

BALANCE DE MATERIA EN SECADO DE DOBLE ETAPA CON ADICIÓN DE CORRIENTES LATERALES DE FLUIDO

Ricardo Vera Guerra

En este trabajo se presenta un conjunto de ecuaciones para el Balance de materia en un circuito de secado de doble etapa en serie, en el que se adicionan corrientes laterales de material valioso recuperado previamente en el proceso, y que permiten determinar las masas de todas las corrientes de alimentación y descarga teniendo como datos sólo las humedades de dichas corrientes. Estas humedades se obtienen fácil y rápidamente en el laboratorio, y son parte del control cotidiano de proceso.

Con estas ecuaciones se ha preparado una plantilla en Excel que permite obtener de inmediato las masas de todas las corrientes de materiales del circuito de secado. Adicionalmente pueden prepararse gráficas que permiten al supervisor o al operador leer directamente los valores a partir de los parámetros usuales en la práctica operacional de su instalación y poder apreciar las relaciones ante cambios de humedad de cualquiera de las corrientes de esta operación.

Se presenta un ejemplo aplicable a la industria de producción de harina integral de pescado, pero es aplicable a otras industrias en cualquier situación similar.

I. INTRODUCCIÓN

El secado es una operación imprescindible en la industria de obtención de harina de pescado y consume alrededor del 40% de la energía calórica utilizada en el proceso de producción. Este alto consumo de calor se requiere para la evaporación del agua contenida en la torta alimentada al circuito de secado y reducir la humedad final hasta 8 a 10% en peso.

Para este efecto se utiliza el secado en serie en dos etapas, con el fin de reciclar las proteínas solubles que se recuperan de la corriente líquida que se obtiene luego de las operaciones de prensado del pescado cocido y de recuperación de los sólidos insolubles finos por centrifugación. Ver Figura N° 1.

En esta industria se puede utilizar el **secado directo** en ambas etapas (implica fundamentalmente mecanismo de **convección** para transferencia de calor), el **secado indirecto** en ambas etapas (mecanismo de **conducción**) o una **combinación secado directo-indirecto** para presecado y secado, respectivamente. Para el primer tipo son usuales el secador rotatorio de gases de combustión atemperados o el de aire caliente; para el segundo caso los secadores rotatorios de discos y de tubos con uso de vapor de agua para calefacción de las superficies de transferencia de calor.

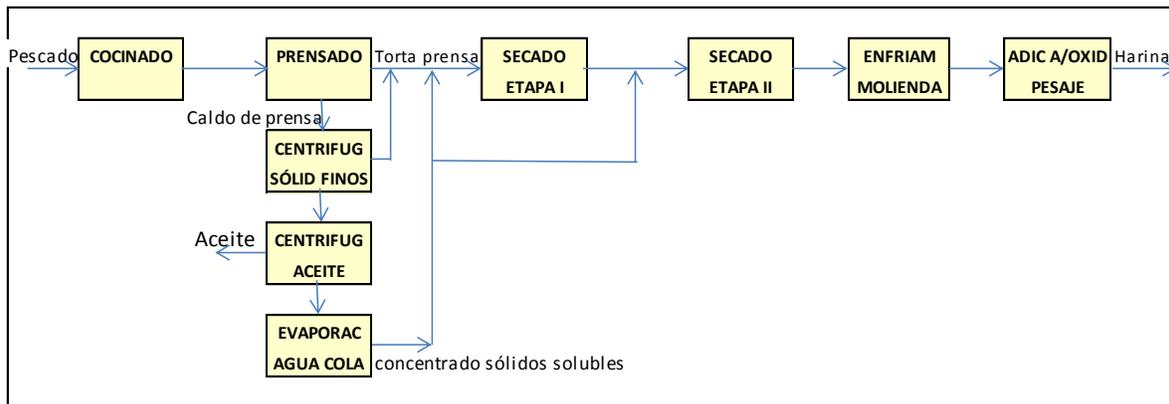


FIG 1 Diagrama de flujo simplificado: Producción de harina-aceite de pescado

La conveniencia de conocer la cantidad de agua evaporada en cada etapa de secado, así como las masas de las correspondientes corrientes de entrada y salida de material a/de cada secador, permite efectuar luego un balance de energía y además disponer de información básica para el ingeniero de operación y de diseño, para contrastar la eficiencia de esta operación. Ver Figura 2.

El balance de materia **basado exclusivamente en las humedades de las corrientes de sólidos húmedos del circuito de secado** genera un conjunto de ecuaciones que permiten determinar la masa de agua evaporada en cada etapa de secado, las masas de las corrientes de materiales de entrada y salida a/de cada secador, y las masas de las corrientes laterales de concentrado de solubles adicionadas en las líneas antes de su ingreso a cada secador.

La utilidad de estas ecuaciones radica en que pueden manejarse fácilmente en una Hoja de Cálculo mediante una plantilla, y obtenerse de inmediato las masas de todas las corrientes de materiales que ingresan y salen a/de cada equipo. Es posible aplicarlas al secado de otros productos. Otra ventaja es que pueden prepararse gráficas que permiten al supervisor o al operador leer directamente los valores **a partir de los parámetros usuales en la práctica operacional de su instalación** y poder apreciar las relaciones ante cambios de humedad de cualquiera de las corrientes de este proceso.

Las humedades requeridas se determinan fácil y rápidamente mediante balanzas de rayos infrarrojos, por ejemplo. Es aconsejable tomar una serie de muestras representativas para el período estable de operación en el que desea efectuar el balance.

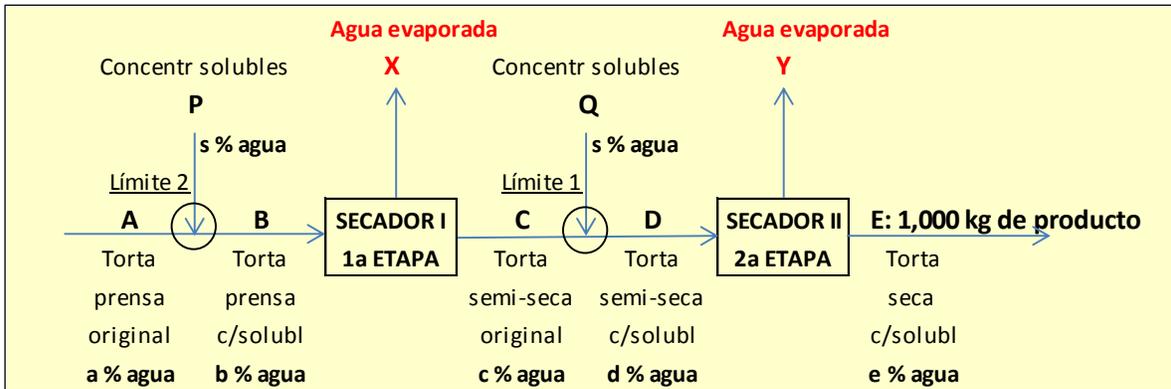


FIGURA 2 Diagrama para balance de materia en secado de doble etapa

II. BALANCE DE MATERIA

Base de cálculo: 1 000 Kg de producto, con humedad de “e” % en “peso” (ver diagrama). El peso de producto obtenido usualmente es controlado continuamente.

Todas las corrientes tienen humedades porcentuales en peso.

1. Balance en el Secador II

Balance de sólidos: Sólidos en D = Sólidos en E

$$D (1 - 0,01*d) = 1\ 000 (1 - 0,01*e)$$

$$D = (1\ 000 - 10*e) / (1 - 0,01*d) \quad [1]$$

Agua evaporada en el secador II:

$$\text{Agua en Y} = D - E$$

$$Y = [(1\ 000 - 10*e) / (1 - 0,01*d)] - 1\ 000$$

$$Y = 10*(d - e) / (1 - 0,01*d) \quad [2]$$

2. Balance en el Límite 1:

Balance total: $C + Q = D = (1\ 000 - 10*e) / (1 - 0,01*d)$

Luego la masa de concentrado Q al Secador II es:

$$Q = [(1\ 000 - 10*e) / (1 - 0,01*d)] - C \quad [3]$$

Balance de agua: Agua en C + agua en Q = agua en D

$$C (0,01*c) + Q (0,01*s) = [(1\ 000 - 10*e) * 0,01*d] / (1 - 0,01*d) \quad [4]$$

Remplazando [3] en [4] y simplificando, la masa de torta descargada del Secador I es:

Balance de materia en secado de doble etapa con adición de corrientes laterales de fluido-R. Vera

$$C = 1\,000 \cdot (s-d) / [(s-c) \cdot (1-0,01 \cdot d)] \quad [5]$$

3. Balance en el Secador I:

Balance de sólidos: $B(1-0,01 \cdot b) = C(1-0,01 \cdot c)$

Remplazando C y simplificando, la masa de torta con solubles alimentada al Secador I es:

$$B = 1\,000 \cdot (s-d) \cdot (1-0,01 \cdot c) / [(s-c) \cdot (1-0,01 \cdot b) \cdot (1-0,01 \cdot d)] \quad [6]$$

Balance total en el Secador I:

Agua evaporada en el Secador I: $X = B - C$

Remplazando [5] y [6] y simplificando, la masa de agua evaporada en el Secador I es:

$$X = \{1\,000 \cdot (s-d) \cdot \left\{ \left[\frac{1-0,01 \cdot c}{1-0,01 \cdot b} \right] - 1 \right\} / (s-c) \cdot (1-0,01 \cdot d) \} \quad [7]$$

4. Balance en el Límite 2:

Balance total: $A + P = B$

Remplazando B, obtendremos la masa de concentrado P a la línea de pre secado:

$$A + P = 1\,000 \cdot (s-d) \cdot (1-0,01 \cdot c) / [(s-c) \cdot (1-0,01 \cdot b) \cdot (1-0,01 \cdot d)] \quad [8]$$

$$P = [1\,000 \cdot (s-d) \cdot (1-0,01 \cdot c)] / [(s-c) \cdot (1-0,01 \cdot b) \cdot (1-0,01 \cdot d)] - A \quad [9]$$

Balance de agua:

Agua en A + Agua en P = Agua en B

$$A \cdot (0,01 \cdot a) + P \cdot (0,01 \cdot s) = B \cdot (0,01 \cdot b) \quad [10]$$

Remplazando [6] y [9] en [10] y simplificando, la masa de torta de prensa original es:

$$A = 1\,000 \cdot (s-b) \cdot (s-d) \cdot (1-0,01 \cdot c) / [(s-a) \cdot (s-c) \cdot (1-0,01 \cdot b) \cdot (1-0,01 \cdot d)] \quad [11]$$

III. PLANTILLA PARA CÁLCULOS DEL BALANCE DE MATERIA

La Figura 3 muestra la Plantilla Excel que permite efectuar el Balance de Materia y obtener de inmediato los valores de todas las corrientes del circuito de secado mostrado en la Figura 2 una vez efectuado el ingreso numérico en la columna D de las humedades indicadas en la columna C.

El peso de torta seca final descargada es 1,000 kilogramos (base de cálculo). Las humedades de las corrientes se pueden variar a discreción, dentro de límites lógicos. Por ejemplo es incompatible con la realidad asumir una humedad de torta de prensa de 60%, con una humedad del concentrado de solubles de 40% (o sea con 60% de sólidos solubles).

Balance de materia en secado de doble etapa con adición de corrientes laterales de fluido-R. Vera

En la industria de obtención de harina integral de pescado es recomendable compartir la carga evaporativa (masa de agua a evaporar) entre las dos etapas de secado. Es práctica usual la variación de humedad de las tortas en los siguientes rangos:

	<u>Secador etapa I</u>	<u>Secador etapa II</u>
Humedad de entrada, % peso	54 a 60	35 a 45
Humedad de salida, % peso	20 a 30	8 a 10

La plantilla también comprueba la corrección de los cálculos. Para verificar la corrección de todas las corrientes de materiales obtenidas con la plantilla también se han efectuado balances parciales en cada secador y en los Límites 1 y 2. Esto último no se muestra en esta plantilla.

En la Plantilla deben ingresarse los datos de humedad como valor porcentual (celdas C6 a C12). Automáticamente se generan los flujos en las celdas de la columna E una vez que se hayan ingresado en las celdas sus correspondientes fórmulas (indicadas en las celdas de la columna G). Se deja al usuario el desarrollo de las sencillas fórmulas de las celdas E15 a E30, basadas en balances de materia referidas en la Figura 2.

Si desea disponer de la Plantilla Excel puede solicitarla sin costo al correo electrónico del autor.

A	B	C	D	E	F	G
CORR	MATERIAL	HUMEDAD	FLUJO MATERIAL			
		%	KG/H	%		
A	Torta prensa original	a	42	464.65		=1000*(D11-DE9)*(1-0.01*D8)*(0.01*D11-0.01*D7)/((D11-D8)*(1-0.01*D7)*(1-0.01*D9)*(0.01*D11-0.01*D6))
B	Torta prensa original con solubles	b	52	1,045.45		=(1000*(D11-D9)*(1-0.01*D8))/((1-0.01*D9)*(D11-D8)*(1-0.01*D7))
C	Torta semi-seca original	c	20	627.27		=(1000*(D11-D9))/((1-0.01*D9)*(D11-D8))
D	Torta semi-seca con solubles	d	45	1,672.73		=(1000-10*D10)/(1-0.01*D9)
E	Torta seca final con solubles descarg	e	8	1,000.00		
P	Concentr de solubles a Secad I	s	60	580.81		=E7-E6
Q	Concentr de solubles a Secad II	s	60	1,045.45		=E9-E8
X	Agua evaporada en Secador I			418.18		=(1000*(D11-D9)*(((1-0.01*D8)/(1-0.01*D7))-1))/((D12-D8)*(1-0.01*D9))
Y	Agua evaporada en Secador II			672.73		=(10*(D9-D10))/(1-0.01*D9)
	Agua evaporada Total sec I + II			1090.91		
	Agua evaporada en Secador I, %				38.3%	
	Agua evaporada en Secador II, %				61.7%	
	Concentrado de solubles Total			1626.26		
	Concentr de solubles a Secad I				35.7%	
	Concentr de solubles a Secad II				64.3%	
	Sólid grasos en torta de prensa			269.49		
	Sólid grasos en concent solubl			650.51		
	Sólid grasos tot a sistema secado			920.00		
	Sólid grasos en torta seca c solubl			920.00		
	COMPROBACIÓN:		¡CORRECTO!			=SI(E6+E11+E12)=(E10+E13+E14),"¡CORRECTO!";"¡ERROR!"
	BALANCE TOTAL					
	ENTRADAS AL SISTEMA:			2,090.91		
	SALIDAS DEL SISTEMA:			2,090.91		

FIG 3 Plantilla Excel para efectuar el Balance de materia en secado de doble etapa

Balance de materia en secado de doble etapa con adición de corrientes laterales de fluido-R. Vera

IV. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En una instalación de obtención de harina de pescado, cuyo diagrama de flujo de proceso se muestra en la Figura 2, se obtienen durante una producción estable de 12 horas los siguientes valores promedio para las humedades de las corrientes de proceso, las que se muestrearon cada 20 minutos:

CORRIENTE	MATERIAL	HUMEDAD PROMEDIO	
			%
A	Torta prensa original con sólido separad	a	45
B	Torta prensa orig con solubles-Ingr sec I	b	53
C	Torta semi-seca original-Desc sec I	c	27
D	Torta semi-seca con solubles-Ingr sec II	d	38
E	Torta seca final con solubles-Desc sec II	e	8.5
P	Concentrado de solubles a Secad I	s	63
Q	Concentrado de solubles a Secad II	s	63

La producción horaria promedio de la planta es de 10 TM.

Para el turno de producción se desea conocer la cantidad de torta de prensa inicial (con sólidos finos recuperados) que ingresa al sistema, la cantidad de concentrado de solubles adicionado a las estaciones de presecado y secado, la cantidad de agua evaporada en los secadores I y II, y la cantidad total de harina obtenida.

Solución:

Para determinar los flujos de las corrientes del sistema de secado ingresamos en la Plantilla (columna D) los correspondientes valores de humedad promedio. Inmediatamente se generan los valores **para 1,000 Kg de producto** que se muestran en la columna E de la siguiente tabla:

CORRIENTE	MATERIAL	HUMEDAD		FLUJO MATL	
			%	KG/H	%
A	Torta prensa original con sólido separad	a	45	884.34	
B	Torta prensa orig con solubles-Ingr sec I	b	53	1,591.81	
C	Torta semi-seca original-Desc sec I	c	27	1,024.87	
D	Torta semi-seca con solubles-Ingr sec II	d	38	1,475.81	
E	Torta seca final con solubles-Desc sec II	e	8.5	1,000.00	
P	Concentrado de solubles a Secad I	s	63	707.47	
Q	Concentrado de solubles a Secad II	s	63	450.94	
X	Agua evaporada en Secador I			566.95	
Y	Agua evaporada en Secador II			475.81	
	Agua evaporada Total			1042.75	
	Agua evaporada en Secador I, %				54.4%
	Agua evaporada en Secador II, %				45.6%
	Concentrado de solubles Total			1158.41	
	Concentrado de solubles a Secad I				61.1%
	Concentrado de solubles a Secad II				38.9%

Se producen 120,000 kilogramos de harina obtenida en el turno de 12 horas (10 TM/h * 12 h). Luego los valores para el turno serán los siguientes:

CORRIENTE	MATERIAL	FLUJO MATERIAL		FLUJO MATERIAL
		POR 1000 KG PROD.		TURNO 12 HORAS
		Kg/1000 Kg Prod.	%	T.M.
A	Torta prensa original con sólido separad	884.3		106.1
B	Torta prensa orig con solubles-Ingr sec I	1591.8		191.0
C	Torta semi-seca original-Desc sec I	1024.9		123.0
D	Torta semi-seca con solubles-Ingr sec II	1475.8		177.1
E	Torta seca final con solubles-Desc sec II	1000.0		120.0
P	Concentrado de solubles a Secad I	707.5	61.1	84.9
Q	Concentrado de solubles a Secad II	450.9	38.9	54.1
	Concentrado de solubles Total	1158.4		139.0
X	Agua evaporada en Secador I	566.9	54.4%	68.0
Y	Agua evaporada en Secador II	475.8	45.6%	57.1
	Agua evaporada Total	1042.8		125.1

Como se aprecia, el 61.1% del concentrado se adiciona a la corriente que ingresa al Secador I, y el 38.9% a la corriente que ingresa al Secador II. El 54.4% del agua se evapora en el Secador I y el saldo de 45.6% en el Secador II.

V. GRÁFICAS PARA EL BALANCE DE MATERIA

Para cada situación particular puede ser de utilidad práctica, por ejemplo, disponer de gráficas que muestren las relaciones entre las humedades de las corrientes de materiales en el circuito de secado y la cantidad de agua evaporada en cada etapa de secado. Esto facilita la tarea del operador y supervisor de esta operación de la planta.

Veamos el caso de la **masa de agua evaporada en el Secador I**. Con ayuda de la Plantilla Excel se generan y luego se agrupan los valores de agua evaporada en el Secador I para distintos parámetros de humedad en las corrientes de materiales. Las Figuras 4 y 5, por ejemplo, muestran los mismos parámetros de humedad para las distintas corrientes de materiales del circuito de secado con la excepción de la humedad del producto final descargado del Secador II: 8% y 10%, respectivamente. Con los valores calculados para el agua evaporada en el Secador I se construyen las curvas mostradas en las Figuras 6 y 7.

La **masa de agua evaporada en el Secador II** depende solamente de las humedades determinadas para la torta de ingreso a este equipo y del producto final obtenido (recordemos la Base de cálculo de 1,000 kilogramos de producto).

	(Humedad de salida del secador II: 8%)			
	Humedad de torta prensa original: 42%			
D	(Humedad de entrada a secador I: 56%)			
Hum. Ingra	(Concentrado de solubles: Sól. Grasos 36% - Humedad 64%)			
secad II	Hum. Descarg de secador I			
↓	35	30	25	20
	Agua evaporada en secador I:			
38	634.9	670.5	697.0	717.4
39	620.5	655.3	681.1	701.1
40	605.6	639.6	664.8	684.3
41	590.2	623.3	647.9	666.9
42	574.3	606.5	630.4	648.9
43	557.8	589.1	612.3	630.3
44	540.8	571.0	593.6	611.0
45	523.1	552.4	574.1	591.0
	(Humedad de entrada a secador I: 54%)			
	(Concentrado de solubles: Sól. Grasos 36% - Humedad 64%)			
	Hum. Descarg de secador I			
	35	30	25	20
	Agua evaporada en secador I:			
38	549.5	592.0	623.7	648.1
39	537.0	578.6	609.5	633.4
40	524.1	564.7	594.9	618.2
41	510.8	550.3	579.7	602.5
42	497.0	535.5	564.1	586.2
43	482.8	520.1	547.9	569.4
44	468.0	504.2	531.1	551.9
45	452.7	487.7	513.8	533.9
	(Humedad de entrada a secador I: 52%)			
	(Concentrado de solubles: Sól. Grasos 36% - Humedad 64%)			
	Hum. Descarg de secador I			
	35	30	25	20
	Agua evaporada en secador I:			
36				
37				
38	471.2	520.1	556.5	584.6
39	460.5	508.3	543.8	571.3
40	449.4	496.1	530.8	557.6
41	438.0	483.5	517.3	543.4
42	426.2	470.4	503.3	528.7
43	413.9	456.9	488.9	513.6
44	401.3	442.9	473.9	497.8
45	388.1	428.4	458.4	481.5

FIG 4 Datos obtenidos con la Plantilla Excel que permiten construir la Figura 6

	(Humedad de salida del secador II: 10%)			
	Humedad de torta prensa original: 42%			
D	(Humedad de entrada a secador I: 56%)			
Hum. Ingr a	(Concentrado de solubles: Sól. Grasos 36% - Humed 64%)			
secad II	Hum. Descarg de secador I			
↓	35	30	25	20
	Agua evaporada en secador I:			
38	621.1	655.9	681.8	701.8
39	607.0	641.1	666.3	685.9
40	592.5	625.7	650.3	669.4
41	577.4	609.8	633.8	652.4
42	561.8	593.3	616.7	634.8
43	545.7	576.3	599.0	616.6
44	529.0	558.6	580.7	597.7
45	511.7	540.4	561.7	578.1
	(Humedad de entrada a secador I: 54%)			
	(Concentrado de solubles: Sól. Grasos 36% - Humed 64%)			
	Hum. Descarg de secador I			
	35	30	25	20
	Agua evaporada en secador I:			
38	537.6	579.2	610.1	634.0
39	525.4	566.0	596.2	619.6
40	512.7	552.4	581.9	604.7
41	499.7	538.4	567.1	589.4
42	486.2	523.9	551.8	573.5
43	472.3	508.8	536.0	557.0
44	457.8	493.2	519.6	539.9
45	442.8	477.1	502.6	522.3
	(Humedad de entrada a secador I: 52%)			
	(Concentrado de solubles: Sól. Grasos 36% - Humed 64%)			
	Hum. Descarg de secador I			
	35	30	25	20
	Agua evaporada en secador I:			
37	471.1	520.0	556.3	584.4
38	460.9	508.8	544.4	571.8
39	450.5	497.2	532.0	558.9
40	439.7	485.3	519.2	545.5
41	428.5	473.0	506.0	531.6
42	416.9	460.2	492.4	517.2
43	404.9	447.0	478.2	502.4
44	392.5	433.3	463.6	487.0
45	379.7	419.1	448.4	471.1

FIG 5 Datos obtenidos con la Plantilla Excel que permiten construir la Figura 7

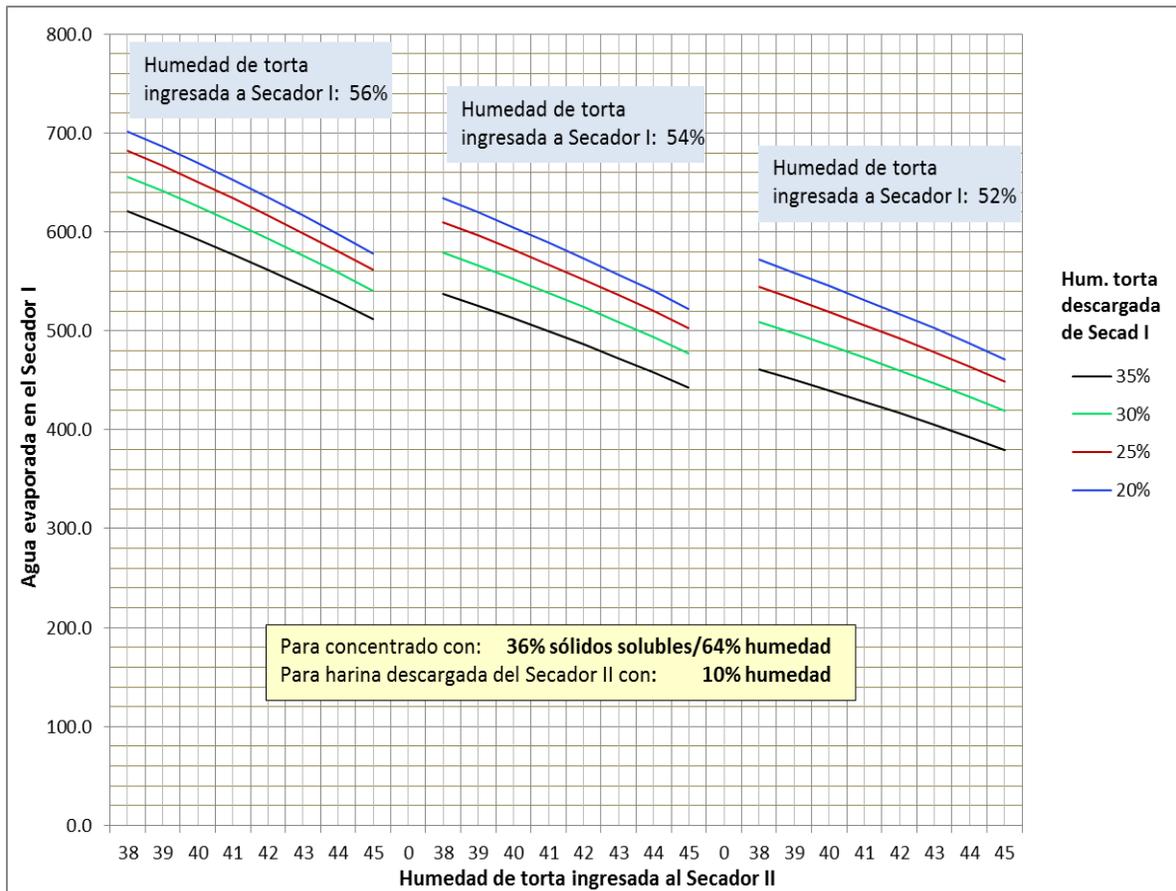


FIG 5 Gráfica para obtener la cantidad de agua evaporada en el Secador I en función de la humedad de torta ingresada al Secador II, para tres niveles de humedad de torta ingresada al Secador I. Base: 1,000 Kg de producto obtenido en el Secador II.

Parámetros fijados: - Concentrado con 36 % sólidos solubles
- Harina descargada del Secador II con 10 % de humedad

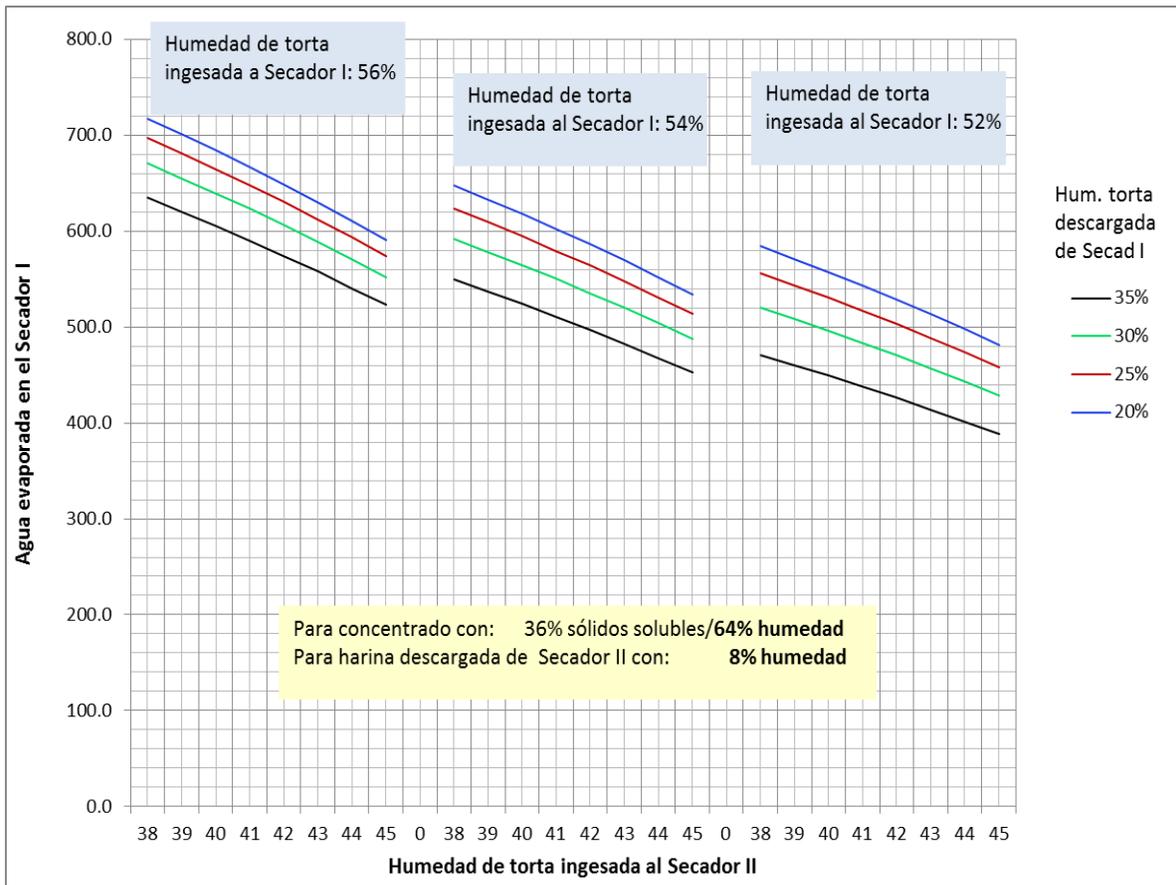


FIG 6 Gráfica para obtener la cantidad de agua evaporada en el Secador I en función de la humedad de torta ingresada al Secador II, para tres niveles de humedad de torta ingresada al Secador I. Base: 1,000 Kg de producto obtenido en el Secador II.

Parámetros fijados: - Concentrado con 36 % de sólidos solubles
 - Harina descargada del Secador II con 8 % de humedad

Hum ingres a secad II	Hum descar de secad II	Agua evap en secad II
%	%	Kg
37	7	476.2
38	7	500.0
39	7	524.6
40	7	550.0
41	7	576.3
42	7	603.4
43	7	631.6
44	7	660.7
45	7	690.9
37	8	460.3
38	8	483.9
39	8	508.2
40	8	533.3
41	8	559.3
42	8	586.2
43	8	614.0
44	8	642.9
45	8	672.7
37	9	444.4
38	9	467.7
39	9	491.8
40	9	516.7
41	9	542.4
42	9	569.0
43	9	596.5
44	9	625.0
45	9	654.5
37	10	428.6
38	10	451.6
39	10	475.4
40	10	500.0
41	10	525.4
42	10	551.7
43	10	578.9
44	10	607.1
45	10	636.4

FIG 7 Datos obtenidos con la plantilla Excel que permiten construir la figura 8.

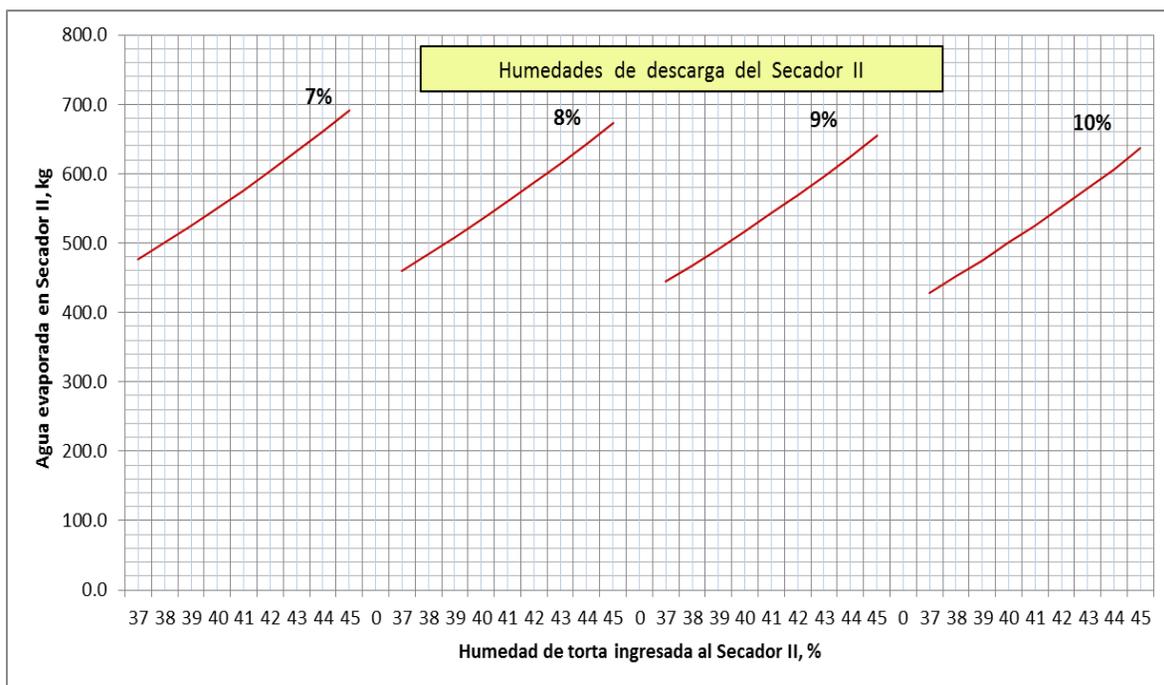


FIG 8 Gráfica para obtener la cantidad de agua evaporada en el Secador II en función de la humedad de torta ingresada al secador, para tres niveles de humedad de la torta descargada. Base: 1,000 Kg de producto obtenido en el Secador II.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Hougen, O. A., Watson, K. M., Ragatz, R. A. Principios de los Procesos Químicos. Vol. 1 Balances de Materia y Energía. Barcelona. Editorial Reverté, S. A. 1972.

McCabe W. L., Smith J. C., Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering. New York. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1985.

Williams, Edwin T., Johnson, R. Curtis. Stoichiometry for Chemical Engineers. Tokyo. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1958.

AUTOR: Ricardo Vera Guerra.
Ingeniero Químico. Magíster en Administración de Negocios.
rverag@hotmail.com

Marzo 2013.