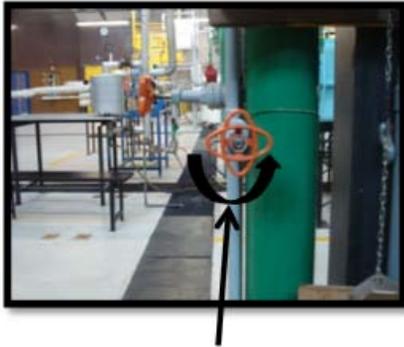
Palanca arriba.



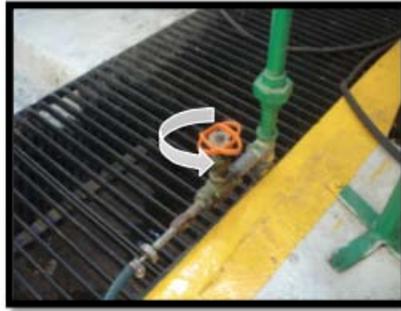
Válvula abierta.

Nota 1: Verificar que ningún otro equipo esté conectado simultáneamente a esta compresora.

- b) Siga la línea de alimentación de aire desde la compresora y abra las dos válvulas de paso antes del tablero de control.

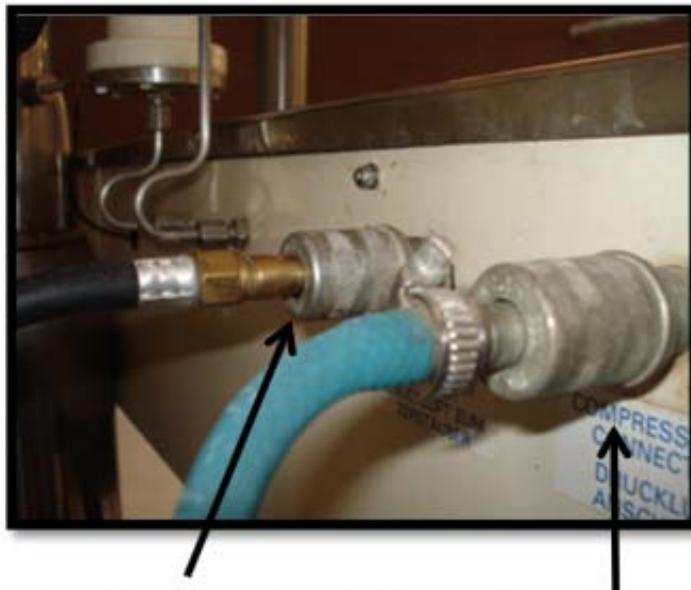


Válvula. Giro izq para abrir.



Válvula. Giro izq para abrir.

- c) Alinear la tubería de aire de servicio, desde la compresora hasta la conexión rápida localizada detrás del panel de control del secador. Verificar la correcta conexión de la manguera en ambos extremos. Un extremo está en la parte trasera del panel de control y la otra está en el disco centrífugo.



Aire de alimentación al disco. Aire de servicio.

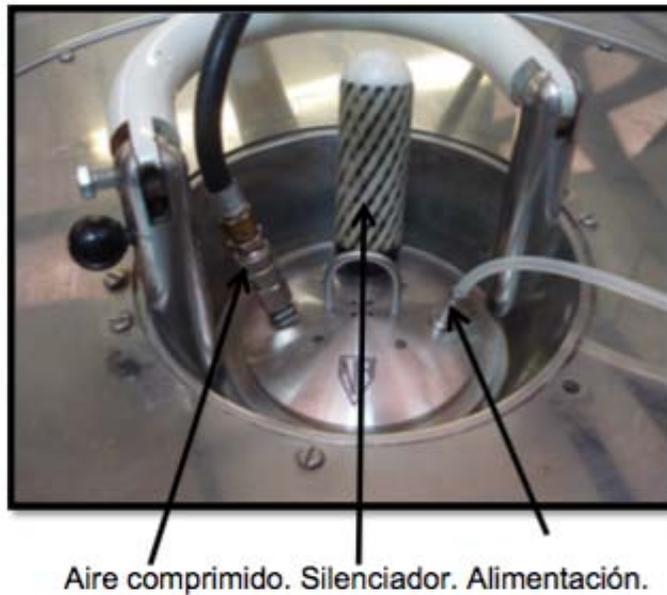
Nota 2: La incorrecta conexión de esta manguera puede causar serios daños tanto al equipo como a los usuarios (opera a presiones  $P > 12$  Bar).

### 5.6.2. Atomizador

- d) Instalar el atomizador centrífugo en la parte central superior de la tapa del equipo de secado (extremar los cuidados ya que el disco no debe sufrir ningún golpe o choque con las partes metálicas del secador).



- e) Conectar la manguera de aire comprimido al atomizador centrífugo que viene desde la parte trasera del panel de control del secador. Conectar el silenciador y la manguera de alimentación que viene desde la bomba de succión.



### **5.6.3. Baño de temperatura controlada**

- f) Verificar que el baño de temperatura controlada contenga el agua suficiente para que funcione en circuito cerrado con la chaqueta del monta-jugos. La temperatura de consigna deberá ser discutida con el profesor.

### **5.6.4. Monta-jugos de vidrio**

- g) Cargar el monta-jugos con la solución o suspensión a tratar (volumen no mayor a dos litros). Ver en el punto 5.6.6 cómo preparar la solución.
- h) Conectar la descarga del monta-jugos a la succión de la bomba dosificadora; y la descarga de la bomba dosificadora al disco centrífugo. (Verificar su correcta instalación).



Descarga monta-jugos. Descarga bomba de succión

- i) El monta-jugos está encaquetado. De tal forma, con el baño de temperatura se hará fluir por él agua de calentamiento. La temperatura del agua ( $T_{BH,A}$ ) se determina rápidamente con un software usando la presión atmosférica del laboratorio de Ingeniería química, el porcentaje en la mezcla (Mixing ratio (x), Vaisala©) y la temperatura de calentamiento a la cual se va a trabajar en la cámara de secado. Ej. 585 mmHg,  $9.41 \frac{g}{kg}$  y  $180^\circ\text{C}$ .  $T_{BH,A} = 39.911^\circ\text{C}$ .

### 5.6.5. Bomba de succión

- j) Programar las RPM's sugeridas (30 RPM's) con la perilla de ajuste de la bomba peristáltica para obtener un flujo alrededor de  $28 \frac{ml}{min}$



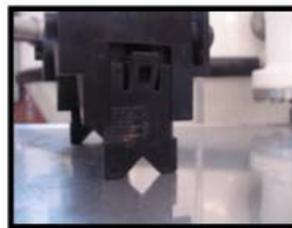
Perilla de ajuste a 30 RPM's

Perilla de ajuste a 30 RPM's

- k) Antes de sujetar la manguera contra los rodillos verificar que las compuertas de cuchilla reguladoras del paso del fluido estén en la posición número 4.



Compuerta de cuchillas.



Compuerta en posición  
4 en ambos lados.

Una vez seleccionada la manguera y la posición de la compuerta reguladora del

paso de fluido, se recomienda hacer una curva de calibración de flujo, ml/min VS RPM.

### 5.6.6. Preparación de la solución

- l) En la termo balanza, hacer tres corridas distintas para determinar el grado de humedad que contiene el bicarbonato de sodio. Una vez hecho esto, promediar los porcentajes de humedad semejantes para obtener el estimado de agua en el bicarbonato de sodio.
- m) En una balanza medir 200 g de  $\text{NaHCO}_3$  más una cantidad adicional de bicarbonato correspondiente al porcentaje de humedad promediado. Retirar la muestra de la balanza y ponerla en la probeta de 2 litros. Tarar la balanza y agregar agua destilada hasta el aforo.  $\text{NaHCO}_3$

| $\text{NaHCO}_3$ | % $\text{H}_2\text{O}$ en el $\text{NaHCO}_3$ | Total $\text{NaHCO}_3$ medido | Total $\text{H}_2\text{O}$ al aforo |
|------------------|---|-------------------------------|-------------------------------------|
| #                | #   | #                             | #                                   |

Nota 3: estos datos servirán para hacer los balances de masa.

- n) Vaciar la solución en un vaso de precipitados de 2 litros y calentarla en la parrilla eléctrica a  $35^\circ\text{C}$  para disolver rápidamente el bicarbonato de sodio.

## **5.7. Puesta en marcha del secador**

- a) Verificar que los equipos auxiliares estén correctamente instalados y listos para operar.
  
- b) Conectar el interruptor de cuchillas o caja de fusibles en posición de encendido (instalado en la columna más próxima al secador).



- c) Verificar que el foco piloto (verde) del panel de control del secador y el foco de la cámara se iluminen.
  
- d) Funcionar el baño de temperatura controlada hasta la temperatura que corresponde a la temperatura de bulbo húmedo del aire entrante a 180 °C, es decir, alrededor de 40 °C. Verificar esta temperatura ej: Vaisala©. Espere a que el baño alcance la temperatura de bulbo húmedo calculada.

### 5.7. Puesta en marcha del secador



Mientras tanto,

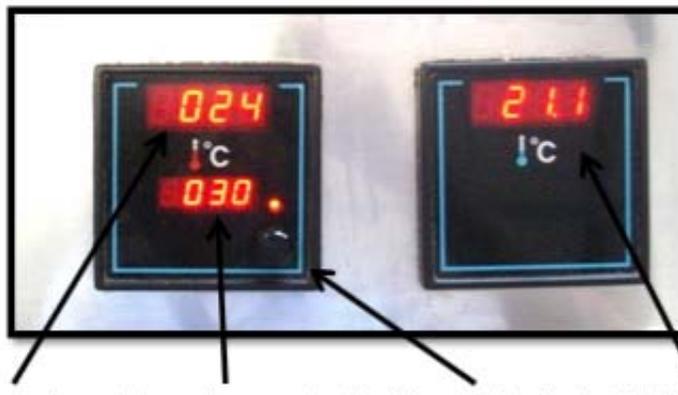
- e) Vaciar la solución preparada al monta-jugos para que el agua de calentamiento la mantenga caliente.
- f) Hacer funcionar el moto-ventilador (aire de proceso) con la perilla, ubicada en el panel de control, en posición M; enseguida fijar la perilla en posición II. Esta posición comprende temperaturas entre 125 °C y 200 °C.

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| Para temperaturas hasta 125°C         | Posición I   |
| Para temperaturas entre 125°C y 200°C | Posición II  |
| Para temperaturas sobre 200°C         | Posición III |



Moto-ventilador. Posición II, T °C [125 – 200]

- g) Fijar la temperatura de consigna girando la perilla de control a 180 °C o la que indique el Profesor.

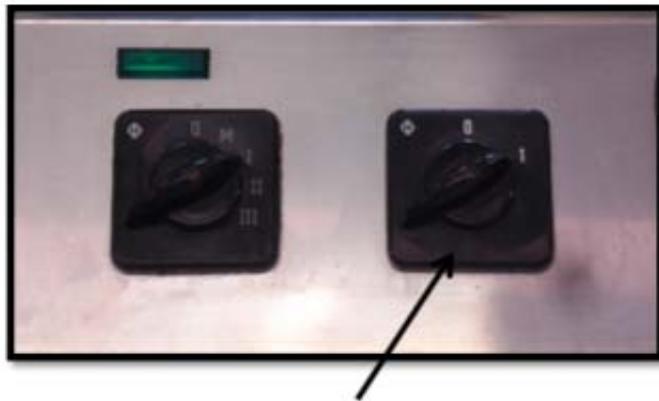


T de consigna. T en el secador. Perilla de ajuste de T. TB en PB.

- h) Accionar el interruptor localizado en el panel de control, para alimentar la corriente eléctrica a la bomba dosificadora (220 Volts).

### 5.7. Puesta en marcha del secador

---



Interruptor para la bomba de alimentación.

- i) Fijar la perilla de la bomba de alimentación en el valor deseado, por ejemplo 30 RPM's; el giro debe ser en el sentido de las manecillas del reloj.



- j) Verificar que la palanca de elevación de la tapa permanezca en posición vertical hacia abajo. Nota 4: Por ningún motivo accionar esta palanca durante el proceso de secado.



**Hacia abajo durante todo el proceso.**

- k) Verificar que la válvula de mariposa de descarga de aire a la atmósfera este en posición horizontal.
- l) Esperar el tiempo suficiente para que la temperatura del aire de proceso alcance los  $180^{\circ}\text{C}$  en el secador (o la que indique el profesor) y la temperatura de la solución alcance  $40^{\circ}\text{C}$ .
- m) Alimentar aire de servicio a la turbina que acciona al disco centrífugo a una presión de aproximadamente 4.6 Bar. Verificar que la aguja del manómetro se mantenga en el valor establecido con ayuda de la perilla de ajuste de presión.  
Nota 5: La perilla de control de presión de aire al disco tiene un seguro que deberá ser aflojado para manipularlo al valor de presión deseado.
- n) Empezar a alimentar la solución o suspensión y comenzar el proceso de secado.  
Nota 6: El secado comienza exactamente cuando la primera gota es asperjada. Así mismo, esto ocurre al tiempo 0 min. Ver por la mirilla cuando esto suceda. Accionar el cronometro cuándo la primera gota sea asperjada.
- ñ) Anotar la información en la Tabla de datos experimentales cada 5 minutos.

5.7. Puesta en marcha del secador

| t min | T <sub>Exh(0)</sub> °C | T <sub>Exh(1)</sub> °C | Y <sub>Exh(0)</sub> [ent] | Y <sub>Exh(1)</sub> [ent] | T <sub>Exh(2)</sub> °C | T <sub>Exh(3)</sub> °C | T <sub>Exh(4)</sub> °C | T <sub>Exh(5)</sub> °C | P <sup>o</sup> H <sub>2</sub> O(ent) | P <sub>Exh(0)</sub> H <sub>2</sub> O | ΔPot <sub>Exh(0)</sub> [ent] |
|-------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 0     |                        |                        |                           |                           |                        |                        |                        |                        |                                      |                                      |                              |
| 5     |                        |                        |                           |                           |                        |                        |                        |                        |                                      |                                      |                              |
| 10    |                        |                        |                           |                           |                        |                        |                        |                        |                                      |                                      |                              |
| 15    |                        |                        |                           |                           |                        |                        |                        |                        |                                      |                                      |                              |

| T <sub>Exh(0)</sub> °C | T <sub>Exh(1)</sub> °C | Y[sal] | Y <sub>Exh(0)</sub> [sal] | T <sub>B</sub> °C | T <sub>A-B</sub> °C | P <sup>o</sup> H <sub>2</sub> O[sal] | P <sub>Exh(0)</sub> H <sub>2</sub> O | ΔPot <sub>Exh(0)</sub> [sal] | L <sub>sol</sub> kg/hr |
|------------------------|------------------------|--------|---------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------|
|                        |                        |        |                           |                   |                     |                                      |                                      |                              |                        |
|                        |                        |        |                           |                   |                     |                                      |                                      |                              |                        |
|                        |                        |        |                           |                   |                     |                                      |                                      |                              |                        |

| H <sub>agua</sub> kg/hr | Y <sub>air</sub> m <sup>3</sup> /s | G <sub>air</sub> kg/hr | G <sub>sol</sub> kg/hr | ΔP <sub>proceso</sub> [cal c-t] | ΔP <sub>in</sub> L mmHg | NUT | η |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----|---|
|                         |                                    |                        |                        |                                 |                         |     |   |
|                         |                                    |                        |                        |                                 |                         |     |   |
|                         |                                    |                        |                        |                                 |                         |     |   |

Figura 5.1: Tabla datos experimentales

## 5.8. Paro del equipo

- a) Al término de la solución alimentada al secador, apague la bomba dosificadora ON/OFF.



- b) Apague el baño térmico.



## 5.8. Paro del equipo

---

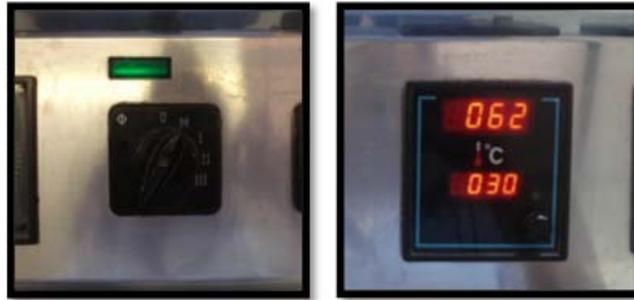
- c) Disminuya la presión en el disco centrífugo hasta cero con la perilla de ajuste en el tablero de control del secador.



- d) En el tablero de control corte el suministro de corriente con el interruptor de alimentación de la bomba dosificadora, colocando la cuchilla en posición 0.

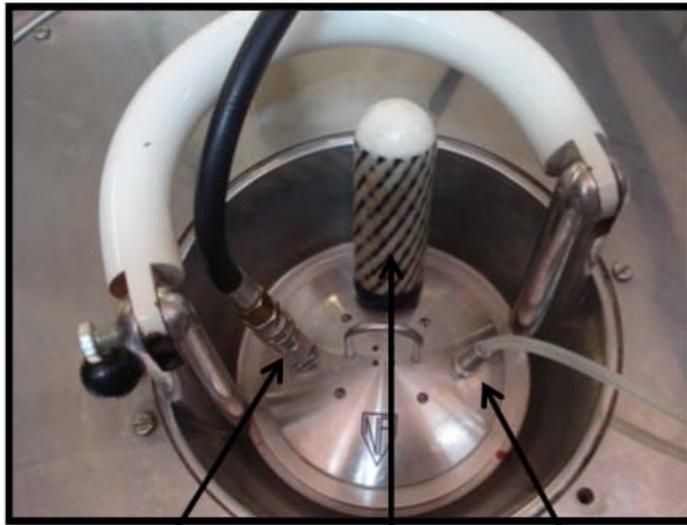


- e) Para enfriar la cámara de secado, posicione la cuchilla desde (I, II o III) en M y baje la temperatura de consigna con la perilla de control a 30 °C.
- f) Deje trabajar el equipo unos minutos para bajar su temperatura.
- g) Cuando la cámara de secado haya alcanzado los 30 °C apague el moto-ventilador. Cambie de posición M a posición 0.



### **5.8.1. Limpieza del disco centrífugo**

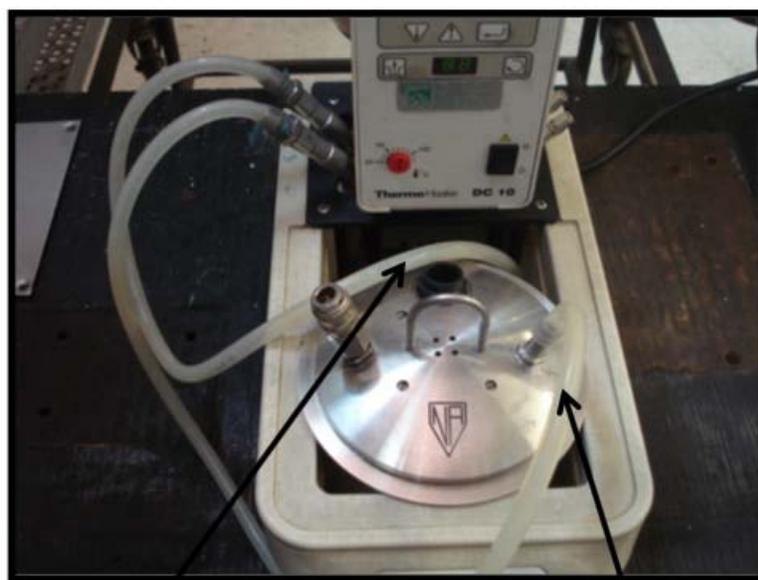
- a) Desconecte del disco centrífugo el silenciador, la manguera de aire comprimido y la alimentación de la solución.



Aire comprimido. Silenciador. Alimentación.

- b) Desmonte el disco centrífugo con cuidado de no golpearlo y llévelo al baño de temperatura.

- c) Para limpiar el disco centrífugo conecte las mangueras del baño de temperatura en un circuito cerrado. La manguera de salida de agua del baño térmico va conectada en la alimentación de la solución en el disco centrífugo. Esto recirculará el agua dentro del disco pasando por el baño térmico. El disco se coloca dentro del baño térmico.



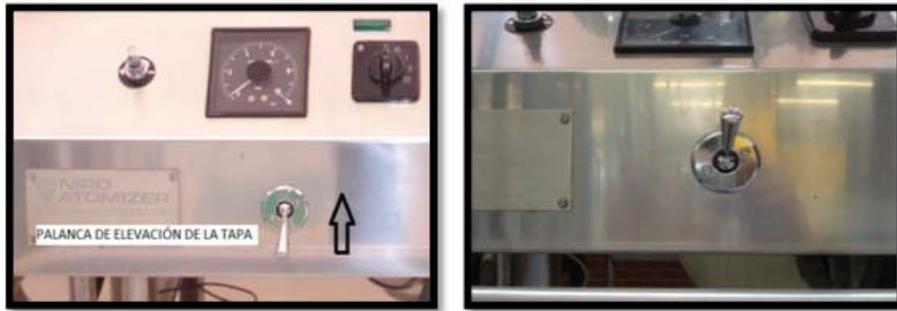
Succión de agua. Alimentación de agua a 35°C.

- d) El baño debe tener una temperatura de 35°C para soluciones como bicarbonato de sodio.  $\text{NaHCO}_3$

### 5.8.2. Limpieza del equipo

Sin dejar de alimentar con aire comprimido al equipo:

- a) Accione hacia arriba la palanca de elevación de la tapa para suspenderla.



- b) Desplace la tapa hacia un lado y lave el interior de la cámara con agua a presión usando la Karcher; así como toda la tubería del equipo que es desmontable. Use la llave de nariz para aflojar las tuercas. Procure no perder los empaques de las uniones de la tubería. Seque el equipo con la franela.
- c) Después de usarse, tanto el baño térmico como el monta-jugos de vidrio, deben enjuagarse para evitar dejarles residuos de bicarbonato de sodio.

## **5.9. Cuestionario**

- 1) Clasificar los secadores por aspersión.
- 2) Dibujar las diferentes partes de las que se compone un secador por atomización y explicar brevemente su función.
- 3) ¿Cuáles son las variables de operación en un secador por aspersión?
- 4) ¿Qué potencial tenemos que tener en cuenta a la hora de realizar el secado?
- 5) ¿Qué objeto tiene pulverizar las soluciones o suspensiones en este tipo de secadores?

- 6) A partir de las condiciones de entrada y salida del aire de secado determinar la fuerza motriz media considerando al proceso de secado como un sistema Aire-Agua.
- 7) ¿Cuál es la condición de humedad mínima que puede alcanzar el sólido para estar en contacto con el aire de salida?
- 8) ¿Cuál es el potencial motriz cuando la presión de vapor del agua es igual a la presión total del sistema?
- 9) Haga una lista de por lo menos 4 parámetros principales encontrados durante la operación del secador por aspersion e indique en que forma afectan al proceso de secado si estos toman un valor mayor o menor.
- 10) ¿Cómo se podría variar el tiempo de residencia del material en el secador y que efectos provocaría esta variación?
- 11) Determinar el número de unidades de transferencia de masa (NUT<sub>m</sub>) en el proceso de secado.
- 12) Determinar el coeficiente de transferencia de masa volumétrico en el proceso de secado  $KG_V$ .
- 13) Explicar el significado físico de NUT y VUT
- 14) Determinar la eficiencia de secado.
- 15) ¿Qué parametros afectan la eficiencia del secado en el secador por aspersion?

## **5.10. Nomenclatura**

- 1) t tiempo.
- 2) TA, Taircal temperatura de calentamiento.
- 3) TBH,A temperatura de bulbo húmedo a la entrada de la cámara de secado.
- 4) TBS (ent) temperatura bulbo seco entrada.
- 5) TBH (ent) temperatura bulbo húmedo entrada.
- 6) TBS (sal) temperatura bulbo seco salida.
- 7) TBH (sal) temperatura bulbo húmedo salida.
- 8) TB temperatura de salida del secador antes del separador ciclónico.
- 9) TBH,B temperatura bulbo húmedo a la salida del secador.
- 10) Y (ent) humedad absoluta a la entrada del secador.
- 11) Y (sal) humedad absoluta a la salida del secador.
- 12) Lsol flujo de la solución.
- 13) V velocidad del aire.
- 14) RPM revoluciones por minuto de la bomba de succión.
- 15) GAH flujo de aire húmedo.
- 16) GAS flujo de aire seco.
- 17) P H<sub>2</sub>O presión de vapor del agua en el sólido.

- 18)  $P_{\text{parcial}}$  Presión parcial del agua en el aire.
- 19)  $\Delta P_{\text{pot}}$  motriz diferencial de potencial motriz.
- 20)  $\Delta P$  diferencial de presiones parciales a la entrada y/o salida.
- 21)  $\Delta P_{\text{LM}}$  potencial motriz medio logarítmico.
- 22) NUT número de unidades de transferencia.
- 23) VUT volumen de unidades de transferencia.
- 24)  $\eta$  eficiencia.
- 25)  $\% \eta$  porcentaje de eficiencia.



## Capítulo 6

### Memoria de Cálculo

#### 6.1. El balance de masa

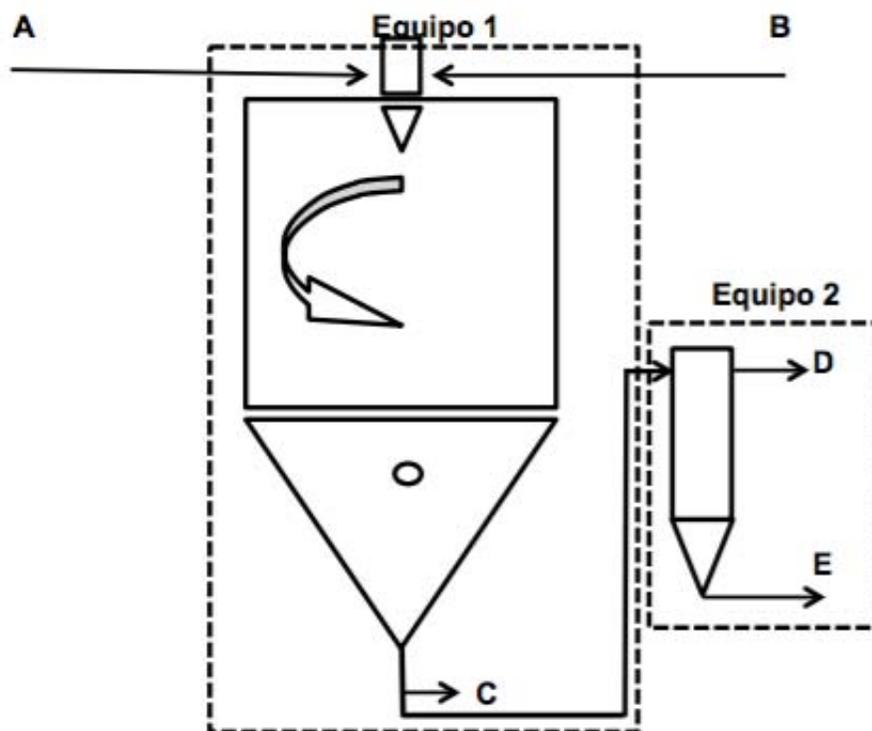


Figura 6.1: Esquema general

**Corrientes:** A, B, C, D, E

**Nomenclatura:** 1 = H<sub>2</sub>O, 2 = NaHCO<sub>3</sub>, 3 = Aire

**De la ecuación general de balance de materia:**

$$(A + B) = (D + E) \quad (6.1)$$

**Balance por equipo**

Equipo 1,

$$A + B = C \quad (6.2)$$

Equipo 2,

$$C = D + E \quad (6.3)$$

## 6.2. Balance por componente

Son tres componentes los que conforman el balance de masa, ellos son el agua, el sólido húmedo y el aire húmedo.

Equipo 1,

a) Agua en las corrientes A y B

$$(A \times x_{A1}) + (B \times x_{B1}) = C \times x_{C1} \quad (6.4)$$

b) Sólido entrante

$$A \times x_A = C \times x_{C2} \quad (6.5)$$

c) Aire entrante

$$B \times x_{B3} = C \times x_{C3} \quad (6.6)$$

Equipo 2,

a) Agua saliente en D y E

$$C \times x_{C1} = (D \times x_{D1}) + (E \times x_{E1}) \quad (6.7)$$

b) Sólido Saliente

$$C \times x_{C2} = E \times x_{E2} \quad (6.8)$$

c) Aire saliente

$$C \times x_{C3} = D \times x_{D3} \quad (6.9)$$

**De las ecuaciones de balance general queda lo siguiente:**

a) Agua

$$(A \times x_{A1}) + (B \times x_{B1}) = (D \times x_{D1}) + (E \times x_{E1}) \quad (6.10)$$

b) NaHCO<sub>3</sub>

$$A \times x_{A2} = E \times x_{E2} \quad (6.11)$$

c) Aire

$$B \times x_{B3} = D \times x_{D3} \quad (6.12)$$

A continuación se toman datos de corridas experimentales para hacer los balances. Una corrida a una temperatura de 160 °C y otra corrida a 180 °C. Se pretende ejemplificar la transferencia de masa que hay entre el sólido húmedo y el aire de calentamiento.

### 6.3. Balances de masa a 160 °C

#### HIPÓTESIS

\*Se considera que el porcentaje de humedad medida inicialmente en el sólido es equivalente en gramos.

- 1) Cantidad de solución (sólido húmedo) : 2L = 2.094 Kg (90.44 % agua)
- 2) Cantidad de sólido húmedo a la entrada, 10 % de sólidos,  $[x_{inicial}] = 0.1 \frac{Kg \text{ de soluto}}{kg \text{ de soln.}}$   
(0.234 Kg soluto con 17 % humedad/100 g de soluto) Es decir, \*17 g de soluto adicionales por cada 100 g de soluto pesado

3) Sólido a la salida,  $[x_{final}] = 0.905 \frac{Kg \text{ de SS}}{Kg \text{ de SH}}$

4) Presión media = 4.6 bar

5) Temperatura aire de calentamiento = 160 °C

6) Velocidad media de salida de aire  $[v] = 10.6 \frac{m}{s}$

**Minuto 40 de la tabla de datos experimentales 1 a 160 °C**

7)  $T_{BH} \text{ (ent)} = 14.5 \text{ °C}$  (ambiente)

8)  $T_{BS} \text{ (ent)} = 27.5 \text{ °C}$  (ambiente)

9)  $T_{BH} \text{ (sal)} = 28.5 \text{ °C}$

10)  $T_{BS} \text{ (sal)} = 51.3 \text{ °C}$

11)  $Y(\text{ent}) = 0.0079$

12)  $Y(\text{sal}) = 0.023$

**Datos generales:**

$$R = 0.082 \frac{(L \times atm)}{(mol \times K)} \quad (6.13)$$

$$M1 = 18 \frac{Kg}{Kmol} \quad (6.14)$$

$$M2 = 84 \frac{Kg}{Kmol} \quad (6.15)$$

$$M3 = 29 \frac{Kg}{Kmol} \quad (6.16)$$

Diámetro ducto salida aire = 0.074 m

**Fracciones en masa del experimento a 160 °C**

mA = 2094 g , mA1 = 1860 g , mA2 = 234 g

a) Agua

$$xA1 = \frac{1860g}{2094g} = 0.89 \quad (6.17)$$

b) Sólido

$$xA2 = \frac{234g}{2094g} = 0.11 \quad (6.18)$$

Flujo corriente A

$$QA = 27.5 \frac{ml}{min} = 4.58 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s} \quad (6.19)$$

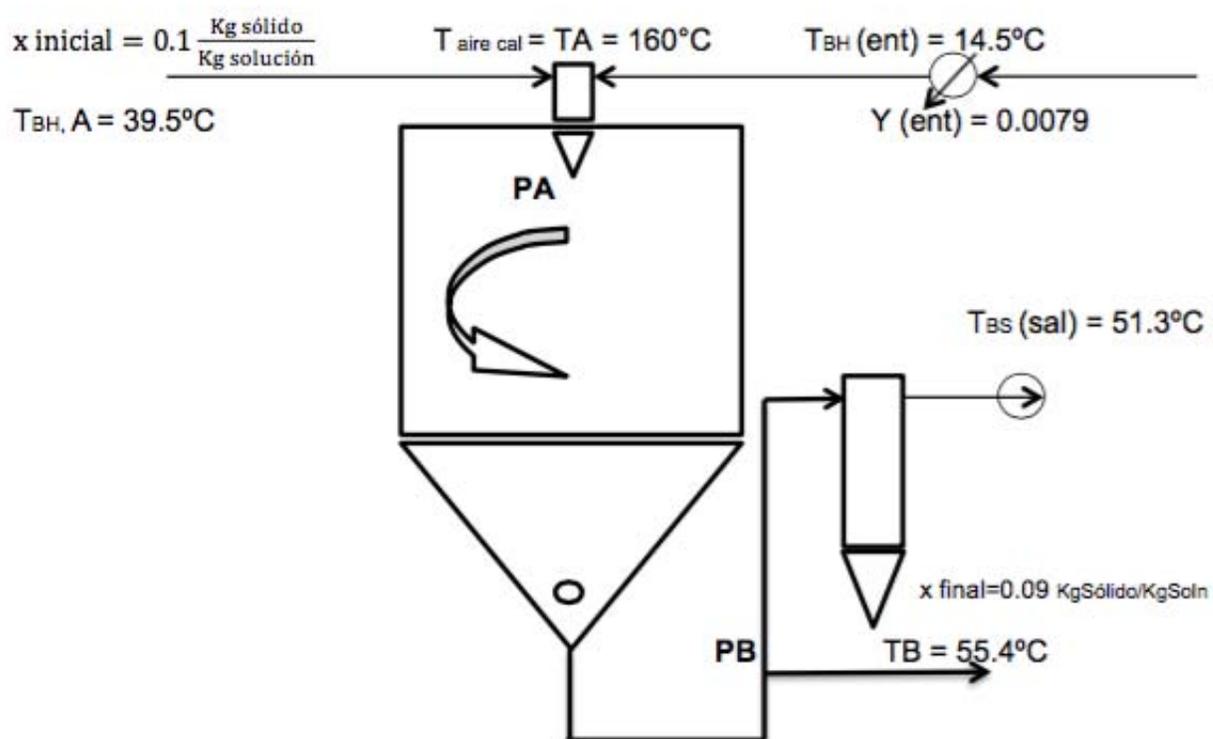
Densidad corriente A

$$\rho A = 1120 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.20)$$

Área ducto salida

$$AD = \pi \frac{DD^2}{4} = \pi \frac{0.074^2}{4} = 0.0043m^2 \quad (6.21)$$

**Traducción**



**Figura 6.2:** Esquema para balances a  $160^\circ\text{C}$

Los siguientes datos fueron tomados del experimento realizado en el laboratorio de ingeniería química usando el equipo de atomización NIRO ATOMIZER Mobile MINOR.

Tabla de datos experimentales 1 a 160 °C

Entrada punto A (PA)

| t [min]   | T <sub>BS(ent)</sub> | T <sub>BH(ent)</sub> | Y(ent) <sub>[g/Kg]</sub> | Y(ent) <sub>[kg/kg]</sub> | y <sub>molar(ent)</sub> |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 0         | 27.0                 | 13.5                 | 6.889                    | 0.0069                    | 0.0110                  |
| 5         | 27.0                 | 13.5                 | 6.889                    | 0.0069                    | 0.0110                  |
| 10        | 27.0                 | 13.5                 | 6.889                    | 0.0069                    | 0.0110                  |
| 15        | 27.0                 | 14.0                 | 7.518                    | 0.0075                    | 0.0120                  |
| 20        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| 25        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| 30        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| 35        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| <b>40</b> | <b>27.5</b>          | <b>14.5</b>          | <b>7.949</b>             | <b>0.0079</b>             | <b>0.0126</b>           |
| 45        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| 50        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| 55        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| 60        | 27.5                 | 14.5                 | 7.949                    | 0.0079                    | 0.0126                  |
| 65        | 27.5                 | 13.5                 | 6.679                    | 0.0067                    | 0.0106                  |
| 70        | 27.0                 | 13.5                 | 6.889                    | 0.0069                    | 0.0110                  |
| 75        | 27.0                 | 13.5                 | 6.889                    | 0.0069                    | 0.0110                  |

Continuación...

| T <sub>aircal</sub> | T <sub>BH,A</sub> | P° H <sub>2</sub> O(ent A) | P <sub>parcial</sub> | ΔPot m (ent) |
|---------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|--------------|
| 160                 | 39.207            | 52.93                      | 6.42                 | 46.51        |
| 160                 | 39.207            | 52.93                      | 6.42                 | 46.51        |
| 160                 | 39.207            | 52.93                      | 6.42                 | 46.51        |
| 160                 | 39.385            | 53.44                      | 7.00                 | 46.44        |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| <b>160</b>          | <b>39.506</b>     | <b>53.79</b>               | <b>7.40</b>          | <b>46.39</b> |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| 160                 | 39.506            | 53.79                      | 7.40                 | 46.39        |
| 160                 | 39.148            | 52.77                      | 6.23                 | 46.54        |
| 160                 | 39.207            | 52.93                      | 6.42                 | 46.51        |
| 160                 | 39.207            | 52.93                      | 6.42                 | 46.51        |

Entrada punto B (PB)

Continuación...

| T <sub>BS</sub> (sal) | T <sub>BH</sub> (sal) | Y(sal) <sub>[g/kg]</sub> | Y(sal) <sub>[kg/kg]</sub> | y <sub>molar</sub> (sal) |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 48                    | 29                    | 25.19                    | 0.025                     | 0.039                    |
| 48                    | 29                    | 25.19                    | 0.025                     | 0.039                    |
| 48.3                  | 27.5                  | 21.52                    | 0.022                     | 0.034                    |
| 48.4                  | 27.5                  | 21.47                    | 0.021                     | 0.033                    |
| 49                    | 28                    | 22.36                    | 0.022                     | 0.035                    |
| 49                    | 28                    | 22.36                    | 0.022                     | 0.035                    |
| 49                    | 28                    | 22.36                    | 0.022                     | 0.035                    |
| 49.5                  | 28.5                  | 23.32                    | 0.023                     | 0.036                    |
| <b>51.3</b>           | <b>28.5</b>           | <b>22.52</b>             | <b>0.023</b>              | <b>0.035</b>             |
| 52                    | 28.7                  | 22.69                    | 0.023                     | 0.035                    |
| 52                    | 28.7                  | 22.69                    | 0.023                     | 0.035                    |
| 52                    | 28.5                  | 22.21                    | 0.022                     | 0.035                    |
| 52.5                  | 28.5                  | 23.19                    | 0.023                     | 0.036                    |
| 52                    | 28.5                  | 22.21                    | 0.022                     | 0.035                    |
| 54                    | 29                    | 22.53                    | 0.023                     | 0.035                    |
| 58                    | 30                    | 23.24                    | 0.023                     | 0.036                    |

Continuación...

| T <sub>B</sub> | T <sub>BH,B</sub> | P° H <sub>2</sub> O (sal B) | P <sub>parcial</sub> | ΔPot m (sal) |
|----------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|
| 53.0           | 29.893            | 31.496                      | 22.82                | 8.677        |
| 53.0           | 29.893            | 31.496                      | 22.82                | 8.677        |
| 53.5           | 28.485            | 29.023                      | 19.60                | 9.425        |
| 53.5           | 28.597            | 29.214                      | 19.56                | 9.654        |
| 54.0           | 28.93             | 29.786                      | 20.34                | 9.445        |
| 54.0           | 28.93             | 29.786                      | 20.34                | 9.445        |
| 54.0           | 28.93             | 29.786                      | 20.34                | 9.445        |
| 54.5           | 29.357            | 30.534                      | 21.18                | 9.353        |
| <b>55.4</b>    | <b>29.249</b>     | <b>30.343</b>               | <b>20.48</b>         | <b>9.861</b> |
| 55.5           | 29.336            | 30.497                      | 20.63                | 9.866        |
| 55.5           | 29.336            | 30.497                      | 20.63                | 9.866        |
| 55.7           | 29.178            | 30.219                      | 20.21                | 10.008       |
| 55             | 29.45             | 30.699                      | 21.07                | 9.627        |
| 55.7           | 29.178            | 30.219                      | 20.21                | 10.008       |
| 56             | 29.361            | 30.541                      | 20.49                | 10.051       |
| 60.5           | 30.433            | 32.492                      | 21.12                | 11.375       |

Continuación...

| $\Delta P_{motriz}$ ml | $\Delta P(\text{sal-ent})$ | NUT          | VUT         | $\eta$      | % $\eta$     |
|------------------------|----------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 22.534                 | 16.40                      | 0.728        | 0.74        | 0.48        | 48.30        |
| 22.534                 | 16.40                      | 0.728        | 0.74        | 0.48        | 48.30        |
| 23.232                 | 13.18                      | 0.567        | 0.95        | 0.57        | 56.71        |
| 23.419                 | 12.56                      | 0.536        | 1.01        | 0.58        | 58.49        |
| 23.214                 | 12.94                      | 0.558        | 0.97        | 0.57        | 57.26        |
| 23.214                 | 12.94                      | 0.558        | 0.97        | 0.57        | 57.26        |
| 23.214                 | 12.94                      | 0.558        | 0.97        | 0.57        | 57.26        |
| 23.129                 | 13.78                      | 0.596        | 0.90        | 0.55        | 55.11        |
| <b>23.591</b>          | <b>13.09</b>               | <b>0.555</b> | <b>0.97</b> | <b>0.57</b> | <b>57.43</b> |
| 23.596                 | 13.23                      | 0.561        | 0.96        | 0.57        | 57.07        |
| 23.596                 | 13.23                      | 0.561        | 0.96        | 0.57        | 57.07        |
| 23.723                 | 12.81                      | 0.540        | 1.00        | 0.58        | 58.27        |
| 23.379                 | 13.68                      | 0.585        | 0.92        | 0.56        | 55.71        |
| 23.769                 | 13.98                      | 0.588        | 0.92        | 0.56        | 55.53        |
| 23.799                 | 14.07                      | 0.591        | 0.91        | 0.55        | 55.37        |
| 24.950                 | 14.69                      | 0.589        | 0.92        | 0.55        | 55.49        |

\*Todas las T's están expresadas °C y todas las P's en mmHg

### 6.3.1. Cálculos a 160 °C

Flujo volumétrico de AH corriente D

$$QD = vD \times AD = 10.6 \frac{m}{s} \times 0.0043 m^2 = 0.045 \frac{m^3}{s} \quad (6.22)$$

La densidad de la mezcla en la corriente D se calculó suponiendo que le peso molecular del aire húmedo era igual al peso molecular del aire; es decir, se despreció la fracción molar del agua en la mezcla.

$$\rho D = \frac{Patm \times M3}{R \times T_{sal en D}} = \frac{0.77 atm \times 29 \frac{Kg}{Kmol}}{0.082 \frac{(L \times atm)}{(Kmol \times K)} \times 324.45 K} = 0.84 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.23)$$

Tsal en D es la  $T_{BS}$  salida

Flujo másico de aire húmedo [AH] en D

$$D = QD \times \rho D = 0.045 \frac{m^3}{s} \times 0.84 \frac{Kg}{m^3} = 0.0378 \frac{Kg AH}{s} \quad (6.24)$$

Flujo másico de NaHCO<sub>3</sub> en E,

$$E = A \times \frac{x_{A2}}{x_{E2}} = 5.1 \times 10^{-4} \frac{0.11}{0.090} = 6.23 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s} \quad (6.25)$$

$x_{E2} = x_{final} = 0.090$

Siendo:

$$A = Q_A \times \rho_A = 4.58 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s} \times 1120 \frac{Kg}{m^3} = 5.1 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s} \quad (6.26)$$

$$C = D + E = 0.0378 \frac{Kg}{s} + 6.23 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s} = 0.0384 \frac{Kg}{s} \quad (6.27)$$

$$B = C - A = 0.0384 - 5.1 \times 10^{-4} = 0.0379 \frac{Kg}{s} \quad (6.28)$$

La densidad de la mezcla en la corriente B se calculó suponiendo que el peso molecular del aire húmedo era igual al peso molecular del aire; es decir, se despreció la fracción molar del agua en la mezcla.

$$\rho_B = \frac{P_{atm} \times M_3}{R \times T_{sal en B}} = \frac{0.77 atm \times 29 \frac{Kg}{Kmol}}{0.082 \frac{(L \times atm)}{(mol \times K)} \times 433.15 K} = 0.63 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.29)$$

Flujo másico en B de AH,

$$Q_B = \frac{B}{\rho_B} = \frac{0.0379}{0.63 \frac{m^3}{s}} = 0.06 \frac{m^3}{s} \quad (6.30)$$

La fracción  $x_{B3}$  se dedujo a partir de la mezcla, que es igual al cociente de la suma de las masas de cada componente en la corriente y el volumen de la mezcla; en este caso, cada uno sustituidos por sus equivalentes de flujo.

$$\rho_B = \frac{m_{B1} + m_{B3}}{Q_B} \quad (6.31)$$

Si,

$$m_{B1} = Y_B \times m_{B3} \quad (6.32)$$

Entonces,

$$\rho_B = \frac{(Y_B \times m_{B3}) + m_{B3}}{Q_B} \Rightarrow \rho_B = \frac{m_{B3}(1 + Y_B)}{Q_B} \quad (6.33)$$

$$m_{B3} = B \times x_{B3} \quad (6.34)$$

De la ecuación (6.33),

$$\rho_B = \frac{B \times x_{B3}(1 + Y_B)}{Q_B} \quad (6.35)$$

Despejando  $x_{B3}$  queda,

$$x_{B3} = \frac{\rho_B \times Q_B}{B(1 + Y_B)} \quad (6.36)$$

Así la fracción de aire entrante es,

$$x_{B3} = \frac{\rho_B \times Q_B}{B(1 + Y_B)} = \frac{0.63 \times 0.06}{0.0379(1 + 0.0079)} = 0.989 \quad (6.37)$$

Fracción de Aire en C,

$$x_{C3} = B \frac{x_{B3}}{C} = 0.0379 \times \frac{0.989}{0.0384} = 0.976 \quad (6.38)$$

Fracción de Aire en D,

$$x_{D3} = B \frac{x_{B3}}{D} = 0.0379 \times \frac{0.989}{0.0384} = 0.976 \quad (6.39)$$

Fracción de agua en B,

$$x_{B1} = 1 - x_{B3} = 1 - 0.989 = 0.011 \quad (6.40)$$

Fracción de agua en D,

$$x_{D1} = 1 - x_{D3} = 1 - 0.989 = 0.011 \quad (6.41)$$

Fracción de  $NaHCO_3$  en C,

$$x_{C2} = A \frac{x_{A2}}{C} = 5.1 \times 10^{-4} \frac{0.11}{0.0384} = 1.46 \times 10^{-3} \quad (6.42)$$

$$x_{C1} = \frac{(A \times x_{A1} + B \times x_{B1})}{C} = \frac{(5.1 \times 10^{-4} \times 0.89 + 0.0379 \times 0.011)}{0.0379} = 0.023 \quad (6.43)$$

$$Y_{D1} = \frac{x_{D1}}{x_{D3}} = \frac{0.011}{0.976} = 0.0112 \quad (6.44)$$

$$Y_{C1} = \frac{x_{C1}}{x_{C3}} = \frac{0.023}{0.976} = 0.0235 \quad (6.45)$$

$$y_{B1} = \frac{\frac{Y_B}{M1}}{\frac{1}{M3} + \frac{Y_B}{M1}} = \frac{\frac{0.0079}{18 \frac{g}{mol}}}{\frac{1}{29 \frac{g}{mol}} + \frac{0.0079}{18 \frac{g}{mol}}} = 0.0125 \quad (6.46)$$

Véase la sección 6.5 para ver la manera de cálculo del NUT y la  $\eta$  (eficiencia).

## 6.4. Balances de masa a 180 °C

### HIPÓTESIS

\*Se considera que el porcentaje de humedad medida inicialmente en el sólido es equivalente en gramos.

- 1) Cantidad de solución (sólido húmedo) : 2L = 2.112 Kg (90.53 % agua)
- 2) Cantidad de sólido húmedo a la entrada, 10 % de sólidos,  $[x_{inicial}] = 0.1 \frac{\text{Kg de soluto}}{\text{kg de soln.}}$   
= 0.214 kg de soluto con 7 % de humedad/100 g de soluto. Es decir, \*7 g de soluto adicionales por cada 100 g de soluto pesado
- 3) Sólido a la salida  $[x_{final}] = 0.095 \frac{\text{kg de SS}}{\text{Kg de SH}}$  con 1.24 % de humedad.
- 4) Presión media = 4.6 bar
- 5) Temperatura aire de calentamiento = 180 °C
- 6) Velocidad media de salida de aire  $v = 10.53 \frac{m}{s}$

**Minuto 40 de la tabla de datos experimentales 2 a 180 °C**

- 7)  $T_{BH}$  (ent) = 15 °C (ambiente)
- 8)  $T_{BS}$  (ent) = 27.5 °C (ambiente)
- 9)  $T_{BH}$  (sal) = 27 °C
- 10)  $T_{BS}$  (sal) = 64 °C
- 11)  $Y(\text{ent}) = 0.0086$

12)  $Y(\text{sal}) = 0.0136$

**Datos generales:**

$$R = 0.082 \frac{(L \times atm)}{(mol \times K)} \quad (6.47)$$

$$M1 = 18 \frac{Kg}{Kmol} \quad (6.48)$$

$$M2 = 84 \frac{Kg}{Kmol} \quad (6.49)$$

$$M3 = 29 \frac{Kg}{Kmol} \quad (6.50)$$

Diámetro ducto salida aire = 7.4 cm

**Fraciones en masa del experimento a 180 °C**

$m_A = 2112 \text{ g}$  ,  $m_{A1} = 1898 \text{ g}$  ,  $m_{A2} = 214 \text{ g}$

a) Agua

$$x_{A1} = \frac{1898g}{2112g} = 0.9 \quad (6.51)$$

b) Sólido

$$x_{A2} = \frac{214g}{2112g} = 0.1 \quad (6.52)$$

Flujo corriente A

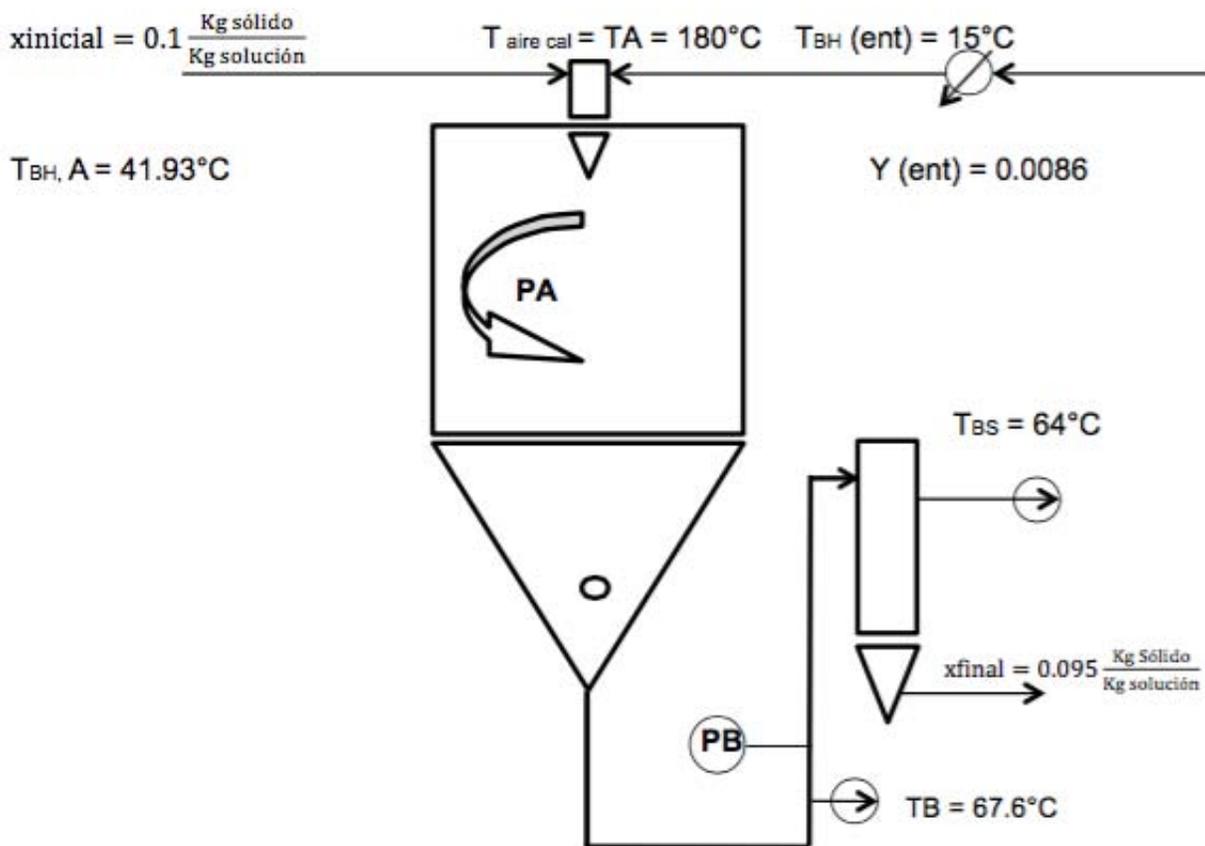
$$Q_A = 27.5 \frac{ml}{min} = 4.58 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s} \quad (6.53)$$

Densidad corriente A

$$\rho_A = 1113 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.54)$$

Área ducto salida

$$AD = \pi \frac{DD^2}{4} = \pi \frac{0.074^2}{4} = 0.0043m^2 \quad (6.55)$$

**Traducción****Figura 6.3:** Esquema para balances a 180 °C

Los siguientes datos fueron tomados del experimento realizado en el laboratorio de ingeniería química usando el equipo de atomización NIRO ATOMIZER Mobile MINOR.

Tabla de datos experimentales 2 a 180°C

Entrada punto A (PA)

| t, min    | T <sub>BS</sub> (ent) | T <sub>BH</sub> (ent) | Y(ent)       | Y(ent)         | y <sub>molar</sub> (ent) |
|-----------|-----------------------|-----------------------|--------------|----------------|--------------------------|
| 0         | 26.5                  | 14.0                  | 7.729        | 0.00773        | 0.01230                  |
| 5         | 26.5                  | 14.0                  | 7.729        | 0.00773        | 0.01230                  |
| 10        | 26.5                  | 14.0                  | 7.729        | 0.00773        | 0.01230                  |
| 15        | 27                    | 14.5                  | 8.160        | 0.00816        | 0.01298                  |
| 20        | 27.5                  | 15.0                  | 8.605        | 0.00860        | 0.01367                  |
| 25        | 27.5                  | 15.0                  | 8.605        | 0.00860        | 0.01367                  |
| 30        | 27.5                  | 15.0                  | 8.605        | 0.00860        | 0.01367                  |
| 35        | 27                    | 14.5                  | 8.160        | 0.00816        | 0.01298                  |
| <b>40</b> | <b>27.5</b>           | <b>15.0</b>           | <b>8.605</b> | <b>0.00860</b> | <b>0.01367</b>           |
| 45        | 27.5                  | 15.0                  | 8.605        | 0.00860        | 0.01367                  |
| 50        | 27.5                  | 15.0                  | 8.605        | 0.00860        | 0.01367                  |
| 55        | 27                    | 14.5                  | 8.160        | 0.00816        | 0.01298                  |
| 60        | 27.5                  | 15.0                  | 8.605        | 0.00860        | 0.01367                  |
| 65        | 27.5                  | 15.0                  | 8.605        | 0.00860        | 0.01367                  |
| 70        | 27                    | 14.5                  | 8.160        | 0.00816        | 0.01298                  |
| 75        | 27                    | 14.5                  | 8.160        | 0.00816        | 0.01298                  |

Continuación...

| T <sub>aircat</sub> | T <sub>BH,A</sub> | P° H <sub>2</sub> O(ent A) | P <sub>parcial</sub> | ΔPot m (ent)  |
|---------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| 180                 | 41.706            | 60.475                     | 7.19                 | 53.281        |
| 180                 | 41.706            | 60.475                     | 7.19                 | 53.281        |
| 180                 | 41.706            | 60.475                     | 7.19                 | 53.281        |
| 180                 | 41.816            | 60.828                     | 7.59                 | 53.236        |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.816            | 60.828                     | 7.59                 | 53.236        |
| <b>180</b>          | <b>41.929</b>     | <b>61.191</b>              | <b>8.00</b>          | <b>53.192</b> |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.816            | 60.828                     | 7.59                 | 53.236        |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.929            | 61.191                     | 8.00                 | 53.192        |
| 180                 | 41.816            | 60.828                     | 7.59                 | 53.236        |
| 180                 | 41.816            | 60.828                     | 7.59                 | 53.236        |

## Entrada punto B (PB)

Continuación...

| $T_{Bs}(\text{sal})$ | $T_{BH}(\text{sal})$ | $Y(\text{sal})$ | $Y(\text{sal})$ | $y_{\text{molar}}(\text{sal})$ | TB          |
|----------------------|----------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|-------------|
| 58.0                 | 26.5                 | 14.86           | 0.0149          | 0.0234                         | 63.0        |
| 58.5                 | 26.5                 | 14.86           | 0.0149          | 0.0234                         | 64.0        |
| 58.5                 | 26.5                 | 14.86           | 0.0149          | 0.0234                         | 64.0        |
| 62.0                 | 26.0                 | 12.30           | 0.0123          | 0.0194                         | 66.5        |
| 63.5                 | 26.5                 | 12.71           | 0.0127          | 0.0201                         | 66.5        |
| 62.6                 | 26.0                 | 12.04           | 0.0120          | 0.0190                         | 66.8        |
| 62.0                 | 26.0                 | 12.30           | 0.0123          | 0.0194                         | 67.5        |
| 62.1                 | 26.0                 | 12.25           | 0.0123          | 0.0194                         | 67.8        |
| <b>64.0</b>          | <b>27.0</b>          | <b>13.57</b>    | <b>0.0136</b>   | <b>0.0214</b>                  | <b>67.6</b> |
| 64.0                 | 27.0                 | 13.57           | 0.0136          | 0.0214                         | 67.6        |
| 64.0                 | 27.0                 | 13.57           | 0.0136          | 0.0214                         | 67.5        |
| 64.0                 | 27.0                 | 13.57           | 0.0136          | 0.0214                         | 67.6        |
| 64.5                 | 27.5                 | 13.35           | 0.0134          | 0.0211                         | 67.9        |
| 64.5                 | 27.0                 | 13.35           | 0.0134          | 0.0211                         | 68.0        |
| 68.0                 | 28.0                 | 14.07           | 0.0141          | 0.0222                         | 70.1        |
| 70.2                 | 29.5                 | 16.65           | 0.0166          | 0.0261                         | 72.4        |

Continuación...

| $T_{BH,B}$    | $P^{\circ} \text{H}_2\text{O}(\text{sal B})$ | $P_{\text{parcial}}$ | $\Delta \text{Pot m sal}$ |
|---------------|--|----------------------|---------------------------|
| 27.391        | 27.220                                       | 13.675               | 13.544                    |
| 27.584        | 27.531                                       | 13.675               | 13.855                    |
| 27.302        | 27.078                                       | 13.675               | 13.402                    |
| 26.909        | 26.457                                       | 11.364               | 15.092                    |
| 27.097        | 26.752                                       | 11.735               | 15.017                    |
| 26.849        | 26.363                                       | 11.132               | 15.231                    |
| 27.108        | 26.769                                       | 11.364               | 15.405                    |
| 27.145        | 26.828                                       | 11.326               | 15.502                    |
| <b>27.701</b> | <b>27.721</b>                                | <b>12.514</b>        | <b>15.207</b>             |
| 27.701        | 27.721                                       | 12.514               | 15.207                    |
| 27.683        | 27.691                                       | 12.514               | 15.178                    |
| 27.702        | 27.722                                       | 12.514               | 15.209                    |
| 27.662        | 27.657                                       | 12.320               | 15.337                    |
| 27.681        | 27.688                                       | 12.320               | 15.368                    |
| 28.395        | 28.871                                       | 12.968               | 15.903                    |
| 29.889        | 31.489                                       | 15.282               | 16.207                    |

Continuación...

| $\Delta P_{motriz}$ ml | $\Delta P(\text{sal-ent})$ | NUT          | VUT          | $\eta$       | % $\eta$     |
|------------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 29.013                 | 6.48                       | 0.223        | 2.413        | 0.800        | 79.98        |
| 34.392                 | 6.48                       | 0.188        | 2.860        | 0.828        | 82.83        |
| 33.971                 | 6.48                       | 0.191        | 2.825        | 0.826        | 82.63        |
| 35.530                 | 3.77                       | 0.106        | 5.076        | 0.899        | 89.93        |
| 35.482                 | 3.74                       | 0.105        | 5.119        | 0.900        | 90.01        |
| 35.672                 | 3.13                       | 0.088        | 6.138        | 0.916        | 91.59        |
| 35.826                 | 3.37                       | 0.094        | 5.738        | 0.910        | 91.03        |
| 35.892                 | 3.73                       | 0.104        | 5.181        | 0.901        | 90.12        |
| <b>35.651</b>          | <b>4.51</b>                | <b>0.127</b> | <b>4.256</b> | <b>0.881</b> | <b>88.11</b> |
| 35.651                 | 4.51                       | 0.127        | 4.256        | 0.881        | 88.11        |
| 35.625                 | 4.51                       | 0.127        | 4.253        | 0.881        | 88.10        |
| 35.633                 | 4.92                       | 0.138        | 3.902        | 0.871        | 87.10        |
| 35.766                 | 4.32                       | 0.121        | 4.462        | 0.886        | 88.62        |
| 35.793                 | 4.32                       | 0.121        | 4.465        | 0.886        | 88.63        |
| 36.243                 | 5.38                       | 0.148        | 3.633        | 0.862        | 86.21        |
| 36.506                 | 7.69                       | 0.211        | 2.558        | 0.810        | 81.00        |

### 6.4.1. Cálculos a 180 °C

Flujo volumétrico de AH corriente D

$$QD = vD \times AD = 10.6 \frac{m}{s} \times 0.0043 m^2 = 0.045 \frac{m^3}{s} \quad (6.56)$$

La densidad de la mezcla en la corriente D se calculó suponiendo que el peso molecular del aire húmedo era igual al peso molecular del aire; es decir, se despreció la fracción molar del agua en la mezcla.

$$\rho_D = \frac{P_{atm} \times M_3}{R \times T_{sal \text{ en } D}} = \frac{0.77 atm \times 29 \frac{Kg}{Kmol}}{0.082 \frac{(L \times atm)}{(Kmol \times K)} \times 337.15 K} = 0.807 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.57)$$

$T_{sal \text{ en } D}$  es la  $T_{BS}$  salida

Flujo másico de aire húmedo [AH] en D

$$D = QD \times \rho D = 0.045 \frac{m^3}{s} \times 0.807 \frac{Kg}{m^3} = 0.0363 \frac{Kg AH}{s} \quad (6.58)$$

Flujo másico de NaHCO<sub>3</sub> en E

$$E = A \times \frac{x_{A2}}{x_{E2}} = 5.09 \times 10^{-4} \frac{0.1}{0.095} = 5.35 \times 10^{-5} \frac{Kg}{s} \quad (6.59)$$

$x_{E2} = x_{final} = 0.95$

Siendo:

$$A = Q_A \times \rho_A = 4.58 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s} \times 1113 \frac{Kg}{m^3} = 5.09 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s} \quad (6.60)$$

$$C = D + E = 0.0363 \frac{Kg}{s} + 5.35 \times 10^{-5} \frac{Kg}{s} = 0.0363 \frac{Kg}{s} \quad (6.61)$$

$$B = C - A = 0.0363 - 5.1 \times 10^{-4} = 0.0362 \frac{Kg}{s} \quad (6.62)$$

La densidad de la mezcla en la corriente B se calculó suponiendo que el peso molecular del aire húmedo era igual al peso molecular del aire; es decir, se despreció la fracción molar del agua en la mezcla.

$$\rho_B = \frac{P_{atm} \times M_3}{R \times T_{sal en B}} = \frac{0.77 atm \times 29 \frac{Kg}{Kmol}}{0.082 \frac{(L \times atm)}{(mol \times K)} \times 453.15 K} = 0.600 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.63)$$

Flujo en B de AH,

$$Q_B = \frac{B}{\rho_B} = \frac{0.0362}{0.600 \frac{m^3}{s}} = 0.060 \frac{m^3}{s} \quad (6.64)$$

La fracción  $x_{B3}$  se dedujo a partir de la mezcla, que es igual al cociente de la suma de las masas de cada componente en la corriente y el volumen de la mezcla; en este caso, cada uno sustituidos por sus equivalentes de flujo.

$$\rho_B = \frac{m_{B1} + m_{B3}}{Q_B} \quad (6.65)$$

Si,

$$m_{B1} = Y_B \times m_{B3} \quad (6.66)$$

Entonces,

$$\rho_B = \frac{(Y_B \times m_{B3}) + m_{B3}}{Q_B} \Rightarrow \rho_B = \frac{m_{B3}(1 + Y_B)}{Q_B} \quad (6.67)$$

$$m_{B3} = B \times x_{B3} \quad (6.68)$$

De la ecuación (6.67),

$$\rho_B = \frac{B \times x_{B3}(1 + Y_B)}{Q_B} \quad (6.69)$$

Despejando  $x_{B3}$  queda,

$$x_{B3} = \frac{\rho_B \times Q_B}{B(1 + Y_B)} \quad (6.70)$$

Así la fracción de aire entrante es,

$$x_{B3} = \frac{\rho_B \times Q_B}{B(1 + Y_B)} = \frac{0.60 \times 0.060}{0.0362(1 + 0.0086)} = 0.986 \quad (6.71)$$

Fracción de Aire en C,

$$x_{C3} = B \frac{x_{B3}}{C} = 0.0379 \times \frac{0.986}{0.0384} = 0.973 \quad (6.72)$$

Fracción de Aire en D,

$$x_{D3} = B \frac{x_{B3}}{D} = 0.0379 \times \frac{0.986}{0.0384} = 0.973 \quad (6.73)$$

Fracción de agua en B,

$$x_{B1} = 1 - x_{B3} = 1 - 0.986 = 0.014 \quad (6.74)$$

Fracción de agua en D,

$$x_{D1} = 1 - x_{D3} = 1 - 0.986 = 0.014 \quad (6.75)$$

Fracción de  $NaHCO_3$  en C,

$$x_{C2} = A \frac{x_{A2}}{C} = 5.09 \times \frac{0.1}{0.0384} = 1.32 \times 10^{-3} \quad (6.76)$$

$$x_{C1} = \frac{(A \times x_{A1} + B \times x_{B1})}{C} = \frac{(5.09 \times 10^{-4} \times 0.9 + 0.0379 \times 0.014)}{0.0384} = 0.0257 \quad (6.77)$$

$$Y_{D1} = \frac{x_{D1}}{x_{D3}} = \frac{0.014}{0.976} = 0.0143 \quad (6.78)$$

$$Y_{C1} = \frac{x_{C1}}{x_{C3}} = \frac{0.0257}{0.973} = 0.0264 \quad (6.79)$$

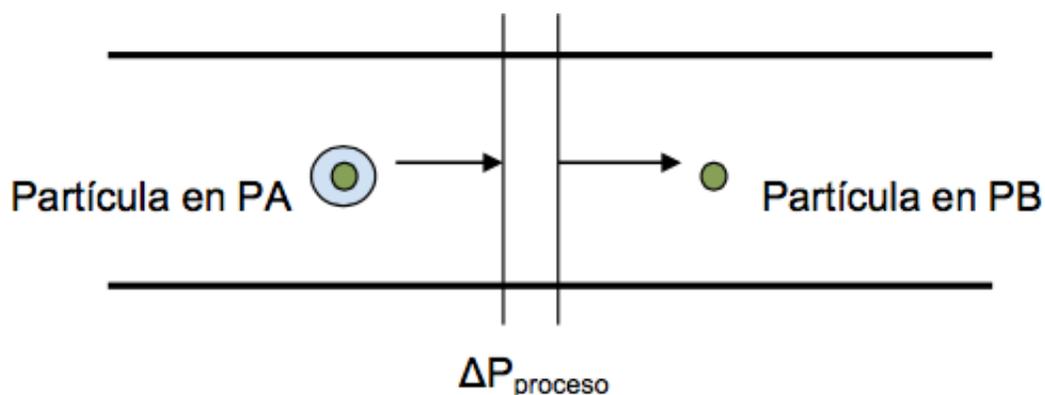
$$y_{B1} = \frac{\frac{Y_B}{M1}}{\frac{1}{M3} + \frac{Y_B}{M1}} = \frac{\frac{0.0086}{18 \frac{g}{mol}}}{\frac{1}{29 \frac{g}{mol}} + \frac{0.0086}{18 \frac{g}{mol}}} = 0.0136 \quad (6.80)$$

Véase la sección 6.5 para ver la manera de cálculo del NUT y la  $\eta$  (eficiencia).

## 6.5. NUT y eficiencia [ $\eta$ ]

A partir de los resultados obtenidos en la experimentación se puede calcular el valor del NUT (número de unidades de transferencia) y la eficiencia en el sistema. Enseguida se presenta el método de cálculo, a manera de ejemplo, con el dato al minuto 40 y la tabla de datos experimentales 2 a 180 °C.

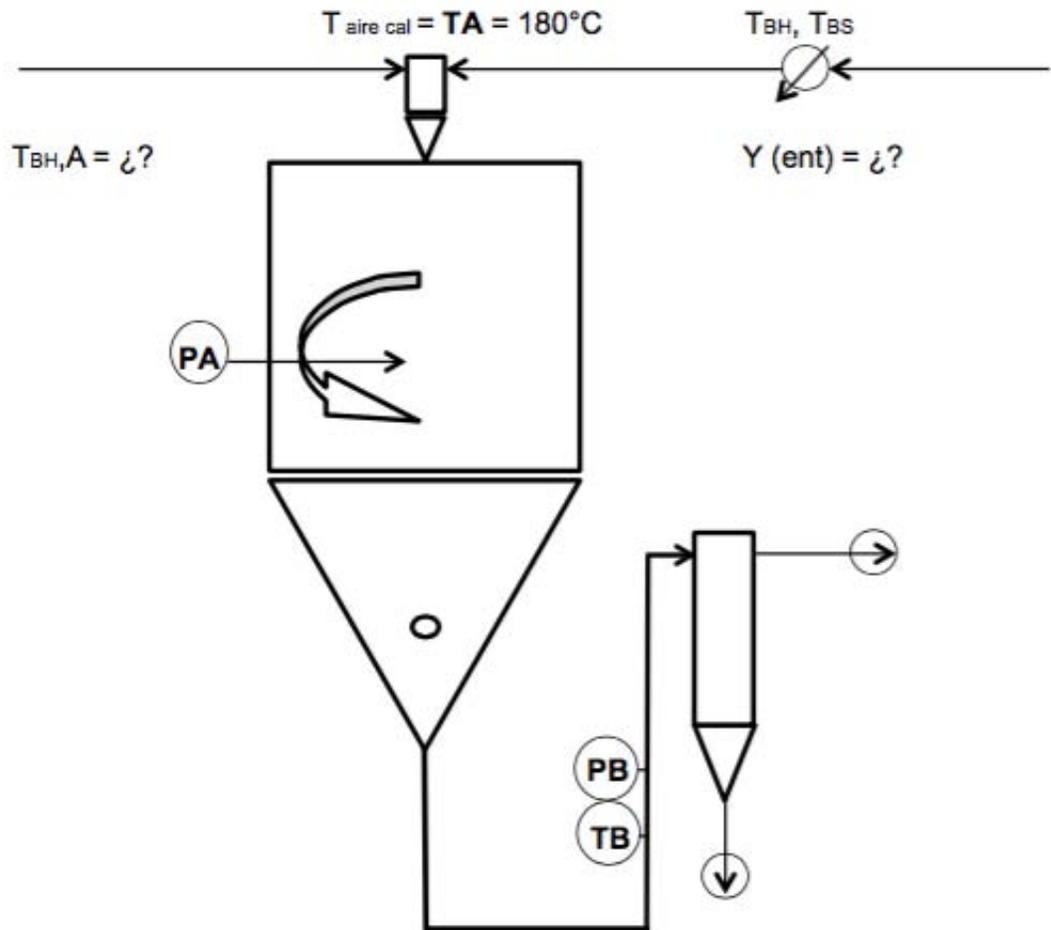
### 6.5.1. Memoria de cálculo para obtener el NUT y la eficiencia $\eta$



**Figura 6.4:** Esquema que muestra cómo se percibe la partícula húmeda al inicio del secado [PA] y cómo se ve la partícula seca al término del mismo [PB].

a) **Entrada.** Cuando la partícula se encuentra en el punto PA

**Traducción**



**Figura 6.5:** Lo que se debe conocer cuándo la partícula se encuentre en el punto PA.

En la experimentación se debe tomar nota de  $t$ ,  $T_{BH}(\text{ent})$ ,  $T_{BS}(\text{ent})$ ,  $T_{\text{air-cal}}$ . Aquí se usarán los datos experimentales de la tabla 2 a  $180^\circ\text{C}$  para ejemplificar. El primer cálculo que se debe conocer a partir de estos datos medidos es

la humedad absoluta  $[Y(\text{ent})]$  con los datos  $T_{BH}(\text{ent})$  y  $T_{BS}(\text{ent})$ . Con esto se podrá conocer la  $T_{BH,A}$  para el punto TA. Se pueden usar dos métodos para determinar la temperatura de bulbo húmedo  $T_{BH,A}$  a la cual entra la solución o las partículas húmedas. Uno es usando la carta psicrométrica y otro es usando el software Vaisala©.

- 1) Con la carta psicrométrica se localizan las temperaturas  $T_{BH}(\text{ent})$  y  $T_{BS}(\text{ent})$ , medidas del aire ambiente con el psicrómetro, para encontrar la  $Y(\text{ent})$ ; con esta humedad debe entrar el aire de calentamiento a la cámara de secado. Se sabe que  $Y(\text{ent})$  está determinada por  $T_{BH}(\text{ent})$  y  $T_{BS}(\text{ent})$  del aire ambiente pero el aire de calentamiento está a  $180^\circ\text{C}$ , entonces es necesario saber a qué temperatura de bulbo húmedo debe estar la solución de entrada para igualar las condiciones de humedad del aire de calentamiento con el aire ambiente.



**VAISALA / Humidity Calculator 2.2** Language / 日本語 / 中文

Basic **Advanced** Help

| Ambient Conditions | Value    | Unit/Conversion |
|--------------------|----------|-----------------|
| Temperature        | 27.5     | °C              |
| Pressure           | 585      | mmHg/torr       |
| Gas type           | Air      | Add new         |
| Psychrometer       | Standard | Add new         |

| Fill in the known parameter to calculate other values | Value    | Unit/Conversion |
|---|----------|-----------------|
| Relative humidity (RH)                                | 28.908   | %RH             |
| Dewpoint (°C)   | 7.844    | Tdew/Tfrost     |
| Parts per million (ppm)                               | 13834.49 | PPMvol          |
| Absolute humidity (a)                                 | 7.67025  | g/m³            |
| Mixing ratio (x)                                      | 8.60492  | g/kg            |
| Water content (w)                                     | 647.83   | lb/MMscf        |
| Vapor pressure (pw)                                   | 10.64275 | mbar            |
| Wet bulb  | 15       | °C              |
| Saturation vapor pressure (pws)                       | 36.816   | mbar            |

Calculate Reset

Copyright © Vaisala - www.vaisala.com

Figura 6.7: Ventana de Vaisala©. Entradas de  $T_{BS}(ent)$ ,  $T_{BH}(ent)$  y  $P_{atm}$

Ahora se cambia la Temperatura por la  $T_{air-cal}$  (180 °C) dejando la Presión en 585mmHg y Mixing ratio (x) en 8.60492. Picar Calcular y se obtendrá la  $T_{BH}$  en la celda Wet bulb a la cual se tendrá que calentar la solución. Ésta nueva  $T_{BH}$  generada será la  $T_{BH,A}$ .

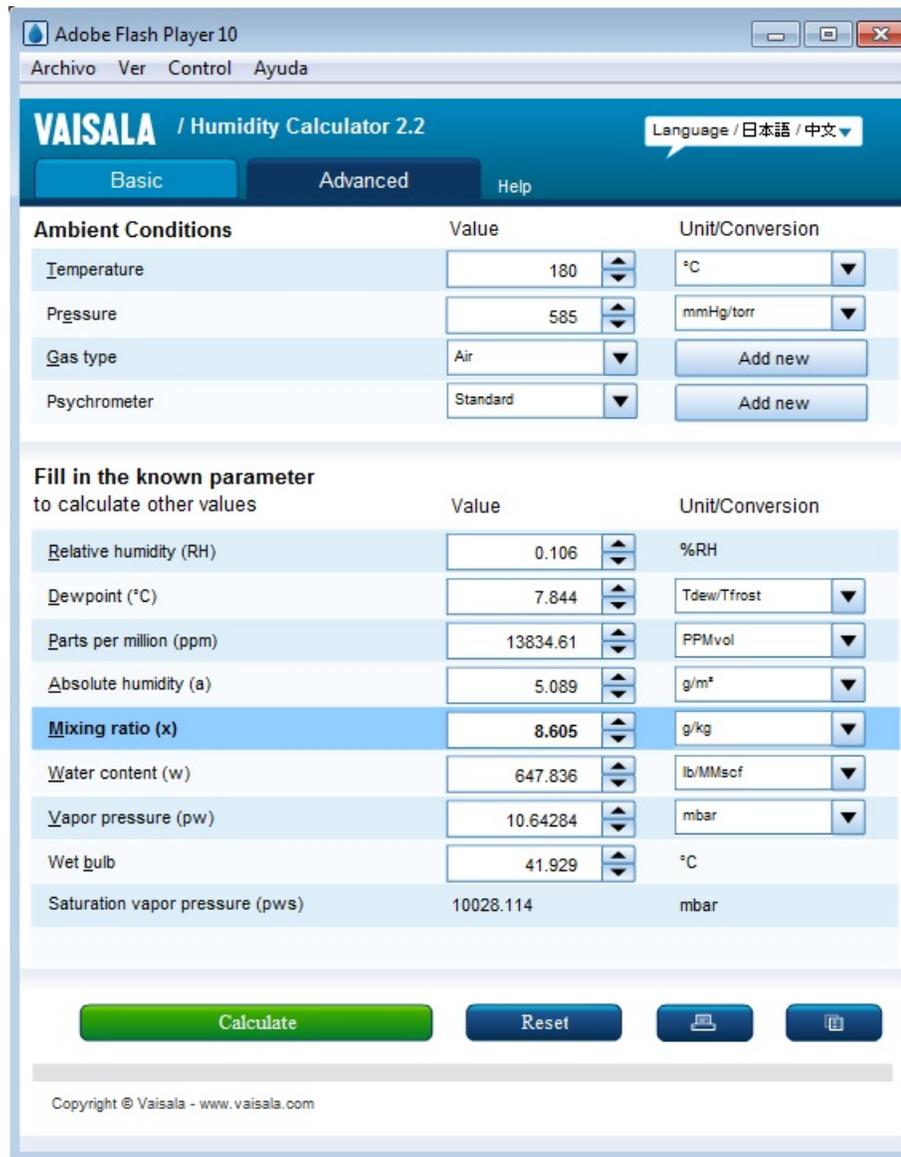


Figura 6.8: Ventana de Vaisala©. Entradas de  $T_{air-cal}$ , Mixing ratio (x) y  $P_{atm}$

Se divide entre mil el dato obtenido en la celda Mixing ratio (x) para obtener  $\frac{Kg}{Kg\ de\ AS}$ . Ahora se debe calcular la presión de vapor del  $H_2O$  y la presión

parcial del  $H_2O$  con la ecuación de Antoine y la ley de las presiones parciales de Dalton. Antoine, T en °C y P en mmHg

$$\text{Log}P^o = A - \frac{B}{T + C} \quad (6.81)$$

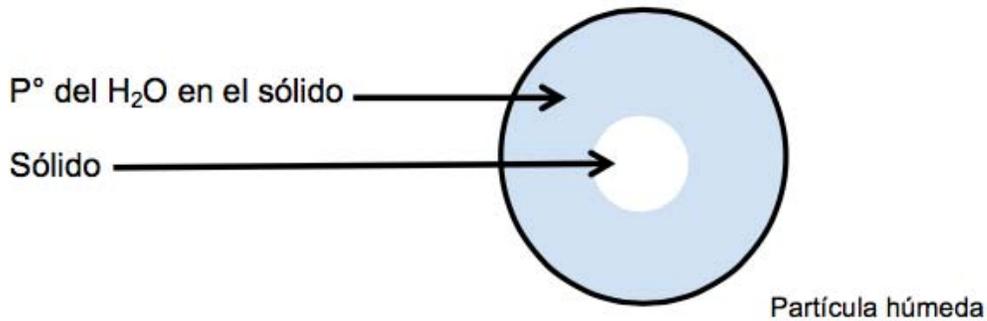
**A = 7.96687, B = 1668.21, C = 228**

$$P_i = P_{tot} \times y_i \quad (6.82)$$

Donde A, B y C son las constantes de Antoine para el  $H_2O$ .  $P_i$  es la presión parcial y  $y_i$  es la  $y_{molar}$

Entonces al minuto 40,  $P^o H_2O$  en el sólido es:

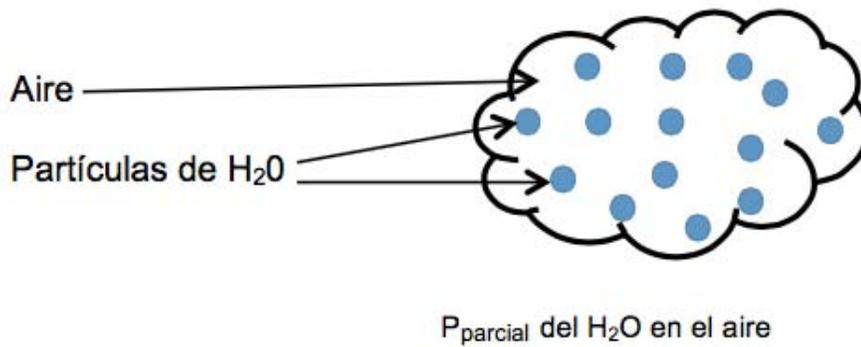
$$P^o H_2O = 10^{[A - \frac{B}{T+C}]} = 10^{[7.96687 - \frac{1668.21}{41.929+228}]} = 10^{[7.96687 - \frac{1668.21}{41.929+228}]} = 61.191 \text{ mmHg} \quad (6.83)$$



$$y_{molar} = \frac{\frac{Y(ent)}{PMH_2O}}{\frac{Y(ent)}{PMH_2O} + \frac{1}{PMaire}} = \frac{\frac{0.0073}{18}}{\frac{0.0073}{18} + \frac{1}{28}} = 0.01367 \quad (6.84)$$

Así que,

$$P_{parcial} = 585 \text{ mmHg} \times 0.01367 = 8.0 \text{ mmHg} \quad (6.85)$$



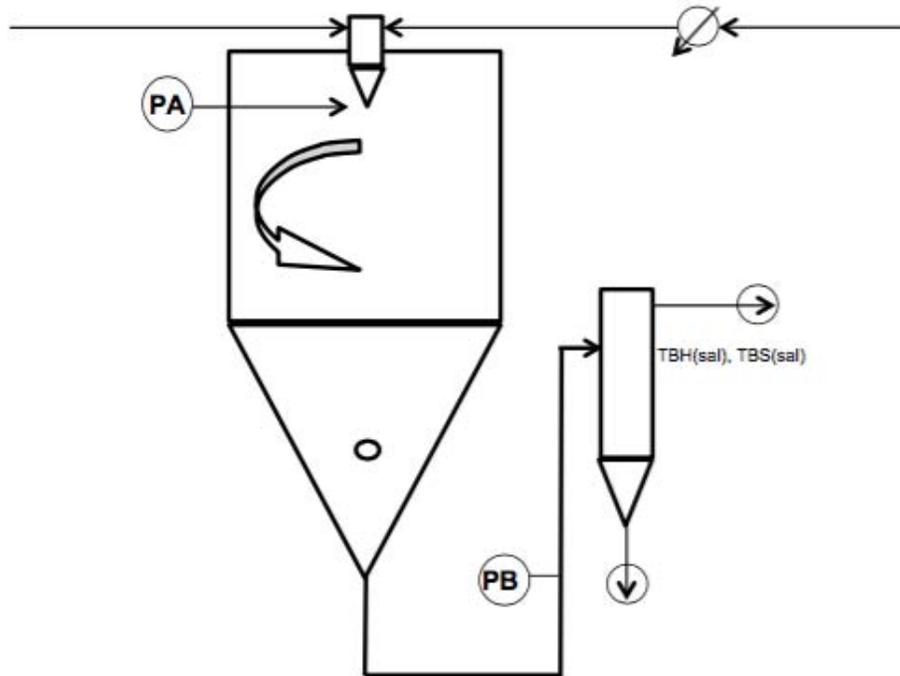
Una vez calculado lo anterior calcúlese el  $\Delta P$  motriz (ent):

$$\Delta P_{motriz} (ent) = P^{\circ} H_2O (entA) - P_{parcial} H_2O (entA) \quad (6.86)$$

$$\Delta P_{motriz} (ent) = (61.19 - 8.0) \text{ mmHg} = 53.19 \text{ mmHg} \quad (6.87)$$

b) **Salida. Cuando la partícula se encuentra en el punto PB.**

## Traducción

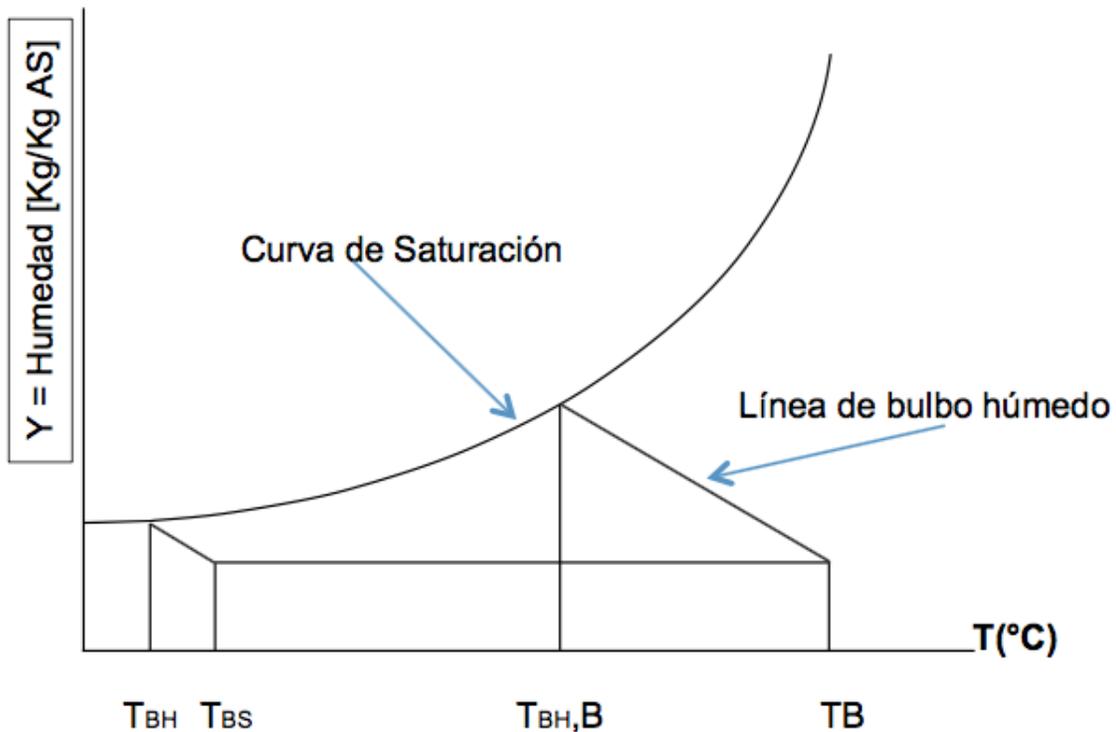


**Figura 6.9:** Lo que se debe conocer cuando la partícula se encuentre en el punto PB.

En la experimentación se debe tomar nota de  $t$ ,  $T_{BH}(sal)$ ,  $T_{BS}(sal)$ , TB. Aquí se usaran los datos experimentales de la tabla 2 al minuto 40 para ejemplificar. El primer cálculo que se debe conocer a partir de estos datos medidos es la humedad absoluta  $[Y(sal)]$  con los datos  $T_{BH}(sal)$  y  $T_{BS}(sal)$ . Con esto se podrá conocer la  $T_{BH,B}$  para el punto TB. Se pueden usar dos métodos para determinar la temperatura de bulbo húmedo  $T_{BH,B}$  a la cual salen las partículas secas. Uno es usando la carta psicrométrica y otro es usando el software Vaisala©.

1) Con la carta psicrométrica se localizan las temperaturas  $T_{BH}(sal)$  y  $T_{BS}(sal)$

del aire ambiente para encontrar la  $Y(\text{sal})$ ; con esta humedad debe salir el aire de calentamiento de la cámara de secado. Se sabe que  $Y(\text{sal})$  está determinada con  $T_{BH}(\text{sal})$  y  $T_{BS}(\text{sal})$  del aire ambiente pero el aire de calentamiento está a  $67.6^\circ\text{C}$ , entonces es necesario saber a qué temperatura de bulbo húmedo están saliendo las partículas secas.



**Figura 6.10:** Muestra que teniendo una  $T_{BH}$  y una  $T_{BS}$  se puede conocer una  $[Y]$  para determinar una  $T_{BH,B}$  a una  $T_B$  fija.

- 2) Usando el programa Vaisala© se debe escribir en la celda Temperature la  $T_{BS}(\text{sal})$ , en Wet bulb la  $T_{BH}(\text{sal})$ , en Pressure [585 mmHg]. Picar Calculate. Esto generará la  $Y(\text{sal})$  en la celda Mixing ratio (x).

| Ambient Conditions | Value    | Unit/Conversion |
|--------------------|----------|-----------------|
| Temperature        | 64       | °C              |
| Pressure           | 585      | mmHg/torr       |
| Gas type           | Air      | Add new         |
| Psychrometer       | Standard | Add new         |

| Fill in the known parameter to calculate other values | Value    | Unit/Conversion  |
|---|----------|------------------|
| Relative humidity (RH)                                | 6.946    | %RH              |
| Dewpoint (°C)   | 14.589   | Tdew/Tfrost      |
| Parts per million (ppm)                               | 21813.01 | PPMvol           |
| Absolute humidity (a)                                 | 10.70029 | g/m <sup>3</sup> |
| Mixing ratio (x)                                      | 13.56749 | g/kg             |
| Water content (w)                                     | 1013.466 | lb/MMscf         |
| Vapor pressure (pw)                                   | 16.64953 | mbar             |
| Wet bulb  | 27       | °C               |
| Saturation vapor pressure (pws)                       | 239.705  | mbar             |

Figura 6.11: Ventana de Vaisala©Entradas de  $T_{BS}(\text{sal})$ ,  $T_{BH}(\text{sal})$  y  $P_{atm}$

Ahora se cambia la Temperature por la TB ( $67.6^{\circ}\text{C}$ ) dejando Pressure en 585 mmHg y Mixing ratio (x) en 13.56749. Picar Calculate y se obtendrá la  $T_{BH}$

en la celda Wet bulb a la cual se tendrá el aire húmedo de salida de la cámara de secado.

| Ambient Conditions | Value    | Unit/Conversion |
|--------------------|----------|-----------------|
| Temperature        | 67.6     | °C              |
| Pressure           | 585      | mmHg/torr       |
| Gas type           | Air      | Add new         |
| Psychrometer       | Standard | Add new         |

| Fill in the known parameter to calculate other values | Value    | Unit/Conversion |
|---|----------|-----------------|
| Relative humidity (RH)                                | 5.919    | %RH             |
| Dewpoint (°C)   | 14.59    | Tdew/Tfrost     |
| Parts per million (ppm)                               | 21814.27 | PPMvol          |
| Absolute humidity (a)                                 | 10.58784 | g/m³            |
| Mixing ratio (x)                                      | 13.56749 | g/kg            |
| Water content (w)                                     | 1013.523 | lb/MMscf        |
| Vapor pressure (pw)                                   | 16.65046 | mbar            |
| Wet bulb  | 27.701   | °C              |
| Saturation vapor pressure (pws)                       | 281.308  | mbar            |

Figura 6.12: Ventana de Vaisala©. Entradas TB, Mixing ratio (x) y  $P_{atm}$

Se divide entre mil el dato obtenido en la celda Mixing ratio (x) para obtener  $\frac{Kg}{Kg \cdot AS}$ . Ahora se debe calcular la presión de vapor del H<sub>2</sub>O y la presión parcial del H<sub>2</sub>O con la ecuación de Antoine y la ley de las presiones parciales de Dalton.

Antoine, T en °C y P en mmHg

$$\text{Log}P^{\circ} = A - \frac{B}{T + C} \quad (6.88)$$

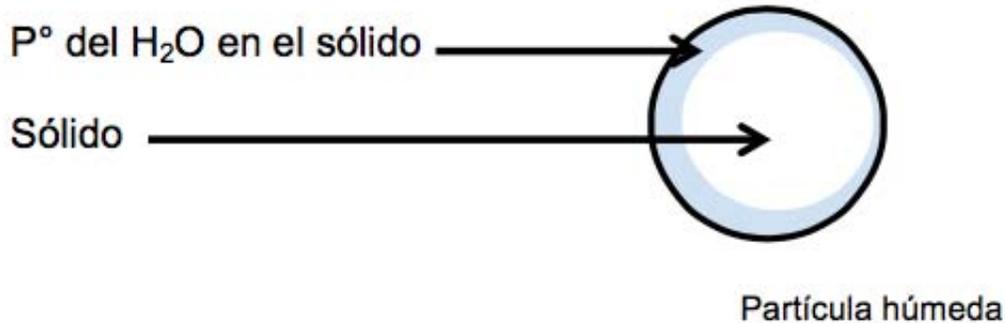
**A = 7.96687, B = 1668.21, C = 228**

$$P_i = P_{tot} \times y_i \quad (6.89)$$

Donde A, B y C son las constantes de Antoine para el H<sub>2</sub>O. P<sub>i</sub> es la presión parcial y y<sub>i</sub> es la y<sub>molar</sub>

Entonces al minuto 40, P°H<sub>2</sub>O en el sólido es:

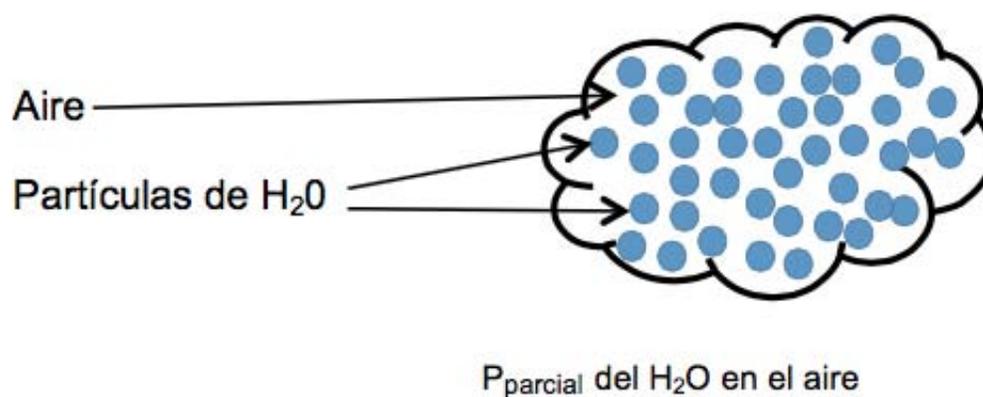
$$P^{\circ}H_2O = 10^{[A - \frac{B}{T+C}]} = 10^{[7.96687 - \frac{1668.21}{27.701+228}]} = 10^{[7.96687 - \frac{1668.21}{27.701+228}]} = 27.72 \text{ mmHg} \quad (6.90)$$



$$y_{molar} = \frac{\frac{Y(sal)}{PM_{H_2O}}}{\frac{Y(sal)}{PM_{H_2O}} + \frac{1}{PM_{aire}}} = \frac{\frac{0.0136}{18}}{\frac{0.0136}{18} + \frac{1}{28}} = 0.0214 \quad (6.91)$$

Así que,

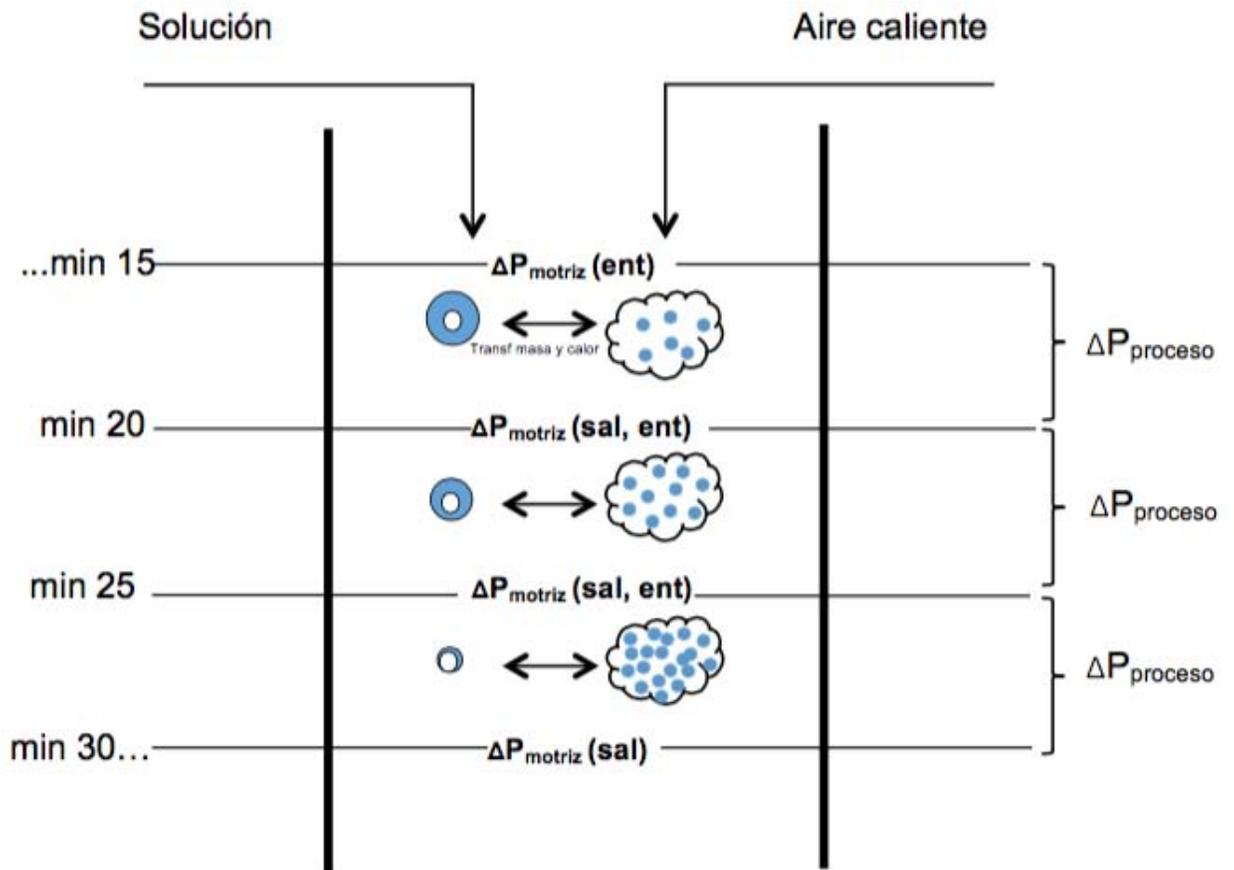
$$P_{parcial} = 585 \text{ mmHg} \times 0.0214 = 12.51 \text{ mmHg} \quad (6.92)$$



Una vez calculado lo anterior calcúlese el  $\Delta P$  motriz (sal):

$$\Delta P_{motriz} (sal) = P^{\circ} H_2O (salB) - P_{parcial} H_2O (salB) \quad (6.93)$$

$$\Delta P_{motriz} (sal) = (27.72 - 12.51) \text{ mmHg} = 15.21 \text{ mmHg} \quad (6.94)$$



**Figura 6.13:** Muestra en que sitio del secador se encuentra  $\Delta P_{motriz}$  y  $\Delta P_{proceso}$ .

El  $\Delta P_{motriz}$  se da entre la partícula húmeda y el aire caliente. La  $P^{\circ} H_2O$  en el sólido a la entrada es mayor porque, en relación con la  $P^{\circ} H_2O$  en el sólido a la salida, hay mayor cantidad de agua que envuelve a la partícula. A lo largo del secado ésta  $P^{\circ} H_2O$  irá disminuyendo considerablemente. La  $P_{parcial}$  del  $H_2O$  en el aire a la entrada es menor con respecto a la de salida pues hay menor cantidad de agua en la nube de aire. Esta presión irá aumentando ligeramente a lo largo del secado. El  $\Delta P_{proceso}$  está relacionado con las presiones parciales de entrada

y salida de la partícula en un intervalo de tiempo.

Consideremos ahora lo siguiente:

$$\Delta P_{\text{proceso}} = P(\text{sal}) - P(\text{ent}) \quad (6.95)$$

$$\Delta P_{\text{motriz}(\text{ent})} = (P^{\circ} - P)\text{ent} \quad (6.96)$$

$$\Delta P_{\text{motriz}(\text{sal})} = (P^{\circ} - P)\text{sal} \quad (6.97)$$

Se sabe que

$$G_s \times P(\text{sal}) - P(\text{ent}) = KGv \times V \times \Delta P_{mL} \quad (6.98)$$

dónde,  $P(\text{sal}) - P(\text{ent})$  es el  $\Delta P_{\text{proceso}}$ , es decir, las presiones parciales a la entrada y salida del proceso de secado.

$$KGv \times V \times \Delta P_{mL} = NA \quad (6.99)$$

NA es el flux másico del proceso. KGv es el coeficiente de transferencia de masa volumétrico. V es volumen del aire.  $\Delta P_{mL}$  es el potencial motriz del sistema definido como:

$$\Delta P_{mL} = \frac{\Delta P_{\text{motriz}(\text{ent})} - \Delta P_{\text{motriz}(\text{sal})}}{\ln \frac{\Delta P_{\text{motriz}(\text{ent})}}{\Delta P_{\text{motriz}(\text{sal})}}} \quad (6.100)$$

Así, es conveniente reacomodar la ecuación (6.99) para obtener la definición de NUT (número de unidades de transferencia) y del VUT (volúmenes de unidades de transferencia) quedando:

$$NUT = \frac{P(\text{sal}) - P(\text{ent})}{\Delta P_{mL}} = \frac{KGv \times V}{G_s} \quad (6.101)$$

Así,

$$NUT = \frac{P(sal) - P(ent)}{\Delta P mL} \quad (6.102)$$

Y,

$$VUT = \frac{V_{sec}}{NUT} \quad (6.103)$$

Y la eficiencia  $\eta$  se define como:

$$\eta = e^{-NUT} \quad (6.104)$$

Teniendo esto, se calcula el  $\Delta P mL$ ,  $\Delta P_{proceso}$ ,  $NUT$ ,  $VUT$ ,  $\eta$  y  $\% \eta$

Entonces al minuto 40, de la ecuación (6.100) se tiene:

$$\Delta P mL = \frac{\Delta P_{motriz}(ent) - \Delta P_{motriz}(sal)}{\ln \frac{\Delta P_{motriz}(ent)}{\Delta P_{motriz}(sal)}} = \frac{53.192 - 15.207}{\frac{53.192}{15.207}} = 30.336 \quad (6.105)$$

De la ecuación (6.95) se tiene:

$$\Delta P_{proceso} = P(sal) - P(ent) = (12.51 - 8.0) mmHg = 4.51 mmHg \quad (6.106)$$

De la ecuación (6.102) se tiene:

$$NUT = \frac{P(sal) - P(ent)}{\Delta P mL} = \frac{4.51}{30.336} = 0.149 \quad (6.107)$$

De la ecuación (6.103) y un volumen de 0.539 m<sup>3</sup> se tiene:

$$VUT = \frac{V_{sec}}{NUT} = \frac{0.539}{0.149} = 3.622 \quad (6.108)$$

De la ecuación (6.104) se tiene entonces:

$$\eta = e^{-NUT} = e^{-0.149} = 0.862 \quad (6.109)$$

$$\% \eta = 0.862 \times 100 = 86.2 \% \quad (6.110)$$

# Capítulo 7

## Análisis de Resultados

Los resultados de las corridas experimentales consideradas para este análisis muestran que la humedad final del producto seco disminuye cuando la temperatura del aire de secado aumenta.

| <b>Temperatura del aire de secado, °C</b> | <b>Humedad del sólido secado (producto). % peso</b> |
|---|---|
| 140                                       | 18  |
| 160                                       | 10  |
| 180                                       | 3   |

El porcentaje de producto recuperado también aumenta con la elevación de la temperatura del aire de secado.

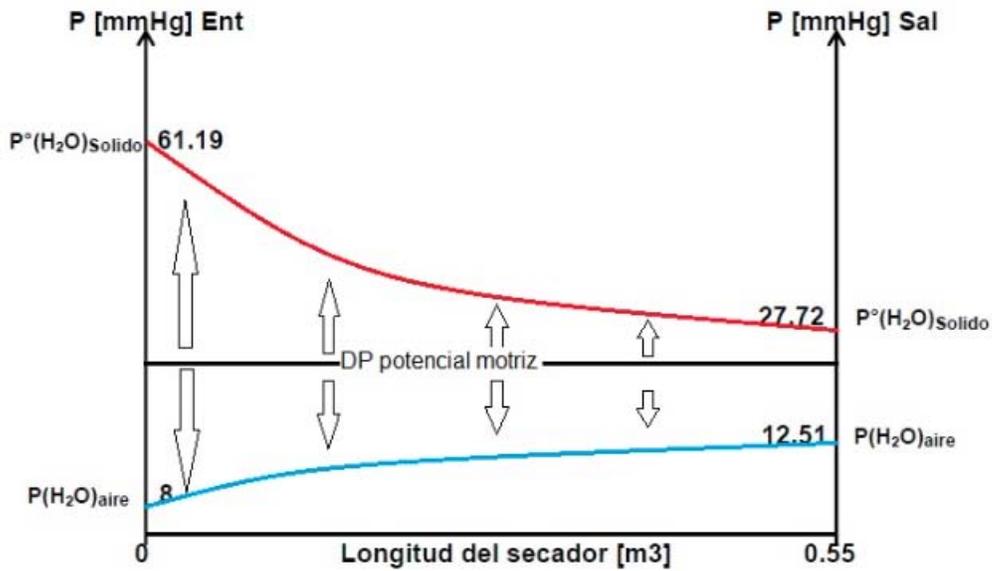
---

| Corrida | Tsecado<br>[°C] | HR (A) | %sólido<br>recuperado | HR (B) |
|---------|-----------------|--------|-----------------------|--------|
| 1       | 140             | 13.5   | 65                    | 82     |
| 2       | 160             | 13.75  | 91                    | 67.5   |
| 3       | 180             | 13.1   | 95                    | 45     |

Resumen de resultados experimentales a varias temperaturas y datos tomados al minuto 40 del proceso. Tablas 1 y 2 de datos experimentales.

El potencial motriz determinado a partir de la diferencia de presiones entre la presión de vapor de agua en el sólido y la presión parcial del vapor de agua en el aire nos permite evaluar el desempeño del secador considerando los dos fluidos (aire y solución) calculado como:

$$\eta \equiv e^{-NUT} \quad (7.1)$$



La figura muestra como el potencial motriz está en función de las presiones de vapor en el sólido y las presiones parciales del agua en el aire representando un comportamiento logarítmico, pero dado que no existen los instrumentos adecuados en el laboratorio para medir puntualmente lo que pasa con la partícula, desde que entra hasta que sale del secador, se recurrió a una expresión matemática descrita a partir de la ecuación (6.95) de este trabajo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

| $T [^{\circ}\text{C}]$ | $\Delta P_{\text{motriz (ent)}}$ | $\Delta P_{\text{motriz (sal)}}$ | $\Delta P_{\text{ot motriz ml}}$ | NUT   | $\% \eta$ |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|-----------|
| <b>140</b>             | 51.11                            | 5.05                             | 19.89                            | 0.985 | 37        |
| <b>160</b>             | 46.39                            | 9.86                             | 23.59                            | 0.555 | 58        |
| <b>180</b>             | 53.19                            | 15.2                             | 30.33                            | 0.149 | 86        |

Resumen de resultados experimentales a varias temperaturas y datos tomados al minuto 40 del proceso. Tablas 1 y 2 de datos experimentales.

Si los potenciales motrices tanto de entrada como de salida fueran similares, se obtendrían resultados de eficiencia más altos.

# Capítulo 8

## Conclusiones

- 1) El guión experimental producto de esta tesis representa una propuesta para el Laboratorio de Ingeniería Química III.
- 2) El secador por aspersión estudiado en esta tesis, desde el punto de vista didáctico, permite analizar conceptos fundamentales de transferencia de masa, tales como, coeficiente de transferencia de masa volumétrico ( $KG_V$ ), número de unidades de transferencia de masa (NUTm), eficiencia del secado ( $\eta$ ), las relaciones de presión de vapor del agua a la entrada y salida del sistema ( $P^o H_2O$ ), las relaciones de presión parcial del agua a la entrada y salida del sistema ( $PH_2O$ ), y la importancia que tiene la temperatura de consigna en el proceso de secado, obteniendo en este estudio mejores resultados de eficiencia, trabajando a temperaturas altas.
- 3) El secado por aspersión en el equipo Niro-Atomizer Mobil-Minor demuestra que es posible hacer un estudio completo de transferencia de masa usando como criterio de evaluación el número de unidades de transferencia de masa

NUT.

- 4) Desde la perspectiva operativa del equipo de secado por aspersión, éste reúne las características óptimas para su implementación en la asignatura del Laboratorio de Ingeniería Química III, dado que sus dimensiones, permiten que un grupo de diez personas participe activamente en la preparación de los equipos auxiliares, la preparación de la solución, la puesta en marcha del equipo, manejo y control del equipo, paro del equipo y toma de datos experimentales.

# Capítulo 9

## Bibliografía

- 1) Alamilla, L. (2001). Aspectos sobre el uso de secadores por aspersión. Documento predoctoral. ENCB-IPN. México. 81 p.
- 2) Alamilla, L., Chanona, J.J., Jiménez, A.R., Gutiérrez, G.F. (2005). Description of morphological changes of particles along spray drying. *Journal of Food Engineering* 67,179-184.
- 3) Treybal, R.E. (2000). Operaciones Unitarias de Transferencia de Masa. McGraw-Hill. México. pp 247-303 y 723-787.
- 4) Masters, K. (1985). *Spray Drying*. George Godwin. London. 684 p.
- 5) Filková, I., Huang, L.X., Mujumdar, A.S. (2006). Industrial spray drying. In. *Handbook of Industrial Drying*.
- 6) Mujumdar, A.S. (Ed). CRC Press. Taylor and Francis Group. pp 215-255.
- 7) Valiente Barderas, Antonio y Tlaczin Stivalet. Problemas de balance de materia y energía. Alhambra Mexicana, México, 1991.

- 8) Valiente Barderas, Antonio. Secado, 2002. pp 1-7, 118-135.
- 9) Foust et al. Principios de operaciones unitarias. Wiley, New York, 1980.
- 10) GEA Process Engineering Division. (2006). Cotización del equipo. Spray Dryer Basic Mobile Minor 2000.
- 11) Spraying Systems Co. (Experts in spray technology) 2012. Manual de referencias técnicas.
- 12) Geankoplis, C. J., (1999) Procesos de transporte y operaciones unitarias., Editorial Continental, S.A, México, 2005, pp.579-630.
- 13) NIRO ATOMIZER A/S. Tecnología de la leche en polvo evaporación y secado por atomización. Copenhague. Niro, Noviembre 1994. p. 29-50.
- 14) Nonhebel, G. y A. A. H. Moss. El secado de sólidos en la industria química. Reverté. España 1979.
- 15) Budavari S, O'Neil MJ, Smith A, Heckelman PE (Eds.). 1989. The Merck Index, 11th ed. Merck y Co., Inc., Rahway, NJ.
- 16) Solvay, BICAR- Sodium bicarbonate and its many uses. Brussels, Belgium: R. Vande Velde, 1996.

# Capítulo 10

## Anexo I y II

### Anexo I

#### Esquemas y fotografías del Equipo Niro-atomizer Mobil Minor Tipo HI-TEC

### 10.1. Secador por aspersión

- a) Cámara del secador.
- b) 800mm de diámetro, 600mm de altura cilíndrica y con base cónica de 700 mm de altura.
- c) El ángulo del cono es de  $60^\circ$ . Altura total de la cámara de 1300 mm.
- d) Todas las superficies internas en contacto con el producto son de acero inoxidable AISI 316.
- e) El volumen total de la cámara de secado es de  $0.539\text{m}^3$ .



Figura 10.1: Frente del secador por aspersión.

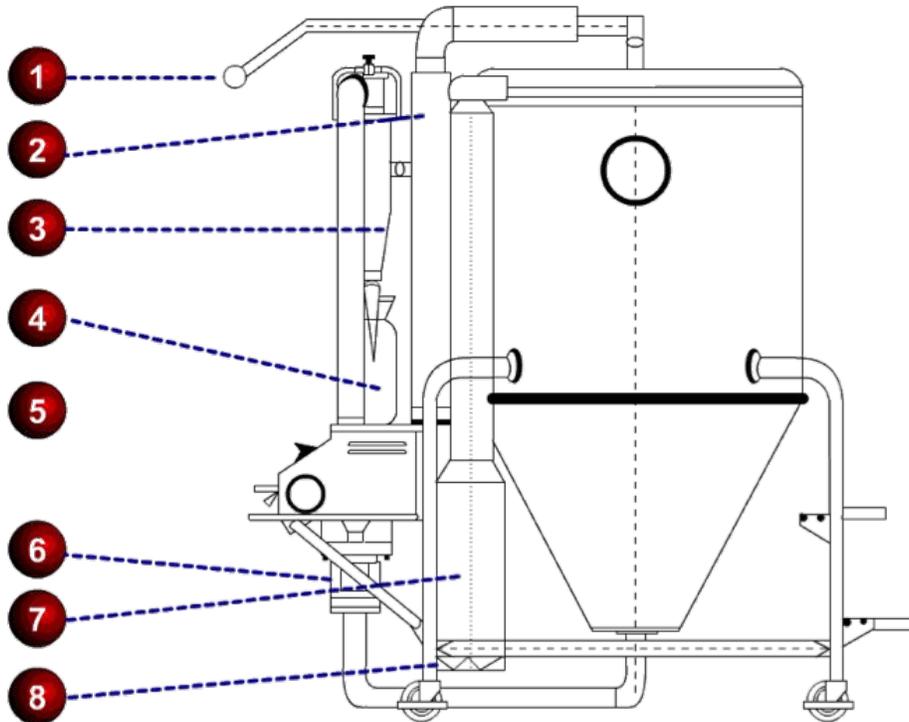


Figura 10.2: Diagrama secador vista lateral.

## 10.2. Partes constitutivas del secador por aspersión

- 1) Maneral.
- 2) Pistón neumático.
- 3) Ciclón.
- 4) Descarga de polvos con válvula de aislamiento.

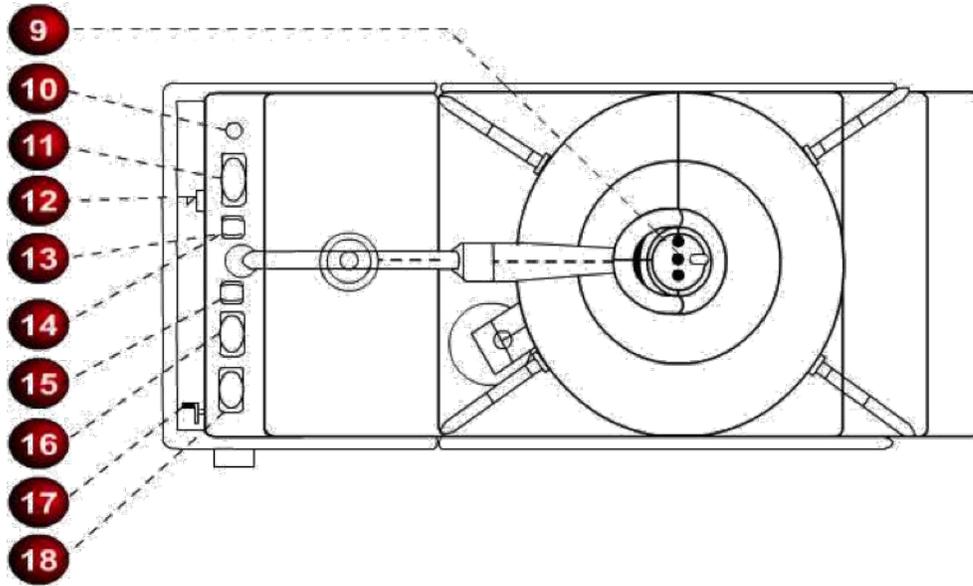
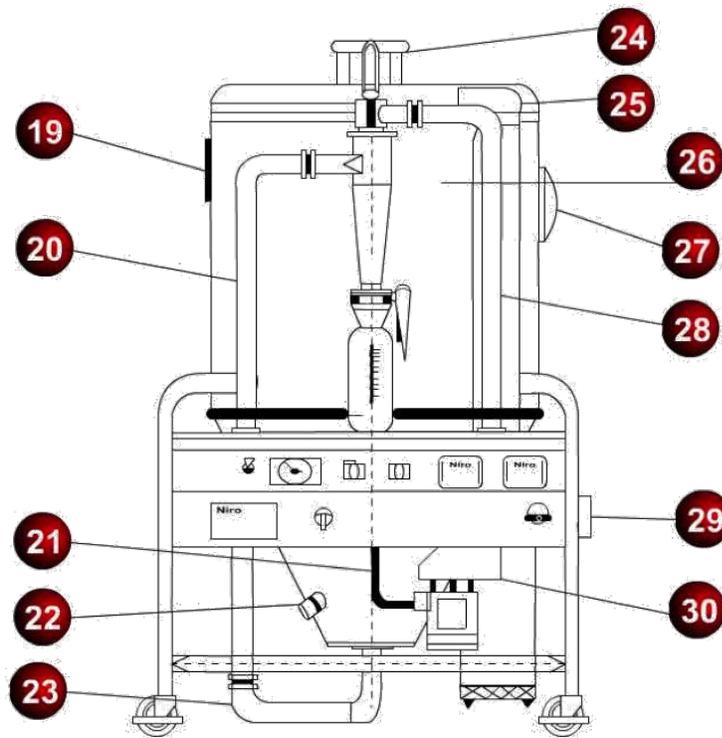


Figura 10.3: Diagrama secador vista aerea.

- 5) Conducto.
- 6) Motor del ventilador.
- 7) Calentador eléctrico de aire.
- 8) Filtro de aire.
- 9) Atomizador.
- 10) Válvula de control para el aire del atomizador.
- 11) Manómetro.
- 12) Válvula de control del dispositivo de levantamiento de la tapa.

## 10.2. Partes constitutivas del secador por aspersión



**Figura 10.4:** Diagrama secador vista frontal.

- 13) Lámpara de tablero activado.
- 14) Interruptor de operación.
- 15) Interruptor para la bomba de alimentación.
- 16) Control digital para la temperatura de aire de calentamiento.
- 17) Control de la válvula de salida del aire.
- 18) Indicador de temperatura de aire de salida.

- 19) Mirilla.
- 20) Conducto de transporte de polvos.
- 21) Contacto para la bomba de succión.
- 22) Yunque vibrador.
- 23) Conducto.
- 24) Motor del ventilador.
- 25) Tapa de la cámara de secado.
- 26) Cámara de secado.
- 27) Luz de la cámara de secado.
- 28) Conducto.
- 29) Salida del soplador.
- 30) Cojinete de balines para el ventilador.

### **10.3. Atomizador o disco centrífugo**

El disco cuenta con 24 ranuras y se instala en un eje que gira a alta velocidad impulsado por una turbina mediante el suministro de aire comprimido. Las dimensiones están en centímetros.

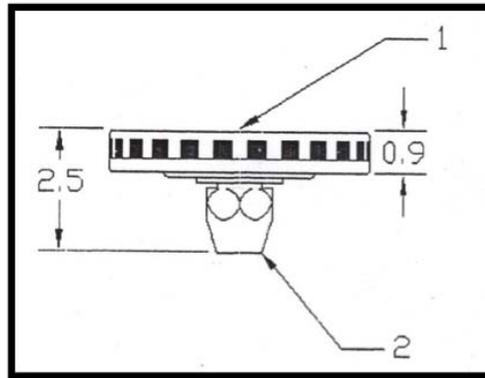
La figura (Fig. 10.13) sugiere el tipo de manguera que se debe utilizar, considerando su diámetro interno y el espesor de la pared; así como la posición en la cual deben encontrarse las compuertas reguladoras del paso del fluido.



**Figura 10.5:** Disco rotatorio.



**Figura 10.6:** Disco rotatorio detalle.



**Figura 10.7:** Diagrama disco rotatorio.

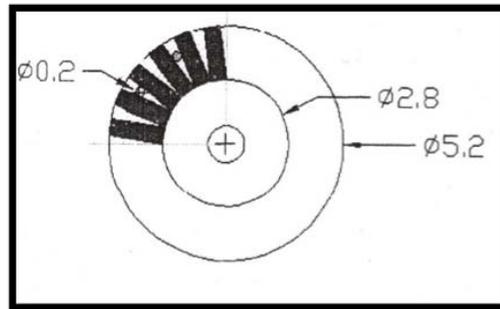


Figura 10.8: Diagrama disco rotatorio.

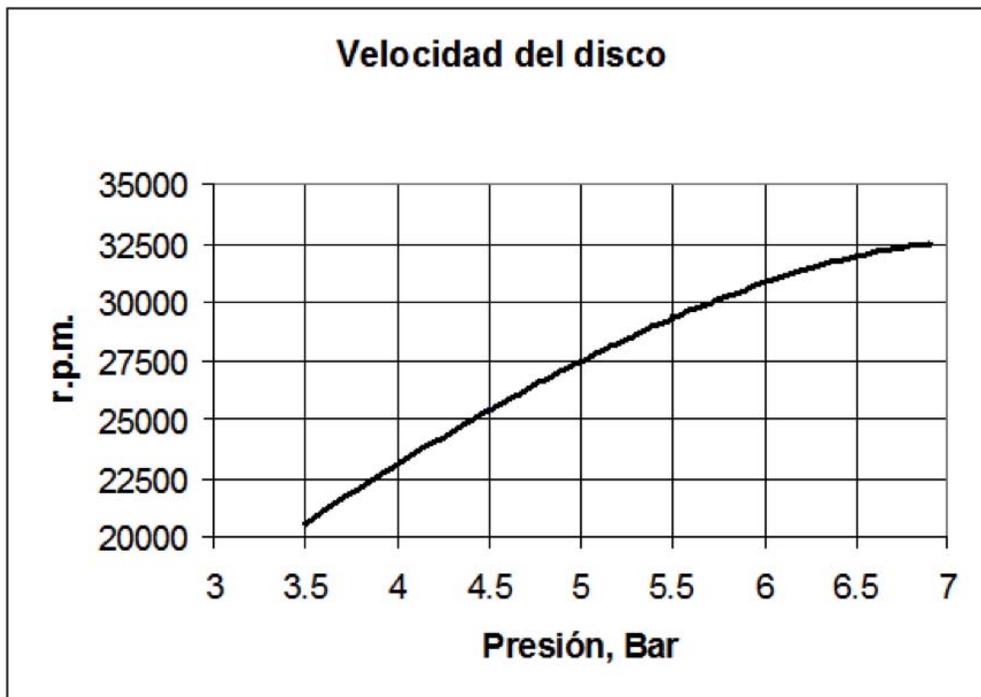


Figura 10.9: Gráfica de presión vs rpm.



Figura 10.10: Monta-jugos de vidrio con capacidad de 2 litros.



Figura 10.11: Bañ térmico de temperatura controlada.



Figura 10.12: Bomba dosificadora o de succión.



Figura 10.14: Compresora exclusiva del secador por aspersión.

|                       |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Diámetro<br>manguera  | 0.5 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | 4.8 | 6.4 | 8.0 |
| Posición<br>compuerta | 2   | 2   | 3   | 4   | 6   | 7   | 7   |

Figura 10.13: Relación diámetro manguera - posición compuerta

\*Espesor de pared de la manguera: 1.6 mm. \*Los diámetros internos van desde 0.5 hasta 8.0 mm

Anexo II

Se muestran dos gráficas comparativas de dos corridas distintas realizadas en el laboratorio secando  $\text{NaHCO}_3$  a  $160^\circ\text{C}$  y a  $180^\circ\text{C}$ .

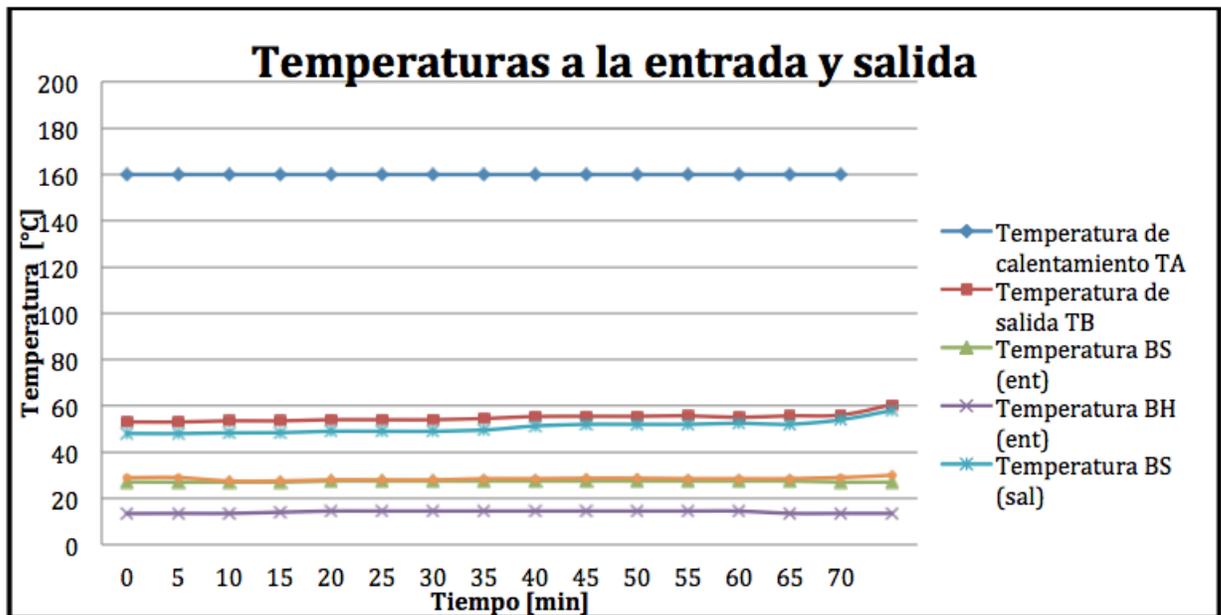


Figura 10.15: Secado a  $160^\circ\text{C}$

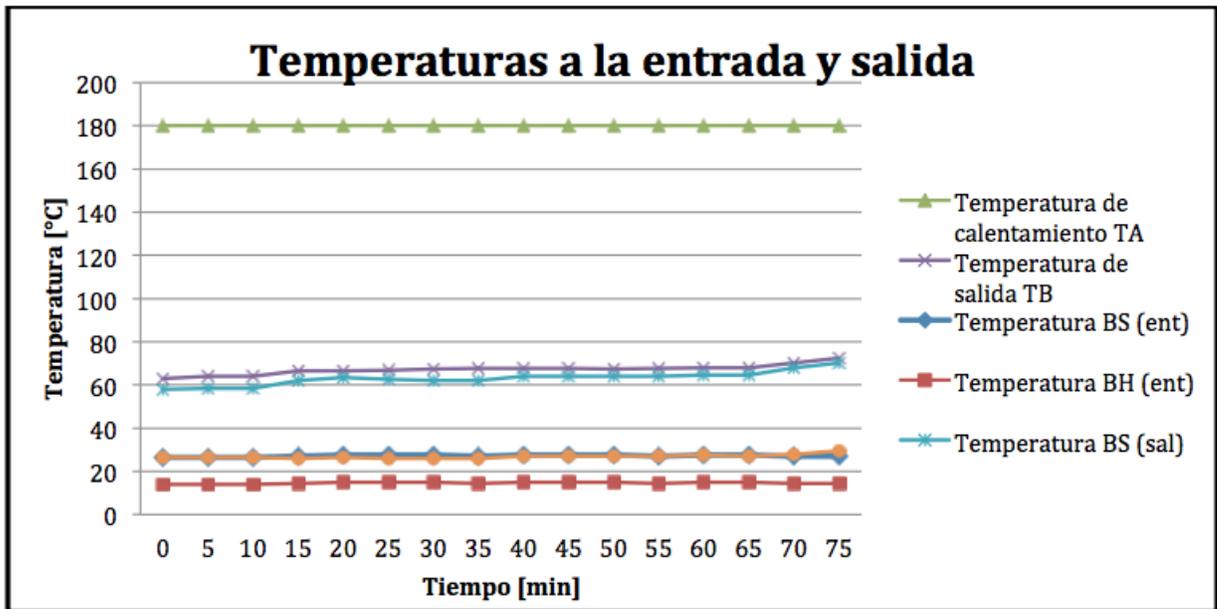


Figura 10.16: Secado a 180 °C

Las curvas para las gráficas se entienden de la siguiente forma. La temperatura de calentamiento TA es constante a lo largo de todo el proceso; se fija al inicio del experimento. La temperatura de salida TB es aquella a la cual salen las partículas secas con el aire de secado. Puede verse que entre estas dos temperaturas hay una disminución bastante considerable ( $TA > TB$ ) debido a que el aire de secado aumentó su humedad y por tanto disminuyó su temperatura. Las temperaturas  $T_{BS}$  y  $T_{BH}$  de entrada con respecto a las temperaturas  $T_{BS}$  y  $T_{BH}$  de salida presentan una diferencia porque el aire de entrada es menos húmedo que el aire de salida, debido a la transferencia de masa y energía que ocurre durante el proceso de secado. El aire húmedo de la entrada ganó más humedad durante el proceso, esto también se ve reflejado en la disminución de la temperatura del TB de salida

del aire pues éste ganó humedad.

Se muestran los potenciales motrices a la entrada y salida del proceso de secado. Así como el potencial medio logarítmico, a 160 °C y 180 °C.

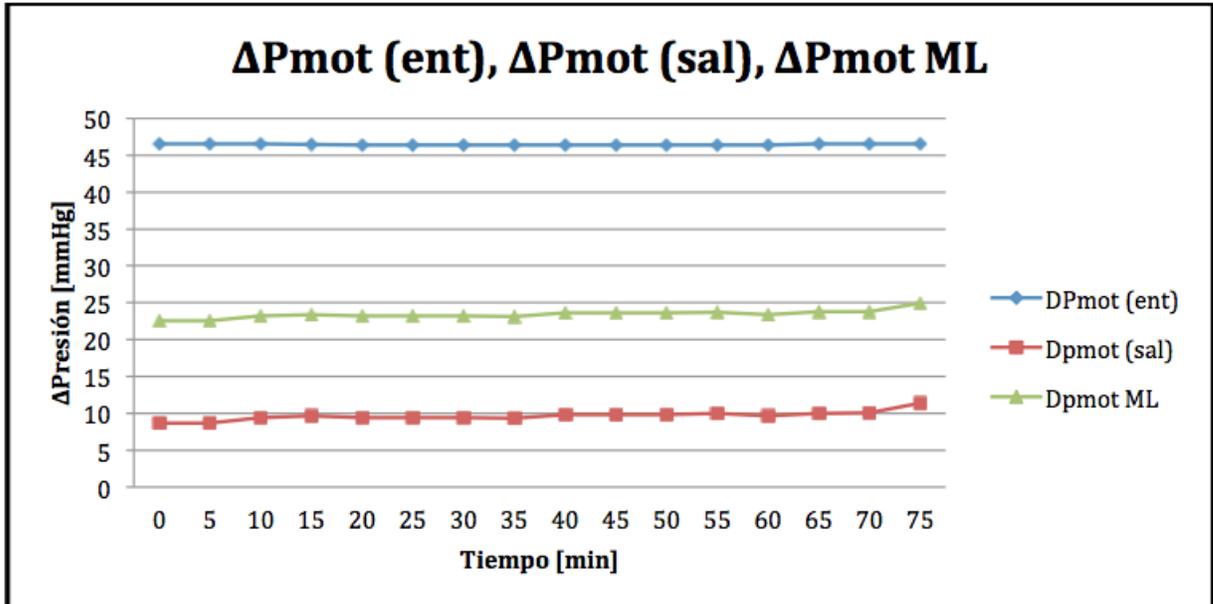


Figura 10.17: Potenciales motrices a 160 °C

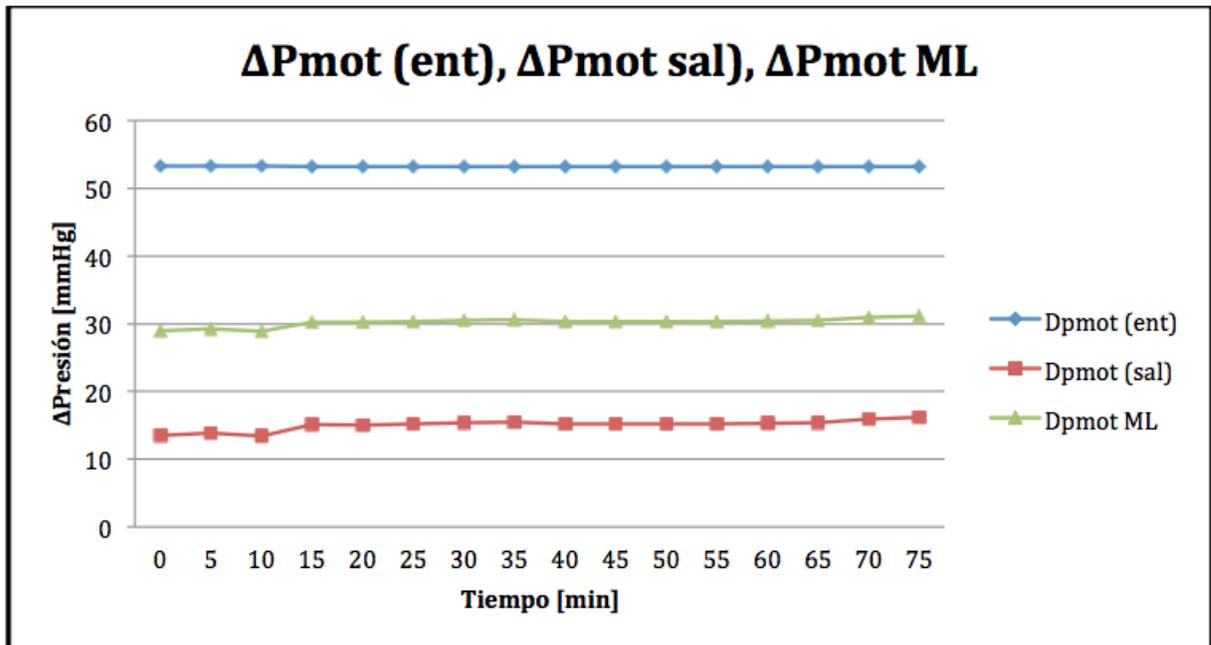


Figura 10.18: Potenciales motrices a 180°C

Los potenciales motrices tanto en el secado a 160°C y el secado a 180°C siguen prácticamente una línea recta, dejando de manifiesto que las presiones se mantienen sin variaciones que afecten el desempeño del secador tanto al inicio del proceso como al final del mismo.

### 10.3. Atomizador o disco centrífugo

Se muestran las gráficas de presión de vapor del agua en el sólido y de presión parcial del agua en el aire a la entrada y a la salida a 160 °C y 180 °C.

