



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

MODELAMIENTO EN PARÁMETROS DISTRIBUIDOS Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DESCONOCIDOS POR OPTIMIZACIÓN DINÁMICA DE UN SECADOR ROTA-TUBO DE HARINA DE PESCADO

Héctor Sandoval-Juárez

Piura, junio de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con Mención en Automática y
Optimización

Sandoval, H. (2017). *Modelamiento en parámetros distribuidos y estimación de parámetros desconocidos por optimización dinámica de un secador rota-tubo de harina de pescado* (Tesis de Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con Mención en Automática y Optimización). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERIA



MODELAMIENTO EN PARÁMETROS DISTRIBUIDOS Y ESTIMACIÓN DE
PARÁMETROS DESCONOCIDOS POR OPTIMIZACIÓN DINÁMICA DE UN
SECADOR ROTA-TUBO DE HARINA DE PESCADO

Tesis para optar el Grado de Máster en Ingeniería de Mecánico Eléctrica
con mención en Automática y Optimización

Héctor Miguel Sandoval Juárez

Asesor:

Dr. Ing. William Ipanaqué Alama

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a quienes me inspiran cada día a ser mejor, mis padres Miguel Sandoval y Teresa Juarez, y a los que siempre voy admirar por su servicio a Dios, mis hermanos Daniel Sandoval y Julissa Sandoval.

Prólogo

El secador rotatubo, es una máquina rotatoria relativamente sencilla, pero de gran importancia en la industria de la harina de pescado, pues ayuda a que la harina no sea sometida a altas temperaturas ni esté en contacto directo con el fluido calefactor, esto es favorable debido a que se crean las condiciones necesarias para que se formen las proteínas a partir de los aminoácidos y no se quemem formando impurezas y disminuyendo así la calidad del producto.

Aunque sea en una máquina sencilla lo que ocurre dentro del secador es complejo, no solo abarca la transferencia de masa y transferencia de calor pues la harina va cambiando sus propiedades físico-químicas a lo largo del secado, y estas partículas se encuentran rotando continuamente por lo cual también intervienen parámetros cinéticos que contribuyen al secado.

Tener un modelo que nos ayude a conocer indirectamente lo que ocurre dentro del secador es de gran importancia, debido a que se tiene problemas con la capacidad de adquisición de datos para saber las condiciones a las que es sometida la harina a lo largo del proceso y predecir la humedad y temperatura que saldrá del secador, controlando la presión del calefactor y el dámper en la salida del vaho.

Por lo mencionado será necesario trabajar con un modelo en parámetros distribuidos del secador, el cual nos ayuda a obtener el perfil de los parámetros necesarios, no solo en el tiempo, sino también a lo largo de todo el secador.

Esto conlleva aplicar un método de integración que pueda replicar con facilidad los fenómenos que ocurren y puedan involucrar los valores de condiciones de contorno. La colocación ortogonal es una técnica simple y eficiente, que formula soluciones aún en cuanto sean modelos no lineales, como es el caso.

Los datos históricos administrados por la planta nos ayudan a validar el modelo y a optimizar el valor de algunos parámetros que se desconocen, al no encontrar estudios respecto a estos o al ser difíciles de hallar de forma experimental pues no se puede replicar lo que ocurre dentro del secador.

Todo esto ha sido un trabajo arduo que se ha logrado gracias a la colaboración de la Universidad de Piura con la Empresa Diamante, la cual me ha provisto de la información necesaria de su secador rotatubo para su modelamiento, y al departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Valladolid – España, donde tuve una estancia de dos meses gracias al apoyo de la Universidad de Piura, la cual me brindó las herramientas necesarias para la simulación en PROOSIS.

Además agradezco al CONCYTEC por haberme dado la oportunidad de poder estudiar la Maestría en Ingeniería Eléctrica, al haberme becado por los dos años que han durado los estudios.

Resumen

En la presente tesis se ha desarrollado un modelo matemático en parámetros distribuidos a partir de formulación de los fenómenos físico-químicos que ocurren en el secador rotatubo de harina de pescado, el modelo es capaz de predecir el comportamiento de los principales parámetros en el tiempo y a lo largo del secador, lo que suprime la incapacidad de adquisición de data en el interior del secador. La tesis está enfocada en los estudios de termodinámica, transferencia de calor, transferencia de masa y cinemática de secado, para su modelamiento. Para la simulación del sistema dinámico no lineal que es formulado por ecuaciones diferenciales parciales, se ha utilizado el método de colocación ortogonal que disminuye la carga computacional para su simulación. Finalmente se hace un ajuste de parámetros desconocidos validando el modelo utilizando optimización dinámica. Todo esto se hizo con el entorno del lenguaje de simulación de PROOSIS.

Índice General

Dedicatoria.....	iii
Prólogo.....	v
Resumen	vii
Índice General.....	ix
Nomenclatura.....	xiii
Introducción.....	17
Capítulo 1 Harina de Pescado.....	19
1.1 Historia de la industria de la harina de pescado.....	20
1.2 La industria de harina de pescado en el Perú.....	21
1.3 Importancia de la harina de pescado.....	25
1.4 Materia prima.....	26
1.5 Composición de la harina de pescado.....	27
1.6 Calidad físico-química de la harina de pescado.....	28
Capítulo 2 Funcionamiento del Secador de Harina de Pescado	31
2.1 Proceso de Producción de Harina de Pescado	32
2.1.1 Obtención de la materia prima.....	33
2.1.2 Recepción.....	33
2.1.3 Almacenamiento	34
2.1.4 Cocinado	35
2.1.5 Prensado	35
2.1.6 Proceso del Licor de prensa	36
2.1.7 Secadores	39
2.1.8 Molino.....	40
2.1.9 Enfriamiento.....	41
2.1.10 Envasado	41
2.1.11 Análisis Físicos, Químicos y Microbiológicos	41
2.1.12 Almacenaje.....	41
2.2 Tipos de Secadores Rotativos de Harina de Pescado.....	42
2.2.1 Secadores Indirectos	42
2.2.2 Secadores Directos.....	45
2.3 Secador rotatubo de harina de pescado.....	46

2.3.1	Componentes	47
2.3.2	Ventajas del secador rotatubo	50
2.4	Malas prácticas en el proceso de secado.....	50
2.4.1	Someter a altas temperaturas la harina de pescado.....	50
2.4.2	Mezclar harinas de diferentes calidades	51
2.4.3	Reprocesar la harina.....	51
2.4.4	Control On, Off.....	51
Capítulo 3 Principios y fundamentos del Secado		53
3.1	Condiciones Externas	53
3.1.1	Entalpía	54
3.1.2	Calores específicos	54
3.1.3	Equilibrio térmico en cambio de fase	54
3.1.4	Mezclas de vapor y gas	55
3.1.5	Mezclas de vapor y gas insaturados.....	57
3.2	Condiciones Internas	58
3.2.1	Humedad contenida en los sólidos.....	58
3.2.2	Isotermas de humedad	59
3.2.3	Histéresis.....	59
3.2.4	Entalpía del sólido húmedo.....	60
3.3	Transferencia de Calor.....	60
3.3.1	Conductividad.....	61
3.3.2	Convección	61
3.3.3	Radiación	62
3.4	Rapidez de secado.....	63
3.4.1	Curva de rapidez de secado	63
3.4.2	Características de la Curva de Rapidez de Secado	66
3.4.3	Difusividad efectiva de secado	69
Capítulo 4 Modelamiento		73
4.1	Descripción del proceso.....	73
4.2	Formulación del Modelo	74
4.2.1	Consideraciones Generales	75
4.2.2	Volúmenes de Control	75
4.3	Balance de Masa y Energía.....	75

4.3.1	Balance de Masa y Energía de la Harina VC1	77
4.3.2	Balance de Masa y Energía del Vaho VC2	80
4.3.3	Balance de Masa y Energía de los Tubos y Chaqueta VC3	82
4.4	Coefficientes de transferencia de calor y masa.....	85
4.4.1	Coefficiente de transferencia de calor.....	86
4.4.2	Coefficiente de transferencia de masa.....	90
4.5	Coefficiente de Fricción de los fluidos saturados.....	91
4.6	Caudal y Velocidad del vaho.....	92
4.6.1	Caudal de Salida del Vaho.....	92
4.6.2	Velocidad Promedio del Vaho.....	93
4.7	Áreas de transferencia de calor.....	93
4.7.1	Superficie de la harina.....	93
4.7.2	Superficie de la chaqueta y tubos.....	94
4.8	Sección transversal.....	96
Capítulo 5 Simulación, Optimización y Validación del Modelo Matemático del Secador.....		97
5.1	Ecuaciones diferenciales parciales.....	98
5.1.1	Identificación de las ecuaciones.....	98
5.1.2	Condiciones de contorno e iniciales.....	100
5.2	Discretización del modelo matemático.....	101
5.2.1	Colocación ortogonal.....	101
5.2.2	Solución numérica del secador.....	104
5.3	Simulación del modelo matemático.....	109
5.4	Estimación de parámetros desconocidos.....	115
5.4.1	Optimización Dinámica.....	115
5.4.2	Resolución por Optimización.....	116
5.4.3	Simulación de la estimación de parámetros desconocidos.....	117
5.5	Validación del modelo final.....	119
Conclusiones.....		121
Bibliografía.....		123
Anexos.....		127
Anexo A Balance de Masa y Energía.....		127
Anexo B Cálculos.....		129
Cálculo de velocidad promedio del vaho.....		129

Cálculos para la zona de secado continuo	130
Depresión por la fricción en la chaqueta y tubos	130
Anexo C Dimensiones del sistema para el cálculo de los coeficientes	133
Anexo D Datos de la planta de harina de pescado	135
Anexo E Propiedades	139
Anexo F Modelos De Las Propiedades Térmicas	141
Conductividad térmica.....	141
Calor Específico	141
Densidad	141
Propiedades del Agua	142
Propiedades de Aire.....	142
Calor específico del vaho y la harina	142
Densidad del vaho y harina	142
Anexo G Código de programación en PROOSIS.....	143
Modelamiento por Colocación Ortogonal	143
Estimación de parámetros desconocidos por Optimización dinámica	154

Nomenclatura

a	Área superficial por unidad de longitud	m^2/m
a_v	Área superficial de los sólidos por volumen del secador.	m^2/m^3
A	Área de transferencia de calor	m^2
C_D	Coefficiente de resistencia.	[]
c	Calor específico	$kJ/kg K$
D	Diámetro interno	m
d_p	Diámetro de la partícula	mm
D_{eff}	Difusividad efectiva	m^2/s
D_0	Constante de difusión o Factor de Arrhenius	m^2/s
E_a	Energía de activación	kJ/mol
F	factor de fricción en flujos desplazados	kg/s
f	Fracción de peso	[]
f	Velocidad de secado característica	[]
fr	Fracción volumétrica de la harina en el secador	[]
g	Aceleración gravitacional	m/s^2
h	Entalpia especifica por unidad de masa	kJ/kg
h_{Av}	Entalpia del vapor emitido por los sólidos	kJ/kg
Δh_v	Calor latente de vaporización	kJ/kg
Δh_s	Calor latente de sorción	kJ/kg
Δh_M	Entalpia residual de la mezcla y otros efectos	kJ/kg
i	Entalpia especifica por unidad de base seca	kJ/kg
j	Coefficiente de transferencia de calor	$kW/m^2 K$
k	Conductividad térmica	$kW/m K$
k_Y	Coefficiente de transferencia de masa a la fase gaseosa	$kg/m^2 s$
L	Longitud total del secador	m
L_c	Longitud característica	m
M	Masa molar	$kg/kmol$
m	Masa	kg
m	Fracción de masa	kg/kg
N_R	Constante universal de los gases ideales	$kJ/K mol$
N_t	Número de Tubos	[]
Nu	Número de Nusselt	[]
P	Presión total	atm
p	Presión parcial	atm
p_{ex}	Presión absoluta del extractor	atm
Pr	Número de Prantl	[]
P_{sat}	Presión de vapor saturado en la chaqueta y tubos	atm
\dot{q}	Flujo de calor por unidad de área	kW/m^2
\dot{Q}	Flujo de calor	kW
Re	Número de Reynolds	[]
R	Radio de la esfera	m
R	Resistencia térmica	$m K/kW$
rf	Flecha del arco que cubre la harina	m
Sc	Número de Schmidt	[]
S	Área de la sección transversal normal al flujo del secador	m^2
t	tiempo	s
T	Temperatura	K

u	Velocidad de la masa en la superficie	m/s
v	Velocidad	m/s
v_t	Velocidad de la particular	m/s
V	Volumen	m^3
V_H	Volumen húmedo	m^3/kg
\dot{V}	Flujo de volumen	m^3/s
W	Humedad por unidad de base húmeda	kg/kg
W	Flujo de masa	kg/s
w_D	Flujo de masa o velocidad de secado por unidad de área	kg/m^2s
w_{DI}	Flujo de masa cuando la partícula está saturada o rapidez inicial de secado por unidad de área	kg/m^2s
X	Humedad por unidad de base seca	kg/kg
\bar{X}	Humedad promedio contenida en los solidos	kg/kg
Y	Humedad absoluta por unidad de base seca	kg/kg
z	Longitud local del secador	m
Z	Fracción de flujo de la masa del gas	kg/kg

Símbolos Griegos

α	Difusividad térmica	m^2/s
β	Expansión volumétrica	$1/K$
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
ε	Porosidad	
ϵ	Aspereza	
ζ	Factor de fricción	
Φ	Contenido de humedad característica.	[]
ρ	densidad	kg/m^3
μ	Viscosidad dinámica	$kg/m s$
τ	Fracción homogénea de volúmenes vacíos	
ω	Velocidad angular	rad/s

Subíndices

A	Humedad o agua
B	Gas seco
c	Contacto
C	Crítica
cr	Contenido crítico
D	Punto de rocío
g	Gas húmedo
G	aire
H	Harina
j	Chaqueta
l	Fase líquida
m	Sólido húmedo
p	Presión constante
p	Paletas
s	Superficie

<i>S</i>	Sólido seco
<i>t</i>	Tubos
<i>V</i>	Vahos
<i>v</i>	Fase gaseosa o vapor o vaho
<i>w</i>	Humedad del sólido
<i>W</i>	Vapor de agua
<i>VC</i>	Volumen de Control
<i>wc</i>	De vapor en el núcleo
<i>ju</i>	Chaqueta-vaho
<i>tu</i>	Tubo-vaho
<i>vu</i>	Vaho-sólido
<i>in</i>	Entrada
<i>out</i>	Salida
<i>int</i>	Interior
<i>ext</i>	Exterior
<i>prom</i>	Promedio
<i>min</i>	mínimo
<i>max</i>	máximo
<i>Vsat</i>	Vapor Saturado
0	0 °C (273.14 K)
∞	Lejos de una superficie

Sobreíndice

*	En equilibrio
0	Saturación

Valor de Constantes

N_R	8.314472×10^{-3}	kJ/K mol
σ	5.67×10^{-8}	$\text{W/m}^2 \text{K}^4$

Introducción

La harina de pescado es una de las principales fuentes de proteínas, es usado como suplemento alimenticio de una gran variedad de animales (conejos, perros, peces, cerdos y aves).[1]La materia prima de la producción de harina de pescado y aceite en el Perú es la anchoveta, [2] su valor unitario ha ido aumentando cada año debido a su demanda y mejoras de procesos, que da un producto de mejor calidad.

Las plantas procesadoras de harina de pescado no cuentan con un sistema de monitoreo en línea, esto hace que cometan una gran variedad de malas prácticas que hacen que se pierda harina en gran cantidad, se obtenga un mayor porcentaje de ceniza y se gaste más energía de lo necesario, lo que muestra una ineficiencia. Los secadores son el último proceso que se le da a la harina antes de su comercialización; sus pequeñas diferencias entre sus calidades (%proteínas, %cenizas, TVB, Digestibilidad) muestran que si se tuviera un mejor control de su temperatura durante el proceso de secado y humedad final, [3] se tendría estabilidad química y microbiológica en la harina de pescado evitando reacciones (oxidación de lípidos, actividad bacteriana, el crecimiento microbiano, enzimática o enranciamiento) que la deterioran durante su almacenamiento.

Todo esto conlleva a tener la necesidad de obtener un modelo matemático del secador, a partir de los fenómenos físico-químicos que ocurren en interior, debido a que no se puede hacer una identificación experimental por su alto costo y pérdida del producto. [4]La formulación en parámetro distribuido representado en ecuaciones diferenciales parciales (EDP) nos da a conocer la dinámica de los diferentes parámetros en el tiempo y a lo largo del secador.

La formulación del modelo no lineal se enfoca en los estudios de termodinámica, transferencia de calor, transferencia de masa y cinemática de secado, teniendo en consideración la difusividad de las partículas de harina de pescado húmedas con el aire húmedo que se genera del secado de la misma.

[5]La colocación ortogonal es el método utilizado para la formulación de las EDP en un lenguaje de programación que permite introducir las condiciones iniciales y condiciones de contorno del sistema. Este método permite simular el intercambio de calor y masa que se da en contracorriente entre el vaho y la harina.

Aun cuanto se tenga a detalle los principales fenómenos físico-químicos durante el secado, estos pueden ser no muy acertados y hay parámetros que se desconocen, por lo que se aplica el [6] método de estimación de parámetros a partir de técnicas de optimización dinámica, el cual ajusta los parámetros calculados y los parámetros desconocidos.

El entorno de lenguaje de programación utilizado es PROOSIS. [7]Este software nos facilita una variedad de herramientas para la simulación y nos muestra los efectos de la dependencia de los parámetros controlables en la salida del secador de forma gráfica.

Los resultados obtenidos luego de todo el proceso ha sido que se tiene los perfiles de $T_S, X, m_{harina}, m_{solido}, T_v, Y$ y v_{vaho} a lo largo de todo el secador, y la respuesta de los estados T_S, X del modelo son muy semejante a la respuesta real.

Capítulo 1

Harina de Pescado

La pesca mundial ha sido de más de 90 millones de toneladas métricas anuales desde 1986, con una tasa media anual del 3.2% de crecimiento del suministro de peces debido a que China ha tenido un crecimiento significativo en la acuicultura [8]. Esta mayor oferta en el área pesquera se ha debido a factores como el crecimiento poblacional y la alta demanda de la harina de pescado para la alimentación de ganado vacuno y el aceite de pescado por su revaloración del contenido de Omegas que posee.

La harina de pescado y aceite de pescado se utilizan como principales ingredientes para la producción de alimentos balanceados, que es parte de la dieta de una gran variedad de animales (conejos, perros, peces, cerdos y aves), esto les ayuda a tener un buen crecimiento y desarrollo, pero son poco utilizados para la elaboración de productos para la alimentación humana, lo que sería útil para una buena dieta.

La harina es una fuente rica en proteínas, que tiene un proceso relativamente simple de fabricación pues consiste básicamente en procesos térmicos de transferencia de masa y energía controlados. Estos procesos tienen el objetivo principal de extraer la cantidad de agua y aceite necesario para que el pescado no siga el proceso de putrefacción sin alterar sus factores nutricionales, y así poder conservar de la mejor forma las proteínas hasta su comercialización.

El proceso de producción de la harina de pescado se inicia en la pesca de la materia prima para seguir con el cocido, prensado y secado del producto; en cada uno de estos procesos se toman muestras, para una rigurosa evaluación de la calidad de harina y regular los parámetros de las maquinas. En el Perú la anchoveta es la principal especie que se pesca, debido a que presenta ventajas en el proceso de elaboración de la harina frente a otras especies y su hábitat está cerca a la costa peruana.

1.1 Historia de la industria de la harina de pescado

El Perú tiene una larga historia en la industria de producción de harina de pescado y siempre ha cumplido un papel muy importante al ser uno de los principales exportadores de harina de pescado y sus derivados en el mundo, al poseer dentro de su territorio uno de los mares más ricos en recursos naturales.

En la década de los 50s, las empresas procesadoras de harina de pescado, comenzaron a especializarse en el procesamiento de la anchoveta [9], al conocer sus altos valores nutricionales y entregar un producto de mayor calidad, que se ha ido cotizando con un valor más alto al transcurrir de los años.

Al tener mejoras en la tecnología navales para la pesca, en el año 1955 el Perú produjo entre 15 mil y 16 mil toneladas de harina de pescado [10]. El crecimiento acelerado de la industria de harina de pescado, condujo a obtener abundancia de recursos para el mejoramiento de la flota pesquera, obtenido la capacidad de adquirir sonares para ubicar cardúmenes de peces y mallas más livianas de nylon, más eficientes que las de algodón [9].

Con eso recursos el Perú se volvió líder mundial en la pesca en la década de los 60s, teniendo 154 plantas procesadoras de harina de pescado con lo cual produjo en el año 1964 el 40% de suministro de harina de pescado en el mundo, donde la anchoveta representaba el 99% de la materia prima, convirtiéndose en líder de exportaciones y con esto la industria pesquera llegó a representar el 30% de las exportaciones del Perú [9].

Con la pesca irresponsable e insostenible Perú llegó a sus capturas récord por encima de las 12 millones de toneladas que se produjeron en 2,25 millones de toneladas métricas de harina de pescado [10], la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) tuvo que poner cartas en el asunto advirtiendo que la pesca máxima sostenible no puede exceder a 9.5 millones de toneladas. Esto produjo un declive total de la producción de la harina de pescado en los siguientes años como consecuencia del control por la sobreexplotación y el fenómeno del niño.

Los siguientes años se tomó conciencia sobre la sobreexplotación y se introdujo las cuotas estrictas que ayudaría a la recuperación este recurso tan preciado, que no solo servía a la humanidad sino también a la vida de las aves costeras, las cuales habían disminuido en gran número.

Aún a pesar de las medidas tomadas, los barcos pesqueros capturaban pescados juveniles que sumado al fenómeno del niño de 1997/1998 registrado como el más fuerte ocasionó una disminución drástica de la biomasa pero debido a las medidas de control que se tomaron se logró nuevamente el crecimiento, mientras que otro fuerte El Niño de 2002/2003 fue afrontado con mayor control logrando sostener las cantidades[9].

Tras afrontar 5 años (2012-2016) con las condiciones climatológicas más difíciles por el fenómeno del niño, las cuotas de pesca se han ido regulando llegando a el 2016 a pescar 900 mil toneladas métricas [11]y este 2017 se pronostica la recuperación de las cuotas (2 millones de toneladas métricas) por la poca probabilidad de que se presente un Fenómeno del niño fuerte [12].

1.2 La industria de harina de pescado en el Perú

Las condiciones geográficas del mar peruano ayudan a tener una gran diversidad de peces que favorecen el consumo directo, pero como ya se mencionó el pescado usado para producir la harina de pescado en el Perú es la anchoveta que presenta ventajas como el ciclo de reproducción (6 meses) y grandes cardúmenes dentro de nuestras aguas territoriales. Por estas razones el Perú es reconocido como principal productor y exportador de harina de pescado para el mundo, y ha llegado a comercializar en los mercados más exigentes como China, Alemania, Japón y Taiwán [4].

Casi el 12% de las exportaciones peruanas provienen de la pesquería. La harina y el aceite de pescado como productos de la anchoveta representaron una suma del 62% de las exportaciones en el 2015, como se puede observar en la Figura 1

La captura de la materia prima ha variado de gran manera año tras año como se observa en la Figura 2, esto es debido a que anualmente se da una cuota de pesca para cada empresa, que depende del estudio hecho por IMARPE por encargo del Ministerio de Producción en el subsector de pesquería, que consiste en tomar muestras independientes en el mar peruano, lo cual permite identificar la zonas y volúmenes habilitados a pescar. El volumen de pesca disminuye por factores oceanográficos; el fenómeno El Niño es el más representativo en el Perú, el cual impulsa la migración del recurso marítimo fuera de las zonas tradicionales de pesca como ocurrió en el 2014 [5].

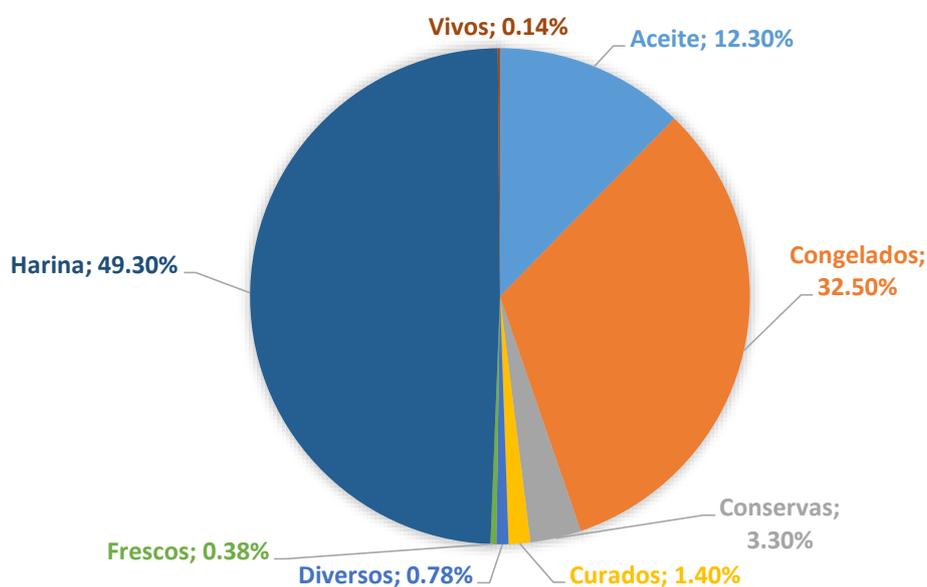


Figura 1. Exportaciones del sector pesquero año 2015

Fuente: PROMPERÚ (2015)

Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

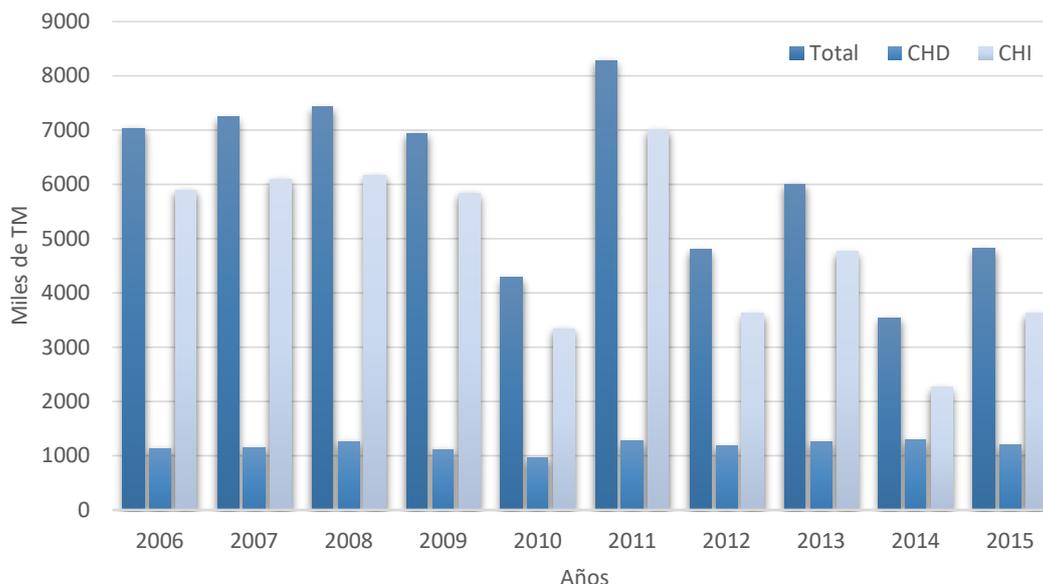


Figura 2. Evolución del desembarque total de recursos hidrobiológicos

Fuente: Sujeewa Ariyawansa (2000)

Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

Los desembarques de productos para consumo humano indirecto (CHI), como es la harina de pescado, son los que registran mayor volatilidad con respecto a los desembarcos destinados a consumo humano directo (CHD), pero aun así el precio unitario promedio de la harina de pescado ha tenido una tendencia de alza, como se observa en la Figura 3, debido a la valoración del porcentaje de proteína que contiene este producto, lo que ha generado una mayor demanda, pero hubo un descenso de alrededor del 9% en el precio internacional de la harina para el 2016 [13].

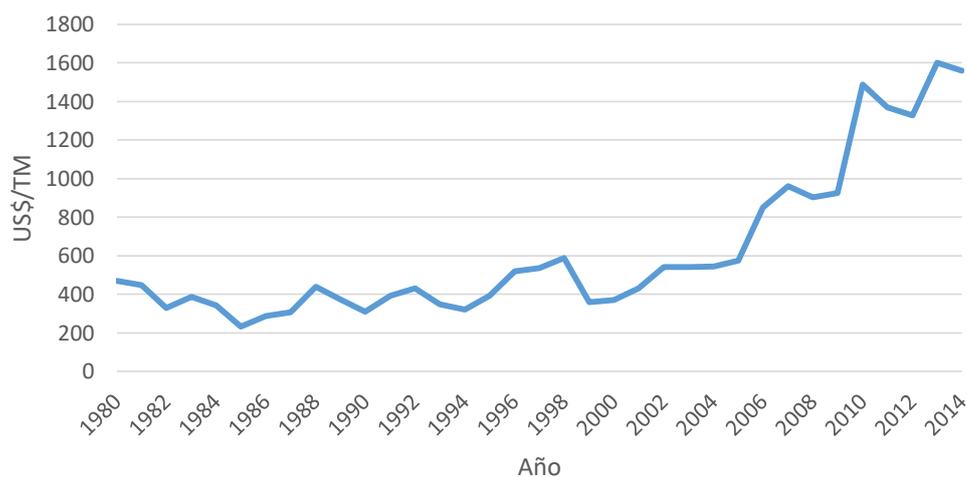


Figura 3. Exportaciones de harina de pescado

Fuente: BCRP (2015)

Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

Las exportaciones destinadas al CHI el 2015 ha alcanzado el valor de 1469 millones de dólares equivalente a 826 mil toneladas de producto [2], en el 2016 se produjo 900 mil toneladas, donde China fue el principal mercado de destino [11], le sigue Dinamarca que ha incrementado sus compras de harina y aceite de pescado, luego Chile, Alemania, Estados Unidos entre otros países con gran interés con este producto para una mejor alimentación de sus animales, esta distribución se observa en la Figura 4.

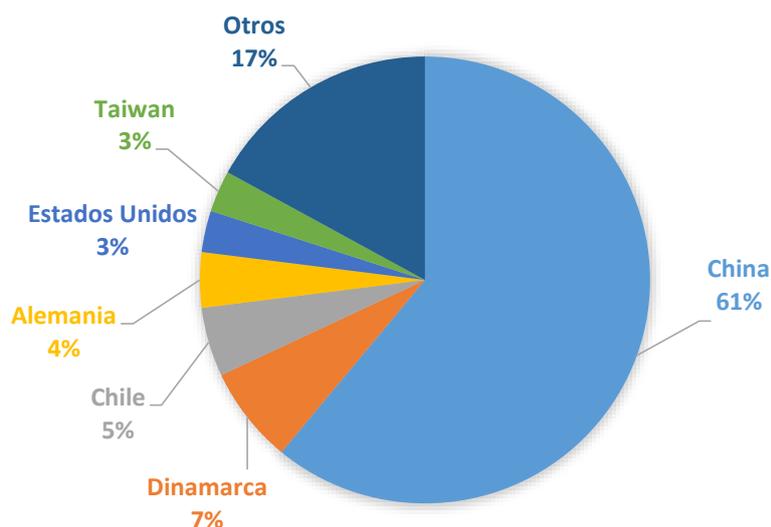


Figura 4. Principales mercados 2015 de CHI
Fuente: PROMPERÚ (2015)
Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

Los productos exportados CHI de este rubro se dividen en: harina de pescado, aceite de pescado y harina de pota, donde la harina de pescado representa el 80% como se observa en la Figura 5.

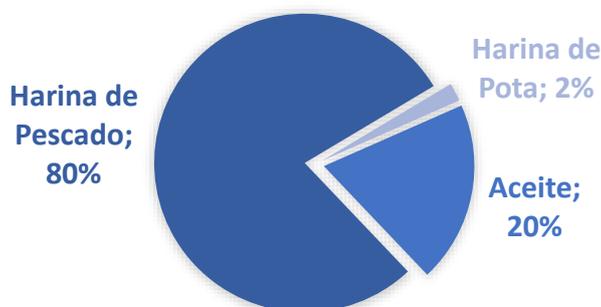


Figura 5. Principales productos 2015 de CHI
Fuente: PROMPERÚ (2015)
Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

Las empresas con mayor participación en la producción de harina de pescado en el Perú, como se ve en la Figura 6, son: Tecnológica de Alimentos, Corporación Pesquera Inca, Pesquera Diamante y Exalmar las cuales representan aproximadamente el 70%, de un total de 70 empresas registradas hasta el 2015 que se encuentran en operación con una capacidad de 9000 toneladas de materia/hora [2]. La pesquería peruana emplea directamente o indirectamente a unas 150 mil personas y alrededor de 7 mil personas son empleadas en el proceso de producción de la harina de pescado [14].

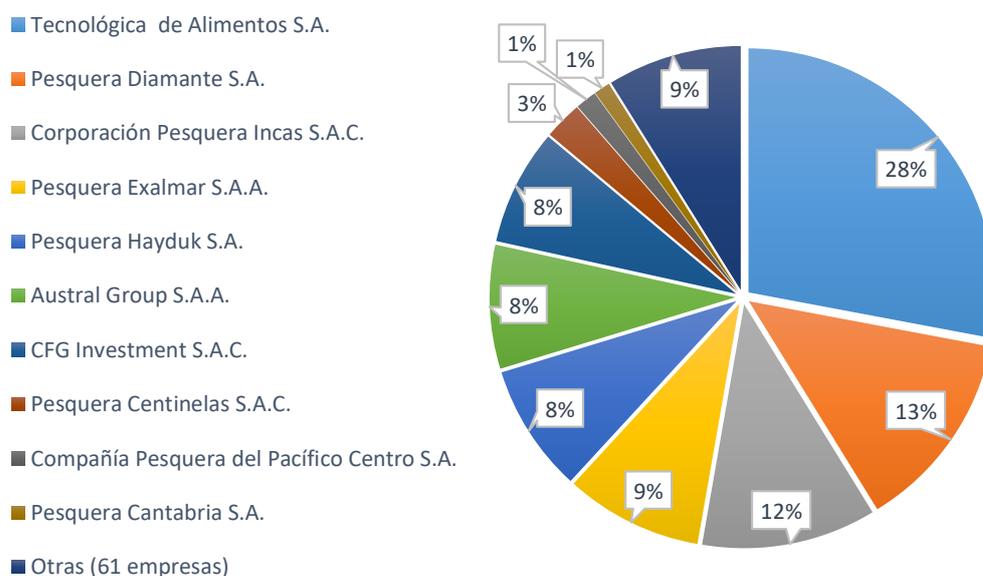


Figura 6 Participación de las principales empresas exportadoras de harina de pescado

Fuente: PROMPERÚ (2015)

Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

En la Figura 7 se observa los principales productores de harina de pescado en el mundo, donde el Perú se impone como primer productor global con un 16.4% , la cual ha disminuido con respecto a los años 2001 y 2010 donde el Perú estuvo produciendo en promedio el 26% de la producción mundial. Esto es debido a que la industria China ha repuntado en los últimos cinco años, ya que ha tenido un rápido crecimiento en la producción acuícola, permitiéndole tener una participación más significativa en la producción mundial partiendo del 11% en promedio durante la última década y llegando al 16% en el 2015 [11].

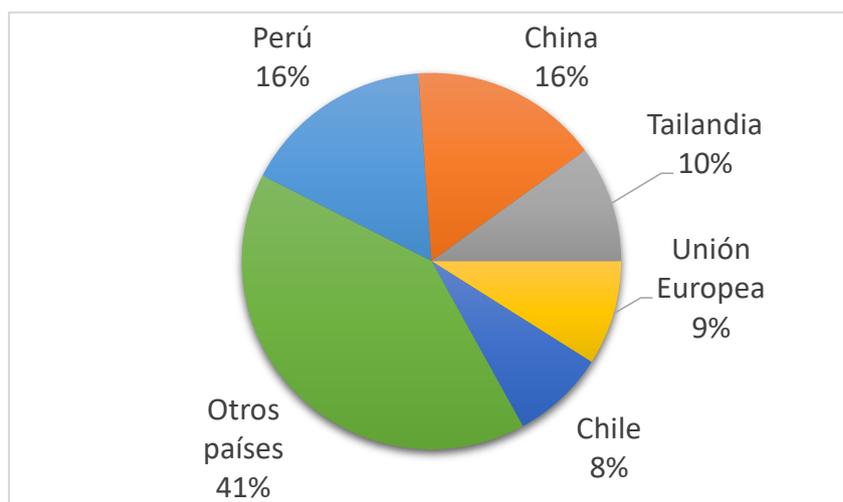


Figura 7. Productores de harina de pescado en el mundo

Fuente: RPP (2016)

Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

1.3 Importancia de la harina de pescado

La oferta mundial de recursos marítimos se ha visto limitada por la captura indiscriminada que causa sobreexplotación a un nivel biológicamente insostenible. La necesidad de estos recursos naturales y la restricción de los países productores para la protección del ecosistema marítimo ha dado pase a la acuicultura, lo cual permite abastecer, principalmente, la creciente demanda inducida por el crecimiento poblacional de los países asiáticos y cuya dieta alimentaria está basada en los productos marinos, por lo que el 73% de la harina de pescado se usa en la acuicultura, como se ve en la Figura 8.

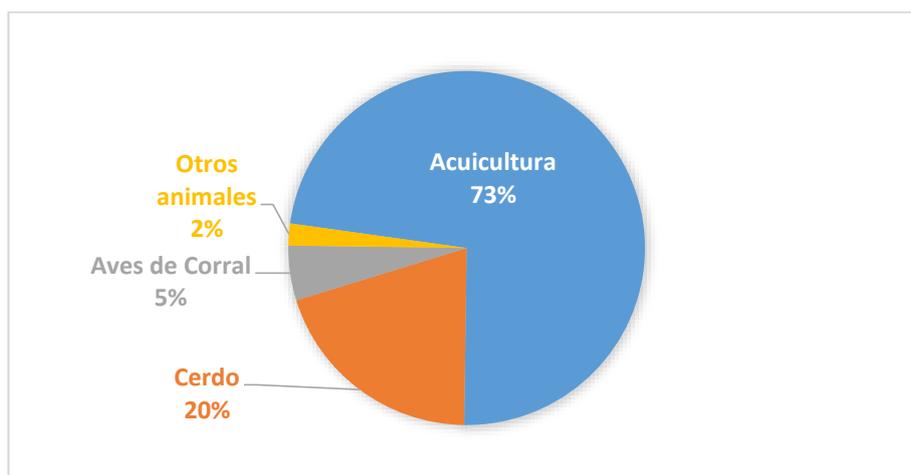


Figura 8. Distribución de consumo de la harina de pescado

Fuente: Pesquera Exalmar (2012)

Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

Debido a la alta calidad de la harina de pescado, es usada en la dieta de una gran variedad de animales, que al consumirla les proporciona los complementos alimenticios necesarios para una eficiente alimentación y crecimiento a través de una mejor palatabilidad, captación y absorción de nutrientes, al proporcionar una cantidad equilibrada de todos los aminoácidos, minerales, fosfolípidos y ácidos grasos esenciales para la optimización del desarrollo, crecimiento y reproducción, especialmente de las larvas y en los reproductores [15].

La alimentación de los animales con harina y aceite de pescado, reduce la mortalidad al mejorar su resistencia hacia las enfermedades, en especial las enfermedades inflamatorias pues la harina proporciona antiinflamatorios como el EPA y DHA, complementando la alimentación con dieta vegetal [15]. La inversión que se hace al darle una dieta complementada con harina de pescado es compensada con el ahorro de inversiones en temas de salud, aumento de reproducción y disminución de mortalidad de los animales, y así promocionar la salud en la crianza de sus animales.

1.4 Materia prima

La producción de harina de pescado con anchoveta, tiene una variedad de ventajas: como es su mayor concentración de proteínas y en el procesamiento el pescado tiene una mejor consistencia, lo que hace que se tenga menores partículas de harina de pescado en el agua de cola, luego del prensado. Para procesar otras especies (jurel, bonito, atún, etc) se tiene que considerar que las máquinas se tienen que regular y hacer un estudio de sostenibilidad de la especie, debido a que en la actualidad en el mar peruano no se encuentran las cantidades necesarias para su explotación en la producción de harina de pescado.

En cambio, la pesca de anchoveta peruana es la más grande del mundo. Sin embargo cabe mencionar que el fuerte olor que se emana al procesar la anchoveta ha causado problemas de contaminación odorífera como en el caso de la ciudad de Chimbote, al ser una ciudad con varias plantas procesadoras de harina y aceite de pescado sin recuperación de vahos esta tenía un fuerte olor a harina de pescado.

La flota pesquera de red de cerco opera principalmente en el área que va desde Paita hasta el límite marítimo sur, generalmente dentro de 80 km de la costa, y a veces se tienen que ir hasta los 160km. Los principales puertos son Chimbote, Pisco, Supe, Callao e Ilo, ordenados según su importancia[9].

Las anchovetas forman enormes cardúmenes en aguas superficiales, los cuales son dependientes del rico plancton de la corriente peruana[16]. Su reproducción abarca todo el año a lo largo de la costa peruana, con un desove principal en el intervalo de agosto a septiembre y uno secundario entre febrero a marzo.

La medida máxima que alcanza una anchoveta es de 20 cm en un tiempo aproximado de 3 años, y llega a su etapa de madurez con 12 cm en alrededor de 1 año. Como se ve en la Figura 9 estos peces son de cuerpo delgado alargado, con una sección transversal redonda que les identifica, con una raya plateada a lo largo del flanco en individuos jóvenes, que van

desapareciendo con la edad, otra característica que lo distingue de otras especies del pacífico es el alto número de *gill rakers*.

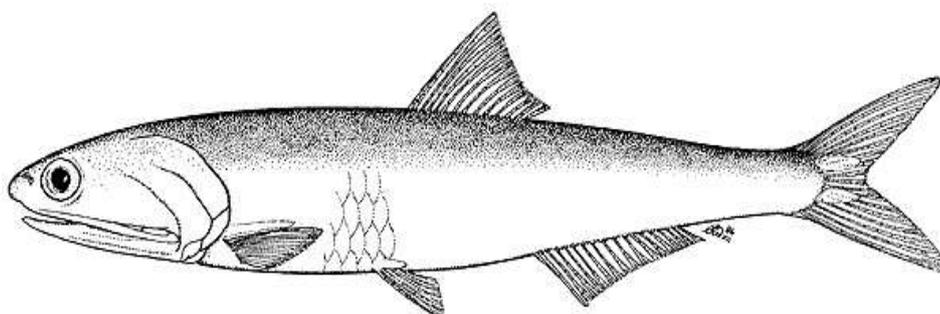


Figura 9. *Engraulis ringens* - Anchoqueta peruana
Fuente: FAO (2015). Extraído: <http://www.fao.org>

El papel vital del pescado y en especial del pescado graso como la anchoveta en la nutrición humana ha llevado tanto al gobierno del Perú como a la industria a desarrollar un mercado de consumo directo de esta especie. Ya se tiene un mercado de exportación de este producto, pero no es de un valor significativo comparado con el mercado de la harina.

1.5 Composición de la harina de pescado

La mayoría de las especies de pescado pueden ser utilizadas para la producción de harina de pescado. Pero lo importante es conocer de qué están compuestas cada una de las especies, por ello en la Tabla 1 se indica el porcentaje de proteínas, grasa, contenido de agua y materia inorgánica de algunas de las especies más conocidas.

El componente nutritivo más valioso de la harina de pescado es la proteína, tiene una proporción ideal de aminoácidos esenciales altamente digestibles, que varía relativamente poco con el origen de la harina. Como antes se mencionó, el Perú tiene las condiciones oceanográficas y la industria para utilizar a la anchoveta como materia prima, a esto se le agrega que contiene un buen porcentaje de proteínas como se observa en la Tabla 1, lo cual lo hace una especie ideal para su explotación.

Tabla 1. Composición promedio de algunas especies - pescados enteros

Especie	Humedad	Proteínas	Grasas
Anchoqueta	78	18	6
Bacalao	81.22	17.81	0.67
Capelán	75	14	10
Haddock	79.92	18.91	0.72
Halibut	77.92	20.81	2.29

Fuente: N.N. Mohsenin (1980) y S. Ariyawansa (2000)

Tabla 1. Composición promedio de algunas especies - pescados enteros

Especie	Humedad	Proteínas	Grasas
Arenque	59.7	24.58	12.37
Caballa atlántica	63.55	18.6	13.89
Perch	78.7	18.62	1.63
Pollock	78.18	19.44	0.98
Salmon rosa	76.35	19.94	3.45
Atún, atún rojo	68.05	23.33	4.9
Pescadilla	80.27	18.31	1.31

1.6 Calidad físico-química de la harina de pescado

La harina de pescado es un material heterogéneo, tanto físico como químico, debido a que sus partículas están compuestas por diferentes tipos de tejidos que contiene el pescado como son los huesos, las escamas, la sangre y el agua. Por lo que se tiene que tomar en consideración las actividades microbiológicas más importantes que deterioran el producto como son: la oxidación de lípidos, actividad bacteriana, el crecimiento microbiano, enzimática o enranciamiento, todas estas depende de la actividad del agua (*water activity*) en el producto [17]. El deterioro de la harina de pescado ocurre desde que es empaquetado en materiales plásticos, por lo que es importante conocer la frescura del producto, la temperatura, las condiciones de almacenamiento y la humedad relativa del ambiente, debido a que se llega a un equilibrio de humedad con esta.

Los parámetros más importantes a determinar en el control de calidad son los relacionados con la frescura de la materia prima y la calidad de su procesado (TVN, histaminas o aminas biogénicas, digestibilidad y solubilidad de la proteína, enranciamiento y bacteriología) [18].

El TVN son las bases nitrogenadas volátiles, que son indicadores de la descomposición del pescado, no debe exceder a 125mg/100g. Este factor se analiza antes que el pescado entre a la planta para dar una primera referencia del tipo de calidad al que pertenecerá la harina que produzca. Este factor indica también cuan deteriorado está el pescado, si el pescado se captura y se ha destrozado en su traslado este factor será mayor.

La histamina es otro indicador de descomposición del pescado, esta es una amina biógena de antigénico, por lo cual un pescado con alto porcentaje de este indicador puede producir una intoxicación. Es una sustancia química muy estable al calor, por lo cual resiste a todos los procesos térmicos a los que es sometido el pescado hasta el producto final. Las condiciones ambientales para los microorganismos responsables de la formación de histamina, se desarrollan a partir de 15°C y en temperaturas superiores a los 20°C se acelera considerablemente la formación de la histamina [19].

La digestibilidad es un factor que indica qué proporción del alimento es aprovechado por el aparato digestivo para convertirlas en sustancias útiles para la nutrición[20]. Este indicador de calidad varía de forma notable de una especie a otra, por lo que es normal encontrar factores muy distintos en especies carnívoras, herbívoras u omnívoras, sin embargo en las diferentes especies de peces el factor de digestibilidad es muy similar.

La solubilidad de las proteínas, así como la digestibilidad se analizan por métodos IN VITRO, que permite determinar si la harina de pescado ha sido sometida a un adecuado procedimiento, con este análisis se observa la composición de los aminoácidos, la estructura tridimensional y el entorno propio de la proteína. Los factores que influyen a la solubilidad de la proteína son: La temperatura, la constante dieléctrica del medio, el PH del mismo y la fuerza iónica.

También se debe vigilar las mezclas fraudulentas con otras harinas animales (p. ej. harina de plumas) o minerales, a través de la relación calcio: fósforo.

Cada empresa productora de harina establece sus propias especificaciones de calidad para la harina de pescado en donde estos parámetros más el porcentaje de proteína, grasa, humedad, sal y arena constituyen el análisis fundamental de la harina como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición de la harina de pescado de la empresa Diamante

Componente	Unidad	Rango	Super Prime	Prime	Estándar (tradicional)
Proteínas	%	Mín.	68-70	67 - 70	64 - 68
Grasa	%	Máx.	10	10	10
Humedad	%	Mín. - Máx.	7 - 10	7 - 10	10
Ácidos Grasos	%	Máx.	7.5	10	-
Ceniza	%	Mín. - Máx.	13-16	14 - 17	-
Sal y Arena	%	Máx.	4	5	5
TVN (Índice volátil total)	mg/100grs	Máx.	100	120	-
Histmina	PPM	Máx.	500	1000	-
Digestibilidad	%	Mín.	94	94	-
Antioxidante	PPM	Mín.	150	150	150

Fuente: Laboratorio de la Empresa Diamante

Capítulo 2

Funcionamiento del Secador de Harina de Pescado

El alto valor nutricional de la harina de pescado es muy requerido en el mercado para la crianza de animales, pues sus valores porcentuales de proteínas y digestibilidad son bastante altos al compararlos con otras harinas. En el proceso de obtención de la harina de pescado se obtiene también otros sub-productos del pescado como el OMEGA-3 que es un concentrado de ácidos grasos para el consumo humano.

Estos productos se obtienen luego de un largo, continuo y estricto proceso, con el fin de obtener las condiciones ideales para que el valor nutricional de los productos no decaiga. Esto trae ciertas dificultades en el control, debido a que existen variaciones que no ayudan a obtener un óptimo control del proceso, entre ellas tenemos las dimensiones del pescado, la masa y la humedad que contiene luego de cada sub-proceso.

El objetivo de la etapa de secado es secar el keke integral (la mezcla de la torta de la prensa, la torta del decantador y el concentrado) que luego de pasar por un secador por algunos minutos a una temperatura específica, pasa con menor humedad por la molienda con el fin de uniformizar los gránulos de harina, adherirle los conservantes y demás aditivos, y finalmente ser almacenado para su posterior venta.

El secador de la harina es el mayor consumidor de energía en la planta y la calidad de la harina depende mucho de este proceso, pero como esta máquina es parte de un proceso en serie, las condiciones en relación a la estancia y temperatura que se encuentra en cada una de las otras máquinas, para la transferencia de calor y transferencia de masa, también son importantes para obtención de un producto final con calidad definida. Ante ello debemos conocer primero todo el proceso de la producción de harina de pescado desde la extracción del pescado del muelle hasta su almacenamiento en condiciones adecuadas.

2.1 Proceso de Producción de Harina de Pescado

El proceso para obtener la harina de pescado comienza con la medición de los parámetros de calidad del pescado antes de entrar a la cocina para la coagulación de las proteínas, liberando, de este modo, el agua y el aceite que son separados por prensado del producto coagulado produciendo una fase sólida (Keke de prensa) y una fase líquida (Agua de prensa) la cual contiene agua, aceite y proteínas disueltas y suspendidas. El agua de prensa pasa por decantadores que extraen todos los sólidos, estos sólidos vuelven al keke de prensa, luego de ello el líquido pasa a una centrifugadora para separar el agua del aceite. El agua no es desechada porque contiene gran cantidad de proteínas y pasa a los evaporadores, donde forma un concentrado llamado agua de cola. El agua de cola es mezclada con el keke de prensa, para obtener el keke integral que pasará por los secadores para disminuir la humedad hasta un 10%. Este material seco es pasado por el molino y almacenado en bolsas o a granel. El aceite es también purificado y almacenado en tanques.

Existen también grandes barcos industrializados que procesan la harina de pescado dentro de sus navíos [21]. Es decir, implementan el proceso anterior en una sola máquina y llevan al puerto solamente la harina ya procesada para su análisis final y venta.

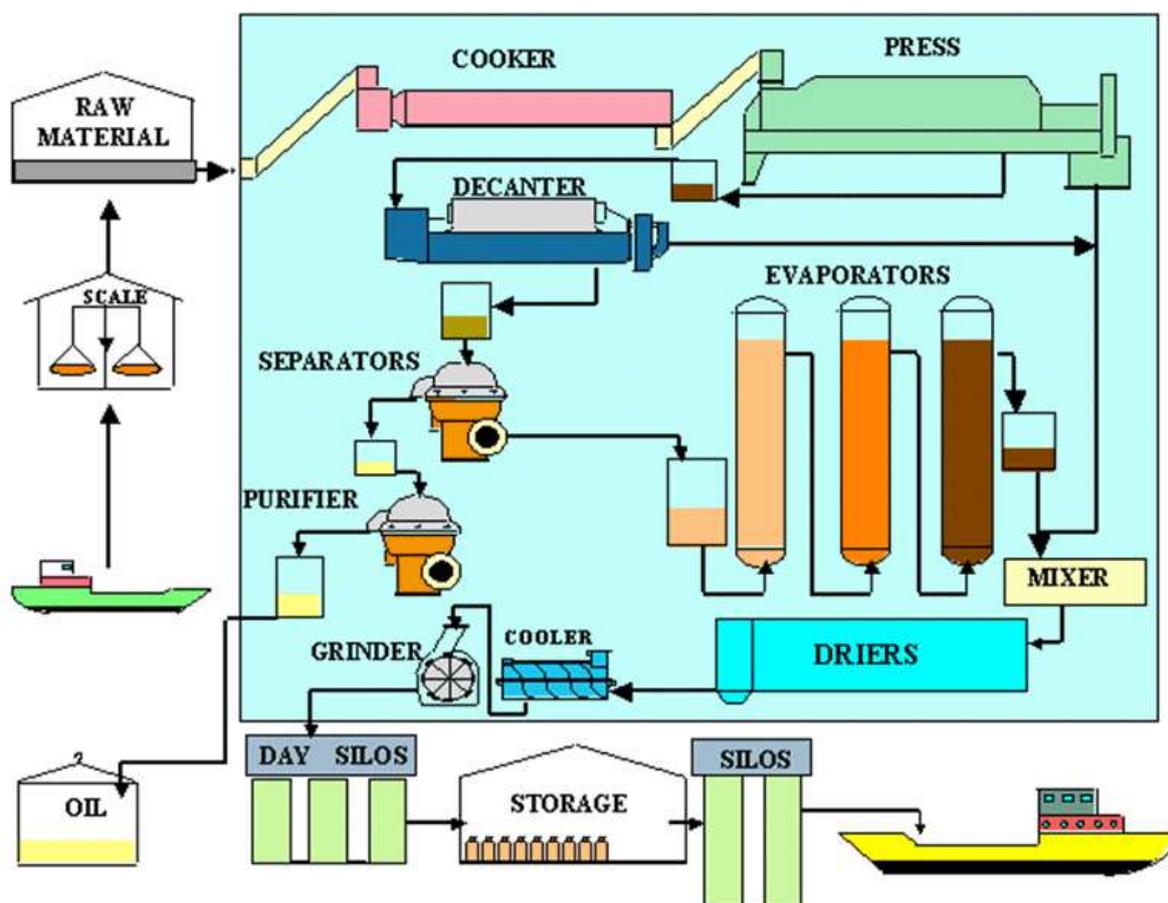


Figura 10. Proceso de producción de harina de pescado
Fuente: IFFO (2011) Extraído de: <http://www.iffonet>

2.1.1 Obtención de la materia prima

Los navíos se encargan de pescar cardúmenes de anchoveta para generar la harina de pescado; por cada 5 toneladas pescada se genera solo 1 tonelada de harina de pescado aproximadamente. Este pescado es almacenado en la bodega refrigerada de la nave.



Figura 11. Pesca de cardúmenes de anchoveta
Fuente: La Tercera (2011) Extraído de: <http://diario.latercera.com>

2.1.2 Recepción

El transporte del pescado desde las embarcaciones a los almacenes de la fábrica se da diferentes maneras con el objetivo de hacer el menor daño posible a la materia prima, buscando evitar el destroz del pescado y con ello que se lleve a cabo el proceso autolítico y microbiano.

El pescado puede ser trasladado desde las embarcaciones pesqueras a través de fajas ubicadas en el muelle o bombas acopladas a tuberías, este último tiene instalado un equipo de bombeo hidráulico; la relación de agua y pescado debe ser de 1:1.



Figura 12. Adición de agua a la anchoveta para el bombeo hidráulico
Fuente: MINAGRI (2015) Extraído de: <http://www.minagri.gob.pe>

El pescado con agua es recepcionado por un desagüador y transportado por mallas. Luego el pescado es pesado y descargado en pozas de almacenamiento del pescado.

Antes de llevar la materia a los almacenes el laboratorio se hace un control de calidad que se encarga de realizar el análisis a la materia prima para conocer las condiciones de estas, y con estos datos verifica la calidad y parámetros operacionales del proceso, el dato necesario a conocer es su grado de frescura con la medida del TVN (Nitrógeno Total Volátil), pues con este factor se reconoce el grado de deterioro al cuantificar el índice de las bases nitrogenadas producidas por el pescado [22].

2.1.3 Almacenamiento

Existe temporadas de exceso de oferta y otros periodos de escasez, por lo que algunas veces no tienen materia prima para procesar u otras tienen en exceso [23]. Se debe almacenar en las mejores condiciones posibles, debido a que el pescado en mal estado produce mal olor, es más difícil de procesar y tiene un rendimiento inferior.

Los métodos de conservación no son baratos, ni seguros. Se puede utilizar la refrigeración, pero no es económica o también se utilizan métodos químicos controlados como es el uso del nitrato de sodio con formaldehído, pero también tiene sus desventajas como el endurecimiento del pescado.

La materia prima también viene de los desechos de pescado provenientes de las plantas elaboradoras de filete de pescado, esta harina es blanca a cambio de la harina de pescado entero que es oscura. El pescado es procesado según la prioridad de calidad [21].



Figura 13. Almacenes de anchoveta antes ingresar a la cocina.
Fuente: Fronterad (2012) Extraído de: <http://fronterad.com>

2.1.4 Cocinado

El pescado es sacado de los almacenes por medio de transportadores helicoidales y llevado a través de transportadores de paletas hacia los cocinadores. El pescado es sometido a un proceso térmico con vapor directo, indirecto o mixto con el fin de detener la actividad microbiológica y enzimática responsable de la descomposición del pescado, coagula las proteínas permitiendo la separación del aceite y los residuos viscosos [22].

Una cocina comercial indirecta consiste esencialmente en un cilindro con camisa de vapor de agua con temperaturas de 90-95°C, a través del cual los peces son movidos por un transportador de tornillo. El trabajo de cocción es continuo, tiene una duración de 10 a 15 minutos dependiendo del estado del pescado y si se encuentra destrozado [23]. En el caso de cocinas directas o mixtas también se usa la inyección de vapor en el material de cocción. La operación de cocción es crítica; si los peces no están cocidos completamente, el licor de la prensa no se obtiene de manera satisfactoria, y si el pescado está muy cocido se vuelve demasiado blando para pasar por la prensa.



Figura 14. Cocina comercial indirecta

Fuente: Zhejiang Longyuan Sifang Machinery Manufacture Co. Extraído de: <http://www.fishmeal-machine.com>

2.1.5 Prensado

Esta es una etapa clave del proceso en el cual se remueve gran cantidad del aceite y agua para obtener el keke de prensa [23]. La eliminación de líquido por medios mecánicos es la manera más eficiente y económica para reducir el contenido de humedad comparada con la eliminación térmica, debido a que en esta primera etapa la harina de pescado que contiene bastante humedad [24]. Durante el proceso de prensado el contenido de humedad en base seca tiende a reducirse desde un 70 % a un 50 % aproximadamente.

En esta etapa el pescado ingresa a la prensa donde una mezcla de agua y aceite se exprime y se extrae a través de las perforaciones del colador, el producto del prensado es conocido como torta de prensa [23]. El líquido del colador es llamado licor de prensa, el cual

es recogido para posteriormente ser separado en aceite y agua de cola. Esta última alimenta el evaporador, el cual concentra las proteínas restantes utilizando el calor residual proveniente de los secadores de vapor. El concentrado, es agregado al keke de prensa y todo el material es secado, esto asegura la recuperación de las valiosas proteínas [25].

Existen varios tipos de prensas para la elaboración de harina de pescado, fundamentalmente están compuestos de tornillos y coladores [26]. Los dos tornillos rotatorios encontrados están instalados en una canasta estática con mallas y planchas de soporte que se mantienen en posición con robustas cuadernas. Los tornillos son fabricados en acero de alta calidad especialmente en los bordes de las aletas y maquinados para ajustarse a la superficie. Las mallas son fabricadas en acero inoxidable y los platos de soporte y costillas robustas en acero dulce (con carbono) [24].

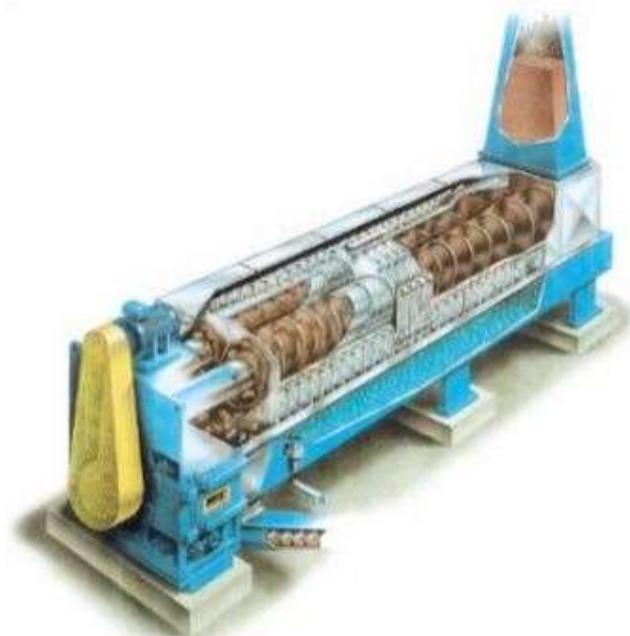


Figura 15. Prensa de doble tornillo

Fuente: Putsch Nerva S.A. Extraído de: <http://www.putschnerva.com>

2.1.6 Proceso del Licor de prensa

Con el licor de prensa se forma un proceso en paralelo para la obtención del agua de cola y un proceso final para la obtención del aceite. Al licor de prensa por decantación se le separa los sólidos gruesos y con centrifugas y/o separadores es retirado el aceite para obtener el agua de cola que pasará por los evaporadores y se obtendrá finalmente el concentrado.

2.1.6.1 Decantación

Primero se necesita extraer los sólidos del licor de prensa para que formen también parte del keke de prensa que continúa su camino a los secadores. El licor es impulsado por bombas a un equipo denominado decantador.

El decantador es el equipo a cargo de la separación de los sólidos de pescado y la fase líquida. Esto se hace gracias a la fuerza centrífuga creada por un conjunto giratorio que está conformado por un tambor cilíndrico/cónico, un transportador en espiral y una caja reductora que transmite el movimiento por medio de poleas y correas; esta fuerza llega a ser 2500 veces la fuerza gravitatoria, con esta fuerza y la diferencia de densidades es posible la separación de los sólidos de pescado y el licor [27].

La parte sólida se denomina keke de decanter y el líquido es llamado licor de decanter que contiene fundamentalmente grasa y agua, el cual es enviado por bombas a las separadoras.



Figura 16. Decantador centrífugos de licor Flottweg
Fuente: Interplant S.A. Extraído de: <http://www.interplant.com.pe>

2.1.6.2 Separadores

La función del separador es obtener, del licor de decanter, aceite con muy poca humedad (menor al 0.3%), dejando un agua baja en grasa. El licor es precalentado hasta una temperatura de 95 °C, facilitando la separación de los dos componentes, inmediatamente es ingresado al separador [28]. El separador es una centrifuga horizontal que trabaja por el mismo principio del decantador al tener 2 materiales con diferentes densidades.

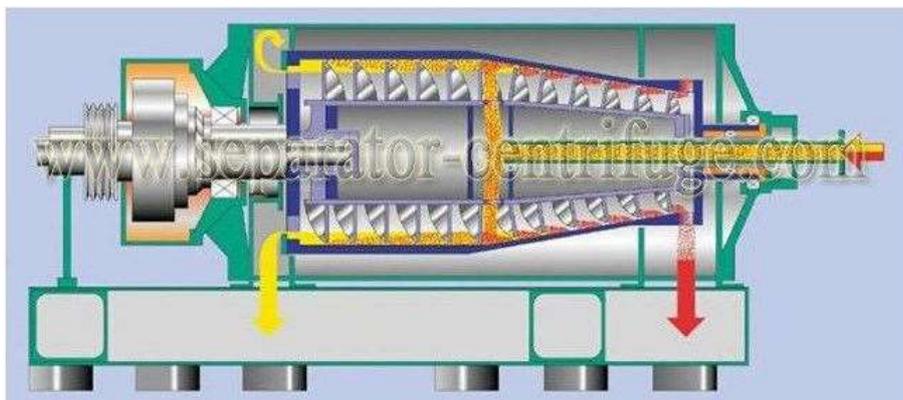


Figura 17. Separadores centrífugos de aceite
Fuente: Tema Maquinaria S.A. (2014) Extraído de: <http://www.temamaquinaria.es>

El separador está compuesto en su interior por 2 tambores con espiral que giran en la misma dirección pero con una diferencia de velocidades, el licor es ingresado por un tubo interno hacia el centro de la centrifuga, por acción de la fuerza centrífuga se crea una presión sobre los espirales, los de mayor densidad (agua) salen por el lado del tambor cilíndrico y los de menor densidad (aceite) por el tambor cónico [29].

El aceite es llevado al clarificador para su purificación y el agua baja en grasa es llamada agua de cola la cual es llevada a los evaporadores.

2.1.6.3 Clarificador

Esta etapa es parecida a la anterior, donde se permite que el aceite tenga menor humedad (menor al 1%). El aceite que sale de las separadoras es calentado de nuevo hasta una temperatura de 95 °C y mezclándolo con un poco de agua es enviado al clarificador [28].

Estas centrifugas verticales giran a una velocidad muy grande capaz de alcanzar a 9800 veces la fuerza de la gravedad en su interior, los fluidos dentro del clarificador se mueven de forma ascendente y descendente, los materiales con mayor densidad se acumulan en la pared del cuerpo del rotor donde se eliminan rápidamente por pequeñas aberturas intermitentes en el rotor. Finalmente, en el proceso de obtención del aceite de pescado acaba al ser bombeado a tanques para su almacenamiento y venta.



Figura 18. Clarificador comercial de aceite de pescado
Fuente: GRATT (2012) Extraído de: <http://www.gratt.com.br>

2.1.6.4 Evaporadores

El licor que se extrae de los separadores es conocido como agua de cola; el contenido del material disuelto y sólidos finos en suspensión puede representar el 9 % del peso, estos sólidos son en su mayoría proteínas, razón por la cual vale la pena hacer un proceso recuperación. El material se recupera por evaporación, hasta obtener un jarabe espeso que contiene del 30 al 50% de sólidos, este a veces es comercializado con el nombre de solubles de pescado condensados [23].

Los evaporadores aumentan la eficiencia de las plantas porque pueden reciclar los gases residuales de la cocina y secadores, para reducir el consumo de energía y el impacto ambiental al ser liberados en la atmosfera [30].

Las plantas evaporadoras de agua de cola en los modelos antiguos (tubos inundados) trabajan con un gran volumen, y tardan un promedio de 4 horas para tener la concentración en alrededor del 40%. Hay otras plantas vigentes, que son las de película descendente WHE, trabajan con un menor volumen de agua de cola pero a su vez se obtiene una concentración más rápida, este tipo de evaporador está preparado para trabajar con el vapor que sale de los secadores y la cocina [31].

El concentrado obtenido será agregado al keke de prensa dándole valor agregado a la harina de pescado y haciéndola rentable.



Figura 19. Evaporadores de agua de cola
Fuente: Bpress (2014) Extraído de: <http://www.bpress.cn>

2.1.7 Secadores

El propósito del secador es que el keke integral que está conformado por la torta prensa, torta del decantador y el concentrado, la cual es una mezcla húmeda e inestable, sea convertida en harina de pescado seca y estable, es decir que el contenido de humedad debe ser del 10%, con lo cual se puede considerar que es suficientemente bajo como para que

exista actividad microbiológica. La temperatura de la harina secado no debe exceder a 90 °C y la humedad no debe ser menor al 6% para no deteriorar los valores nutricionales [22].

Existe gran variedad de secadores, con el mismo principio, pero aplicados según la calidad que se necesita de la harina de pescado.

En este punto del proceso ya se obtiene el producto que se puede comercializar, pero antes de ser envasado debe pasar por un molino para ser enfriado.



Figura 20. Secadores rotadiscos en paralelo
Fuente: Elaboración propia

2.1.8 Molino

El objetivo de molino es dar un producto más homogéneo, para mezclar fácilmente en las proporciones de alimentos que se requiere y dar una buena apariencia granulada lo que ayuda a una mejor aceptación del producto en el mercado [22].



Figura 21. Molino seco de martillo
Fuente: Raul Ruiz (2012) Extraído de: <http://tecnicnaval.blogspot.pe>

2.1.9 Enfriamiento

Al salir del secador se obtiene la humedad deseada, pero la temperatura de la harina de pescado no es conveniente para envasarla, por eso la harina debe alcanzar temperaturas menores a 40 °C. Este procedimiento se realiza mediante el uso de grandes volúmenes de aire generado por ventiladores [32].

Al ser la harina un material compuesto de partículas higroscópicas (absorbe humedad), absorbe y reacciona con el oxígeno, por lo cual debe ser enfriada y estabilizada con antioxidantes antes de ser envasada [22].

2.1.10 Envasado

El envasado se puede realizar en sacos laminados de 25kg, 50 kg y 1200kg [32], según la necesidad del cliente. En esta operación es importante su control debido a su constante manipulación. Antes del envasado se toma muestras de cada lote para enviarlo al laboratorio para los respectivos análisis.



Figura 22. Operarios envasando

Fuente: Industria Alimenticia (2012) Extraído de: <http://www.industriaalimenticia.com>

2.1.11 Análisis Físicos, Químicos y Microbiológicos

Cada lote de harina de pescado es analizado para saber si cumple con los parámetros de comercialización y si los cumple se analiza para clasificar a que calidad pertenece el lote [22]. Los parámetros estudiados se observan en la Tabla 2.

2.1.12 Almacenaje

Los métodos de almacenaje varían, estos dependen de factores climatológicos, capacidad de la producción, uso de antioxidantes y arreglos particulares para su comercialización. Lo más importante es que la harina sea protegida de la humedad, por lo cual la superficie interna de la azotea debe estar aislada y/o los almacenes deben contar con

techos para evitar que las precipitaciones mojen la harina, solamente se permite que la harina de pescado sea almacenada en zonas abiertas en regiones áridas [33].

La harina de pescado se debe proteger también contra la calefacción creada por la misma harina en el almacén, si esta ya está tratada con antioxidante o almacenada después de la cura. Los ramos de harina envasados no debe exceder de 5m de anchura para que se puedan airear[33].

Se estima que en la mitad del mundo la harina de pescado está almacenada en silos, debido que es más simple, más barato y resulta en un ahorro considerable en la mano de obra usada en el mantenimiento, el relleno, el control del peso y la estiba de bolsos[33].

2.2 Tipos de Secadores Rotativos de Harina de Pescado

Existen diversos tipos de secadores según el proceso para el que serán utilizados, estos basan su funcionamiento en transferencia de calor por conducción, convección o radiación, haciendo que la masa o sólidos disminuyan el porcentaje de humedad.

Existe una diversidad de materiales que pueden ser secados para diferentes propósitos, y cada sólido muestra una geométrica o composición diferente; por lo cual no se puede deducir simplemente por un modelo general, la humedad final luego de pasar por el secador o conocer la humedad específica del sólido.

Debido a ello en el secado no solo se involucra la transferencia de calor sino también una variedad de fenómenos como: Transferencia de masa, evaporación, movimiento de sólidos, capilaridad, difusión y tensión superficial. La interacción de todos estos fenómenos físicos y químicos entre sí da como resultado un comportamiento no lineal, que no se deduce con facilidad.

Los secadores rotativos se utilizan en la industria de la harina de pescado debido a su eficiencia térmica y diseño robusto que aseguran un perfecto secado y un producto de calidad. Los secadores se clasifican según su mecanismo de transmisión de calor en: Secadores indirectos y secadores directos.

2.2.1 Secadores Indirectos

El calor es transmitido al sólido por conducción y convección por lo que es recomendable que para una máxima transferencia de energía, el área de contacto con el sólido sea la mayor posible [34]. Los secadores indirectos son más utilizados para asegurar la calidad del producto, debido a que los gases que se utilizan para calentar no tienen contacto directo con los sólidos.

En el caso de la harina de pescado esto produce mayor ceniza y contaminación del producto, debido a que cuenta con partículas pequeñas que podrían quemarse o desperdiciarse. La desventaja de estos secadores es que los sólidos pueden quedarse pegados en las paredes.

2.2.1.1 Secador Rota Disco

Es un secador indirecto de vapor sobrecalentado. Este consta de un rotor de tubo central el cual contiene un arreglo de gran número de discos en paralelo que han sido soldados al tubo central. El resultado de este diseño ofrece una mayor superficie para una mayor cantidad de evaporación en un diseño compacto.

El funcionamiento de este secador es el siguiente: El material a secar se introduce por un extremo del secador y mientras que la humedad se evapora, el material es transportado hasta el otro extremo y se descarga a través de un tornillo de velocidad variable [35].

La velocidad de transporte varía de un punto a otro y se puede ajustar mediante el uso de diferentes palas y diseños de agitador.

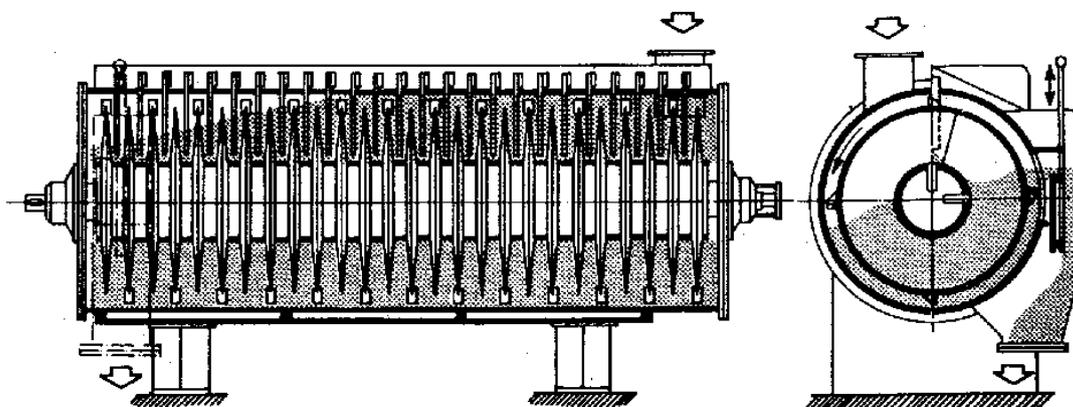


Figura 23. Corte transversal y longitudinal de secador rotadisco
Fuente: FAO Extraído de: <http://www.fao.org>

2.2.1.1.1 Secador Rota Disco RCD

La alta capacidad de evaporación y placas calefactoras lisas son características de este secador [36]. El diseño consiste de canales concéntricos, que da como resultado una superficie lisa para un suave y eficiente secado.

Los secadores RCD son especialmente utilizados para productos bajos en grasas o desgrasados, como la sangre de animales o en plantas de harina de pescado.

2.2.1.1.2 Secador Rota Disco HM

El diseño es simple pero robusto, consiste en dos placas redondas las cuales forman doble camino. Está especialmente diseñado para aplicaciones de trabajo pesado como cocinado y secado de productos que derivan de animales. La dimensión del rotor y los discos depende del producto a ser secado. Este secador es utilizado para una gran variedad de productos, principalmente para biomasa [36].

2.2.1.2 Secador Rota Tubo

Es un secador de vapor compacto de biomazas en base a proteínas, como la harina de pescado y granos luego de la destilación, proporcionan alta capacidad de evaporación y alta calidad del producto.

Es un secador indirecto construido con un tambor rotativo con palas de elevación internas que distribuyen el producto y una superficie de calentamiento que esté compuesto por tubos en paralelos al rotor y calentados por vapor. El producto se transporta a través del secador por gravedad, se mezcla y desliza hacia la salida por el movimiento giratorio de la secadora [37].



Figura 24. Secador Rota Tubo

Fuente: Foto capturada por Héctor M. Sandoval Juarez

2.2.1.3 Secador Continuo Condi

Es un secador ideal con bajas temperaturas de secado y controlables para mantener las proteínas, y da como resultado, productos de alta calidad. El secador está diseñado para el secado continuo de sangre, plumas o harina de pescado y otros productos bajos en grasa [38].

Esta máquina es de acero inoxidable, lo cual le da mayor solidez y durabilidad. El rotor tiene acoplados bobinas concéntricas que contienen el vapor calentado y paletas que transportan el material. La temperatura, contenido de humedad, tiempo de retención, así como un flujo constante se pueden controlar fácilmente y pueden cambiar de acuerdo a las necesidades específicas del producto.



Figura 25. Secador Continuo Condi

Fuente: Sifakas. Extraído de: <http://konstantinos-sifakas.gr>

2.2.2 Secadores Directos

Son cilindros rotatorios dispuestos con una ligera inclinación sobre rodillos para tener este movimiento, en donde el flujo en el interior del cilindro se hace generalmente en contracorriente para favorecer altas temperaturas en el aire o gas de combustión; con este flujo, los gases calientes pueden ceder mayor cantidad de calor al material húmedo que entra al equipo. Interiormente el cilindro posee aletas para permitir el arrastre y volteo del material que se carga por el extremo superior y, aprovechando la gravedad y el movimiento rotatorio, se descarga en la parte inferior.

Este tipo de secadores es alimentado con gas o petróleo, tiene una cámara de combustión cilíndrica. El aire o vapor sobrecalentado se descargan dentro de una cámara de mezclado donde se mezclan con el resto del total del aire.

Las desventajas de este equipo es que produce una mayor cantidad de cenizas, no eficiente en la conservación de las proteínas, y es difícil desarrollar un control, porque no se mantienen temperaturas uniformes.



Figura 26. Interior de secador rotatorio directo

Fuente: Enercom (2016) Extraído de: <http://enercom.cl>

2.2.2.1 Secador con Aire Caliente

En estos secadores los gases calientes de la combustión estarán en contacto directo con la harina de pescado, estos serán los que calentarán los sólidos. Para obtener una combustión completa, de manera que no se produzca una corriente gaseosa humeante, se puede regular la relación aire/gas en un margen de 3:1, manteniendo el máximo caudal de aire y pudiéndose alcanzar una variación de 10:1 en el caudal de gas.



Figura 27. Secador directo de aire caliente construcción
Fuente: Enercom (2016) Extraído de: <http://enercom.cl>

2.2.2.2 Secador con Vapor Sobrecalentado

Los últimos secadores directos no utilizan aire como medio, ni gases no condensables, utilizan vapor sobrecalentado y el consumo es menor. La energía se puede recuperar por equipos de condensación.

2.3 Secador rotatubo de harina de pescado

El secador rotatubo indirecto, es un secador compacto de vapor diseñado específicamente para el secado de biomásas como lo es la harina de pescado; el secador consta de un cilindro rotativo horizontal con cierto grado de inclinación, en las paredes internas tiene palas elevadoras y removedores, como superficie de calefacción a una camisa externa calefactora con revestimiento aislante del ambiente y haces de tubos internos paralelos al cilindro con una configuración concéntrica.

La alimentación del secador se da por la parte superior, la materia avanza a lo largo del secador por medio de la rotación y la pendiente del cilindro. Las paletas internas son elementos arrastrantes y elevadores que mejoran la uniformidad de humedad en el producto y mejora los coeficientes de transferencia de calor y masa, al crear cortinas de materia a través de los tubos. Por lo tanto, la rotación del cilindro cumple 2 tareas distintas: transportar y elevar la materia a lo largo de todo el cilindro.



Figura 28. Interior de secador rotatubos
Fuente: Fotos capturadas por Héctor M. Sandoval Juárez

2.3.1 Componentes

2.3.1.1 Chaqueta y tubos calefactores

La chaqueta envuelve al cilindro interno, tiene como objetivo tener una mayor área de transferencia de calor durante el proceso. El intercambio de energía del vapor saturado que contiene la chaqueta, se da por convección al vaho que fluye en la parte superior y por conducción a las áreas cubiertas por el material húmedo.

Los tubos son la principal fuente de transferencia de energía, pues tiene aproximadamente el 90% de área de transferencia de calor del secado. Estos tubos son los que caracterizan a este secador, pues contiene gran cantidad de tubos distribuidos de forma simétrica con respecto al eje, estos son agrupados para ser alimentados por un solo tubo de vapor saturado.

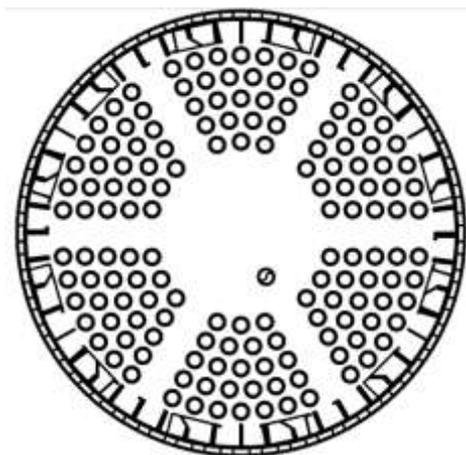


Figura 29. Corte transversal de secador rotatubo
Fuente: Planos del secador rotatubo

2.3.1.2 Suministro de vapor y descarga de condensado

Las secciones calefactoras elevan su temperatura por un flujo constante de vapor saturado que avanza en contracorriente al material. La fuente del vapor saturado son calderas que envía el vapor por tuberías a elevada presión. El vapor llega hasta el eje del cilindro en donde, en la parte externa, hay una junta rotativa, el vapor es transmitido por la parte externa del eje hasta un cilindro que sirve de empalme y distribución a cada uno de los grupos de tubos que ingresan al secador.



Figura 30. Suministro de vapor (izquierda) y descarga de condensado (derecha)
Fuente: Fotos capturadas por Héctor M. Sandoval Juárez

El eje tiene una junta rotativa que comunica un cilindro que contiene el condensado con el exterior, este cilindro recolecta los condensados de los grupos de tubos y de la camisa desde un tubo de retorno auxiliar por la parte interna del secador. Todo el condensado es impulsado por un tornillo sin fin hasta el inicio de eje interior.

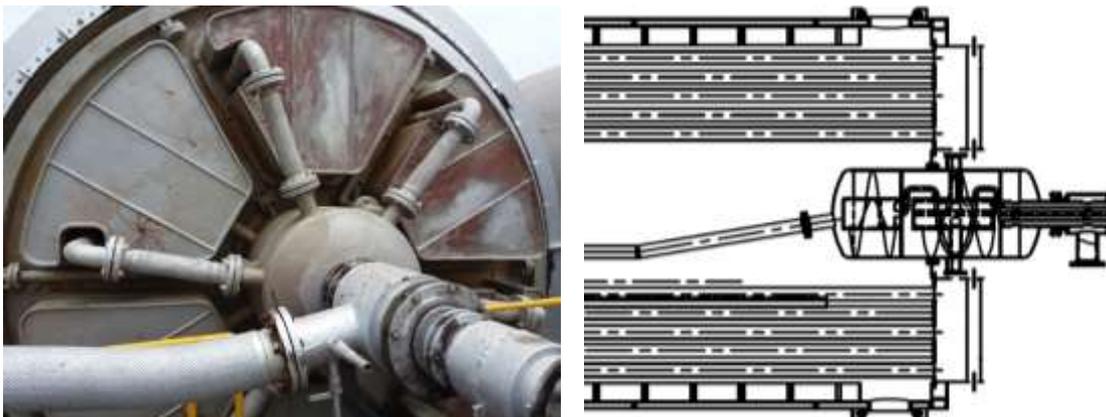


Figura 31. Junta rotativa
Fuente: Foto capturada por Héctor M. Sandoval Juárez y plano del secador rotatubo

2.3.1.3 Cilindro y unidad de accionamiento

El cilindro es soportado en anillos de refuerzo, por dos pares de rodillos flotantes que giran sobre rodamientos y a su vez basculan sobre un eje [37]. Los rodillos flotantes son ubicados de tal forma que el cilindro tenga cierta inclinación desde el extremo de la entrada hacia el extremo de la salida. El cilindro tiene como unidad de accionamiento a un motor el cual transmite el movimiento por medio de correas, un reductor y un juego de accionamiento por cadena en el cilindro. La velocidad del cilindro es constante, por lo tanto la estada de la harina en el secador constante.



Figura 32. Sistema de accionamiento para rotación del cilindro
Fuente: Fotos capturadas por Héctor M. Sandoval Juarez

2.3.1.4 Carga y descarga de material

El material húmedo se ingresa por la parte superior del cilindro por medio de un tornillo sin fin tubular, que se encuentra en posición horizontal, el cual a su vez es alimentado por otro tornillo sin fin, esta serie de tornillos sin fin, es el mecanismo más utilizado en el transporte de la materia a lo largo de toda la planta. Lo encontramos tanto en la zona de carga como en la de descarga.



Figura 33. Tornillos sin fin para carga de material en el secador
Fuente: Fotos capturadas por Héctor M. Sandoval Juarez

2.3.1.5 Aislante de paredes

Es una capa que cubre toda la superficie externa de la chaqueta del secador, su objetivo es disminuir las pérdidas de calor en el secador por fenómenos de convección y radiación a través de las paredes, por ello la diferencia de temperatura entre la superficie del secador y el ambiente es un punto fuerte de pérdida de energía en forma de calor. Las velocidades de viento que hay en las costas, donde se encuentran ubicadas las plantas de harina de pescado, aumenta también la pérdida de energía por el motivo que el coeficiente de calor por convección aumenta al ser forzada y hay una mayor cantidad de masa que hace el intercambio de calor.

Existe una variedad de materiales aislantes que se colocan como un revestimiento sobre el secador, el más utilizado es la lana de vidrio, que es cubierta con planchas de aluminio para evitar su deterioro.

2.3.2 Ventajas del secador rotatubo

- Al aumentar la superficie de convección, hay una mayor eficiencia de transferencia de calor.
- No existe problemas de contaminación de la materia, debido a que no está en contacto con los gases calefactores al desarrollar la transferencia de calor por los tubos y la camisa.
- La humedad y temperatura de la materia se mantiene uniforme a lo largo de todo el secador, al estar en constante movimiento.
- Se da una mejor condición de formación de proteínas al ser un secado lento.
- Mínima pérdida de energía al ser un sistema cerrado.
- Las emisiones como es el vaho pueden ser recuperadas, para evitar la contaminación ambiental y ser utilizadas en los calefactores de agua de cola.
- Bajo coste de mantenimiento, por la poca cantidad de piezas y baja complejidad de los mecanismos.

2.4 Malas prácticas en el proceso de secado

Existe una serie de malas prácticas que se desarrollan a lo largo del proceso de la harina de pescado, como en el uso de la energía y condiciones necesarias para obtener una harina de mejor calidad, es debido a que la industria no cuenta con sistema de monitoreo en línea de los parámetros y optimización de la energía que se usa. Los operarios que manipulan las maquinas toman decisiones según su experiencia y la data que le administra el laboratorio. Por lo que se deben identificar estas prácticas, para darle solución a partir de un autómata e implementar estrategias de control.

2.4.1 Someter a altas temperaturas la harina de pescado

Las temperaturas altas y tiempos prolongados de secado disminuyen la disponibilidad de aminoácidos por formación de productos de Maillard[18].

En la práctica el dämper de la salida del vaho y el del vapor saturado que ingresa al secador es manipulado considerando la carga y la humedad, pero no consideran la temperatura en que se encuentra la harina al contacto con la pared y el vaho.

2.4.2 Mezclar harinas de diferentes calidades

Al no obtener la humedad requerida por el cliente al final del proceso se opta por mezclar harinas con diferentes humedades hasta obtener lo requerido. Esto no es bueno debido a que la mezcla no llega a una homogeneidad total, lo que hace que en el almacén produzca un más rápido deterioro de la harina.

2.4.3 Reprocesar la harina

Las primeras toneladas de harina de pescado al iniciar el proceso son recicladas y luego reprocesada, debido a que no se conoce la humedad con la que saldrá la harina, así que es guardada para ser añadida en alguna de las etapas de secado.

2.4.4 Control On, Off

Las plantas, al iniciar el proceso, prenden las máquinas variando sus variables controlables según su experiencia y el flujo aproximado que va a ingresar. Por lo que no se tiene un control de los parámetros (temperatura, humedad y flujo) de la harina y del vaho. Esto causa que no se tenga un control adecuado de la energía utilizada para el secado ni las condiciones óptimas para que se formen las proteínas.

Capítulo 3

Principios y fundamentos del Secado

La definición más sencilla del secado es el removimiento térmico de la humedad en una sustancia, lo cual nos da una amplia lista de sistemas que se pueden utilizar para remover de forma parcial o total la humedad que se encuentran dentro de las sustancias. Cada equipo o técnica para la remoción humedad es estudiada para que no se altere su composición química durante el secado.

Para remover estas pequeñas partículas húmedas que se encuentran alojadas en la superficie, pequeños poros o microestructuras que forman los sólidos, se le transfiere energía en forma de calor (convección, conducción o radiación) de los fluidos que se encuentran en su entorno, tomando en consideración condiciones de temperatura externa, humedad y flujo de aire, área de superficie expuesta, y presión. Pero también es importante conocer el movimiento interno de la humedad del sólido, pues está en función de la naturaleza interna del sólido, la temperatura, y su humedad contenida, cada uno de estos factores pueden ser limitantes de la velocidad de secado [39].

Por lo cual el secado se vuelve un fenómeno complejo de analizar al no solo depender de la transferencia de masa y energía sino también de fenómenos como la absorción, hinchamiento y reducción, teniendo en cuenta las consideraciones antes tomadas.

3.1 Condiciones Externas

Es importante conocer las variables externas (temperatura, humedad, velocidad, dirección del flujo de aire y forma física del sólido) del secado [1], pues de estas variables dependen los coeficientes de transferencia de calor y masa. Estas dos transferencias van de la mano por lo que se debe tener bien en cuenta las características de energía interna, entalpía y calores específicos.

3.1.1 Entalpía

Toda sustancia tiene energía interna, movimiento y posición relativa lo cual se puede representar como una propiedad, la entalpía, la cual se presenta con el símbolo h [40]

$$h = u + Pv \quad (3.1)$$

O también,

$$H = U + PV \quad (3.2)$$

Tanto la entalpía total H , como la entalpía específica h , representan la entalpía, pero se identificará si es una de ellas según el contexto o los cálculos. Tanto los valores absolutos de la entalpía como de la energía interna no son conocidos en las sustancias, por lo cual es conveniente hallar los valores relativos con respecto a otras condiciones [1].

3.1.2 Calores específicos

El calor específico se define como la energía requerida para aumentar una unidad de temperatura a una unidad de masa. Existe dos clases de calores específicos: calor específico a volumen constante c_v y calor específico a presión constante c_p .

En los sistemas de secado normalmente la presión es constante, entonces para los cambios diferenciales en la entalpía h de un gas ideal se pueden expresar como [39]

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (3.3)$$

Para los cálculos de secado es conveniente el uso de un valor medio de temperatura

$$\bar{c}_p = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_p = \frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (3.4)$$

El valor de c_p en función de la temperatura se puede representar como un polinomio de 3°orden como se ve en las equivalencias c_p del Anexo F, con un porcentaje de error.

3.1.3 Equilibrio térmico en cambio de fase

Los sistemas aislados evolucionan de forma espontánea hasta alcanzar el equilibrio, como es el caso de un líquido expuesto a un gas seco, el líquido se evapora y pasa a estado gaseoso. Si asumimos al vapor como un gas ideal podemos utilizar la ecuación universal para gases ideales.

$$P_W V = \frac{m_W}{M_W} RT \quad (3.5)$$

Al centrarnos en el estudio del equilibrio de fases del agua, se dibuja las curvas en un diagrama bidimensional de presión y temperatura.

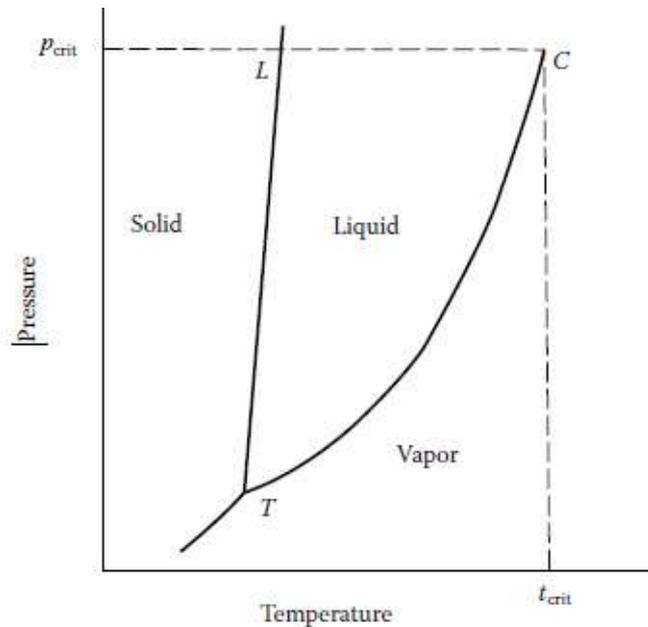


Figura 34. Diagrama de gases del agua saturada
Fuente: A. S. Mujumdar (2014)

En este diagrama se identifica el área donde esta sustancia pura se encuentra en cada uno de sus estados, y qué se debe hacer para que este cambie de fase. En la intersección de las 3 curvas de cambio de fase se encuentra el punto triple, es donde las 3 fases coexisten, además existe un crítico que indica el máximo valor donde pueden coexistir 2 fases en equilibrio, en este punto ya no se puede cambiar la fase solo variando la temperatura o la presión.

3.1.4 Mezclas de vapor y gas

Cuando una mezcla de gases está en contacto con una superficie en estado líquido, el líquido transfiere masa hasta que la presión parcial del vapor en la mezcla de gases sea igual a la presión del vapor del líquido. En el caso del secado, el gas utilizado es aire y el líquido utilizado es el agua, por lo tanto, como el vapor contenido es variable es mejor tomar como base a la cantidad de gas.

Es necesario tener un análisis detallado de la mezcla de vapor y gas de [39], esto es debido a que sus correlaciones serán muy importantes en el cálculo del secado. La humedad contenida o humedad absoluta Y es una mezcla de vapor de agua y gas, la cual puede ser expresada por

$$Y = \frac{m_W}{m_G} \quad (3.6)$$

Donde, m_W es la masa de vapor de agua y m_G es la masa de gas (aire). Usando la ley de gases fraccionarios para el volumen V y la temperatura T .

$$m_G = \frac{p_G V}{RT} M_G \text{ y } m_W = \frac{p_W V}{RT} M_W \quad (3.7)$$

Y usando la ley de Dalton de presiones parciales

$$P = p_W + p_G \quad (3.8)$$

Se obtiene

$$Y = \frac{p_W}{P - p_W} \frac{M_W}{M_G} \quad (3.9)$$

Se dice que el gas está saturado cuando se llega al equilibrio de transferencia de masa entre el líquido y el gas, es decir cuando la presión parcial del vapor en el gas es igual a la presión del vapor del líquido, por lo cual la humedad absoluta saturada es denotada

$$Y = \frac{p_W}{P - p_W^0} \frac{M_W}{M_G} \quad (3.10)$$

Otra relación importante es la humedad relativa ψ de la mezcla de vapor y gas, nos indica la relación entre la presión parcial del vapor y la presión de saturación de vapor a la misma temperatura, la cual está dada por

$$\psi = \frac{p_W}{p_W^0} \quad (3.11)$$

También puede ser representada como

$$Y = \frac{M_W}{M_G} \frac{\psi p_W^0}{P - \psi p_W^0} \quad (3.12)$$

El valor de p_W^0 se obtiene a partir de la Ecuación de Antoine

$$\ln p_W^0 = 11.75896 - \frac{3878.8223}{T - 43.289} \quad (3.13)$$

3.1.5 Mezclas de vapor y gas insaturados

Cuando la presión parcial del vapor de una mezcla de gas y vapor es menor a la presión de saturación se considera un gas insaturado. Esta mezcla es la que se considera para el secado de sólidos húmedos, por lo cual se utiliza la psicometría que es la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y las cartas de humedad para saber la cantidad de aire que se necesita para remover la humedad. Para el estudio de esta mezcla se tiene la necesidad de conocer ciertos conceptos que se encuentran ya definidos

3.1.5.1 Temperatura de bulbo seco

Es la temperatura medida en una mezcla vapor-gas al introducir un termómetro [40].

3.1.5.2 Punto de rocío

Es la temperatura T_D a la cual la mezcla se satura cuando se enfría a presión total constante sin contacto con el líquido [40]. Si la mezcla se enfría a una temperatura inferior se precipita líquido de la mezcla vapor-gas, y permanecerá siempre saturada la mezcla.

3.1.5.2.1 Volumen húmedo

Es el volumen de la mezcla vapor-gas por unidad de masa a una presión total P y temperatura T_G [39]. Considerando a la mezcla como un gas y con humedad absoluta Y el volumen húmedo es

$$V_H = 0.082 \left(\frac{1}{M_G} + \frac{Y}{M_W} \right) \frac{T}{P} \quad (3.14)$$

3.1.5.2.2 Calor húmedo

El calor húmedo c_{pY} es el calor requerido para aumentar 1 °K a la temperatura de la masa unitaria del gas y la presión del vapor a presión constante [40]. Para una mezcla de humedad absoluta Y

$$c_{pY} = c_{pG} + c_{pW}Y \quad (3.15)$$

3.1.5.2.3 Entalpía de gas húmedo

Es una propiedad que se halla de la suma de las entalpías de los elementos que constituyen el gas húmedo y otros efectos [39].

$$i_G = h_B + Yh_W + \Delta h_M \quad (3.16)$$

Δh_M es la entalpía residual que representa solamente el 1% de i_G , por lo cual se obvia en los siguientes cálculos. Una forma sencilla de representar es

$$i_G = c_{pY}(T_G - T_D) + \Delta h_{v0}Y \quad (3.17)$$

La ecuación solo puede ser utilizada para humedades menores al 0.05kg/kg . Por lo cual una correcta ecuación al pasar del estado líquido al estado gaseoso se describe de la siguiente manera

$$h_W = c_{lW}(T_D - T_0) + \Delta h_{vD} + c_{pW}(T_G - T_D) \quad (3.18)$$

El valor de Δh_{vD} puede ser aproximada a partir de Δh_{v0} la cual es evaluado en T_0

$$\frac{\Delta h_{vD}}{\Delta h_{v0}} = \left(\frac{T_D - T_C}{T_0 - T_C} \right)^{1/3} \quad (3.19)$$

3.2 Condiciones Internas

Debido a las gradientes de temperatura y humedad ocurre la transferencia de masa y calor entre los sólidos y el vapor, por lo tanto, son los procesos por lo que produce el secado. La migración de humedad ocurre desde la superficie de los sólidos donde aparecen diferentes fenómenos por causa del secado como la difusión, flujo capilar y presiones internas establecidos por la contracción durante el secado. En el interior del sólido después de pasar la humedad crítica existe un factor de control importante que se multiplica para establecer la nueva velocidad de secado en función de la humedad.

3.2.1 Humedad contenida en los sólidos

La humedad en los sólidos es el líquido disuelto, el cual ejerce presión dependiendo de la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido y la temperatura. Por lo tanto, si al sólido húmedo se le expone a una corriente continua de gas fresco, el sólido perderá o ganará humedad dependiendo de la humedad del gas y la humedad del sólido, hasta que el contenido de humedad se encuentre en equilibrio. La humedad en el equilibrio para una especie dada de sólido puede depender del tamaño de partícula o de la superficie específica [40]. La presión parcial en el equilibrio para un sólido es independiente de la naturaleza del gas seco, siempre que este último sea inerte frente al sólido y sea la misma presión en ausencia de gas no condensable. La mejor clasificación de los sólidos está dada por [41]:

- Sólidos capilares no higroscópicos en medios poroso
- Sólidos higroscópicos en medios porosos
- Sólidos en medios Colloidales (No porosos)

Cuando el sólido tiene cambios en la humedad también produce cambios en su volumen por lo cual el contenido humedad es expresada con el contenido de la masa de la humedad en proporción a la masa del material seco X , otras veces en proporción al contenido de masa del material húmedo W .

$$X = \frac{m_W}{m_S}, W = \frac{m_W}{m_S + m_W} = \frac{m_W}{m_m}, X = \frac{W}{1 - W} \quad (3.20)$$

3.2.2 Isotermas de humedad

Las isotermas de sorción son medidas experimentalmente en condiciones isotérmicas los cuales se utilizan para describir las propiedades higroscópicas de un producto [41]. Los diferentes productos varían ampliamente en sus propiedades higroscópicas. La razón de esto es que su estructura molecular, su solubilidad, y la extensión de superficie reactiva son diferentes en cada material.

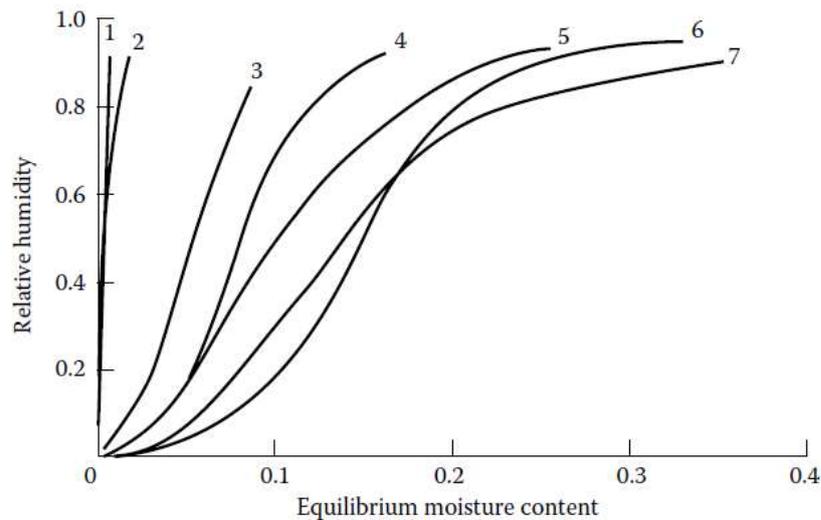


Figura 35. Curvas isotermicas típicas de humedades en equilibrio de las sustancias: (1) fibras de asbesto, (2)PVC(50°C), (3) madera, (4) papel Kraft, (5) jute, (6) trigo, (7) papas
Fuente: A. S. Mujumdar (2014)

Sorción del agua (desorción y absorción) de manera isotérmica es importante en la determinación del alcance de un secado o un proceso de humidificación que puede funcionar bajo un sistema definido de humedad relativa y la temperatura en el ambiente [42].

3.2.3 Histéresis

La curva de absorción para la misma temperatura puede no ser idéntica a la de desorción, y este fenómeno se llama sorción de histéresis. Este fenómeno puede ser influido por el área de la superficie del material en función de si la absorción de agua o desorción está involucrada [42].

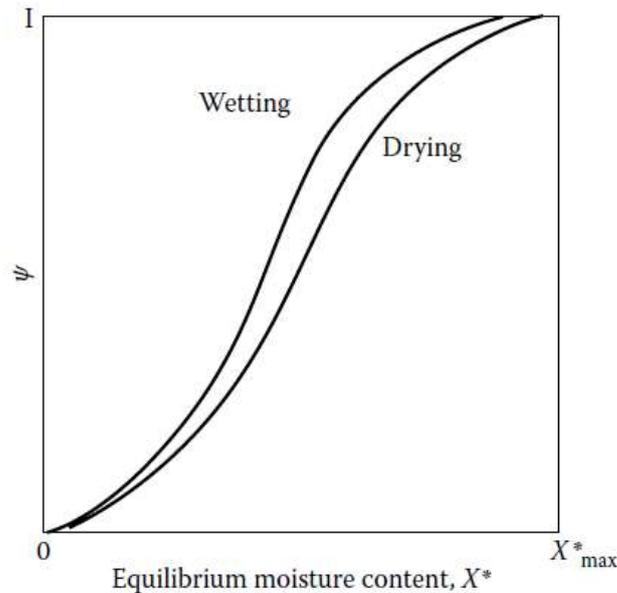


Figura 36. Isotermas de humedad y secado para un sólido higroscópico típico
Fuente: A. S. Mujumdar (2014)

3.2.4 Entalpía del sólido húmedo

El sólido húmedo está compuesto por varias materias sólidas (proteínas, grasa, carbohidratos, fibras y cenizas) y el líquido disuelto que es el agua. Todas las materias sólidas serán representadas por un solo valor del coeficiente del calor específico y el agua aparte, pues depende de la humedad, y se resta el valor del calor latente de sorción que depende de la humedad para obtener la entalpía de los sólidos húmedos [43]

$$i_m = (c_s + c_{Al}X)T_m - \Delta h_s X \quad (3.21)$$

Los coeficientes de los calores específicos del sólido seco c_s son usualmente representados por polinomios dependientes de la temperatura (Anexo F).

El valor equivalente de c_s se puede estimar a partir de la siguiente ecuación que es la suma de los calores específicos de sus compuestos multiplicados por su fracción de peso f .

$$c_s = f_{prot}c_{prot} + f_{grs}c_{grs} + f_{carb}c_{carb} + f_{fib}c_{fib} + f_{cenz}c_{cenz} \quad (3.22)$$

3.3 Transferencia de Calor

Es la velocidad de intercambio de calor entre cuerpos relativamente fríos o calientes los cuales se comportan como fuentes o receptores de este tipo de energía. Los cambios de energía en cada proceso son diferentes dependiendo de la fase o estado que se encuentre, pues esto da una referencia de la energía que contiene por sus diferentes órdenes de magnitud en las propiedades térmicas. La dirección de la transferencia de calor se da del cuerpo más caliente hacia el más frío.

Cada cuerpo expuesto a un intercambio de energía tiene sus propias peculiaridades, puede existir un cambio de energía sin contacto como es la radiación, o en fluidos en contacto dinámico con una diferencia de energía, o en sólidos en contacto relativamente estáticos uno respecto al otro como mínimo un diferencial de energía en forma de calor.

3.3.1 Conductividad

La conductividad se da a través de materiales que se encuentran en contacto y estacionarios, que tiene como ecuación general para una sola dimensión a

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.23)$$

donde k es una constante proporcional llamada constante conductividad térmica [$W/m K$] y A es el área de la superficie en contacto. El valor de conductividad térmica está en función de la temperatura del material, por lo que existen tablas experimentales por cada uno de los materiales que normalmente son sustancias puras o también puede ser dado por polinomios que se aproximan a los valores. En muchos de los casos para encontrar la conductividad de los materiales se utiliza el concepto de resistividad térmica R que es igual a la inversa de la conductividad térmica $1/k$.

La conductividad en los alimentos depende de su composición que generalmente consiste en grasas, proteína, minerales, agua y otros componentes volátiles en menor volumen [42]; la suma de las fracciones de los componentes con que está hecha los alimentos es multiplicada por su resistividad térmica, esto nos da un aproximado de la resistividad térmica única de los alimentos.

La conducción o secado indirecto es lo más apropiado para productos finos o sólidos muy húmedos, como ocurre en los secadores de pasta, secadores rotatorios con tubos internos y secadores de tambor (*drum dryers*) para el secado de sólidos finos [43], estos secadores tienen alta eficiencia de transferencia de calor por la conducción que se da en su interior.

3.3.2 Convección

La convección es una transferencia de calor entre fluidos que están relativamente fríos o calientes al ser mezclados, lo cual se puede dar por convección natural que es causada por movimientos del fluido de forma natural, como es el efecto de flotación por las diferencias de densidades, esto hace que normalmente ascienda los fluidos más calientes (menos densos) y los fluidos más fríos (más densos) se mantengan en la parte baja de los contenedores; también se puede dar la transferencia de calor por convección forzada donde los fluidos son obligados a desplazarse con ayuda de ventiladores, agitadores o bombas a través de otros medios. Este tipo de transferencia de calor se puede describir con la siguiente ecuación

$$\dot{Q}_{conv} = jA\Delta T \quad (3.24)$$

donde j es el coeficiente de transferencia de calor por convección, que es la razón de transferencia de calor entre la superficie sólida y un fluido, este término no es propiedad del material, el valor no solo está en función de la temperatura y la presión, depende también de la mecánica de los fluidos que están en movimiento, por lo cual está ligado a la geometría, la viscosidad, la compresibilidad y el régimen hidrodinámico (laminar o turbulento), y en los fluidos turbulentos es importante conocer la intensidad de la turbulencia y la rugosidad de la superficie del sólido. Desde un punto de vista de transferencia de calor se pueden ordenar por su velocidad de transferencia de acuerdo a su mecanismo [44]

Conducción < Convección natural < Conv. forz. laminar < Conv. forz. turbulenta

La convección es el más común modo de secado por la afirmación anterior, donde el aire es la fuente de calor para calentar la superficie de los sólidos.

En el procesamiento de alimentos es muy importante saber qué tan rápido se calientan o enfrían estos por convección, lo cual es determinado por el tamaño característico [42]

$$L_c = \frac{V}{A} \quad (3.25)$$

Para una lámina infinita de espesor 2δ , $L_c = \delta$; para un cilindro de longitud infinita de radio R , $L_c = 0.5R$; para una esfera de radio R , $L_c = R/3$. Estos valores sirven para hallar el valor de Biot.

$$Bi = \frac{jL_c}{k} \quad (3.26)$$

Cuando el valor de Bi es menor a 0.1, significa que la resistencia interna es menor al 10% de la resistencia externa, por lo que se puede considerar que la temperatura es uniforme en todo su volumen.

3.3.3 Radiación

La radiación es emitida por todo cuerpo caliente. Cuando la radiación es emitida por una fuente hacia un receptor, parte de la energía es absorbida y parte reflejada. La velocidad de energía emitida por energía electromagnética (radiación), está dada por la ecuación de Stefan-Boltzman.

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma AT^4 \quad (3.27)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzman $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, y T es la temperatura del cuerpo negro.

La radiación infrarroja se usa para secar recubrimientos, láminas delgadas y películas. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua: a medida que el producto se hace más seco, se utiliza menos energía. El capital, así como los costos de operación son altos, por lo que estas técnicas son útiles para secar productos de alto valor

unitario o para la corrección final del perfil de humedad en el que sólo se eliminan pequeñas cantidades de humedad difícil de obtener [41].

3.4 Rapidez de secado

La transferencia de masa para el secado se da por medio de 2 formas: La vaporación y la evaporación. La evaporación ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en los sólidos supera la presión atmosférica y la tensión superficial, esto se logra elevando la temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. La vaporización ocurre en todo momento, la velocidad y dirección de transferencia de masa es proporcional a la temperatura del aire que pasa por encima de los sólidos, en este caso la presión de saturación del vapor de la humedad que está en la superficie del sólido es menor que la presión atmosférica.

3.4.1 Curva de rapidez de secado

El secado tiene una curva característica para condiciones de secado contante como se indica en [40], [41] esta curva tiene 3 etapas:

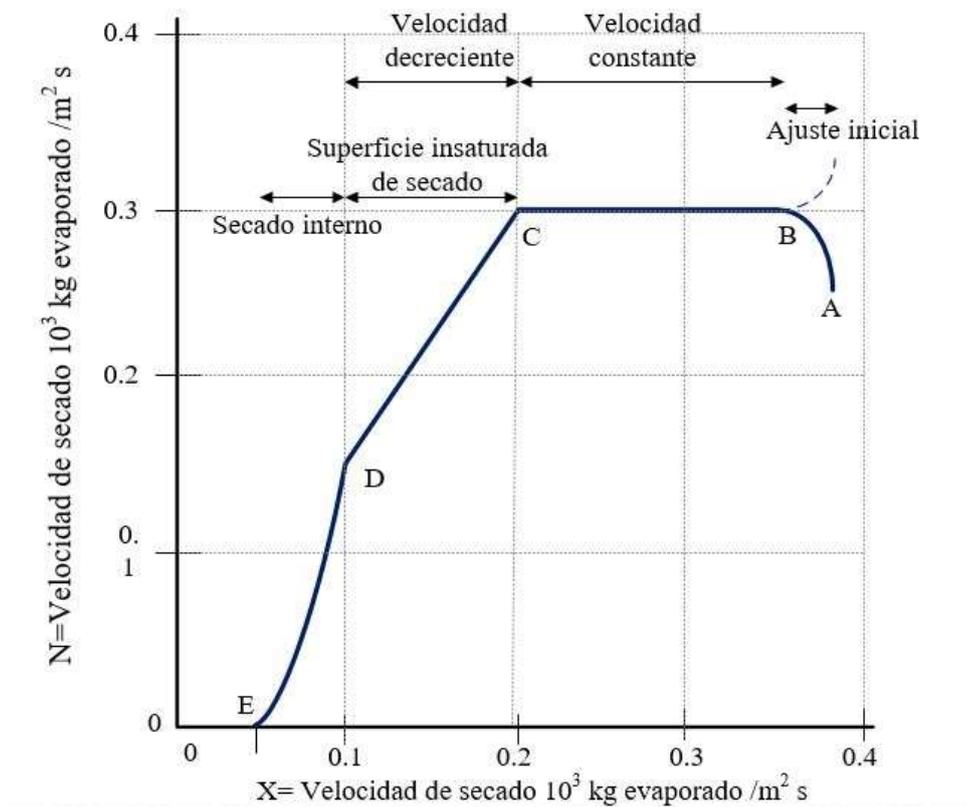


Figura 37. Curva típica de velocidad de secado a condiciones constantes

Fuente: R.E. Treybal (1988)

Elaboración: Héctor M. Sandoval Juarez

En la primera etapa la rapidez de secado es constante, debido a que normalmente en la superficie se encuentra una capa delgada de líquido, que se le atribuye como humedad total no ligada. La rapidez a la cual se evapora el agua se puede poner en función del

coeficiente de transferencia de masa k_Y y la diferencia entre la humedad absoluta en equilibrio con la superficie del sólido Y^* y la humedad absoluta por base seca Y .

$$w_{DI} = k_Y(Y^* - Y) \quad (3.28)$$

Se mantiene un equilibrio del flujo de calor en el entorno a la superficie que es igual a la absorción de calor de la humedad con lo que se produce la evaporación, por lo tanto Y^* se mantiene constante. En la parte final del periodo de velocidad constante, la humedad es transportada desde el interior del sólido a la superficie por fuerzas capilares e intersticios del sólido, lo cual ayuda llevar a la superficie líquido tan pronto se evapora este, con lo cual se mantiene constante la velocidad de secado hasta cuando el sólido alcanza el valor de X_{cr} el contenido crítico de humedad del sólido, de tal forma que la película delgada de la superficie del sólido produce puntos secos, sin embargo, la tasa se calcula con respecto a la superficie total de superficie sólida, la rapidez de secado cae aunque la tasa por unidad de área de superficie sólido húmedo se mantiene constante. Esto da lugar a la segunda etapa de secado o la primera parte del periodo de velocidad decreciente, el periodo de secado superficial no saturada. Esta etapa transcurre hasta que la película superficial del líquido se evapora por completo. Esta parte de la curva puede faltar por completo, o puede constituir la totalidad del período de velocidad decreciente.

El segundo periodo decreciente de rapidez de secado, se da porque la rapidez con la cual se puede mover la humedad a través del sólido disminuye, a causa de los gradientes de concentración que existe entre las partes más profundas, lo cual es el paso controlante. Es decir, la rapidez de secado es controlado por la difusión de la humedad de adentro a la superficie, durante esta etapa una parte de la humedad ligada es removida por la sorción. La rapidez de secado sigue disminuyendo hasta el valor de equilibrio X^* para la humedad de aire predominante y el secado se detiene.

Como se indica en [40] cuando el material tiene gran cantidad de humedad, el producto puede contener gran cantidad de humedad no ligada con lo que puede producir un extenso periodo de rapidez constante. Pero en la mayor parte de los casos ocurren ambos fenómenos.

También indica que durante el periodo de rapidez decreciente varía con el cuadrado del espesor del material, por lo que es conveniente la granulación de la materia prima utilizando agitadores o el uso de capas delgadas en el caso de secadores de bandejas de flujo cruzado.

3.4.1.1 Coeficiente de transferencia de masa

Se ha observado que cuando un fluido fluye en una superficie sólida, en condiciones en donde por lo general prevalece la turbulencia, la región contigua a la superficie es laminar, al alejarse se encuentra el flujo turbulento, en donde existe cierta cantidad de sustancia disuelta. Debido a que en el flujo turbulento hay remolinos que se mueven con mayor rapidez, el proceso de transferencia de masa es más rápido [40].

Los fluidos turbulentos son los que más se encuentran en situaciones prácticas útiles, para estas situaciones no es posible calcular coeficientes de transferencia de masa, debido a la imposibilidad para describir matemáticamente las condiciones de flujo, por ello se confía en los datos experimentales, pero estos datos se dan para ciertas condiciones y/o rangos de las propiedades del fluido.

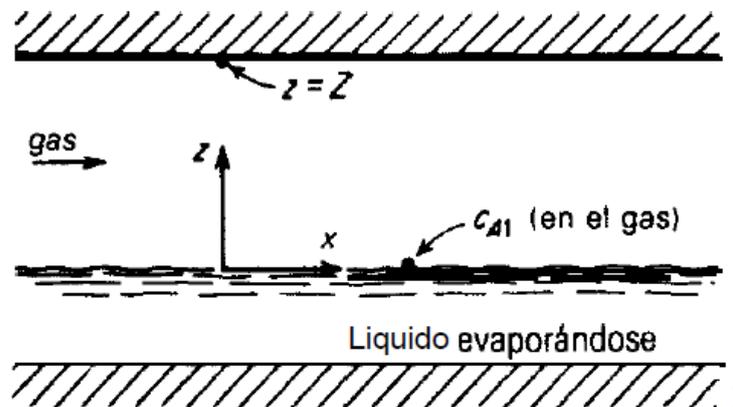


Figura 38. Transferencia de masa a un fluido confinado
Fuente: R.E. Treybal (1988)

Debido a que la concentración puede definirse de diversas maneras y como no se han establecido estándares, existen distintos coeficientes para la transferencia de A a través de B para cada situación:

$$w_{DI} = k_G(\bar{p}_{A1} - \bar{p}_{A2}) = k_Y(y_{A1} - y_{A2}) = k_Y(c_{A1} - c_{A2}) \quad (3.29)$$

Como vemos se puede definir en función de la presión parcial \bar{p}_A , humedad absoluta y_A y concentración c_A . La naturaleza del proceso de transferencia de calor es muy semejante a la transferencia de masa por lo cual es muy importante tenerlo en cuenta para el razonamiento de obtener los coeficientes.

Hay relaciones analógicas entre coeficientes que caracterizan a la convección de calor y la convección de masa mostradas en la Tabla 3.

Como se afirmó antes es difícil hallar de manera matemática el valor de h_{masa} que está bien representado por k_Y , estos se hallan en forma experimental y se pone en función de estos coeficientes anteriores para ciertos intervalos.

Tabla 3. Grupos adimensionales correspondientes de transferencia de masa y calor

N°	Convección de Calor	Convección de Masa
1	Coefficiente de transferencia de calor h_{conv}	Coefficiente de transferencia de masa h_{masa}
2	Número de Reynolds $Re = \frac{uL_c}{\nu}$	Número de Reynolds $Re = \frac{uL_c}{\nu}$
3	Número de Prandtl $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	Número de Schmidt $Sc = \frac{\nu}{D_{eff}}$
4	Número de Nusselt $Nu = \frac{h_{conv}L_c}{k}$	Número de Scherwood $Sh = \frac{h_{masa}L_c}{D_{eff}}$
5	Número de Grashof $Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2}$	Número de Grashof $Gr = \frac{g(\rho_\infty - \rho_s)L_c^3}{\rho\nu^2}$
6	Número de Stanton $St = \frac{h_{conv}}{\rho u c_p}$	Número de Stanton $St = \frac{h_{masa}}{u}$

Fuente: R.E. Treybal (1988)

3.4.2 Características de la Curva de Rapidez de Secado

En cada tipo de sólido hay una curva que los caracteriza, pero estos se hallan para condiciones determinadas y son representadas por una función de la medida en que el secado se ha dado. [40], [41] obtienen ecuaciones similares para representar a estas curvas, pero para un mejor manejo y estudio de las curvas son normalizadas con respecto a la velocidad de secado inicial y el contenido medio de humedad, con ello todas las curvas pueden ser aproximadas a menudo a una sola curva "característica" de una sustancia particular. Con lo cual obtenemos las variables normalizadas, la f velocidad de secado característica y el Φ contenido de humedad característica,

$$f = \frac{w_D}{w_{DI}} \quad (3.30)$$

$$\Phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} \quad (3.31)$$

Para estas curvas características se debe tener en cuenta que el contenido crítico de humedad X_{cr} es invariable e independiente del contenido de humedad inicial y las condiciones externas.

Como lo afirman en [41] el criterio es bastante restrictivo, por la gran cantidad de condiciones, pero es bastante utilizado para identificar el comportamiento de la curva de la rapidez de secado o contenido de humedad como es en [45] donde hace comparaciones de los datos teóricos con los experimentales de materiales porosos granulares, donde aplica por una función de corrección a la rapidez de secado el cual varía en función de Φ , con lo cual se obtiene un mejor ajuste de las curvas como se ve en las gráficas.

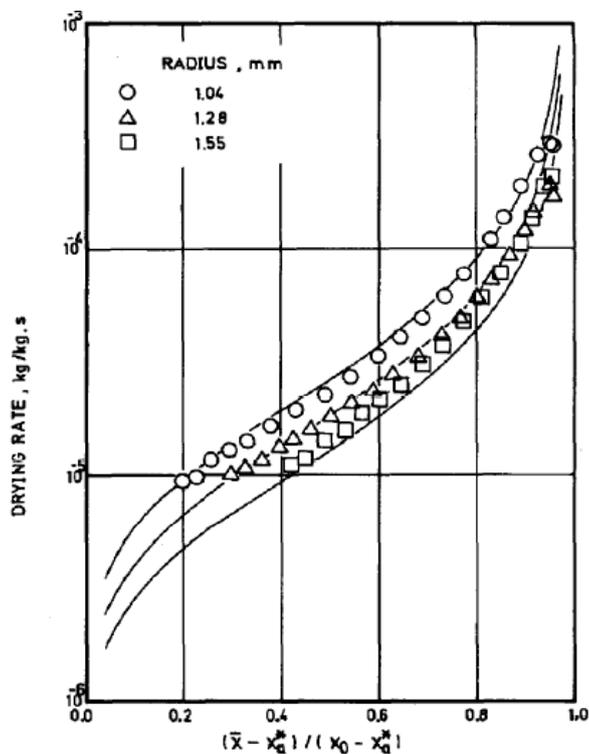


Figura 39. Comparación de curva de secado experimental y calcula de sólidos porosos
Fuente: A. Hallström & R. Wimmerstedt (1983)

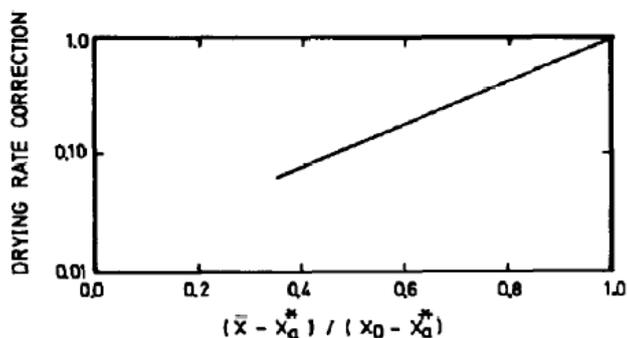


Figura 40. Funcion de correction de la curva de secado
Fuente: A. Hallström & R. Wimmerstedt (1983)

El valor de f está en función de Φ , con lo cual se puede ajustar a diferentes formas de los sólidos, donde [46] propone una función bastante utilizada. El cual divide la zona de rapidez de descenso en 2 secciones:

$$f = \Phi^{a-c}, \quad \Phi \leq \Phi_B \quad (3.32)$$

$$f = \Phi^a, \quad \Phi > \Phi_B \quad (3.33)$$

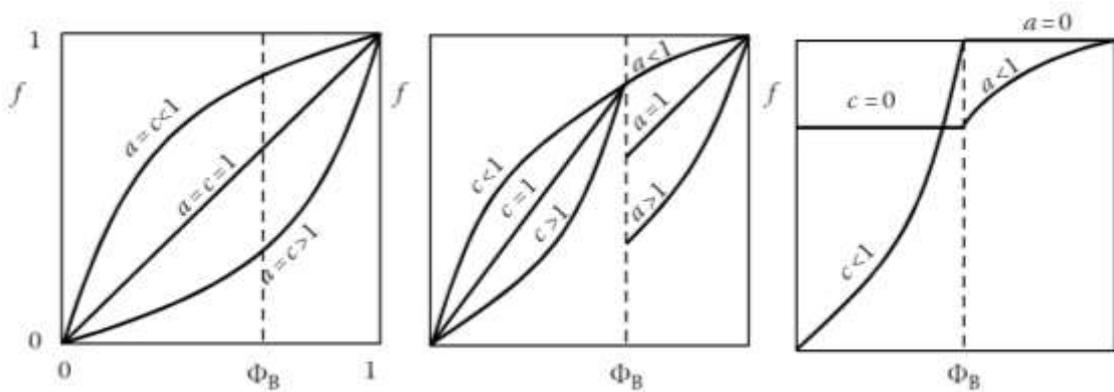


Figura 41. Curvas de las influencias los parametros a y c en las ecuaciones (3.32)
Fuente: A.S. Mujumdar

Para la cual obtenemos su forma más sencilla en $a = c = 1$

$$f = \Phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} \quad (3.34)$$

Por lo tanto f representaría la pendiente de la zona de descenso de la rapidez de secado. En otros casos como se halla para capas finas en [41]

$$f = - \frac{(1 - \varepsilon)\rho_S(X_{cr} - X^*)}{k_Y(Y^* - Y)a_v} \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.35)$$

Para obtener el valor de f para otros sólidos, se obtiene la rapidez de secado de forma sencilla,

$$w_D = \frac{M_S}{S} \frac{dX}{dt} \quad (3.36)$$

En el caso de secado de materiales poroso granular [45] se obtiene una relación de entre constante de humedad característica para esferas,

$$\Phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} = \frac{1}{\gamma^3} \quad (3.37)$$

en donde γ es la relación entre el radio de la esfera R y el radio del núcleo. La velocidad de secado por área de superficie calcula como el flujo de vapor de difusión estacionaria seudo a la superficie,

$$w_D = \frac{M_w}{N_R T} \frac{1}{R(\gamma - 1)} D_{eff} \Delta p_w \quad (3.38)$$

$\Delta p_w = P \ln((P - p_w)/(P - p_{wc}^*))$ es la *driving force* o el gradiente de concentración en la difusión, p_{wc}^* es la presión de vapor de equilibrio en el núcleo, y p_w es la presión parcial de vapor de agua en el aire. Esta ecuación también puede ser representada como,

$$w_D = \frac{\rho_w}{p_w} \frac{2}{d_p(\Phi^{-1/3} - 1)} D_{eff} \Delta p_w \quad (3.39)$$

y utilizando las ecuaciones (3.28), (3.30)(3.30)y (3.39) se obtiene

$$f = - \frac{\Delta p_w}{p_w} \frac{2}{d_p(1 - \Phi^{-1/3})} \frac{\rho_w D_{eff}}{k_Y(Y^* - Y)} \quad (3.40)$$

3.4.3 Difusividad efectiva de secado

La difusividad de la humedad es una propiedad importante de transporte de masa, esencial para el cálculo y modelización de secado de alimentos. Tan pronto como termina la evaporación a flujo constante, se da inicio a la transferencia de la humedad interna o la resistencia interna a la transferencia de la humedad [47] donde, en materiales porosos, pueden contraerse o formar nuevas estructuras de poros, pero esto depende de cada alimento o material. El fenómeno de la difusión, estrictamente, puede ser encontrado sólo en sistemas muy simples, homogéneos de alimentos, es decir, los grupos primarios. Por el contrario, dentro de los materiales celulares más complejas y heterogéneas, por ejemplo, los sistemas alimentarios o el transporte de la humedad pueden producirse por varios modos, sólo uno de los cuales es difusión.

En el caso de modelamiento de parámetros de distribuidos el valor de difusión efectiva es utilizado para la segunda ley de difusión de Fick, lo cual ayudará a obtener un modelo preciso del sistema. Por lo cual, la difusión efectiva de la humedad es representada por los fenómenos físicos de transferencia de masa. Existen varios modelos que pueden representarla, pero casi siempre es representada por la velocidad de reacción química que tiene la forma de Arrhenius [40]–[42], [47], [48]

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{N_R T}\right) \quad (3.41)$$

Donde se refleja que la difusión efectiva muestra una relación inversa a la temperatura, pero existe una serie de modelos para la descripción de la difusividad de humedad es decir [42]

$$D_{eff} \propto \exp\left(\frac{1}{T}\right) \text{ y } D_{eff} \propto \exp(X) \quad (3.42)$$

También una dependencia de la porosidad, para hallar el valor de difusión efectiva teórica [42]

$$D_{eff} = D_0 \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (3.43)$$

Donde τ es la tortuosidad que normalmente está en función de la porosidad y sirve principalmente para hallar el valor de difusividad. En investigaciones complementarias [49] que hacen la comparación entre dos métodos para partículas porosas, vemos la utilización del número de Fourier para la difusión F_0 que está en función del radio de la partícula.

$$F_0 = \frac{D_0 t}{d_p^2} \quad (3.44)$$

El cual es una formulación planteada por [50] para el fenómeno de difusión dependiente del tiempo en una experiencia de secado. Un modelamiento semejante, usado para el modelamiento de secador directo [51] para hallar su velocidad de secado lo pone en función de F_0 . Además vemos la aplicación de esta formulación para secado rápido en harina de pescado [52] en un intervalo grande de temperatura y humedad, el cual es presentado en la tabla N°1 de [53]. Estos valores hallados de forma experimental o teórica en sus diferentes intervalos serán usados para hallar los valores de la difusión efectiva en forma de Arrhenius. También se adicionará los valores de pescado entero, debido a que la harina de pescado tiene los mismos compuestos con un valor menor de humedad.

Tabla 4. Datos para obtener la difusividad de la harina de pescado

N°	Tipo	T		X		E_a		D_{eff}	
1	H. de Pescado	338	443	0.33	0.55			1.95e-11	1.89e-9
2	Pescado(Mackerel)*	303						3.5e-11	
3	Pescado(Cod)**	303	333	3				8.1e-11	5.13e-10
4	Pescado			0.1		36.96			
5	Pescado(Cod)**	303		0.05	0.3	29.7	36.8	1.3e-11	3.1e-10
6	Pescado	318	343	0.2	0.4	35.65	37.26	8.76e-10	3.21e-09

*El Mackerel es la caballa, un pescado graso como la anchoveta. **El Cod es el bacalao, un pescado blanco con la mayor cantidad de proteínas semejante a la anchoveta (15-19%).

¹⁻³N. M. Panagiotou, M. K. Krokida, Z. B. Maroulis, and G. D. Saravacos (2004) ⁴C. Suarez, P. Viollaz, and J. Chirife (1980) ⁵N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, and D. Marinos-Kouris (2013) ⁶M. Toujani, L. Hassini, S. Azzouz, and A. Belghith (2013)

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 4 contiene valores de los parámetros de la ecuación de Arrhenius, los cuales pertenecen a casos de harina de pescado y pescado, con sus respectivos intervalos de temperatura y humedad. Debido a que no se tiene datos de la anchoveta, se ha utilizado los datos de pescados que contienen una composición semejante; la variación de la difusión efectiva es dependiente de la humedad contenida y su temperatura.

En [54] se indica que para obtener un valor preciso de la energía de activación E_a se debe considerar los fenómenos de la difusión y que está fuertemente ligado al factor de Arrhenius D_0 , porque no se pueden ver de forma separada. Por otra parte, en [51] señala que D_0 es el coeficiente de difusividad de humedad evaluado en el contenido de humedad del sólido inicial si es menor que el contenido crítico. En otro caso D_0 representa el coeficiente de difusividad evaluado en el contenido crítico y complementando como la Figura 42, donde se muestra que la difusividad sigue la tendencia de la humedad contenida. Entendemos que E_a y D_0 dependen de la humedad contenida en el material.

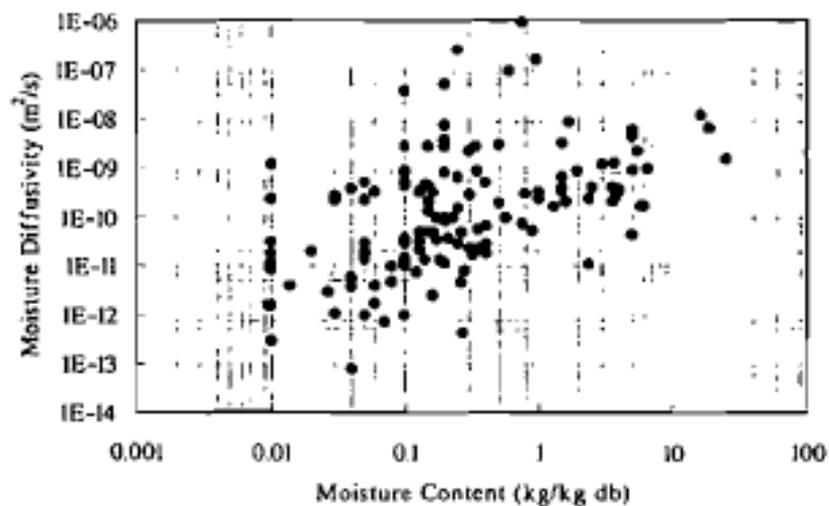


Figura 42. Efecto del contenido de humedad en difusividad de humedad en alimentos
Fuente: N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, and D. Marinos-Kouris (2013)

La difusividad varía en la misma dirección de la temperatura, lo cual es razonable, debido a que al variar la temperatura, la dimensión de los poros varía y existe un mayor gradiente de concentración en los sólidos porosos. [54] muestra una gran cantidad de modelos diferentes que dependen de la humedad y la temperatura.

A lo que se propone el siguiente modelo:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{N_R T}\right) \quad (3.45)$$

$$D_0 = a_1 + a_2 X \quad (3.46)$$

$$E_a = a_3 + a_4 X \quad (3.47)$$

Se conoce que cada dato de difusividad fue obtenido para casos en diferentes condiciones y por lo cual no se puede usar ninguno de ellos en forma directa, pero sí para hallar unos supuestos valores de las constantes para el modelo de Arrhenius. Pero consideraremos que los valores extremos de T y X corresponden a sus respectivos valores extremos de E_a y D_{eff} .

De la Tabla 4, selecciono los valores N°3, que tiene los valores de difusión para $X=3$, y $T=303$ y 333 . Se reemplaza en (3.47), y obtengo el valor de $E_a = 51.6$. Se compara con los valores N°5

Tabla 5. Selección de datos útiles para el cálculo de E_a y D_0

T	303	303	303
X	0.05	0.3	3
E_a	29.7	36.8	51.6
D_{eff}	1.3e-11	3.1e-10	

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo un análisis de los datos N°4 y N°6 de la tabla vemos que los valores E_a están alrededor de 36 kJ/mol por lo que se toma como referencia a los valores $E_a = 36.8$ y $E_a = 51.6$ de la tabla con sus respectivos valores de humedad. Se reemplaza en la ecuación (3.47), con lo que obtenemos los valores de a_3 y a_4 .

$$E_a = 35.155 + 5.485X \quad (3.48)$$

Ahora tomamos los valores de $E_a = 29.7$ y $E_a = 36.8$ debido a que tiene valores de D_{eff} . Con lo cual reemplazamos en las ecuaciones (3.46), (3.47) y (3.48), se obtiene los valores de a_1 y a_2 .

$$D_0 = -4.48x10^{-5} + 147.36x10^{-5}X \quad (3.49)$$

Debido que no se tiene valores específicos de una experiencia para este tipo de material, aún menos para los intervalos que nos encontramos trabajando, se ha tenido la necesidad de hallar de esta manera. Estos valores parecen ser los más razonables para el poco alcance de datos que tenemos, y al ser reemplazados en cada uno de los casos se acercan a los valores de D_{eff} , por lo cual finalmente nos quedamos con:

$$D_{eff} = (-4 + 150X)x10^{-5} \exp\left(-\frac{35.2 + 5.5X}{N_R T}\right) \quad (3.50)$$

Considerando que en la parte de la simulación pueden ser mejorados los valores de las constantes, sin embargo, son una buena referencia.

Capítulo 4

Modelamiento

El modelamiento es la representación de los sistemas reales en ecuaciones matemáticas que se hallan a partir de leyes físicas-químicas o de la identificación computacional del sistema que se estima con la ayuda de las respuestas del sistema y sus estímulos. Estos modelos ayudan a predecir la respuesta o comportamiento de los sistemas reales a partir de una serie de estímulos continuos o también llamados señales.

Para los procesos de secado existe una gran cantidad de tipos de secadores, entre los cuales se reconoce que el secador rota-tubo de harina de pescado es un sistema continuo indirecto, contracorriente continua y no mixing, se ha determinado esto dado que el intercambio de calor se da de forma indirecta del tubo al vaho, en contracorriente se encuentran los flujos de harina y vaho, y no mixing debido a que aun cuando existe intercambio de calor y masa, el sólido y el gas conservan su estado de la materia, como resultado salen del proceso como dos diferentes productos (harina seca y vaho).

4.1 Descripción del proceso

El Secador rotatubo se describió en el 2.3 por lo cual, ahora se describirá los fenómenos físicos a los que es sometida la harina durante el secado para predecir la humedad y temperatura de la harina a lo largo del secador.

La harina húmeda o keke integral ingresa por la parte superior del secador a una primera etapa, donde el cilindro como camisa de calor transfiere la energía calorífica por el vapor saturado en su interior por medio de sus paredes y paletas en la superficie interior del cilindro, las cuales tienen como objetivo separar los gránulos de harina y que esta sea de humedad uniforme con relación al volumen de harina que se encuentra en esa sección, en esta etapa por lo general la harina eleva su temperatura hasta llegar al punto de ebullición para la humedad relativa del aire. El vaho que se genera va en contracorriente al avance de

la harina y sale por la parte superior del secador por la diferencia de presiones que es generada por un extractor de gases en el conducto de los vahos.

La segunda etapa es de mayor área de transferencia de calor, debido a que se encuentran la camisa y los tubos ubicados de forma radial en el interior del cilindro, que son alimentados en el extremo inferior del secador por vapor saturado. La energía se transfiere en forma de calor a la harina la cual genera el vaho, que viene a ser la transferencia de masa con el aire. La transferencia de calor a la harina no solo se hace de forma directa por conducción, sino que también el calor se entrega por convección por el vaho que se encuentra a una mayor temperatura con respecto a los gránulos, la convección se da porque gránulos de harina caen a través del cilindro diametralmente luego de ser elevados por las paletas que se encuentran en la superficie interior del cilindro. Por efecto de la gravedad, la rotación y la inclinación del cilindro, la harina avanza a través del cilindro con velocidad constante, por consecuencia la harina con menor humedad sale por la parte inferior del secador y el condensado del vapor saturado sale por un mecanismo de tornillo sin fin y tuberías, por la misma zona de ingreso del vapor saturado.

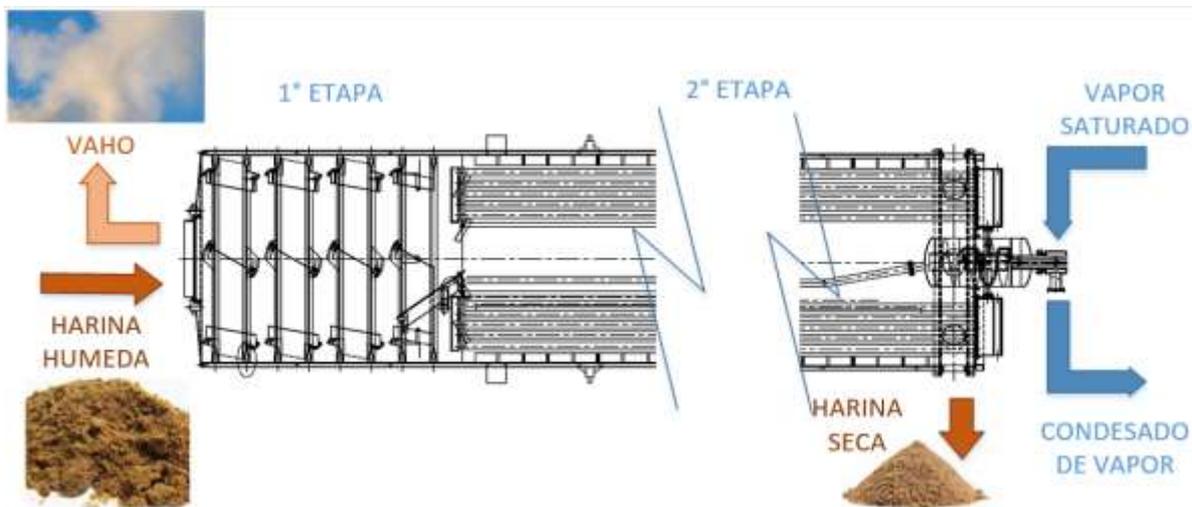


Figura 43. Diagrama de secador rotatubo de harina de pescado a modelar
Fuente: Elaboración propia

4.2 Formulación del Modelo

Debido a que las propiedades cambian continuamente a lo largo de todo el proceso en dirección del flujo, se debe modelar el proceso en este caso como un Modelo de Parámetros Distribuidos (MPD) en el cual se identificará en estado estable y en estado inestable al sistema o también llamados estados estacionario y transitorio.

Antes de iniciar el modelamiento del sistema debemos plantear las consideraciones generales para este tipo de secador.

4.2.1 Consideraciones Generales

El secador es un proceso bastante complejo por lo cual debemos asumir ciertas consideramos las cuales se deben tomar en cuenta en el momento de la simulación y/o la implementación del proceso.

- Es un sistema continuo indirecto, contracorriente continua y no mixing.
- La velocidad de entrada de la harina es constante.
- La harina está perfectamente mezclada en la sección transversal.
- La velocidad del vaho solo tiene componente horizontal.
- La transferencia de calor se hace por convección y conducción, no se considera la radiación.
- Los efectos por la energía cinética, energía potencial y el trabajo son despreciables.
- No se asumen pérdidas de calor por el ambiente.
- No existen reacciones químicas.

4.2.2 Volúmenes de Control

Se debe identificar a cada volumen de control con sus respectivos parámetros (harina, vahos, tubos y chaqueta).

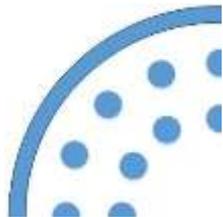
HARINA – SÓLIDO VC_1	VAHO – AIRE VC_2	TUBOS – CHAQUETA VC_3
$T_H c_H h_H F_H X$	$T_V c_V h_V F_V P_V Y$	$T_j F_j P_j$
		
$T_S c_S h_S F_S$	$T_B c_B h_B F_B P_B$	$T_t F_t P_t$

Figura 44. Volúmenes de control con sus respectivos parámetros
Fuente: Elaboración propia

4.3 Balance de Masa y Energía

El método de parámetros distribuidos tiene alcance a lo largo de todo el proceso, por lo que se trabajará en una sección primero, la cual representará todo el proceso de secado, para luego ser dividido por zonas y sub-modelos a lo largo de todo el proceso, con lo que ayudará a obtener un mejor modelo del proceso.

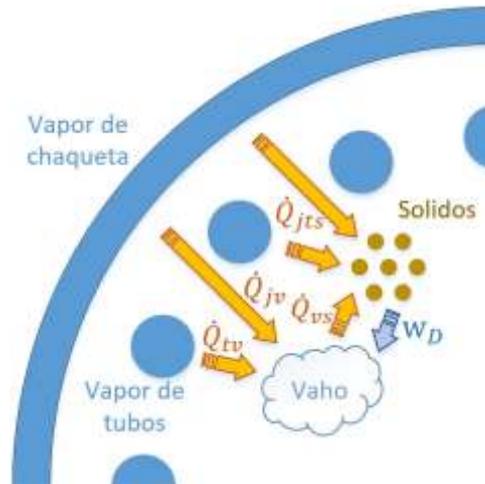


Figura 45. Diagrama de transferencia de calor y masa
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 45 vemos que la transferencia de calor entre vaho y el vapor saturado que se encuentra en la chaqueta y tubos se hace en forma indirecta, mientras que la transferencia de calor del vaho al sólido se hace de forma directa y en paralela a lo largo del cilindro, pero en contracorriente, debido a que los sólidos también están en contacto con la superficie interna de la chaqueta y externa de los tubos, se considera que hay transferencia de calor por conducción. Así mismo existe una transferencia de masa entre el vaho y los sólidos que da paso al secado de la harina de pescado.

El modelamiento por simplicidad comenzará de un modelo de parámetros concentrados que obtenemos del principio de conservación de masa y la primera ley de la termodinámica (Anexo A).

$$\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = dm_{VC}/dt \quad (4.1)$$

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = dE_{VC}/dt \quad (4.2)$$

Que también se representa

$$\begin{aligned} & \left[\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m} * (h + ec + ep) \right] \\ & - \left[\dot{Q}_{sal} + \dot{W}_{sal} + \sum_{sal} \dot{m} * (h + ec + ep) \right] \\ & = \frac{d}{dt} [m_{vc} * (u + ec + ep)_{vc}] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta las consideraciones generales se obtiene

$$\left[\dot{Q}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m} * h \right] - \left[\dot{Q}_{sal} + \sum_{sal} \dot{m} * h \right] = \frac{d}{dt} [m_{vc} * u_{vc}] \quad (4.4)$$

Debido a que las propiedades como la humedad y entalpía varían a lo largo del secador en dirección al flujo “z”, este balance de ecuaciones se reescribirá para un diferencial de espacio, con lo que la convertiremos en un modelo de parámetros distribuidos. Esto se representa en la Figura 46 para cada volumen de control.

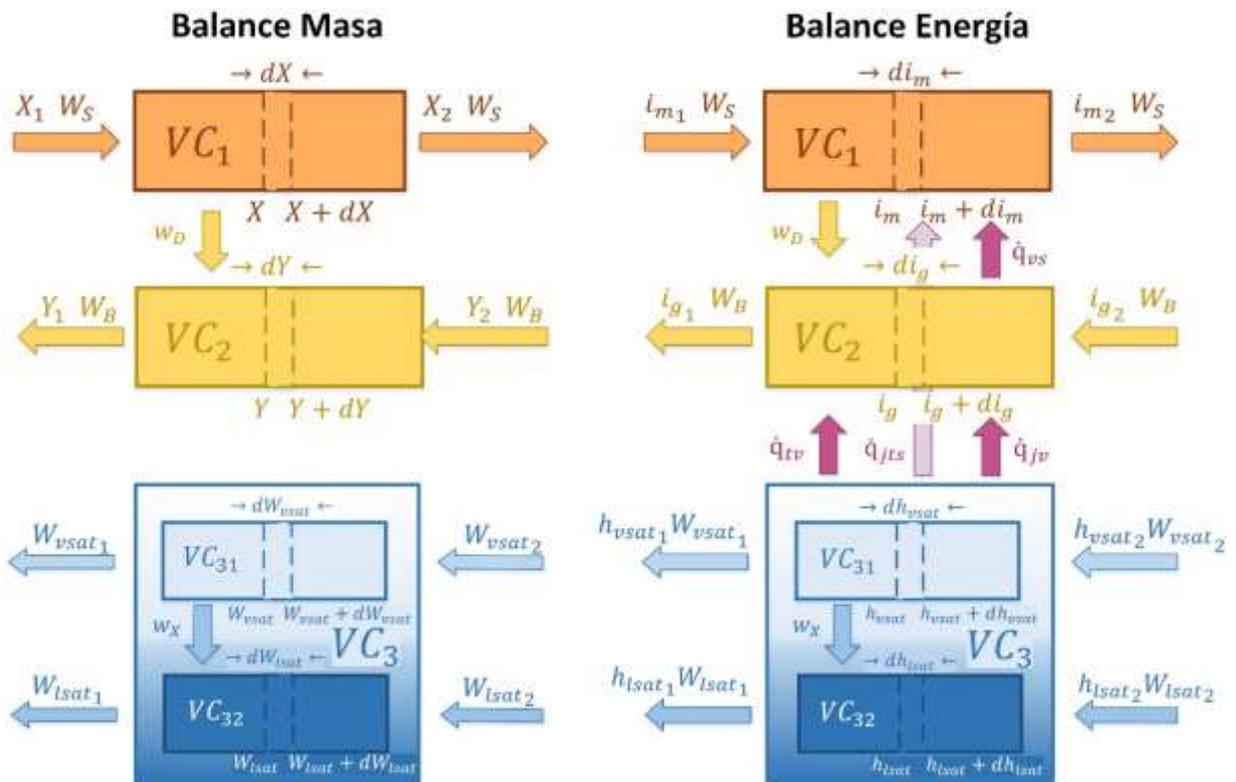


Figura 46. Balance de masa y energía en los volúmenes de control
Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Balance de Masa y Energía de la Harina VC_1

4.3.1.1 Consideraciones particulares

- Las partículas son esféricas de dimensión uniforme.
- Las partículas no se expanden a lo largo del proceso.
- La isoterma de adsorción es independiente de la temperatura.
- La presión del vapor generada debido a la evaporación del agua de los sólidos es considerado homogéneo a lo largo del secador.
- Debido a la acción de rotación de las paletas un porcentaje de las partículas se encuentran formando cortinas de partículas y la otra parte en reposo en las paletas o en el parte inferior del secador.
- El cilindro tiene un grado de inclinación estático que determina la velocidad de flujo constante de la harina a lo largo del secador.

4.3.1.3 Balance de Energía

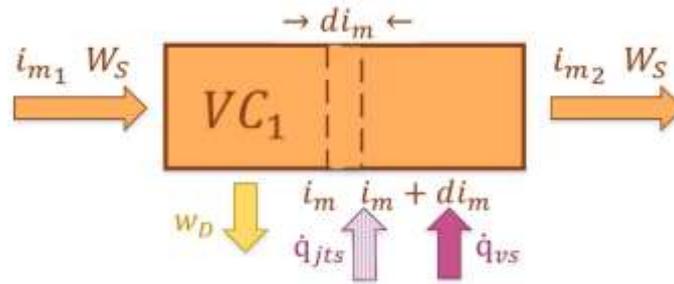


Figura 48. Balance de energía de sólidos húmedos
Fuente: Elaboración propia

En el flujo de masa húmeda de la fase sólida se utiliza la ecuación (4.4) de balance de energía, esto permite representar al VC1 (Figura 48) por medio del flujo de sólidos secos W_S y la entalpía específica de sólidos húmedos por unidad de base seca i_m . A lo que se obtiene

$$W_S i_{m1} - W_S i_{m2} + \dot{q}_{vs} A_S + \dot{q}_{jts} A_c - w_D h_{Av} A_S = \frac{dm_S i_m}{dt} \quad (4.10)$$

Teniendo en cuenta que h_{Av} es la entalpía del vapor emitido por los sólidos

$$h_{Av} = c_A t_m + \Delta h_{v0} \quad (4.11)$$

Para un diferencial de espacio

$$\begin{aligned} W_S i_m - \left(W_S + \frac{\partial W_S}{\partial z} dz \right) \left(i_m + \frac{\partial i_m}{\partial z} dz \right) + \dot{q}_{vs} dA_S + \dot{q}_{jts} dA_c - w_D h_{Av} dA_S \\ = dm_S \frac{\partial i_m}{\partial t} + di_m \frac{\partial m_S}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Sustituimos $dA_S = a_v S_H dz$, $dA_c = a_c dz$ y $dm_S = (1 - \varepsilon) \rho_S S_H dz$

$$\begin{aligned} -W_S \frac{\partial i_m}{\partial z} dz - i_m \frac{\partial W_S}{\partial z} dz + \dot{q}_{vs} a_v S_H dz + \dot{q}_{jts} a_c dz - w_D h_{Av} a_v S_H dz \\ = (1 - \varepsilon) \rho_S S_H dz \frac{\partial i_m}{\partial t} + \frac{\partial i_m}{\partial z} dz \frac{\partial m_S}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Simplificando dz y reemplazando $a_v S_H = a_S$ finalmente se obtiene

$$\begin{aligned} -W_S \frac{\partial i_m}{\partial z} - i_m \frac{\partial W_S}{\partial z} + \dot{q}_{vs} a_S + \dot{q}_{jts} a_c - w_D h_{Av} a_S \\ = (1 - \varepsilon) \rho_S S_H \frac{\partial i_m}{\partial t} + \frac{\partial i_m}{\partial z} \frac{\partial m_S}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

4.3.2 Balance de Masa y Energía del Vaho VC₂

4.3.2.1 Consideraciones particulares

- La presión del vaho es igual a presión atmosférica.
- El dámper de salida del vaho esta estático.
- Es despreciable las gradientes de temperatura en las secciones transversales del vaho.

4.3.2.2 Balance de Masa

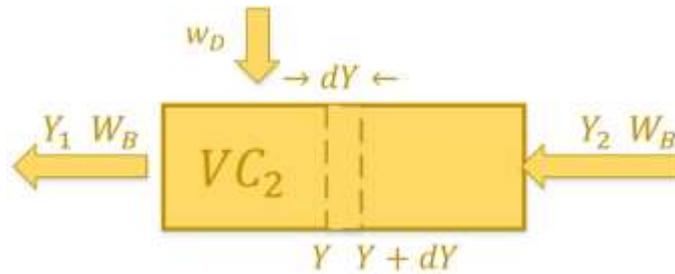


Figura 49. Balance de masa de aire húmedo
Fuente: Elaboración propia

En el flujo de masa húmeda de la fase gaseosa se utiliza la ecuación (4.1) de balance de masa, esto permite representar al VC2 (Figura 49) por medio del flujo de gases secos W_B y la humedad por unidad de base seca Y . A lo que se obtiene

$$-W_B Y_1 + W_B Y_2 + w_D A_S = m_B \frac{dY}{dt} \quad (4.15)$$

Para un diferencial de espacio

$$-W_B Y + W_B \left(Y + \frac{\partial Y}{\partial z} dz \right) + w_D dA_S = dm_B \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (4.16)$$

Sustituimos $dA_S = a_v S dz$ y $dm_B = \rho_B S_V dz$

$$W_B \frac{\partial Y}{\partial z} dz + w_D a_v S_H dz = \rho_B S_V dz \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (4.17)$$

Simplificando dz y reemplazando $a_v S_H = a_S$ finalmente se obtiene

$$W_B \frac{\partial Y}{\partial z} + w_D a_S = \rho_B S_V \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (4.18)$$

4.3.2.3 Balance de Energía

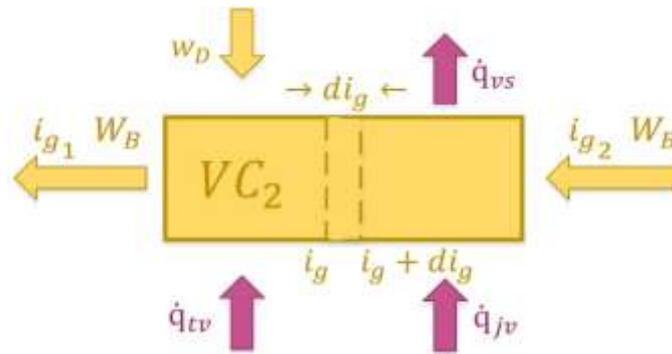


Figura 50. Balance de energía de aire húmedo
Fuente: Elaboración propia

En el flujo de masa húmeda de la fase sólida se utiliza la ecuación (4.4) de balance de energía, esto permite representar al VC2 (Figura 50) por medio del flujo de gases secos W_B y la entalpía específica de los gases húmedos por unidad de base seca i_g . A lo que se obtiene

$$-W_B i_{g_1} + W_B i_{g_2} + \dot{q}_{jv} A_j + \dot{q}_{tv} A_t - \dot{q}_{vs} A_s + w_D h_{Av} A_s = m_B \frac{di_g}{dt} \quad (4.19)$$

Para un diferencial de espacio

$$\begin{aligned} -W_B i_g + W_B \left(i_g + \frac{\partial i_g}{\partial z} dz \right) + \dot{q}_{jv} dA_j + \dot{q}_{tv} dA_t - \dot{q}_{vs} dA_s + w_D h_{Av} dA_s \\ = dm_B \frac{di_g}{dt} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Sustituimos $dA_s = a_v S_H dz$ y $dm_B = \rho_B S_V dz$

$$\begin{aligned} W_B \frac{\partial i_g}{\partial z} dz + \dot{q}_{jv} a_j dz + \dot{q}_{tv} a_t dz - \dot{q}_{vs} a_v S_H dz + w_D h_{Av} a_v S_H dz \\ = \rho_B S_V dz \frac{\partial i_g}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Simplificando dz y reemplazando $a_v S_H = a_s$ finalmente se obtiene

$$W_B \frac{\partial i_g}{\partial z} + \dot{q}_{jv} a_j + \dot{q}_{tv} a_t - \dot{q}_{vs} a_s + w_D h_{Av} a_s = \rho_B S_V \frac{\partial i_g}{\partial t} \quad (4.22)$$

4.3.3 Balance de Masa y Energía de los Tubos y Chaqueta VC₃

4.3.3.1 Consideraciones particulares

- A lo largo de todo el secador las 2 fases (líquida y gaseosa) se encuentran mezcladas.
- El flujo del vapor a la salida es cero.

4.3.3.2 Balance de Masa VC₃₁

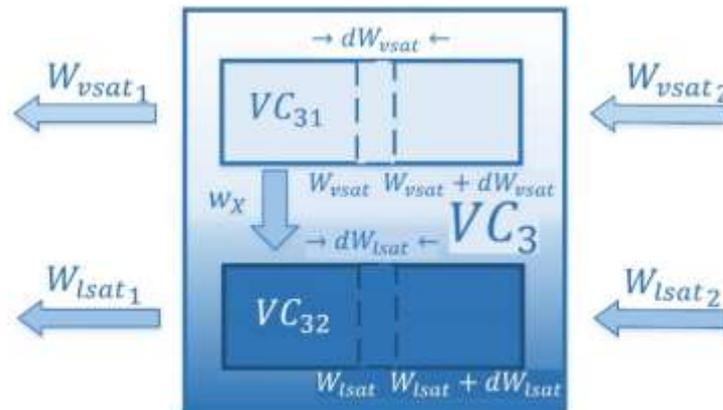


Figura 51. Balance de masa de fluidos saturados
Fuente: Elaboración propia

El fluido de vapor saturado y líquido saturado se encuentran mezclados y cambiando de estado continuamente por lo que se permite representar al VC31 (Figura 51), que es el estado gaseoso, por la ecuación (4.1) de balance de masa. A lo que se obtiene

$$-W_{Vsat_1} + W_{Vsat_2} - W_X = \frac{dm_{Vsat}}{dt} \quad (4.23)$$

Utilizaremos la variable Z para relacionar la proporción de masa de vapor y líquido saturados en la camisa y chaqueta

$$Z = \frac{m_{Vsat}}{m_{TSat}} \quad (4.24)$$

$$m_{TSat} = m_{Vsat} + m_{Lsat} \quad (4.25)$$

Entonces,

$$m_{Vsat} = m_{TSat}Z \quad (4.26)$$

$$m_{Lsat} = m_{TSat}(1 - Z) \quad (4.27)$$

Y

$$\rho_{Tsat} = \frac{m_{Tsat}}{V_{Tsat}} \quad (4.28)$$

Para un diferencial de espacio y reemplazando las ecuaciones

$$-W_{Vsat} + \left(W_{Vsat} + \frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} dz \right) - \frac{\partial W_X}{\partial z} dz = S_{Vsat} dz \rho_{Tsat} \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (4.29)$$

Simplificando se obtiene

$$\frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} - \frac{\partial W_X}{\partial z} = S_{Vsat} \rho_{Tsat} \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (4.30)$$

4.3.3.3 Balance de Energía VC₃₁

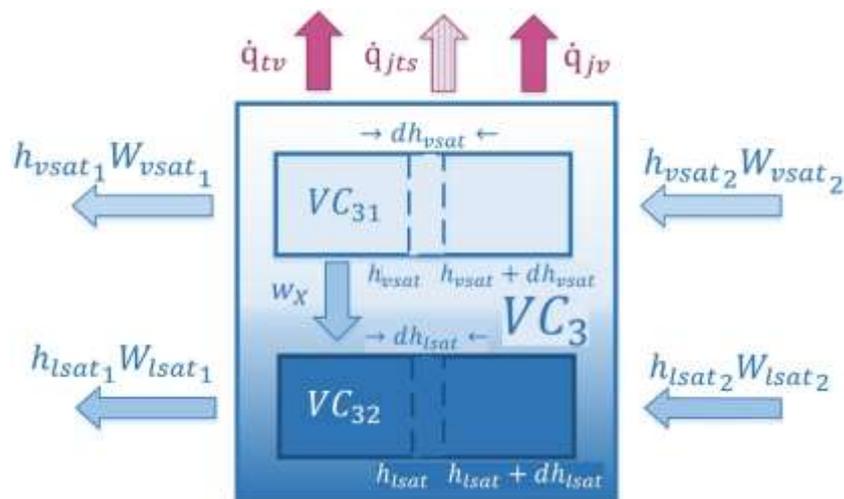


Figura 52. Balance de energía de fluidos saturados
Fuente: Elaboración propia

El fluido de vapor saturado y líquido saturado se encuentran mezclados y cambiando de estado continuamente al entregar el calor latente necesario, por lo que se permite presentar al VC31 (Figura 52), que es el estado gaseoso, por la ecuación (4.4) de balance de energía, con lo que se obtiene

$$-W_{Vsat_1} h_{Vsat_1} + W_{Vsat_2} h_{Vsat_2} - W_X h_{Lsat} - \dot{q}_{jv} A_j - \dot{q}_{tv} A_t - \dot{q}_{jts} A_c = \frac{dm_{Vsat} h_{Vsat}}{dt} \quad (4.31)$$

$$\frac{dm_{Vsat} h_{Vsat}}{dt} = m_{Tsat} \left(Z \frac{dh_{Vsat}}{dt} + h_{Vsat} \frac{dZ}{dt} \right) \quad (4.32)$$

Para un diferencial de espacio

$$\begin{aligned}
& -W_{Vsat}h_{Vsat} + \left(W_{Vsat} + \frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} dz\right) \left(h_{Vsat} + \frac{\partial h_{Vsat}}{\partial z} dz\right) - \frac{\partial W_X}{\partial z} dz h_{Lsat} \\
& \quad - \dot{q}_{jv} dA_j - \dot{q}_{tv} dA_t - \dot{q}_{jts} dA_c \\
& \quad = S_{Vsat} dz \rho_{Tsat} \left(Z \frac{dh_{Vsat}}{dt} + h_{Vsat} \frac{dz}{dt}\right)
\end{aligned} \tag{4.33}$$

$$\begin{aligned}
& W_{Vsat} \frac{\partial h_{Vsat}}{\partial z} dz + h_{Vsat} \frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} dz + \frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} dz \frac{\partial h_{Vsat}}{\partial z} dz - \frac{\partial W_X}{\partial z} dz h_{Lsat} \\
& \quad - \dot{q}_{jv} a_j dz - \dot{q}_{tv} a_t dz - \dot{q}_{jts} a_c dz \\
& \quad = S_{Vsat} dz \rho_{Tsat} \left(Z \frac{dh_{Vsat}}{dt} + h_{Vsat} \frac{dz}{dt}\right)
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Para simplificar la ecuación $\frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} dz \frac{\partial h_{Vsat}}{\partial z} dz = 0$

$$\begin{aligned}
& W_{Vsat} \frac{\partial h_{Vsat}}{\partial z} + h_{Vsat} \frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} - \frac{\partial W_X}{\partial z} h_{Lsat} - \dot{q}_{jv} a_j - \dot{q}_{tv} a_t - \dot{q}_{jts} a_c \\
& \quad = S_{Vsat} \rho_{Tsat} \left(Z \frac{dh_{Vsat}}{dt} + h_{Vsat} \frac{dz}{dt}\right)
\end{aligned} \tag{4.35}$$

4.3.3.4 Balance de Masa VC₃₂

El estado líquido del fluido saturado VC32 (Figura 51) es representado por la ecuación (4.1) de balance de masa. A lo que se obtiene

$$W_{Lsat1} - W_{Lsat2} + W_X = \frac{dm_{Lsat}}{dt} \tag{4.36}$$

Para un diferencial de espacio

$$W_{Lsat} - \left(W_{Lsat} + \frac{\partial W_{Lsat}}{\partial z} dz\right) + \frac{\partial W_X}{\partial z} dz = S_{Vsat} dz \rho_{Tsat} \frac{\partial(1-Z)}{\partial t} \tag{4.37}$$

Simplificando se obtiene

$$-\frac{\partial W_{Lsat}}{\partial z} + \frac{\partial W_X}{\partial z} = -S_{Tsat} \rho_{Tsat} \frac{\partial Z}{\partial t} \tag{4.38}$$

4.3.3.5 Balance de Energía VC₃₂

El estado líquido del fluido saturado VC32 (Figura 51) es representado por la ecuación (4.4) de balance de energía. A lo que se obtiene

$$W_{Lsat_1}h_{Lsat_1} - W_{Lsat_2}h_{Lsat_2} + W_Xh_{Lsat} = \frac{dm_{Lsat}h_{Lsat}}{dt} \quad (4.39)$$

$$\frac{dm_{Lsat}h_{Lsat}}{dt} = m_{Tsat}((1 - Z)\frac{dh_{Lsat}}{dt} - h_{Lsat}\frac{dZ}{dt}) \quad (4.40)$$

Para un diferencial de espacio

$$\begin{aligned} W_{Lsat}h_{Lsat} - \left(W_{Lsat} + \frac{\partial W_{Lsat}}{\partial z} dz\right) \left(h_{Lsat} + \frac{\partial h_{Lsat}}{\partial z} dz\right) + \frac{\partial W_X}{\partial z} dz h_{Lsat} \\ = dm_{Tsat}((1 - Z)\frac{dh_{Lsat}}{dt} - h_{Lsat}\frac{dZ}{dt}) \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} -W_{Lsat}\frac{\partial h_{Lsat}}{\partial z} dz - h_{Lsat}\frac{\partial W_{Lsat}}{\partial z} dz - \frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} dz \frac{\partial h_{Vsat}}{\partial z} dz + \frac{\partial W_X}{\partial z} dz h_{Lsat} \\ = S_{Tsat}\rho_{Tsat} dz((1 - Z)\frac{dh_{Lsat}}{dt} - h_{Lsat}\frac{dZ}{dt}) \end{aligned} \quad (4.42)$$

Para simplificar la ecuación $\frac{\partial W_{Vsat}}{\partial z} dz \frac{\partial h_{Vsat}}{\partial z} dz = 0$

$$\begin{aligned} -W_{Lsat}\frac{\partial h_{Lsat}}{\partial z} - h_{Lsat}\frac{\partial W_{Lsat}}{\partial z} + \frac{\partial W_X}{\partial z} h_{Lsat} \\ = S_{Tsat}\rho_{Tsat}((1 - Z)\frac{dh_{Lsat}}{dt} - h_{Lsat}\frac{dZ}{dt}) \end{aligned} \quad (4.43)$$

4.4 Coeficientes de transferencia de calor y masa

Ahora que se tiene el MPD, se necesita determinar cada uno de los coeficientes de transferencia de calor y masa, para lo cual se va a recurrir a las ecuaciones (0.28) y (3.32).

$$\dot{q} = j\Delta T \quad (4.44)$$

$$w_D = k_Y\Delta Y \quad (4.45)$$

Donde j es el coeficiente de transferencia de calor y k_Y es el coeficiente de transferencia de masa a la fase gaseosa, siendo para el sistema

$$\dot{q}_{jv} = j_{jv}\Delta T_{jv}; \dot{q}_{tv} = j_{tv}\Delta T_{tv}; \dot{q}_{vs} = j_{vs}\Delta T_{vs}; \dot{q}_{jts} = j_{jtv}\Delta T_{jtv} \wedge w_D = k_Y\Delta Y \quad (4.46)$$

Lo importante es definir y entender los valores de coeficientes de transferencia de calor por convección (j_{jv} , j_{tv} y j_{vs}), conducción (j_{jtv}) y el coeficiente de transferencia de masa (w_D) por medio de fenómenos físicos, los cuales determinan su dependencia y rangos de trabajo.

4.4.1 Coeficiente de transferencia de calor

Para determinar los coeficientes de transferencia de calor y masa se necesita conocer cuáles son sus intervalos de trabajo en el sistema.

Tabla 6. Intervalos de valores de trabajo de temperatura, presión y humedad (Anexo D)

	T_{\min}	T_{\max}	P_{\min}	P_{\max}	X_{in}	X_{out}
Vaho	95	105	0.9	1.05	-	-
Harina	70	100	-	-	0.45	0.08
Vapor Sat.	120	150	2	6	-	-

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la chaqueta y el vaho j_{jv}

Para hallar el valor del coeficiente se comienza identificando que se trata de transferencia de calor por convección externa forzada por la gran cantidad de vaho que se genera en un espacio cerrado y por el extractor de vaho que hay a la salida del vaho, por lo que se necesita saber los valores de Re y Pr para determinar si el vaho se comporta como un flujo turbulento o laminar y cuál es el factor con el que se disipa el calor.

Para determinar el valor de Pr , es necesario considerar que el vaho está saturado para utilizar el valor de las propiedades del vapor de agua, con lo cual se obtienen los siguientes intervalos.

Tabla 7. Valores de Prantl para el intervalo los valores de temperatura

Vaho	T	Pr
T_{\min}	95	0.9853
T_{\max}	105	0.9830

Fuente: Elaboración propia

El valor de Re para este caso es

$$Re_j = \frac{v_{promj} D_j}{\nu} \quad (4.47)$$

Se hace el cálculo aproximado de la velocidad para obtener la v_{promj} , la cual tiene 2 componentes perpendiculares, la componente en dirección a la salida del vaho (Anexo B) y la componente radial por rotación del cilindro

$$v_{promj} = \sqrt{v_{prom}^2 + 0.25(D_j * \omega)^2} \quad (4.48)$$

considerando el valor de $\nu = 1.7054 \times 10^{-5}$ para una temperatura de 100°C (Anexo E) y $D_j = 3.356$ (Anexo C) entonces el valor de $Re_j = 2.89 \times 10^4$. Con este valor de Re , se considera al flujo del vaho como turbulento, para los tubos lisos [56]. Por lo cual la mejor ecuación que se adecua para hallar el valor de Nu está dado por

$$Nu_j = \frac{(\zeta/8)(Re_j - 1000)Pr}{1 + 12.7(\zeta/8)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.49)$$

Esta correlación es válida para $3 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^6$, $0.5 \leq Pr \leq 2000$; ζ es el factor de fricción de la chaqueta, el cual es un tubo de acero comercial, y su valor está dado por la primera ecuación de Petukhov

$$\zeta = (0.79 \ln Re_j - 1.64)^{-2} \quad (3 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^6) \quad (4.50)$$

Debido a que el valor de $\epsilon/D = 1.34 \times 10^{-5}$, se puede considerar cero, en consecuencia, es un material liso bajo estas condiciones. El valor del coeficiente de transferencia de calor por convección chaqueta-vaho está dada por

$$j_{jv} = \frac{Nu_j k_v}{D_j} \text{ kW/m}^2 \text{ K} \quad (4.51)$$

4.4.1.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el tubo y el vaho j_{tv}

El obtener el coeficiente de transferencia entre el tubo y el vaho es bastante complejo por lo que se tendrá que asumir de la misma manera los 2 componentes

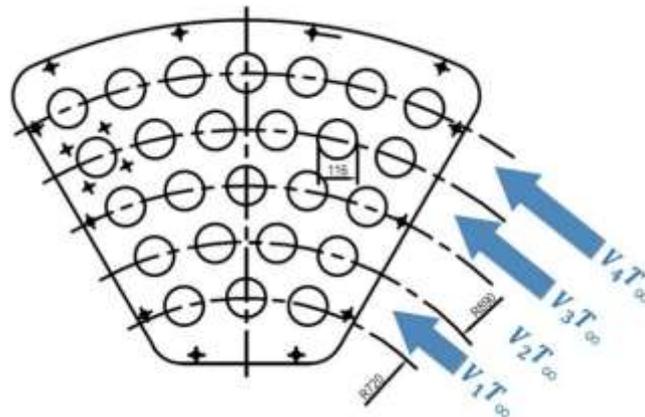


Figura 53. Dirección transversal del fluido en el banco de tubos
Fuente: Elaboración propia

Debido a que el sistema rota continuamente y la configuración de los tubos es radial, se puede asumir que el vaho avanza linealmente entre los tubos con respecto al plano transversal del secador. La v_{max} en las corrientes perpendiculares al eje de tubos en línea se producirá cuando la configuración sea de área mínima. Por lo cual se aplica la ecuación de continuidad en la disposición de los tubos

$$v_{max} = v_{\infty} \frac{S_T}{S_T - D} = v_{\infty} \frac{R_2 - R_1}{(R_2 - R_1) - D} \quad (4.52)$$

$$v_{\infty} = \bar{R} \omega \quad (4.53)$$

donde \bar{R} es el radio promedio del banco de tubos la otra componente perpendicular al as de tubos es la v_{prom} (anexo B), entonces

$$v_{promt} = \sqrt{v_{prom}^2 + v_{max}^2} \quad (4.54)$$

Se considera también el valor de $\nu = 1.7054 \times 10^{-5}$ para una temperatura de 100°C (Anexo E) y $D_t = 0.116$

$$Re_t = \frac{v_{promt} D_t}{\nu} \quad (4.55)$$

Al calcular el valor de Nusselt se observa que el número de hileras son mayores a 20 debido a que se encuentra rotando continuamente, por lo que se debe tomar en cuenta la variación de temperatura en la superficie de los tubos y chaqueta, la cual es aproximadamente de 150 °C en la mayor parte del tiempo del funcionamiento del secador y en el vaho es de 100 °C, las cuales tienen diferentes valores de Prantl, por lo que se debe usar para el número de Nusselt es

$$Nu_t = 0.27 Re^{0.63} Pr_{\infty}^{0.36} \left(\frac{Pr_{\infty}}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (4.56)$$

Esta correlación es válida para $10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^6$, $0.7 \leq Pr \leq 500$ y $1.0 \leq \mu_{\infty} / \mu_s \leq 3.2$, el valor de Pr_{∞} se da para la temperatura del vaho y Pr_s para la temperatura de la superficie de los tubos y chaqueta, que es la temperatura del vapor saturado del sistema. El valor del coeficiente de transferencia de calor por convección tubo-vaho está dada por

$$j_{tv} = \frac{Nu_t k_v}{D_t} \text{ kW/m}^2 \text{ K} \quad (4.57)$$

4.4.1.3 Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el vaho y los sólidos

j_{vs}

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor del flujo de vapor a las partículas de harina de pescado consideradas esféricas es importante determinar la velocidad de caída de los sólidos al rotar el secador, se considerará que la trayectoria seguida por los sólidos es de caída libre. En el cálculo interviene el balance entre la fuerza de gravedad y la fuerza de resistencia al movimiento del vaho hacia la superficie de los sólidos [57]

$$v_t = \left(\frac{4 d_p g \rho_s - \rho_v}{3 C_D \rho_v} \right)^{1/2} \quad (4.58)$$

La velocidad de los sólidos es necesaria para determinar el valor de Reynolds que se usa en la correlación de Whitaker [58]

$$Nu = 2 + [0.4Re^{1/2} + 0.06Re^{2/3}]Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s}\right)^{1/4} \quad (4.59)$$

Esta correlación es válida para los intervalos de $3.5 \leq Re \leq 8 \times 10^4$, $0.7 \leq Pr \leq 380$ y $1.0 \leq \mu_{\infty}/\mu_s \leq 3.2$, las propiedades se evalúan para la temperatura en el flujo T_{∞} , excepto para μ_s , donde

$$Re = d_p v_t \frac{\rho_v}{\mu_v} \quad (4.60)$$

$$Pr = c_v \frac{\mu_v}{k_v} \quad (4.61)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección vaho-sólido es dada por

$$j_{vs} = \frac{Nu k_v}{d_p} \quad (4.62)$$

4.4.1.4 Coeficiente de transferencia de calor por conducción entre la chaqueta, tubos y los sólidos j_{jts}

Hallar este valor es bastante complicado debido a que las partículas se encuentran en continuo movimiento y se expanden durante su proceso de secado, es decir, que se vuelven en partículas porosas ε , dependientes de la humedad y temperatura. Esta parte estará totalmente basada en [59], donde considera que las partículas son materiales esféricos, que cuando están estacionarios, se estudia la capa que está en contacto con la superficie de los tubos o chaqueta; las partículas que están a una misma temperatura pertenecen a la misma capa, no hay transferencia de calor tangencial.

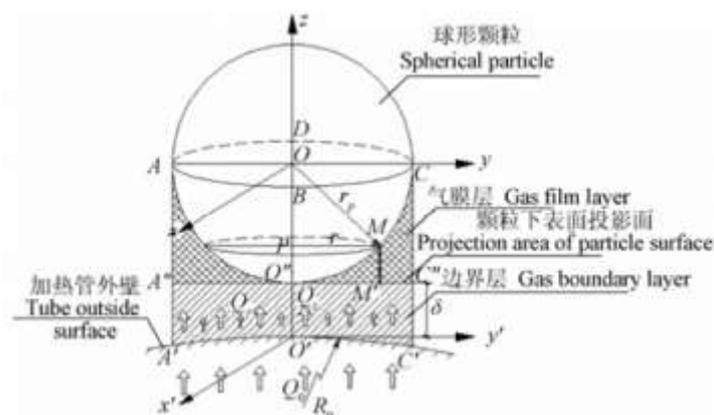


Figura 54. Diagrama de transferencia de calor entre una partícula y superficie de un tubo[60]

Fuente: J. Wu (2013)

El secador modelado no contiene paleta por lo que solo se considerará el estudio realizado por conducción debido a que la convección ya se identificó en apartados anteriores.

Se observa que las partículas del material mezclado con gas siempre están en contacto con la pared del tubo y la chaqueta, como se considera en la Figura 54, teniendo en cuenta el tamaño de las partículas de harina, son mucho más pequeñas que el diámetro de las tuberías y la chaqueta ($d_p \ll D_t < D_j$), se considera que las superficies de contacto son planas y que calentarán de forma directa a los gránulos de harina por conducción. La relación entre la ecuación de Newton de enfriamiento y la ley de Fourier, y la capa límite térmica y la capa límite de velocidad entre la pared calentada se puede extraer a partir del coeficiente de transferencia de calor por convección local instantánea.

$$j_x = 1.54 \frac{k_v}{\delta} Pr^{1/3} \quad (4.63)$$

donde j es el coeficiente de transferencia instantánea local de calor, δ es un hueco cerca de las partículas entre las paredes de la partícula y tubo o chaqueta de calefacción. Cuando las partículas se calientan en la brecha de δ a 0 entre la pared y la partícula de superficie total A_c , el coeficiente de transferencia de calor es

$$j_{jts} = \frac{1}{\frac{1}{S_m} \int_0^{S_m} \frac{1}{j_x} d\delta} = 3.08 \frac{k_v}{S_m} Pr^{1/3} \quad (4.64)$$

donde, S_m es el área de contacto por partícula. Debido a que está trabajando con partículas porosas e indica que este coeficiente es dependiente de la velocidad de rotación del sistema se debe poner en función de este

$$S_m = \sqrt{3}(\varepsilon^{-1/3} - 1) \frac{d_p}{2} \quad (4.65)$$

De las ecuaciones (4.64) y (4.65)

$$j_{jts} = 3.5565 \frac{k_v Pr^{1/3}}{(\varepsilon^{-1/3} - 1) d_p} \quad (4.66)$$

4.4.2 Coeficiente de transferencia de masa

La disminución del valor de la humedad a lo largo de todo el secador se determina analizando la rapidez de secado del sólido húmedo, por lo que en 3.4.2 se analizó la curva de rapidez de secado. La rapidez del secado tiene 2 zonas: la zona de secado continuo y la zona de descenso de la rapidez del secado.

4.4.2.1 Zona de secado continuo

En esta zona se desarrolla la difusividad de masa y difusividad térmica entre el aire-vapor y agua, debido a que todas las superficies de las partículas se consideran que están

cubiertas por agua hasta el punto de X_{cr} . Para lo cual se utilizará el caso general de la analogía de Chilton-Colburn [56]

$$\frac{j_{vs}}{k_Y} = \rho c_p \left(\frac{D_{AB}}{\alpha} \right)^{-2/3} \quad (4.67)$$

Para $0.6 < Pr < 60$ y $0.6 < Sc < 3000$, lo cual cumple las partículas de harina (Anexo B), por lo que en este caso se formula como

$$k_Y = \frac{j_{vs}}{c_A \rho_v} \left(\frac{D_{eff}}{\alpha} \right)^{2/3} \quad (4.68)$$

4.4.2.2 Zona de descenso de la rapidez del secado

Para plantear esta parte se pueden utilizar dos fórmulas que se dieron en 3.4.2, las cuales se diferencian en que la primera es un caso general, pero en la segunda determina mejor la naturaleza de las partículas de harina de pescado. La primera y más sencilla se da cuando la pendiente es determinada como

$$f = \Phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} \quad (4.69)$$

Con la ecuación (3.34) se obtiene

$$w_D = k_Y \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} \Delta Y \quad (4.70)$$

La segunda opción esta presentada por la ecuación (3.39)

$$w_D = \frac{\rho}{p_w d_p} \frac{2}{(\Phi^{-1/3} - 1)} D_{eff} \Delta p_w \quad (4.71)$$

$$\Delta p_w = P * \ln \left(\frac{P - p_w}{P - p_{wc}^*} \right) \quad (4.72)$$

4.5 Coeficiente de Fricción de los fluidos saturados

En sistemas bifásicos, como es en lo que se presenta en el vapor saturado de los tubos y chaqueta del secador, es normal que no se comprenda y/o determine la asignación correcta del patrón de los fluidos, debido a su complejidad de parámetros que se deben determinar, por lo que se asume que a todo lo largo del secador es una mezcla uniforme de las 2 fases (líquida y gaseosa) para poder aplicar la teoría como si fuera de una aplicación monofásica.

Se utiliza la ecuación de factor de fricción en flujos desplazados [61], donde se relaciona con el número de Reynolds y la relación rugosidad/diámetro

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = 3.48 - 4 \log \left[\frac{2\epsilon}{D} + \frac{9.35}{Re\sqrt{F}} \right] \quad (4.73)$$

Donde usa una definición aplicable a flujos anulares y burbujeantes

$$F = \frac{\rho_{Tsat} D \left[\frac{dP}{dz} \right]}{2 W^2} \quad (4.74)$$

Para el cual se debe considerar que la densidad homogénea ρ_{Tsat} es dado por

$$\frac{1}{\rho_{Tsat}} = \frac{Z}{\rho_{Vsat}} + \frac{1-Z}{\rho_{Lsat}} \quad (4.75)$$

Se define el valor de la viscosidad del fluido μ para un sistema de flujo anular por los efectos del modelo bifásico como

$$\mu = \mu_{Lsat}(1 - \tau) + \mu_{Vsat}\tau \quad (4.76)$$

Donde τ es fracción homogénea de volúmenes vacíos

$$\tau = \frac{\rho_{Lsat}Z}{\rho_{Lsat}Z + \rho_{Vsat}(1 - Z)} \quad (4.77)$$

4.6 Caudal y Velocidad del vaho

El vaho dentro del secador no tiene un movimiento uniforme pues existen sólidos (tubos, paletas y harina) que crean depresiones entre ellos y hacen que se vuelva el vaho un fluido turbulento, donde la velocidad y/o el flujo de vaho no tenga sus vectores de dirección bien definidos, pero se tomará consideraciones necesarias para que el estudio se haga sencillo.

4.6.1 Caudal de Salida del Vaho

Un punto necesario de formulación es la dependencia de la humedad de salida de la harina con el área de salida del vaho, como el vaho está casi saturado o saturado a su salida, se formulará a partir de la pérdida de carga por depresión que se crea en la barrera que crea el damper para un vapor saturado

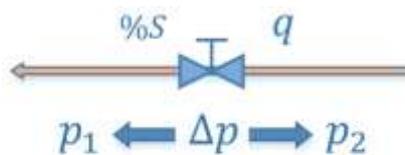


Figura 55. Gráfico de depresión del damper en la salida del vaho
Fuente: Elaboración propia

$$q = \%S \cdot K_x \sqrt{\Delta p_v (p_1 + p_2)} \quad (4.78)$$

K_x es el coeficiente de caudal y $\%S$ es el porcentaje de área controlada por el damper.

4.6.2 Velocidad Promedio del Vaho

La v_{prom} hallada en el anexo B es bastante general para el cálculo de transferencia de calor por convección, por lo que se necesita un cálculo más específico. Por ello se considerará que la depresión creada por el rozamiento e impacto con los sólidos es 0. A partir de la ecuación 3.18 se propone

$$V_H = m_B \left(\frac{1}{M_G} + \frac{Y}{M_W} \right) \frac{T_v R}{P_t} \quad (4.79)$$

Se relaciona con un diferencial volumen húmedo (vaho) y se obtiene

$$v_{prom} = \frac{F_B}{S_v} \left(\frac{1}{M_G} + \frac{Y}{M_W} \right) \frac{T_v R}{P_t} \quad (4.80)$$

4.7 Áreas de transferencia de calor

La transferencia de calor y/o masa de los fluidos que se mueven por el interior o alrededor de los cilindros y esferas es difícil de analizar, por lo que se analizan de forma experimental, pero estas transferencias son directamente proporcionales a las superficies de contacto, los cuales se encuentran ligados al coeficiente de transferencia de masa o energía, como se ve en los balances de masa y energía.

4.7.1 Superficie de la harina

Los gránulos de la harina son partículas irregulares que se definen en función del factor de forma φ , el cual relaciona el diámetro promedio equivalente y el diámetro de la partícula, como si esta fuera una partícula esférica.

$$d_{pe} = \varphi d_p \quad (4.81)$$

La superficie específica de la harina es determinada por la relación entre el área del superficial y el volumen del gránulo, la cual es de gran importancia al usarse para el cálculo de transferencia de calor y masa sólidos-vaho

$$a_v = \frac{6}{\varphi d_p} \quad (4.82)$$

El factor de forma φ es correlacionada [57] al d_p

$$\varphi = \frac{1}{1.101 + 414d_p} \quad (4.83)$$

Y,

$$S_H = S fr \quad (4.84)$$

Para finalmente hallar

$$a_S = a_v S_H \quad (4.85)$$

4.7.2 Superficie de la chaqueta y tubos

Debido a que el secador está en constante movimiento se hace complejo encontrar el área de contacto para la transferencia de calor, pues toda la harina no cae directamente a la baja del cilindro, sino que puede ir topando con los tubos que están rotando conjuntamente, por lo que se considerará que el área de contacto está en la parte baja donde entran en contacto con la parte interna de la chaqueta y tubos, y en las paletas que se están elevando, en la cual la harina está en contacto parcial con la chaqueta y la superficie de la paleta

$$fr = \frac{\frac{2\tau}{2\pi} \cdot \pi r^2 - \sin \tau \cos \tau r^2}{\pi r^2} = \frac{\tau}{\pi} - \frac{\sin 2\tau}{2\pi} \quad (4.86)$$

r es un radio relativo pues el cilindro no está vacío, y de manera sencilla se hace los cálculos de fracción parcial de área con el radio relativo, pues es una buena aproximación. Para mayor sencillez de cálculo aún, se utilizará la serie de Taylor de seno hasta el orden 3

$$\sin 2\tau = 2\tau - \frac{(2\tau)^3}{3!} \quad (4.87)$$

Al evaluarlo en la ecuación (4.86) se obtiene

$$fr = \frac{4}{3\pi} \tau^3 \quad (4.88)$$

Es necesario conocer una referencia de cuánta harina hay en la parte inferior del secador, para saber qué proporción de área de los tubos y chaquetas transfiere el calor por convección o conducción.

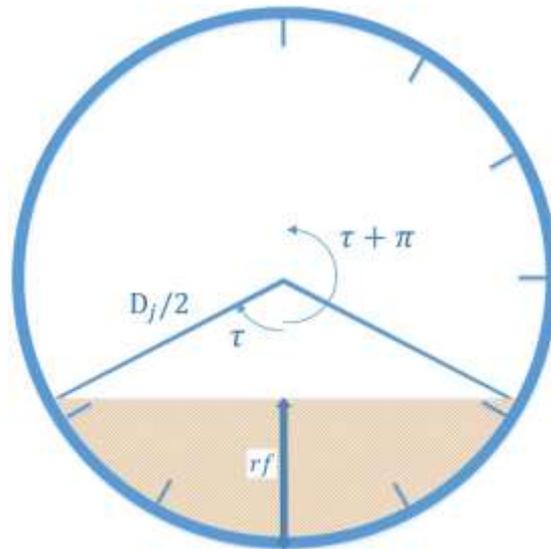


Figura 56. Corte transversal del secador
Fuente: Elaboración propia

Por lo que se toma como referencia la flecha formada por el arco que cubre la harina en la chaqueta Figura 56

$$r_f = \frac{D_j}{2} (1 - \cos \tau) \quad (4.89)$$

En el anexo C se observa las dimensiones de la chaqueta y los tubos, así como su distribución. Los tubos están divididos en 6 secciones con 5 filas ubicadas radialmente, con una totalidad 25 tubos por sección.

$$a_t = N_t D_t \pi \quad (4.90)$$

La chaqueta tiene una configuración más compleja debido a que tiene paletas soldadas perpendicularmente a todo lo largo de la superficie interna, también tiene una distribución homogénea, con un total de 42 filas de paletas, se observa que las filas de las paletas no son continuas, por lo que se multiplicará por un factor (0.8), que es la relación del área real entre el área virtual, pues la integración es a lo largo de todo el secador y sería poco eficiente identificar la ubicación de las paletas, de la misma forma se observa que no todas las paletas son planas, pero se considerarán planas y homogéneas.

$$a_p = 2 * 0.8 * N_p * L_p \quad (4.91)$$

$$a_j = D_j \cdot \pi + a_p \quad (4.92)$$

No se puede conocer de forma exacta la porción de tubos que se encuentran sumergidos en la harina, por lo que se aproximará la cantidad para cierto intervalo de r_f . Teniendo en cuenta las ecuaciones (4.89), (4.90), (4.92) y la consideración anterior las áreas de transferencia de calor por conducción son

$$\begin{aligned}
a_{t1} &= 0, rf \in [0, 0.278) \\
7 D_t \pi, rf &\in [0.278, 0.448) \\
16 D_t \pi, rf &\in [0.448, 0.618) \\
27 D_t \pi, rf &\in [0.618, 0.778) \\
40 D_t \pi, rf &\in [0.778, 0.948) \\
55 D_t \pi, rf &\in [0.948, 1.118)
\end{aligned} \tag{4.93}$$

$$a_{j1} = \frac{D_j}{2} (\pi + \tau) + \frac{\tau}{\pi} a_p + \frac{\tau - \pi}{4\pi} a_p \tag{4.94}$$

Por lo tanto, las áreas de transferencia de calor por convección son la diferencia con las áreas de transferencia de calor por conducción con respecto a las áreas totales

$$a_{t2} = a_t - a_{t1} \tag{4.95}$$

$$a_{j2} = a_t - a_{j1} \tag{4.96}$$

4.8 Sección transversal

A lo largo del secador solo hay 2 etapas, la única diferencia en el área transversal donde el vaho y la harina recorren son los tubos que hay en la 2° etapa, lo que se resume

1° Etapa

$$S = 0.25\pi D_j^2 \tag{4.97}$$

2° Etapa

$$S = 0.25\pi (D_j^2 - N_t D_t^2) \tag{4.98}$$

Capítulo 5

Simulación, Optimización y Validación del Modelo Matemático del Secador

El desarrollo de las tecnologías computacionales de los últimos años ha permitido que empresas de software creen herramientas para el modelamiento matemático, estas herramientas facilitan el análisis físico-químico de los modelos, pues estos tienden a ser muy complejos y es poco posible encontrar una solución analítica, en este punto es donde la simulación juega un rol importante, y puede proveer de respuestas gráficas del modelo por medio de acciones en el parámetros a controlar.

PROOSIS (Propulsion Object Oriented Simulation Software) es un software que provee una gran cantidad de herramientas para el modelado y simulación de sistemas en continuo y/o discreto de ingeniería, físicos, químicos, matemáticos, biológicos, etc, que toma en cuenta las condiciones iniciales y las condiciones de contorno [7].

Se necesita un conocimiento pleno del sistema a modelar, debido a que se tiene que considerar la naturaleza del sistema, para utilizar el método de integración adecuado para las ecuaciones diferenciales parciales EDP, que se han obtenido del balance unidimensional de masa y energía.

Pero aun así, se tiene que considerar que el modelo matemático es una aproximación de un sistema a partir de las EDP y las relaciones auxiliares obtenidas en transferencia de masa y energía obtenidas en el capítulo 3 y en el capítulo 4, no son exactas y se tiene parámetros desconocidos debido a que no se han encontrado de forma teórica y a su dificultad de hallarlos de forma experimental, por lo que se tiene la necesidad de aplicar un método de estimación de los parámetros desconocidos para su validación final.

5.1 Ecuaciones diferenciales parciales

El modelo del secador de harina de pescado está representado por las ecuaciones diferenciales parciales 4.10, 4.15, 4.19 y 4.23, las relaciones auxiliares y las equivalencias de las propiedades térmicas de los materiales que interviene en el secado. Las ecuaciones 4.31, 4.36, 4.39 y 4.44 se desestiman del modelo debido a que la depresión del vapor saturado generado por el rozamiento en las paredes a este fluido bifásico es casi 0 (Anexo B), por lo tanto la temperatura a lo largo del secador se puede considerar constante.

5.1.1 Identificación de las ecuaciones

Las EDP que se han calculado para representar al secador son EDP homogéneas de primer orden que tienen 2 variables independientes: t en el tiempo y z en el espacio. El modelo es un sistema no lineal, por una variedad de condiciones en el espacio planteadas en el modelamiento. Al ser un modelo representado con EDP se tienen diferentes componentes que se identificarán como un sistema particular, por lo cual se tiene la necesidad de analizar el modelo para identificar cada uno de los términos y sus puntos de equilibrio.

- Balance de Masa – Fase sólida (ecuaciones (4.10), (4.71))

$$-W_{S1} \frac{\partial X}{\partial z} - X_1 \frac{\partial W_S}{\partial z} - \frac{\partial X}{\partial z} \frac{\partial m_S}{\partial t} - w_D a_S = (1 - \varepsilon) \rho_S S_H \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.1)$$

Flujo de Masa
Transferencia de Masa
Termino Inestable

$$\frac{\partial m_S}{\partial t} = W_{S1} - W_{S2} \quad (5.2)$$

$$w_D = k_Y \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} \Delta Y \quad (5.3)$$

- Punto de Equilibrio de la Fase sólida (humedad)

El punto de equilibrio en la humedad de harina de pescado es X^* , se considera así pues es el punto de isoterma de sorción para la temperatura de secado.

- Balance de Energía – Fase sólida (ecuaciones (4.14), (3.21) y (4.46))

$$-W_S \frac{\partial i_m}{\partial z} - i_m \frac{\partial W_S}{\partial z} - \frac{\partial i_m}{\partial z} \frac{\partial m_S}{\partial t} + \dot{q}_{vs} a_S + \dot{q}_{jts} a_c - w_D h_{Av} a_S = (1 - \varepsilon) \rho_S S_H \frac{\partial i_m}{\partial t} \quad (5.4)$$

Flujo de Energía
Transferencia de Energía
Termino Inestable

$$i_m = (c_S + c_{Al} X) T_s - \Delta h_s X \quad (5.5)$$

$$\dot{q}_{vs} = j_{vs}(T_v - T_s); \dot{q}_{jts} = j_{jts}(T_{sat} - T_s) \quad (5.6)$$

- Punto de Equilibrio de la Fase sólida (Temperatura)

El punto de equilibrio de temperatura de los sólidos está acotado por las temperaturas superiores T_{sat} y T_v .

- Balance de Masa – Fase gaseosa (ecuaciones (4.18) y (4.70))

$$W_B \frac{\partial Y}{\partial Z} + w_D a_S = \rho_B S_V \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (5.7)$$

Flujo de Masa Transferencia de Masa Término Inestable

$$w_D = k_Y \Phi (Y^* - Y) \quad (5.8)$$

- Punto de Equilibrio de la Fase gaseosa (humedad)

El punto de equilibrio en la humedad del vaho que genera la harina es Y^* , que es humedad absoluta saturada para la temperatura del vaho.

- Balance de Energía – Fase gaseosa (ecuaciones (4.22), (3.15) y (3.17))

$$W_B \frac{\partial i_g}{\partial Z} + \dot{q}_{jv} a_j + \dot{q}_{tv} a_t - \dot{q}_{vs} a_s + w_D h_{Av} a_s = \rho_B S_V \frac{\partial i_g}{\partial t} \quad (5.9)$$

Flujo de Energía Transferencia de Energía Término Inestable

$$i_g = (c_B + c_A Y) T_v + \Delta h_{v0} Y \quad (5.10)$$

$$h_{Av} = c_A T_v + \Delta h_{v0} \quad (5.11)$$

$$\dot{q}_{jv} = j_{jv}(T_{sat} - T_v); \dot{q}_{tv} = j_{tv}(T_{sat} - T_v); \dot{q}_{vs} = j_{vs}(T_v - T_s) \quad (5.12)$$

- Punto de Equilibrio de la Fase gaseosa (Temperatura)

El punto de equilibrio de temperatura de los sólidos está acotado por la temperatura superior T_{sat} y T_v de la fase gaseosa a 1 atm, pues el interior del secador está en comunicación con el ambiente.

5.1.2 Condiciones de contorno e iniciales

En [62] las EDP de primer orden que se tienen para representar al sistema por medio del modelo, se utiliza la condiciones de contorno CC e iniciales CI del tipo Dirichlet, es decir también las CC y CI de primer orden donde las condiciones solo contiene las variables dependientes. Las condiciones iniciales están incluidos en este tipo, lo cuales tienen la siguiente forma

$$u(z, 0) = u_0 \tag{5.13}$$

Y las condiciones de contorno de la superficie del sistema está dado por

$$u(0, t) = CC \text{ ó } u(L, t) = CC \tag{5.14}$$

Las CI en el secador son difíciles de determinar debido a que estos valores dependen del momento inicial de simulación, por lo que se puede asumir un valor aproximado en cada uno de los parámetros.

En el análisis del sistema Figura 57, se observaron que las condiciones CC está determinado por

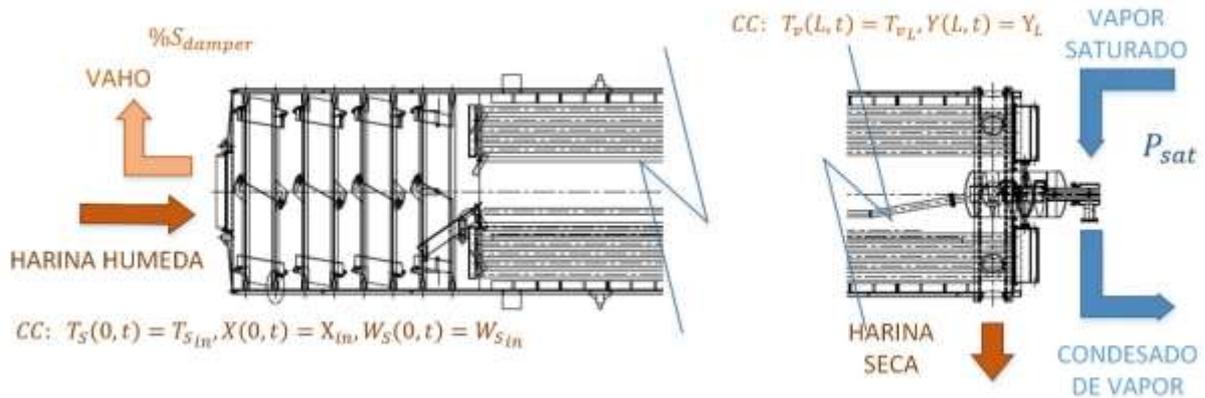


Figura 57. Condiciones de Contorno y Variables Controlables del Secador
Fuente: Elaboración propia

$CC: \quad T_S(0, t) = T_{S_{in}}, X(0, t) = X_{in}, W_S(0, t) = W_{S_{in}},$ $T_v(L, t) = T_{vL}, Y(L, t) = Y_L$	(5.15)
---	----------

5.2 Discretización del modelo matemático

La dinámica de este proceso es descrita por un modelo no lineal en parámetros distribuidos, el método más popular para resolver el sistema es por diferencias finitas DF [4]. Las DF son sencillas de implementar y permiten abordar una gran cantidad de clases de problemas, pero también tiene sus desventajas al ser implementado en ciertos casos. Principalmente, los DF no son muy convenientes cuando se trata de problemas en varias dimensiones espaciales con dominios irregulares. Pero existen otra familia de técnicas, los métodos de los residuos ponderados como es el método de elementos finitos, colocación ortogonal y la descomposición ortogonal adecuada.

Los métodos de los residuos pesados constituyen toda una familia de técnicas para desarrollar soluciones aproximadas de las ecuaciones de los operadores, de acuerdo al teorema de la serie de Fourier [5], la solución de las EDP pueden ser aproximados a

$$\hat{x}(z, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \varphi_i(z) \quad (5.16)$$

Donde $\varphi_i(z)$ es conocida como función base, estas son normalmente ortogonal entre ellas y debe cumplir las condiciones de contorno. Dado la función base $\varphi_i(z)$, la familia de residuos pesados (weighted residual), busca a la función $a_i(t)$ que cancela una integral pesada (weighted integral) de los residuos R sobre el dominio espacial Ω . Los pesos son denotados por la $W_i(z)$.

$$\int_{\Omega} W_i(z) R(z, t) dz = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5.17)$$

Dependiendo de la elección de $W_i(z)$, surgen diferentes métodos

Mínimos cuadrados	$W_i = R(z, t)$	$\int_{\Omega} R(z, t)^2 dz = 0$	(5.18)
-------------------	-----------------	----------------------------------	--------

Galerkin	$W_i = \varphi_i(z)$	$\int_{\Omega} \varphi_i(z) R(z, t) dz = 0$	(5.19)
----------	----------------------	---	--------

Colocación	$W_i = \delta(z - z_i)$	$R(z_i, t) = 0$	(5.20)
------------	-------------------------	-----------------	--------

5.2.1 Colocación ortogonal

Es posible acelerar la convergencia seleccionando cuidadosamente los puntos de colocación en las raíces de los puntos ortogonales. Este conjunto de puntos z_i son reemplazados en el dominio del espacio y la solución aproximada es forzada a coincidir con uno de estos puntos.

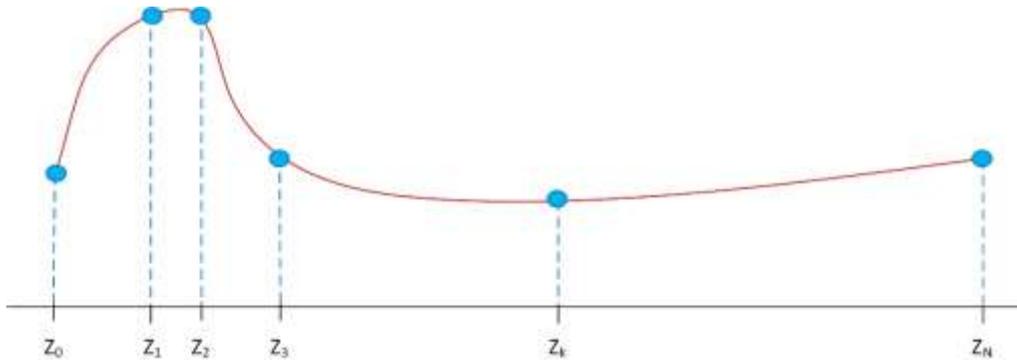


Figura 58. Perfil de estado para un instante t
 Fuente: César de Prada UVA
 Elaboración propia

Para un modelo de un sistema que tenga una variedad de no linealidades, el espacio del dominio es dividido en K intervalos o elementos $\langle z_{k-1}, z_k \rangle$ de longitud $\Delta_k = z_k - z_{k-1}$

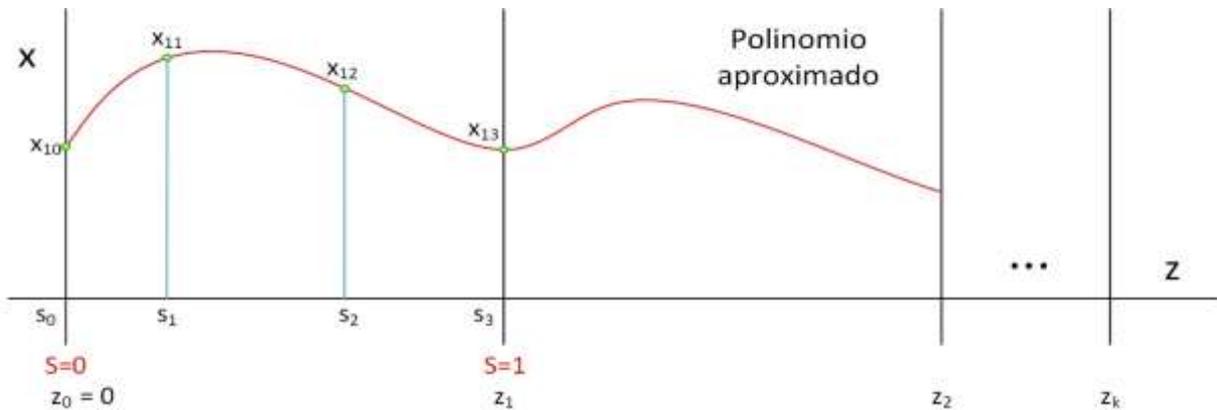


Figura 59. Polinomios aproximados de 3° orden en los puntos de colocación
 Fuente: César de Prada UVA
 Elaboración propia

$$x(s_{kj}, t) = x(z_{k-1} + s_j \Delta_k, t) = x_{kj}(t) \tag{5.21}$$

En todos los intervalos $\langle z_{k-1}, z_k \rangle$ la solución x en un instante determinado t , es aproximada por un polinomio, esto permite las discontinuidades en el perfil de control. Existe varios tipos de aproximación del polinomio que pueden ser usados, una opción es la aproximación de la evolución de las variables por una combinación lineal de un polinomio conocido $P_j(\tau)$ orden P . Los polinomios de interpolación de Lagrange son los recomendables.

$$P_j(s) = \prod_{i=0, i \neq j}^P \frac{s - s_i}{s_j - s_i} \tag{5.22}$$

s es el espacio normalizado $\in (0,1]$, los $P+1$ puntos de colocación s_i son puestos en una posición fija en cada uno elementos k , existen diferentes métodos para elegir estos puntos, se puede utilizar los polinomios de Lagrange para hallar los puntos de colocación para polinomios de orden $P+1$

$$\int_0^1 P_j(\tau)P_i(\tau)d\tau = 0 \quad i \neq j \quad (5.23)$$

La solución de la ecuación (5.23) resulta las raíces de los polinomios de Gauss-Legendre and Radau [63], que tiene como solución los valores Tabla 8

$$P_P^{Legendre}(s) = \sum_{j=0}^P (-1)^{P-j} s^j \gamma_j, \gamma_0 = 1 \wedge \gamma_j = \frac{(P-j+1)(P+j)}{j^2} \quad (5.24)$$

$$P_P^{Radau}(s) = \sum_{j=0}^P (-1)^{P-j} s^j \gamma_j, \gamma_j = \frac{(P-j+1)(P+j+1)}{j^2} \quad (5.25)$$

Tabla 8. Solución de las Raíces de Legendre y Radau

Grados	Raíces de Legendre	Raíces de Radau
1	0,500000	1,000000
2	0,211325	0,333333
	0,788675	1,000000
3	0,112702	0,155051
	0,500000	0,644949
	0,887298	1,000000
4	0,069432	0,088588
	0,330009	0,409467
	0,669991	0,787659
	0,930568	1,000000
5	0,046910	0,057104
	0,230765	0,276843
	0,500000	0,583590
	0,769235	0,860240
	0,953090	1,000000

Fuente: Lorenz T. Biegler (2010)
Elaboración propia

Con los puntos de colocación los parámetros $x(z, t)$ son aproximados como[5]

$$x(z, t) \approx \sum_{j=0}^P P_j(s) x_{kj}(t) \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial x(z, t)}{\partial z} \approx \sum_{j=0}^P \frac{\partial P_j(s)}{\partial s} \frac{x_{kj}(t)}{\Delta_k} \quad (5.27)$$

Para las EDP

$$\frac{\partial x}{\partial t} = v \frac{\partial x}{\partial z} + F(x, t) \quad (5.28)$$

Deben ser satisfechas los puntos de colocación s_i

$$\dot{x}_{ki}(t) = v \sum_{j=0}^P \frac{\partial P_j(s_{ki})}{\partial s} \frac{x_{kj}(t)}{\Delta_k} + F(x_{ki}(t), t), \quad k = 1, \dots, K \wedge i = 1, \dots, P \quad (5.29)$$

Esto satisface una serie de ecuaciones que permite estimar o calcular los valores que se desconoce $x_{ki}(t)$. Pero se debe mantener el perfil de continuidad entre los elementos por lo que se debe considerar

$$x(z_k, t) = x_{k+1,0}(t) = x_{k,P}(t) \quad (5.30)$$

Y es necesario conocer la CC

$$x(z_0, t) = x_{10} = \text{boundary} \quad (5.31)$$

5.2.2 Solución numérica del secador

El sistema se integra entre $t \in [0, 20000] \wedge z \in [0, L], L = 21.7m$. El secador tiene 2 etapas ($L_1 = 4.1m$ y $L_2 = L - L_1$) por lo que elegirá que $K_1 = 2$ para la 1º Etapa ($\Delta_{k1} = (L_1 - 0)/K_1$) y $K_2 = 5$ para la 2º Etapa ($\Delta_{k2} = (L - L_1)/K_2$), por lo tanto $K = K_1 + K_2 = \text{sec}$, con un tiempo de estancia de la harina $t_{\text{estancia}} = 2700 \text{ s}$. Se aplica los puntos de colocación de Radau para $P=3$ ($s_1 = 0, s_2 = 0.155051, s_3 = 0.644949, s_4 = 1$) en la ecuación (5.22).

$$P_0 = \frac{s - s_1}{s_0 - s_1} \frac{s - s_2}{s_0 - s_2} \frac{s - s_3}{s_0 - s_3} = -10s^3 + 18s^2 - 9s + 1 \quad (5.32)$$

$$P_1 = \frac{s - s_0}{s_1 - s_0} \frac{s - s_2}{s_1 - s_2} \frac{s - s_3}{s_1 - s_3} = 15.5808s^3 - 25.6296s^2 + 10.0488s \quad (5.33)$$

$$P_2 = \frac{s - s_0}{s_2 - s_0} \frac{s - s_1}{s_2 - s_1} \frac{s - s_3}{s_2 - s_3} = -8.9141s^3 + 10.2963s^2 - 1.3821s \quad (5.34)$$

$$P_3 = \frac{s - s_1}{s_3 - s_1} \frac{s - s_1}{s_3 - s_1} \frac{s - s_2}{s_3 - s_2} = 3.3333s^3 - 2.6667s^2 + 0.3333s \quad (5.35)$$

Entonces

$$\frac{\partial P_0(s)}{\partial s} = -30s^2 + 36s - 9 \quad (5.36)$$

$$\frac{\partial P_1(s)}{\partial s} = 46.7423s^2 - 51.2592s + 10.0488 \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial P_2(s)}{\partial s} = -26.7423s^2 + 20.5925s - 1.3821 \quad (5.38)$$

$$\frac{\partial P_3(s)}{\partial s} = 10s^2 - 5.3333s + 0.3333 \quad (5.39)$$

Las EDP que tiene la forma de la ecuación (5.29) de los VC1 y VC2 es evaluado en los puntos de Radau.

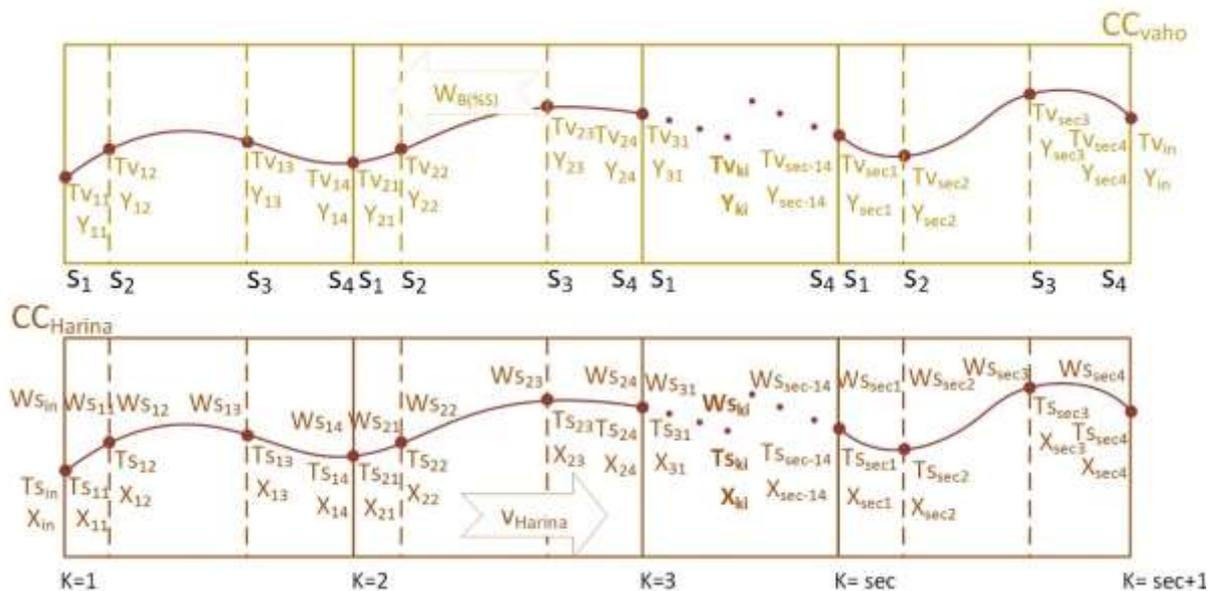


Figura 60. Continuidad en los perfiles de las aproximaciones polinomiales de cada uno de los estados

Fuente: Elaboración propia

$$\frac{\partial \mathbf{X}(z, t)}{\partial z} \approx \sum_{j=1}^{P+1} \frac{\partial P_j(s)}{\partial s} \frac{\mathbf{X}_{kj}(t)}{\Delta_k} \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial T_s(z, t)}{\partial z} \approx \sum_{j=1}^{P+1} \frac{\partial P_j(s)}{\partial s} \frac{T_{skj}(t)}{\Delta_k} \quad (5.41)$$

$$\frac{\partial W_s(z, t)}{\partial z} \approx \sum_{j=1}^{P+1} \frac{\partial P_j(s)}{\partial s} \frac{W_{skj}(t)}{\Delta_k} \quad (5.42)$$

$$\frac{\partial \mathbf{Y}(z, t)}{\partial z} \approx \sum_{j=1}^{P+1} \frac{\partial P_j(s)}{\partial s} \frac{\mathbf{Y}_{kj}(t)}{\Delta_k} \quad (5.43)$$

$$\frac{\partial T_v(z, t)}{\partial z} \approx \sum_{j=1}^{P+1} \frac{\partial P_j(s)}{\partial s} \frac{T_{vkj}(t)}{\Delta_k} \quad (5.44)$$

El desarrollo de cada uno de las aproximaciones

$$\frac{\partial \mathbf{x}(z, t)}{\partial z} \approx \sum_{j=0}^P \frac{\partial P_j(s)}{\partial s} \frac{\mathbf{x}_{kj}(t)}{\Delta_k} \quad (5.45)$$

$$\frac{\partial x_1(z, t)}{\partial z} = \frac{\partial P_0(s_1)}{\partial s} \frac{x_0(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_1(s_1)}{\partial s} \frac{x_1(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_2(s_1)}{\partial s} \frac{x_2(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_3(s_1)}{\partial s} \frac{x_3(t)}{\Delta_k} \quad (5.46)$$

$$\frac{\partial x_2(z, t)}{\partial z} = \frac{\partial P_0(s_2)}{\partial s} \frac{x_0(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_1(s_2)}{\partial s} \frac{x_1(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_2(s_2)}{\partial s} \frac{x_2(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_3(s_2)}{\partial s} \frac{x_3(t)}{\Delta_k} \quad (5.47)$$

$$\frac{\partial x_3(z, t)}{\partial z} = \frac{\partial P_0(s_3)}{\partial s} \frac{x_0(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_1(s_3)}{\partial s} \frac{x_1(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_2(s_3)}{\partial s} \frac{x_2(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_3(s_3)}{\partial s} \frac{x_3(t)}{\Delta_k} \quad (5.48)$$

$$\frac{\partial x_4(z, t)}{\partial z} = \frac{\partial P_0(s_4)}{\partial s} \frac{x_0(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_1(s_4)}{\partial s} \frac{x_1(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_2(s_4)}{\partial s} \frac{x_2(t)}{\Delta_k} + \frac{\partial P_3(s_4)}{\partial s} \frac{x_3(t)}{\Delta_k} \quad (5.49)$$

Para las entalpías en base seca del sistema se usa las ecuaciones (5.5) y (5.10)

$$\frac{\partial i_m(z, t)}{\partial z} = (c_s + c_{AlX}) \frac{\partial T_s(z, t)}{\partial z} + (c_{AlT_s} - \Delta h_s) \frac{\partial \mathbf{X}(z, t)}{\partial z} \quad (5.50)$$

$$\frac{\partial i_g(z, t)}{\partial z} = (c_B + c_A Y) \frac{\partial T_v(z, t)}{\partial z} + (\Delta h_{v0} + c_A T_v) \frac{\partial Y(z, t)}{\partial z} \quad (5.51)$$

En los flujos (harina y vaho) se usa las ecuaciones (5.2) y (4.78)

$$\frac{\partial m_{S_{kj}}}{\partial t} = W_{S_{kj-1}} - W_{S_{kj}}, \quad j = 2, 3, 4 \quad (5.52)$$

Se evalúa el flujo de los sólidos

$$W_{S_{kj}} = \frac{m_{S_{kj}}}{\Delta_k((s_j - s_{j-1}))} * v, \quad j = 2, 3, 4 \quad (5.53)$$

El flujo de salida del vaho depende de % S_{damper}

$$q = \%S_{damper} \cdot K_x \sqrt{\Delta p_v (p_1 + p_2)} \quad (5.54)$$

Para el modelamiento del secador

$$W_B (Y_{11} + 1) = \%S_{damper} \cdot K_x \sqrt{p_{11}^2 - p_{ex}^2} \quad (5.55)$$

p_{ex} , presión absoluta en el extractor de vaho después del dámper

$$W_B = \%S_{damper} \cdot K_x \frac{\sqrt{p_{11}^2 - p_{ex}^2}}{(Y_{11} + 1)} \quad (5.56)$$

Con los datos administrados por la Empresa diamante de su control de proceso en la planta de la sede Callao (Anexo D), hallamos los valores promedios que trabaja el secador para completar los datos necesarios para solucionar el sistema; se considera constante todos los parámetros del sistema.

Por experiencia los operarios normalmente mantienen el regular del dámper al 50% (% $S_{damper} = 0.5$). La velocidad de avance de la harina a lo largo del secador es complejo que depende de la velocidad angular que gira el secador, pero se conoce que el tiempo de estancia de la harina en el secador es 45 min por lo tanto

$$v = \frac{L}{t_{estancia}} * \frac{1}{60} = \frac{21.7}{45 * 60} = 7.9444 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

De los datos solicitados a la planta (Anexo D) se considera que la $p_{ex} = 0.8 \text{ atm}$ y como única fuente de calor al sistema al vapor saturado que hay en la chaqueta y en los tubos

en los cuales se encuentra distribuido el flujo bifásico con $P_{sat} = 4.2 \text{ atm}$ a lo largo de todo el secador.

Los valores aproximados CI de $X_0 = 0.7$, $T_{s_0} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$, $m_{s_0} = W_{sin} t_{estancia}/L$, $T_{v_0} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$, $Y_0 = 1$ y $P_{t_0} = 1 \text{ Atm}$, entonces

$$X_{ki}(z, 0) = X_0, \quad k \in [1, K_1]; \quad (5.57)$$

$$X_{ki}(z, 0) = X_0 - 0.12(i - 3) - 0.03k, \quad k \in [K_1 + 1, K_2] \quad (5.58)$$

$$T_s(z, 0) = T_{s_0} \quad (5.59)$$

$$m_{s_{ki}}(z, 0) = m_{s_0}(s_{i+1} - s_i)\Delta_{k1}, \quad k \in [1, K_1]; \quad (5.60)$$

$$m_{s_{ki}}(z, 0) = m_{s_0}(s_{i+1} - s_i)\Delta_{k2}, \quad k \in [K_1 + 1, K_2] \quad (5.61)$$

$$T_v(z, 0) = T_{v_0} \quad (5.62)$$

$$Y(z, 0) = Y_0 \quad (5.63)$$

$$P_t(z, 0) = P_{t_0} \quad (5.64)$$

Y las CC de la ecuación (5.15), completamos lo necesario para resolver el sistema de ecuaciones que representa a los fenómenos físico-químicos que ocurren en el secador.

$$CC: \quad T_s(0, t) = T_{sin} = 95^\circ\text{C}$$

$$X(0, t) = X_{in} = 0.7$$

$$W_s(0, t) = W_{sin} = 3.215 \text{ kg/s} \quad (5.65)$$

$$T_v(L, t) = T_{vL} = 95^\circ\text{C}$$

$$Y(L, t) = Y_L = \frac{M_W}{M_G} \frac{\psi p_W^0}{P - \psi p_W^0}, \quad \psi = 0.98$$

Las propiedades para la transferencia de masa y calor, y los modelos de las propiedades térmicas de los materiales involucrados se encuentran formulados en el anexo E y el anexo F respectivamente.

Para un gráfico uniforme se recalcula los valores de cada uno de los parámetros utilizando la ecuación (5.26) considerando $s = \{0, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1\}$

5.3 Simulación del modelo matemático

La simulación de procesos a partir de su modelamiento matemático hoy en día se ha vuelto de necesidad absoluta para el diseño, control o mejoras de estos. Los sistemas simulados permiten a las compañías reducir el tiempo en pruebas y costos de manufactura.

PROOSIS es un software reconocido internacionalmente por sus herramientas dedicadas para el modelamiento y simulación de procesos, estas herramientas poseen capacidades para llevar a cabo una amplia gama de simulaciones para un análisis de las respuestas en estado estacionario y/o transitorio.

En el secador rotatubo de harina de pescado los parámetros más importantes a estudiar son X y T_s , pero el análisis de otros parámetros (Y, T_v, v_{prom} y m_{harina}) nos ayudará a entender mejor el comportamiento de los fenómenos físico-químicos que ocurren en el interior del secador.

Las evoluciones espacio-temporal de la dinámica de estos parámetros corresponden a las EDP, con las señales de excitación constantes ($T_{S_{in}}, X_{in}, W_{S_{in}}, P_{sat}$ y $\%S_{damper}$).

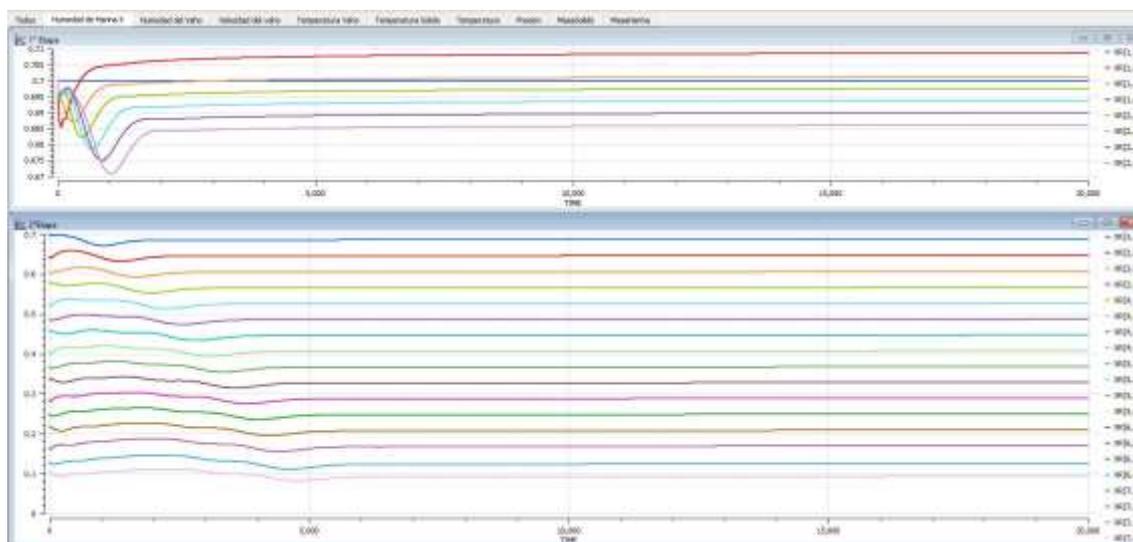


Figura 61. Simulación en los puntos uniformes de colocación de la humedad de la harina – X (PROOSIS)

Fuente: Elaboración propia

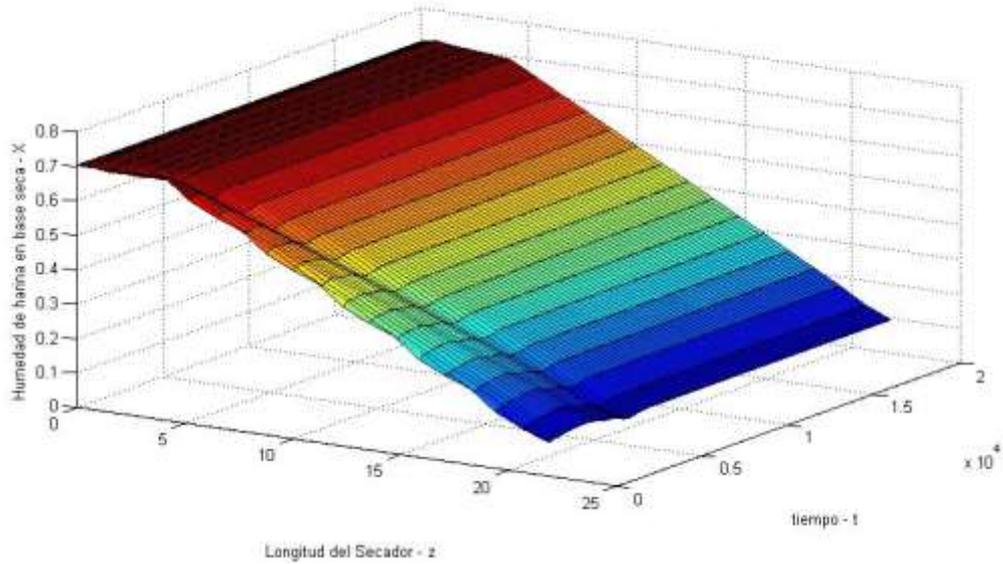


Figura 62. Evolución del espacio-temporal de la humedad de la harina – X (MATLAB)
Fuente: Elaboración propia

La simulación muestra la dinámica de la humedad de la harina, se observa que en la 1° etapa la harina no se seca, y por estar el vaho saturado, la harina se humedece en la 1° sección. El tiempo de establecimiento de la parte transitoria es de 5000seg.

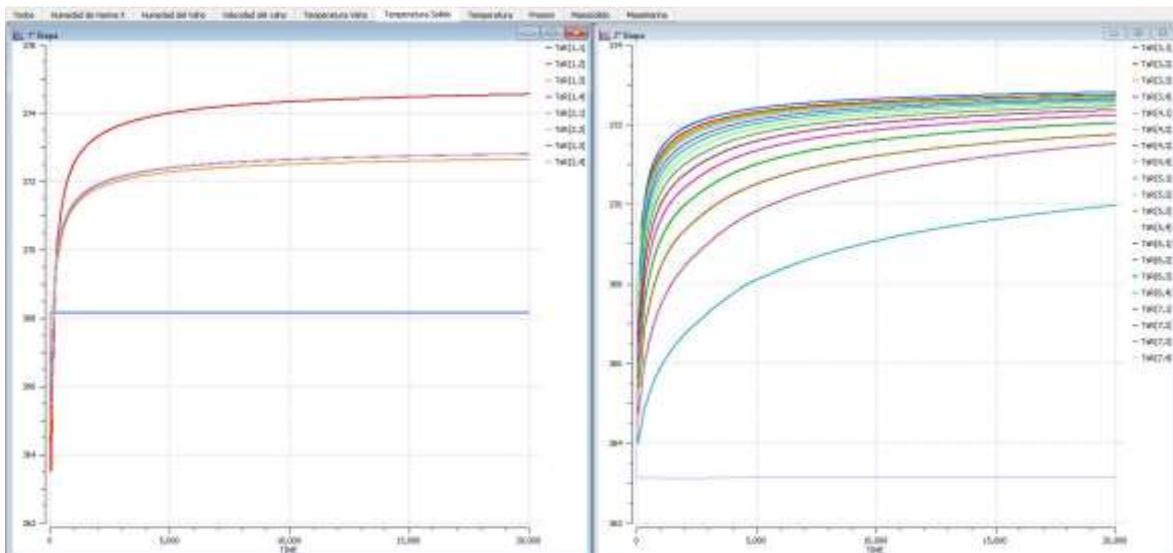


Figura 63. Simulación en los puntos uniformes de colocación de la Temperatura de la harina – Ts (PROOSIS)
Fuente: Elaboración propia

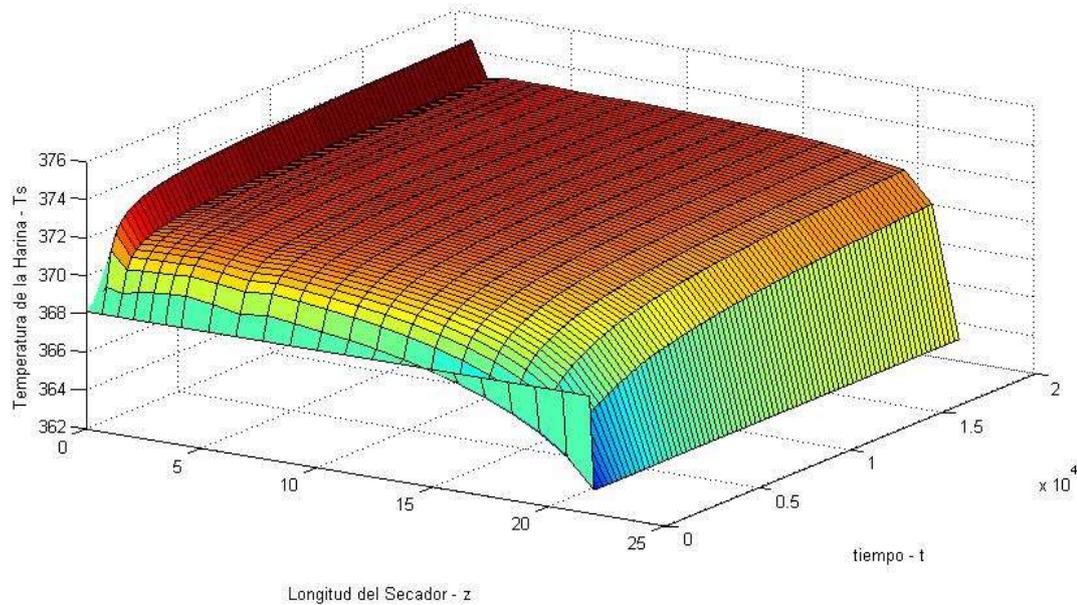


Figura 64. Evolución del espacio-temporal de la Temperatura de la harina – T_s – X (MATLAB)
Fuente: Elaboración propia

La temperatura de los sólidos no es uniforme a lo largo del secador, hay un pico en la 1° sección, es debido a que está próximo a la salida y se genera una mayor presión. Cumple que el punto de equilibrio es aproximadamente igual a la temperatura del vaho.

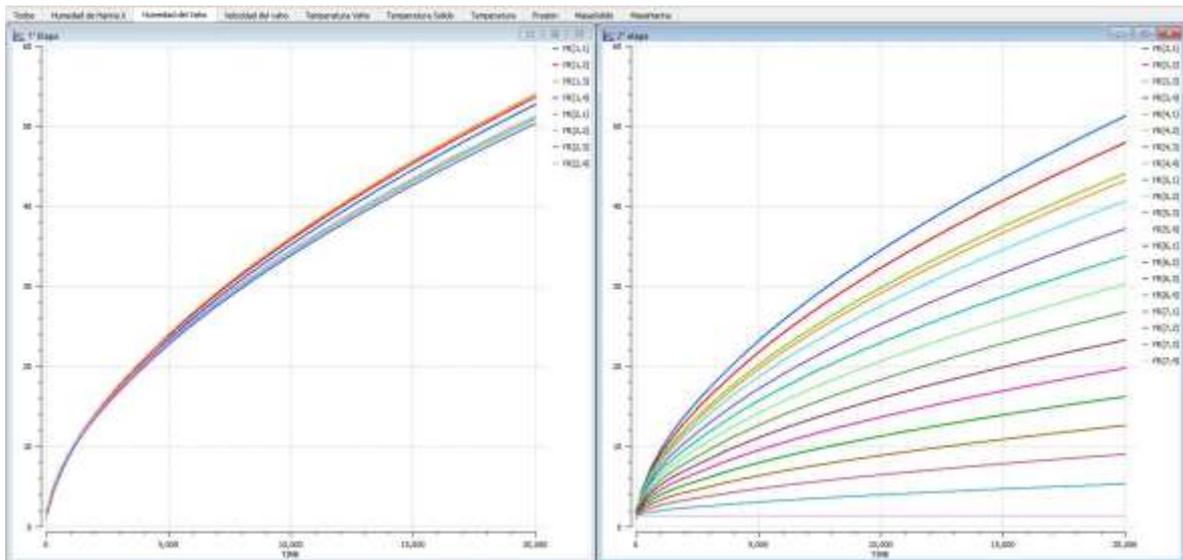


Figura 65. Simulación en los puntos uniformes de colocación de la humedad absoluta del vaho – Y (PROOSIS)
Fuente: Elaboración propia

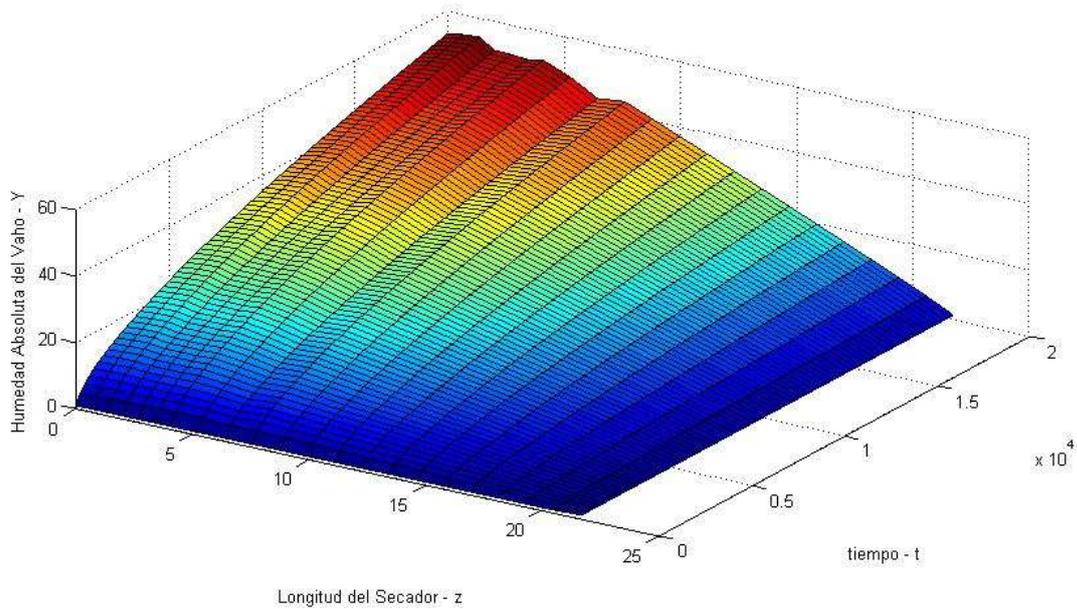


Figura 66. Evolución del espacio-temporal de la humedad absoluta del vaho – Y (MATLAB)
Fuente: Elaboración propia

La humedad del vaho tarda en establecerse, debido a que tarda en saturarse, se tiene mayor humedad a la salida del vaho, lo cual es correcto considerando debido que al secarse la harina va entregando masa de agua al vaho.

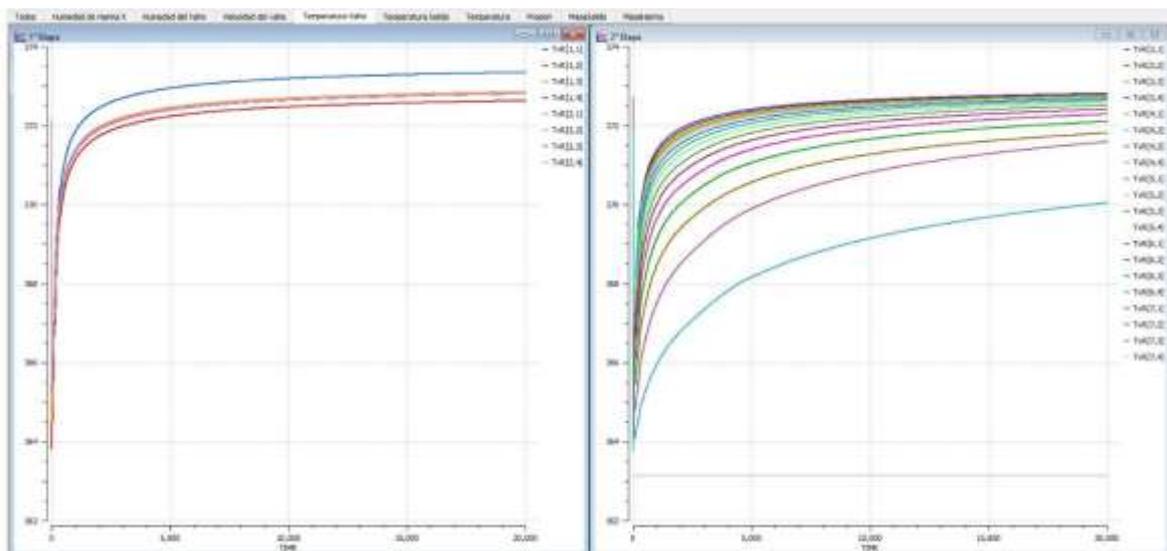


Figura 67. Simulación en los puntos uniformes de colocación de la Temperatura del vaho – Tv (PROOSIS)
Fuente: Elaboración propia

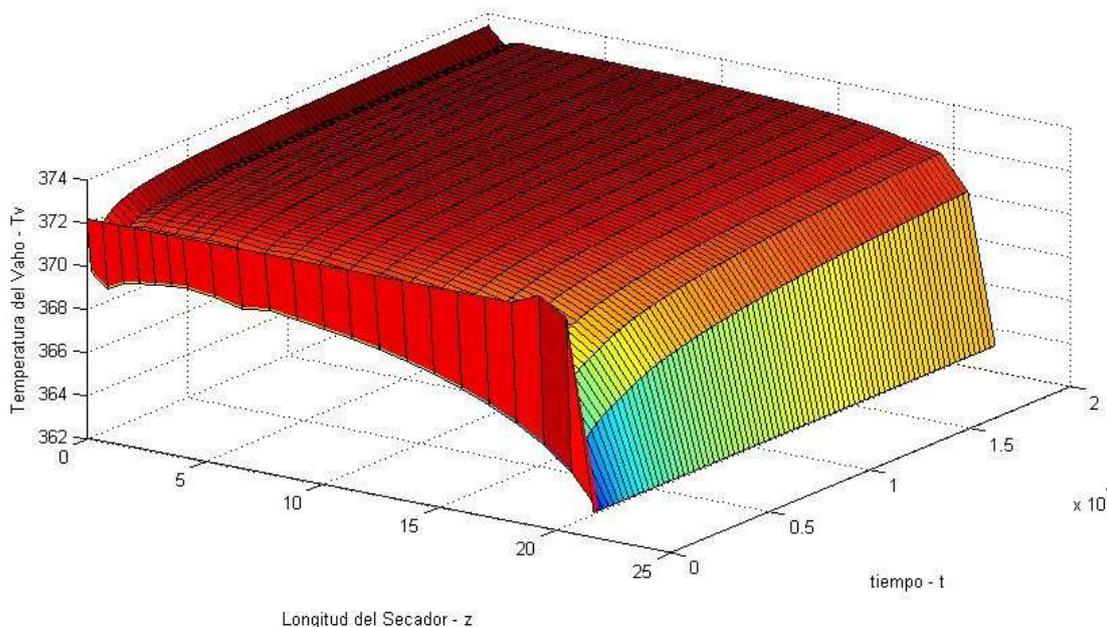


Figura 68. Evolución del espacio-temporal de la Temperatura del vaho – T_v (MATLAB)
Fuente: Elaboración propia

La dinámica de la temperatura del vaho es más rápida que la dinámica de la temperatura de la harina, es debido a que la masa instantánea del vaho es mucho menor a la de la harina. El punto de equilibrio es aproximadamente igual a la temperatura de vaporización a 1 atm, lo que es correcto debido a que el vaho se encuentra en comunicación con la parte exterior del secador y que la depresión es de un valor muy pequeño para ser considerado.

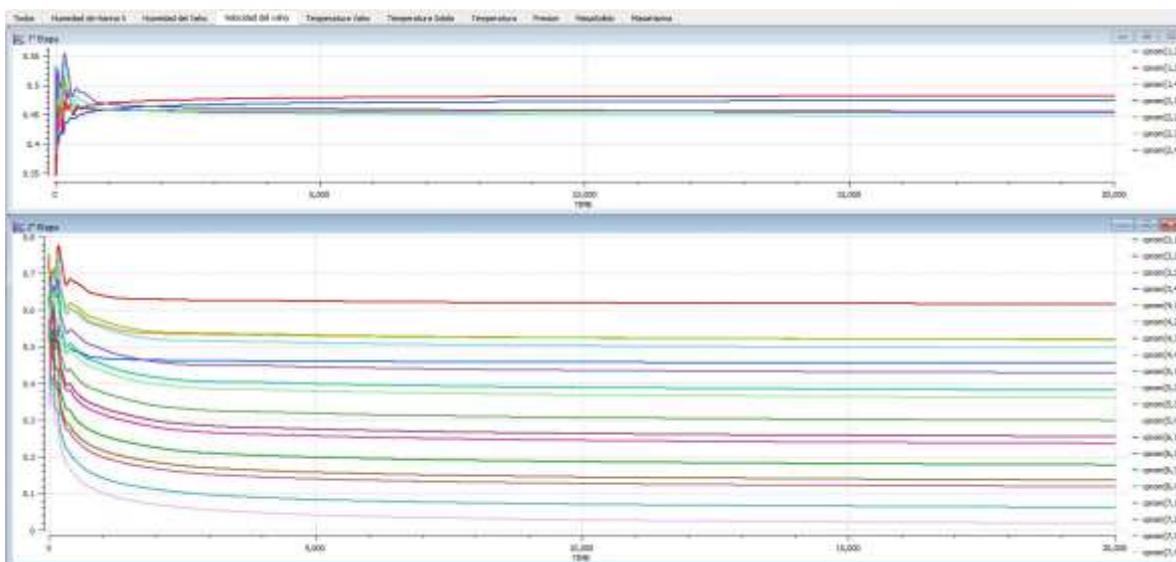


Figura 69. Simulación en los puntos uniformes de colocación de la velocidad del vaho – V_{prom} (PROOSIS)

Fuente: Elaboración propia

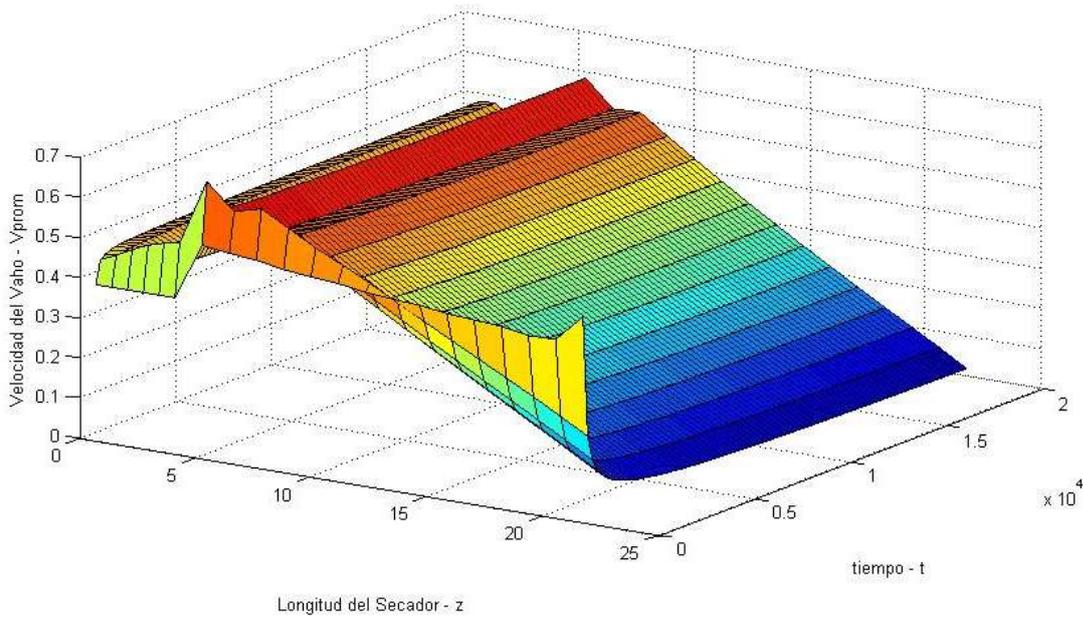


Figura 70. Evolución del espacio-temporal de la velocidad del vaho – Vprom (MATLAB)
Fuente: Elaboración propia

Se nota en la gráfica la no linealidad de la velocidad del vaho al pasar de la 2° etapa a la 1° etapa, la velocidad aumenta conforme aumenta en flujo de agua evaporada en cada sección.

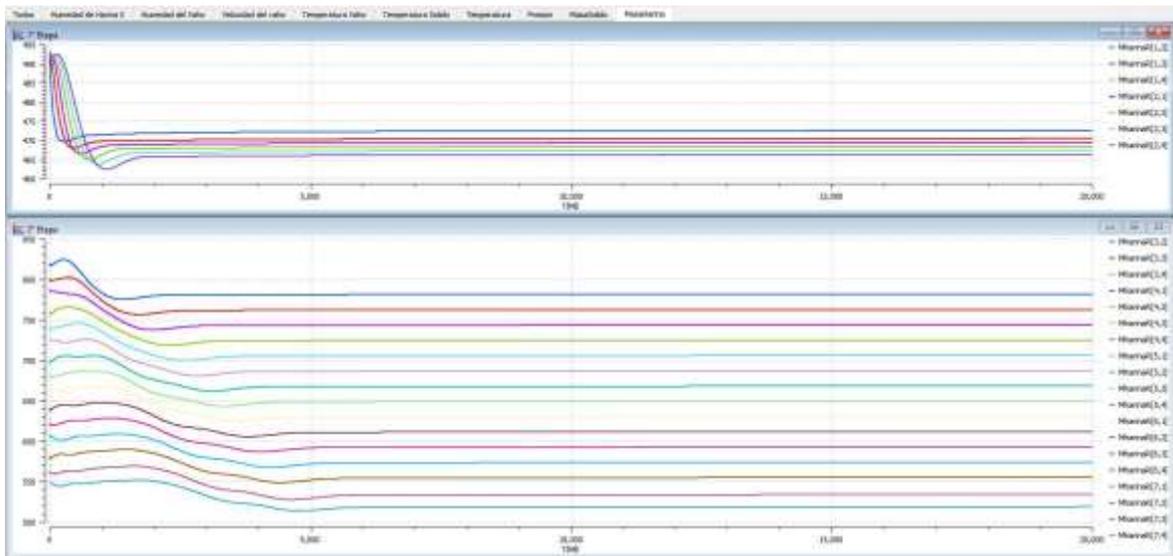


Figura 71. Simulación en los puntos uniformes de colocación de la Masa de harina – Mharina (PROOSIS)
Fuente: Elaboración propia

La gráfica muestra la variación en el tiempo de las masas instantáneas de cada una de las secciones en el secador.

5.4 Estimación de parámetros desconocidos

Hay parámetros en el proceso de secado de harina de pescado que se desconocen debido a que son muy difíciles de hallar de forma experimental y/o no hay un estudio que pueda dar un valor confiable para este sistema tan específico, por lo que se recurrió a dar valores razonables al sistema que puedan ser ajustados.

La porosidad ε es un fenómeno que depende del contenido de agua, de los agujeros creados o destruidos durante el proceso de secado. Estos cambios están relacionados con el proceso de la partícula porosa. Este es un parámetro que se necesita estimar, aunque aun así no será confiable debido a sus dependencias[64].

La humedad crítica X_{cr} , es el punto donde comienza la región de disminución de la velocidad de secado debido a que ya no existe una película uniforme en la superficie de la partícula porosa. El valor de este parámetro también es complicado de hallar pues depende de la composición de las partículas, por lo cual es otro parámetro que se necesita estimar.

El valor de la constante K_x es un valor del dämper que se necesita estimar de forma directa debido a que no hay ninguna referencia para este valor.

El cálculo de la transferencia de calor por conducción no es realmente confiable por la gran cantidad de movimientos que ocurren en el interior del secador, por lo que es necesario estimar el factor K_s que multiplique al coeficiente.

5.4.1 Optimización Dinámica

La optimización dinámica estudia la obtención de la solución óptima de sistemas que evolucionan en el tiempo los cuales son sensibles a la influencia de decisiones externas. En [6] indica que la función objetivo a optimizar para un modelo dinámico es $J(\mathbf{u}(t), \mathbf{x}(t))$, que está en función de las variables de decisión $\mathbf{u}(t)$ y de las variables de estado $\mathbf{x}(t)$, que a su vez están en función del tiempo. Las restricciones de un problema de optimización dinámica pueden incluir ecuaciones diferenciales como también límites inferiores y superiores de las variables de decisión, lo cual se formula

Minimizar $J(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ respecto a \mathbf{u}

$$\text{Sujeto a:} \quad g_m(x, u) \geq 0 \quad m = 1, 2, \dots, m$$

$$h_k(x, u) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, k \quad (5.66)$$

$$u_{inferior} \leq u \leq u_{superior} \quad (5.67)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), t) \quad (5.68)$$

$$\hat{y}(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (5.69)$$

Donde $x(t)$ son las variables del sistema, $\hat{y}(t)$ son las predicciones del modelo para las respuestas medibles del sistema y $u(t)$ es el vector de variables de decisión. La función objetivo a minimizar se calculará para unos valores determinados de la variable de decisión mediante la simulación del modelo en PROOSIS.

5.4.2 Resolución por Optimización

En la resolución de la estimación de los parámetros para cada valor del vector de parámetros θ (variables de decisión) el modelo proporciona una predicción de la respuesta del sistema $\hat{y}(\theta)$. Se obtienen muestras de las entradas $u(t)$ y salidas $y(t)$ del sistema real con el tiempo de muestreo τ , y un periodo $t=1\dots N$. Para cada instante de tiempo t , el error de predicción $e(t)$ es medida del modelo

$$e(\theta, t) = \hat{y}(\theta, t) - y(t) \quad (5.70)$$

El objetivo es encontrar los valores de los parámetros θ que minimizan los errores de predicción a lo largo del experimento. Esto se formula como

$$\min_{\theta} J = \sum_i \sum_{t=1}^N \gamma_i [e_i(t)]^2 = \sum_i \sum_{t=1}^N \gamma_i \cdot [\hat{y}_i(u, \theta, t) - y_i(t)]^2 \quad (5.71)$$

Sujeto a las restricciones

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), \theta, t) \quad (5.72)$$

$$\hat{y}(t) = g(x(t), u(t), \theta, t) \quad (5.73)$$

$$\theta_{inferior} \leq \theta \leq \theta_{superior} \quad (5.74)$$

La función objetivo se reformula a partir de los criterios de mínimos cuadrados

$$\min_{\theta} J = \sum_{t=1}^N [\hat{y}(u, \theta, t) - y(t)]^T \cdot Q \cdot [\hat{y}(u, \theta, t) - y(t)] \quad (5.75)$$

Donde Q es una matriz diagonal de pesos γ_i , igual a la inversa de la matriz de covarianzas del ruido

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (5.76)$$

5.4.3 Simulación de la estimación de parámetros desconocidos

Se ha hecho un análisis de los datos históricos de la planta, tratando de tener la mayor cantidad de muestras consecutivas en un solo proceso, por lo que se ha escogido los datos tomados el 01 de diciembre del 2015 (Anexo D), los cuales muestran 14 horas de trabajo continuo de la planta, pero para el análisis se utiliza 12 horas debido a que el sistema solo en ese tiempo tiene los datos completos para simular. Se recalcularon los datos para los 2 secadores que estuvieron funcionando en paralelo con las mismas características y dimensiones, con lo cual se obtuvo los datos de la Tabla 9

Tabla 9. Muestras del secador rotatubo obtenida de datos historicos de la plantas (Anexo D)

TIME	Fs1	Fs2	Pwsat	Tsin	Xin	Xout1	Xout2	Tsout1	Tsout2
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
0	3.4121	3.4110	5.0	369	0.7634	0.0638	0.1050	369	365
3600	2.7957	2.7953	5.0	366	0.7218	0.0776	0.1111	366	359
7200	3.3543	3.3542	5.0	367	0.7340	0.0753	0.0893	367	359
10800	3.4943	3.4943	5.0	366	0.7397	0.1038	0.1062	366	364
14400	3.4964	3.4962	5.0	366	0.7960	0.1038	0.1038	366	361
18000	3.8881	3.8875	5.0	365	0.7775	0.0977	0.1050	365	360
21600	4.0554	4.0551	5.0	366	0.7848	0.0787	0.0941	366	359
25200	3.9148	3.9146	5.0	366	0.7787	0.0989	0.1050	366	365
28800	3.4941	3.4952	5.0	359	0.7419	0.1111	0.1173	359	360
32400	3.1455	3.1460	5.0	359	0.7718	0.1111	0.0799	359	363
36000	2.4469	2.4460	5.0	362	0.7544	0.1161	0.0989	362	363
39600	3.1443	3.1441	4.0	370	0.6978	0.0834	0.1173	370	362

Fuente: Elaboración propia

Al simular el sistema sin optimizar los parámetros tienen los valores $\varepsilon=0.2$, $X_{cr}=0.25$, $K_x=6$ y $K_s=0.5$, es decir solo disminuyendo al coeficiente de transferencia de calor por conducción en un 50%. El resultado que se obtuvo fue $J_{costo1} = 1.4284$ para el secador N°1 y $J_{costo2} = 2.0742$ para el secador N°2.

Las funciones de costo dan resultados diferentes debido a que aunque tengan los 2 los mismos valores de Fs, Psat, Tsin y Xin, los valores de Xout son diferentes. Esto se debe a que no hay datos históricos de $\%S_{damper}$, este es un parámetro que el operario manipula según su experiencia y para cada uno de los secadores es diferente, por lo que para la simulación se consideró 0.5, este es valor promedio que los operarios utilizan.

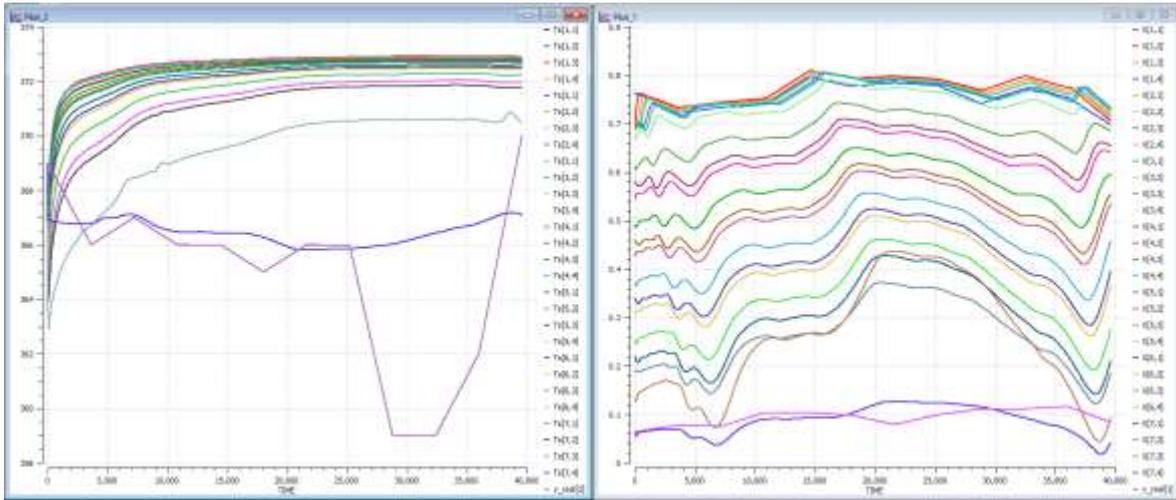


Figura 72. Respuesta de X y T_s a los datos históricos de la planta – Secador N°1
Fuente: Elaboración propia

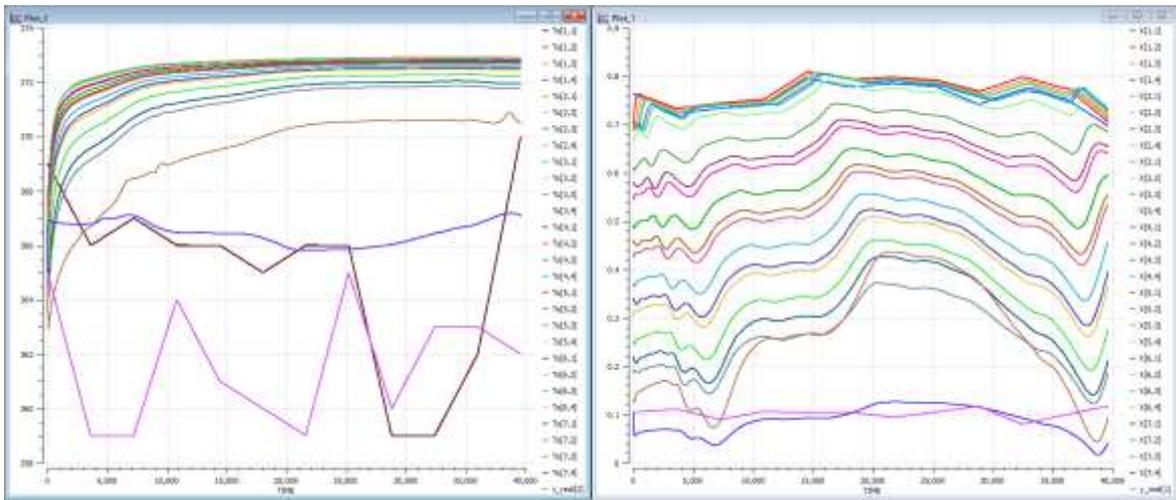


Figura 73. Respuesta de X y T_s a los datos históricos de la planta – Secador N°2
Fuente: Elaboración propia

$T_s[7,4]$ es la salida de la temperatura de la harina del modelo matemático y $y_real[2]$ es la data real de salida de temperatura de la harina del secador.

$X[7,4]$ es la salida de la humedad en base seca de la harina del modelo matemático y $y_real[1]$ es la data real de salida de la humedad en base seca de la harina del secador.

El modelo matemático del secador obtiene datos muy cerca de la data real tanto en la humedad como en la temperatura de la harina a la salida de los secadores. Tanto en el secador N°1 como en el secador N°2, se observa que entre el tiempo [25000,36000], se aleja la data real, de la salida del modelo matemático, esto es debido a que como se comentó antes, no se está manipulando el parámetro de control $\%S_{dampner}$, pero aun así el resultado es muy bueno.

Para la optimización el parámetro antes propuesto en el secador se necesita dar las siguientes acotaciones

$$\begin{aligned}
 0.15 &\leq X_{cr} \leq 0.3 \\
 0.1 &\leq \varepsilon \leq 0.25 \\
 2 &\leq K_x \leq 8 \\
 0.2 &\leq K_s \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{5.77}$$

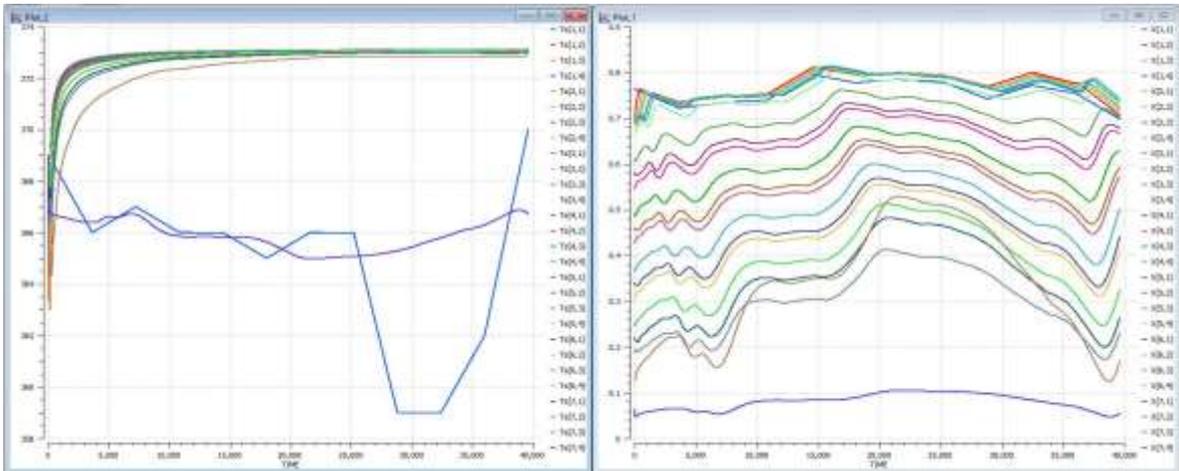


Figura 74 Respuesta de X y T_s a los datos históricos de la planta con parámetros optimizados Secador N°1
Fuente: Elaboración propia

Los nuevos resultados de $J_{costo1} = 0.7945$ para el secador N°1 y $J_{costo2} = 1.242$ para el secador N°2. De los nuevos valores propuestos $\varepsilon=0.1$, $X_{cr}=0.15$, $K_x=2$ y $K_s=0.2$.

5.5 Validación del modelo final

Luego de la estimación de los parámetros desconocidos, el paso final es la validación del modelo resultante

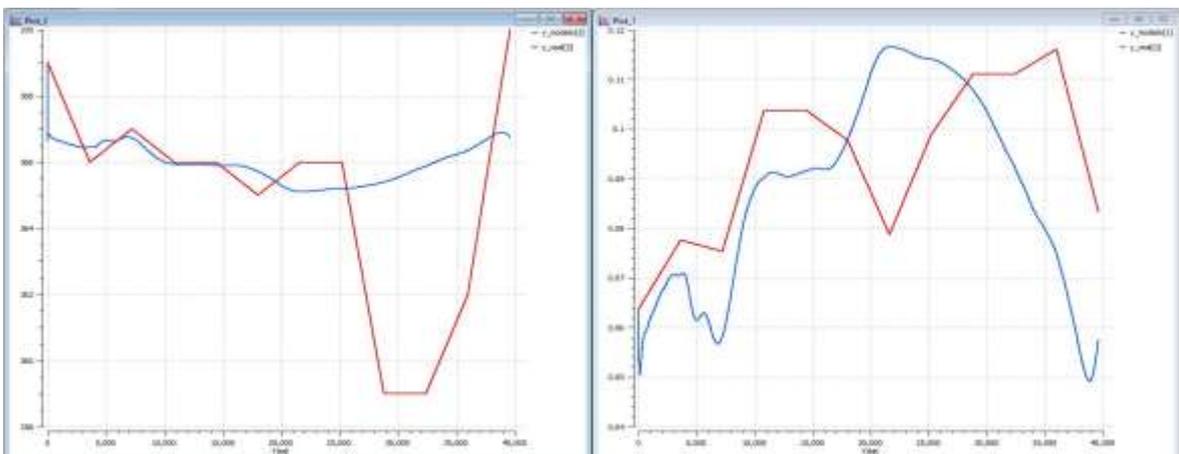


Figura 75 Comparación de la respuesta del modelo y los datos reales Secador N°1
Fuente: Elaboración propia

Las gráficas permiten demostrar la credibilidad del modelo, debido a que las respuestas del modelo matemático siguen las tendencias de los valores reales. Se observa que la diferencia entre el X_{real} y X_{modelo} es menor a 0.02 kg/kg. En la caso de la $T_{s_{modelo}}$ sigue muy de cerca la tendencia $T_{s_{real}}$ es menor a 1°C, en la mayor parte de las respuestas.

Conclusiones

La principal ventaja de modelar en parámetros distribuidos es que se puede saber cuál es la dinámica interna en el secador, y puede tomar acciones correctivas para que los sólidos no sean sometidos a altas temperaturas.

El modelo describe la dinámica $T_s, X, m_{harina}, m_{solido}, T_v, Y$ y v_{vaho} a lo largo de todo el secador.

El modelo matemático en EDP del secador ha modelado satisfactoriamente la variable de control P_{sat} , pero para dar un valor más exacto de K_x para el control del dämper, se necesita saber $\%S_{damper}$ como dato.

El considerar que la depresión causada por el rozamiento entre el vaho, los tubos y chaqueta es cero, simplificó mucho los cálculos.

La velocidad de secado es proporcional a la velocidad transversal del vaho que es controlada por el $\%S_{damper}$ y la depresión por el extractor de vaho.

Los resultados demuestran que la 1° etapa del secador está preparada principalmente para formar una masa homogénea de harina y elevar la temperatura de la masa húmeda, debido a que su capacidad de secado en esta etapa es indiferente.

Analizar los puntos de equilibrio del sistema nos ayuda a entender la dinámica y las acotaciones reales que debe tener el sistema.

El método de discretización por colocación ortogonal ha disminuido la carga computacional con otros métodos al hallar los polinomios que aproximan la dinámica del sistema en comparación con el método de Volúmenes Finitos.

El método de discretización por colocación ortogonal ha facilitado el modelamiento en contracorriente (vaho y harina), a comparación del método de diferencias finitas.

PROOSIS es una excelente herramienta de modelamiento y simulación, debido que la herramienta que tiene te ayuda a tener un rápido análisis si existe incoherencias en el modelo o consideraciones tomadas en el modelamiento.

Las gráficas para solución de EDP que te da PROOSIS en su monitor son primitivos, debido a que no podemos ver la gráfica continua de los valores de estados. Sería bueno que PROOSIS tenga nuevos avances en los gráficos de 3D. Ese fue el motivo que se tuvo para exportar la data a MATLAB y poder graficar la superficie de los estados en el espacio-tiempo.

Hallar un modelo equivalente de la porosidad de la harina de pescado dependientes de la X y T_s es de gran importancia debido es un factor que influye bastante en el área de transferencia de calor y masa en la partículas. Aún cuanto se halla estimado un mejor valor al parámetro, no es el adecuado debido a que no está en función de la X y T_s .

El incluir la difusividad del contenido de humedad característica en el modelamiento pone en participación en el modelamiento de la transferencia de masa,

Después de la optimización dinámica de los parámetros, se puede decir que la transferencia de calor por conducción es aproximadamente 0.1 veces el valor modelado, por lo cual no tiene una participación tan significativa como en un principio.

Bibliografía

- [1] Pesquea Exalmar SAA, “Pesquera EXALMAR S.A.A. - Memoria Anual 2011.” 2012.
- [2] Departamento de Productos Pesqueros de la subdirección de Internacional de la Oferta Exportable, PROMPERÚ, “Desenvolvimiento del comercio exterior pesquero en el Perú.” .
- [3] S. Ariyawansa, “The evaluation of functional properties of fish meal,” *U. N. Univ. Fish. Train. Programme Proj. Final Sri Lanka*, vol. 125, 2000.
- [4] Alain Vande Wouwer, Sauced Philippe, and Carlos Vilas, *Simulation of ODE/PDE Models with MATLAB, OCTAVE and SCILAB*. New York: Springer, 2014.
- [5] Prof. Cesar de Prada, “Solution of partial differential equations (PDEs),” Valladolid.
- [6] E. G. César de Prada, “OPTIMIZACIÓN DINÁMICA EN ECOSIMPRO®. APLICACIÓN A LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS Y VALIDACIÓN DE MODELOS,” p. 7.
- [7] *User Manual PROOSIS 3.7.28*, 2016th ed. España: Empresarios Agrupados.
- [8] Fao, *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016*. Food & Agriculture Org, 2016.
- [9] IFFO, “La producción de harina y aceite de pescado de la anchoveta peruana.” .
- [10] “Un poco sobre la historia de la anchoveta y la fabricación de harina y aceite de pescado,” *Blogacuícola*, 21-Nov-2013. [Online]. Available: <http://blogacuicola.com/?p=3104>. [Accessed: 18-Mar-2017].
- [11] “Producción de harina de pescado crecerá alrededor de 7% este año,” *rpp.pe*. [Online]. Available: <http://rpp.pe/economia/economia/produccion-de-harina-de-pescado-crecera-alrededor-de-7-este-ano-noticia-974796>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [12] “Pesca en el Perú: el inicio del 2017 trae optimismo al sector – Asociacion Peruana de Agentes Maritimos.” .
- [13] BCRP, “EXPORTACIONES DE HARINA DE PESCADO (PRECIO - US\$/TM).” .
- [14] “FAO Fisheries & Aquaculture - Perfiles sobre la pesca y la acuicultura por países - La República Del Perú.” [Online]. Available: <http://www.fao.org/fishery/facp/PER/es#CountrySector-AddInfo>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [15] “Beneficios del uso de los ingredientes marinos | IFFO - The Marine Ingredients Organisation.” [Online]. Available: <http://www.iffonet.es/beneficios-del-uso-de-los-ingredientes-marinos>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [16] “FAO Fisheries & Aquaculture - Species Fact Sheets - *Engraulis ringens* (Jenyns, 1842).” [Online]. Available: <http://www.fao.org/fishery/species/2917/en>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [17] S. Ariyawansa, “The evaluation of functional properties of fish meal,” *U. N. Univ. Fish. Train. Programme Proj. Final Sri Lanka*, vol. 125, 2000.
- [18] “Harina de pescado, 70/9/13 | FEDNA.” [Online]. Available: http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/harina-de-pescado-70913. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [19] Bocanegra Moreno, Jorge, “Industria pesquera y visita técnica a pesquera Diamante S.A.,” Sep. 2013.
- [20] “CONTROL DE CALIDAD DE INSUMOS Y DIETAS ACUICOLAS.” [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/AB482S08.htm>. [Accessed: 18-Mar-2017].
- [21] “proceso-harina-de-pescado.jpg (1480×1516).” [Online]. Available: <https://fronteramarina.files.wordpress.com/2012/01/proceso-harina-de-pescado.jpg>. [Accessed: 18-Mar-2017].

- [22] Austin Engineering Perú SAC, “Proceso de la harina de pescado,” 00:09:54 UTC.
- [23] FAO, “Fish Meal.” [Online]. Available: [http://www.fao.org/wairdocs/tan/x5926e/x5926e01.htm#What is fish meal](http://www.fao.org/wairdocs/tan/x5926e/x5926e01.htm#What%20is%20fish%20meal). [Accessed: 18-Mar-2017].
- [24] “Twin Screw Press,” *Haarslev*. [Online]. Available: <https://www.haarslev.com/products/twin-screw-press/>. [Accessed: 18-Mar-2017].
- [25] Haarslev Industries A/S, “Harina y aceite de pescado - Haarslev,” *yumpu.com*. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/es/document/view/39885946/harina-y-aceite-de-pescado-haarslev>. [Accessed: 18-Mar-2017].
- [26] ATI GROUP, “6 La prensa de pescado,” 15:58:08 UTC.
- [27] GRATT - Indústria de Máquinas, “Decantadores.” [Online]. Available: http://www.gratt.com.br/site/espanhol/produtos_selecionado.php?id_produto=4. [Accessed: 18-Mar-2017].
- [28] P. por E. de aceite, “Extracción de Aceite.” .
- [29] “Separador de la harina de pescado del aceite de pescado del acero inoxidable - centrifugadora, fase del sólido-líquido.” [Online]. Available: <http://spanish.separator-centrifuge.com/sale-789902-stainless-steel-fish-oil-fishmeal-separator-centrifuge-solid-liquid-phase.html>. [Accessed: 18-Mar-2017].
- [30] Haarslev Industries A/S, “Evaporator.” [Online]. Available: http://www.haarslev.com/media/EvaporatorConcept_GB.pdf.
- [31] ATIGROUP, “8 plantas y equipos para el proceso harina de pescado,” 09:41:22 UTC.
- [32] “DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE HARINA DE PESCADO.” .
- [33] Cabrera Segura, Orlando and Chacón Castañeda Paris, “HARINA DE PESCADO.” .
- [34] E. R. Canales, R. M. Bórquez, and D. L. Melo, “Steady state modelling and simulation of an indirect rotary dryer,” *Food Control*, vol. 12, no. 2, pp. 77–83, 2001.
- [35] Haarslev Industries A/S, “Disc Dryer.” [Online]. Available: https://www.haarslev.com/wp-haarslev/uploads/2017/01/1018_Haarslev_Disc-Dryer_Productsheet_ES.pdf.
- [36] Haarslev Industries A/S, “Steam Drying.” [Online]. Available: http://www.haarslev.com/media/SteamDryingConcept_GB.pdf.
- [37] Haarslev Industries A/S, “Tube bundle dryer,” *Haarslev*. [Online]. Available: <https://www.haarslev.com/products/tube-bundle-dryer/>. [Accessed: 18-Mar-2017].
- [38] Haarslev Industries A/S, “Condi Dryer.” [Online]. Available: https://www.haarslev.com/wp-haarslev/uploads/2017/01/1014_Haarslev_Condi-Dryer_ES.pdf.
- [39] Arun S. Mujumdar, “Principles, Classification, and Selection of Dryers,” in *Handbook of Industrial Drying*, CRC press, 2014.
- [40] R. E. Treybal, *Operaciones de transferencia de masa*, 2da Edición. McGraw-Hill, 1988.
- [41] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition*. CRC Press, 2014.
- [42] X. D. Chen and A. S. Mujumdar, *Drying Technologies in Food Processing*. John Wiley & Sons, 2009.
- [43] Zdzislaw Pakowski and Arun S. Mujumdar, “Basic Process Calculations and Simulations in Drying,” in *Handbook of Industrial Drying*, CRC press, 2014.
- [44] R. W. Serth and T. Lestina, *Process heat transfer: Principles, applications and rules of thumb*. Academic Press, 2014.
- [45] A. Hallström and R. Wimmerstedt, “Drying of porous granular materials,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 38, no. 9, pp. 1507–1516, 1983.

- [46] T. A. G. Langrish, R. E. Bahu, and D. Reay, "Drying kinetics of particles from thin layer drying experiments," in *Drying '91*, 1991, pp. 196–206.
- [47] W. A. M. McMinn and T. R. A. Magee, "Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs," *Food Bioprod. Process.*, vol. 77, no. 3, pp. 175–193, 1999.
- [48] C. Suarez, P. Viollaz, and J. Chirife, "Diffusional analysis of air drying of grain sorghum," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 523–531, 1980.
- [49] V. T. Karathanos, G. Villalobos, and G. D. Saravacos, "Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data," *J. Food Sci.*, vol. 55, no. 1, pp. 218–223, 1990.
- [50] P. Alvarez and P. Legues, "A SEMI-THEORETICAL MODEL FOR THE DRYING OF THOMPSON SEEDLESS GRAPES," *Dry. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–17, 1986.
- [51] C. Shene, F. Cuhillos, R. Perez, and P. I. Alvarez, "Modelling and simulation of a direct contact rotary dryer," *Dry. Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 2419–2433, 1996.
- [52] R. Blasco and P. I. Alvarez, "Flash drying of fish meals with superheated steam: isothermal process," *Dry. Technol.*, vol. 17, no. 4–5, pp. 775–790, 1999.
- [53] N. M. Panagiotou, M. K. Krokida, Z. B. Maroulis, and G. D. Saravacos, "Moisture diffusivity: literature data compilation for foodstuffs," *Int. J. Food Prop.*, vol. 7, no. 2, pp. 273–299, 2004.
- [54] N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, and D. Marinou-Kouris, "Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs," *Dry. Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 2225–2253, 1996.
- [55] M. Toujani, L. Hassini, S. Azzouz, and A. Belghith, "Experimental study and mathematical modeling of silverside fish convective drying," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 37, no. 5, pp. 930–938, 2013.
- [56] Cengel, *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2011.
- [57] E. R. Canales, R. M. Bórquez, and D. L. Melo, "Steady state modelling and simulation of an indirect rotary dryer," *Food Control*, vol. 12, no. 2, pp. 77–83, Mar. 2001.
- [58] S. Whitaker, "Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles," *AIChE J.*, vol. 18, no. 2, pp. 361–371, 1972.
- [59] J. Wu, X. Li, B. Chen, R. Wang, X. Ma, and L. Gao, "Modeling for heat transfer coefficient in indirect-heating tube rotary dryer," *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 29, no. 14, pp. 53–59, 2013.
- [60] J. Wu, X. Li, B. Chen, R. Wang, X. Ma, and L. Gao, "Modeling for heat transfer coefficient in indirect-heating tube rotary dryer," *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 29, no. 14, pp. 53–59, 2013.
- [61] D. R. H. Beattie and P. B. Whalley, "A simple two-phase frictional pressure drop calculation method," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 8, no. 1, pp. 83–87, 1982.
- [62] D. B. Ramin Farnood, *The Art of modeling in Science and Engineering with Mathematica*, Second Edition. Toronto: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- [63] Lorenz T. Biegler, *Nonlinear programming - Concepts, Algorithms, and applications to chemical processes*. Pennsylvania: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2010.
- [64] X. D. Chen and A. S. Mujumdar, *Drying technologies in food processing*. John Wiley & Sons, 2009.

Anexos

Anexo A

Balance de Masa y Energía

Balance de Energía

En [56] se muestra el balance de energía a partir de la primera ley de la termodinámica, la cual es conocida también como el principio de conservación de la energía, para cualquier sistema que experimenta alguna clase de proceso se expresa como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{entra al VC} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{sale del VC} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la energía} \\ \text{total del VC} \end{array} \right)$$
$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{VC} \quad (kJ)$$

O bien, en la forma de tasa, como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Tasa de transferencia neta} \\ \text{de energía por calor, trabajo} \\ \text{y masa}}} = \underbrace{\frac{dE_{VC}}{dt}}_{\substack{\text{Tasa de cambio de energías} \\ \text{interna, cinética, potencial,} \\ \text{etcétera}}} \quad (kW)$$

En vista de que la energía se puede transferir por calor, trabajo y masa solamente, el balance de energía en la ecuación anterior para un sistema general de flujo no estacionario se puede escribir también de manera explícita como

$$\dot{Q}_{\text{entrada}} + \dot{W}_{\text{entrada}} + \sum_{\text{entrada}} \dot{m} \theta - \left(\dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{W}_{\text{salida}} + \sum_{\text{salida}} \dot{m} \theta \right) = \frac{dE_{VC}}{dt}$$

Debido a que la energía total del volumen de control no se mantiene constante, el cambio en la energía total del volumen de control es diferente de cero ($dE_{\text{sistema}}/dt \neq 0$). En la ecuación anterior, θ representa la energía de masa total de un fluido en movimiento por unidad de masa, lo cual es

$$\theta = PV + u + ec + ep = h + ec + ep = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (kJ/kg)$$

Balance de Masa

En base al principio de conservación de la masa para un volumen de control se puede expresar como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Masa total que entra} \\ \text{al VC durante } \Delta t \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Masa total que sale} \\ \text{del VC durante } \Delta t \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio de masa total} \\ \text{dentro del VC durante } \Delta t \end{array} \right)$$
$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} = \Delta m_{VC} \quad (kg)$$

O bien, en la forma de tasa, como

$$\dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{salida}} = dm_{VC}/dt \quad (kg)$$

Anexo B Cálculos

Cálculo de velocidad promedio del vaho

El cálculo de la velocidad promedio del vaho, se halla considerando que el flujo del vaho tiene una inercia obtenida al inicio de cambio de estado. Por lo cual la velocidad relativa angular entre el cilindro y el vaho es cero. Por lo cual tendremos que v_{prom} esta dada por

$$v_{prom} = \frac{\dot{V}}{S_V} = \frac{W_V}{\rho_V S_V} = \frac{W_{Hin} - W_{Hout}}{\rho_V S_V}$$

$$v_{prom} = \frac{W_S(X_{in} - X_{out})}{\rho_V S_V(1 - \xi)}$$

$$S_V = \frac{\pi}{4} D_j^2 - \#tubos * \frac{\pi}{4} D_t^2$$

- Diámetros

De los gráficos (Anexo B) se obtiene $D_j = 3.356$, $D_t = 0.13$ y $\#tubos = 6 \times 25 = 150$

Reemplazamos en la ecuación anterior, obtenemos $S_V = 7.3066$

- Fracción volumétrica de sólidos en el secador

La harina ocupa una fracción del volumen total del secador,

$$\xi = \frac{V_{Htotal}}{V_{total}} = \frac{M_{Htotal}}{\rho_S S_V L} = \frac{M_{Htotal}}{\rho_V S_V L} = \frac{250 \text{ sacos} \times 50 \text{ kg/saco}}{593 \times 7.3066 \times 21.696} = 0.133$$

- Flujo de solidos

La planta de harina de pescado trabajando con sus 2 secadores rotatubos en paralelo obtienen un promedio de 500 sacos/hora (Anexo C), con los valores de humedades promedios de $W_{out} = 0.08$ y $W_{in} = 0.45$ o $X_{out} = 0.087$ y $X_{in} = 0.818$

$$W_S = \frac{M_{Stotal}}{tiempo} = \frac{M_{Htotal}}{(X_{out} + 1) * tiempo} = \frac{250 \text{ sacos} * 50 \text{ kg/saco}}{(0.087 + 1) * 3600 \text{ s}} \cong 3.194 \text{ kg/s}$$

- Densidad

La mayor cantidad del tiempo el vaho tiene la temperatura de 100°C (Anexo F) y considerando que el vaho es vapor de agua la $\rho_V = 0.5884$ (Anexo D).

Para obtener

$$v_{prom} = \frac{W_S(X_{in} - X_{out})}{\rho_V S_V(1 - \xi)} \cong 0.6677 \text{ m/s}$$

Cálculos para la zona de secado continuo

Es necesario calcular los valores de Pr y Sc para determinar que ecuación se puede utilizar para el caso de la tabla 3.1

$$Sc = \frac{\nu}{D_{eff}}$$

El valor de D_{eff} se calculó en 3.4.3 donde los valores experimentales están en el intervalo de $[1.3e-11, 3.21e-09]$. De la tabla de propiedades del vapor de agua en el anexo 5 para 100°C , $\nu=2.15e-5$ entonces

$$Sc \in [6.7 \times 10^2, 1.6 \times 10^4]$$

Y, también $Pr = 0.9830$

Depresión por la fricción en la chaqueta y tubos

La depresión ocasionada por el flujo bifásico que fluye a través de la chaqueta y los tubos, genera un perfil de temperatura. Las ecuaciones 4.74 al 4.78 son las que aportan al cálculo, pero antes se debe hallar la cantidad de fluido que ingresa al sistema

$$W_V = W_S(X_{in} - X_{out})$$

$$S_j = 0.25 \pi (D_{jext}^2 - D_{jint}^2)$$

$$S_t = 0.25 \pi D_t^2 N_t$$

$$W_{Vt} = W_{Vsat} \frac{S_t/N_t}{S_t + S_j}$$

$$W_{Vj} = W_{Vsat} \frac{S_j}{S_t + S_j}$$

Para el cálculo de la depresión se tomará un valor aproximado de la fracción del flujo de masa del gas Z , debido a que este dato no se conoce (este valor se puede obtener conociendo flujo del vapor saturado que ingresa y el flujo del condensado que sale). Como la P_{sat} es de $[2-5]$ Atm, se considera que $Z = 0.1$. De la tabla del agua saturada en el Anexo E, se extrae los siguientes valores

Tabla B1. Valores de la densidad y viscosidad dinámica en función de la presión

P_{sat}	2 atm	5 atm
ρ_{Vsat}	1.121	2.546
ρ_{Lsat}	943.4	916.6
μ_{Vsat}	1.296×10^{-5}	1.402×10^{-5}
μ_{Lsat}	0.232×10^{-3}	0.181×10^{-3}

Fuente: Elaboración propia

Al ser reemplazado los valores en las ecuaciones 4.74 al 4.78, se obtiene como resultado f

Tabla B2. Diferenciales de la Presion respecto a la longitud

P_{sat}	2 atm	5 atm
$\frac{dP_t}{dz}$	95.9×10^{-3}	44.3×10^{-3}
$\frac{dP_j}{dz}$	3.3×10^{-3}	1.5×10^{-3}

Fuente: Elaboración propia

El valor de la depresión por el rozamiento en las paredes está en magnitud de los milipascales, por lo que se puede considerar que

$$\frac{dP_{sat}}{dz} \cong 0$$

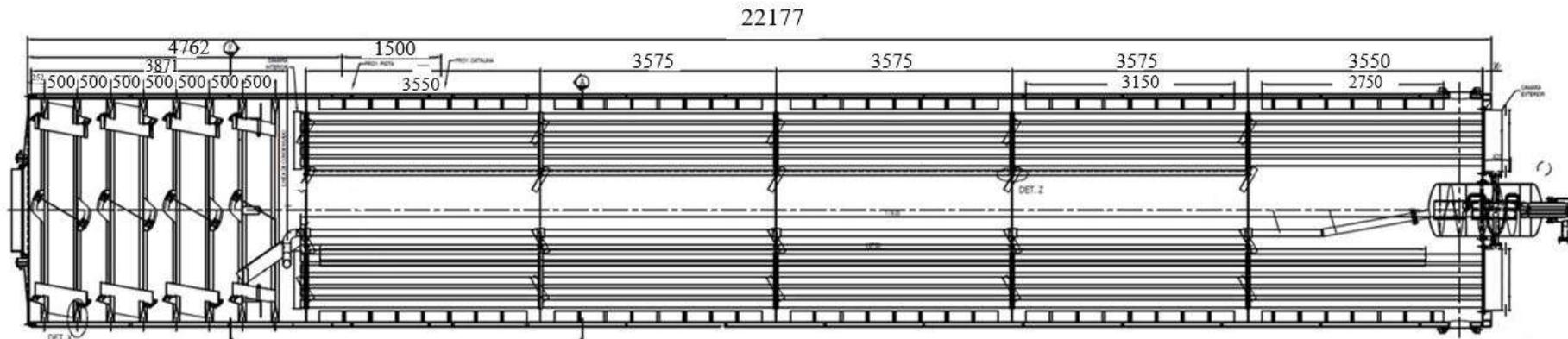


Figura C3. Corte transversal del secador
Fuente: Planos de Secador Rotatubo

Anexo D

Datos de la planta de harina de pescado

PLANTA CALLAO

DPTO. DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y DEL AMBIENTE

PD02-HACCP-F-01
CONTROL DE PROCESO PLANTA DE HARINA STEAM DRIED

TURNO	DIA	FECHA	12/12/2015
-------	-----	-------	------------

TURNO	NOCHE	FECHA	01/12/2015
-------	-------	-------	------------

CONTROLES			HORA								Promedio	HORA			Promedio	Límites	
			7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00		23:00					
MATERIA PRIMA ALIMENTACIÓN A COCINAS	TBVN (PCC para ACEITE CHD)	mg/100gr	67	68	74		28	28	29	29	30	44				Max 60mg/100gr	
	TDC (PCC - 1 para ACEITE CHD)	HORAS	23	24	25		20	21	12	13	14	19				Max 36 HORAS	
	N° POZA (Alim. a Cocinas)			1y3	1y3	1y3	1	2	2	2	2	2					
COCINA	PRESIÓN CHAQUETA (BAR)	1	0,7	1,0				1,0	1,1			1,0				4 Max.	
		2	1,7	1,8					2,1	2,1			1,9				
		3	1,0	0,8					1,0	1,2			1,0				
	PRESIÓN ROTOR (BAR)	1	0,8	1,2					1,1	1,1			1,0			4Max.	
		2	1,9	2,0					2,3	2,4			2,2				
		3	0,9	0,7					0,6	1,0			0,8				
	RPM (Digital/Mecanico)	1	4,3	3,2					4,2	4,8			4,1				
		2	2,4	2,4					2,3	2,6			2,4				
		3	3,9	3,9					3,9	4,3			4,0				
	TIEMPO DE RESIDENCIA	1	15	20					15	13			16			Mín 10 min	
		2	14	14					15	13			14				
		3	17	17					17	15			16				
		1	100	100	100	100			100	100	100	100	100				>=90 °C

TVN		mg/100gr	118	120	C	150/ 164	175	183	E	193		E	87	99	139	194	211	184	226	232	209	
TEMPERATURA		T °C	35	35	E	37	41	40	N	41		N	37	33	37	33	36	36	38	40	37	40
CALIDAD		TIPO	A/B	B	S	C/D	D	D		D			A	A		D	D	D	D	D		
SACOS/CALIDAD			61/ 700	102/ 01	O	448/ 94	500	500	S	733		S	486	614		250	500	250	500	195		
RUMA		Nro	399/ 400	402/ 400		401/ 391	403	403	I	404		I	399	405		390	390	390	391	391		
Nº de sacos		n° / h							L			L										
PESO x SACO		Kg	49,9	50,0		49,9	49,7	50,1	O	49,9		O	49,7	49,8	49,9	49,9	49,8	49,9	50,1	49,9	50	50.5
Nº Rumas del Turno: R-399(547), R-400B(701), R-402B (102), R-401C(440), R-391(949, R-403D(1000), R-404D(733), R-405A(614), TOTAL = 4231															Nº Rumas del Turno: R- 390D(1000), R-391D(695) TOTAL = 1695 SACOS							
CALIDAD	SACOS	%	OBSERVACIONES Y/O ACCIÓN CORRECTIVA:																			
A	1161	27,4	10:30HR. TERMINO M.P. EN POZA 3 Y SOLO SE ALIMENTA DE POZA 1 A COCINAS 1,2Y3, 11:00HRS. TERMINÓ M.P. EN POZA 1, 11:10HRS. SE COMUNICÓ AL JEFE DE TURNO POR ROTURA DE MANGUERA DE INGRESO DE FLUJO DE ANTIOXIDANTE A ROTADISCK (AP-4) 13:50HRS. REINICIO ALIMENTACION DE POZA 2 A COCINAS 1,2Y3 07:50HRS. SALIERON 8 DYNOS POR HUMEDAD ALTA, 08:15HRS. SALEN 587 SACOS DE HARINA POR HUMEDAD ALTA 13,5%, SE COMUNICÓ AL JEFE DE TURNO. 15:40HRS. SALIERON 20 SACOS POR LIMPIEZA DE LA LINEA Y SE DOSIFICÓ SALCAP A LAS 3 PRIMERAS TOLVADAS DE HARINA.																			
B	803	19																				
C	440	10,4																				
D	1827	43,2																				
CALIDAD	SACOS	%	OBSERVACIONES Y/O ACCIÓN CORRECTIVA:																			
A			22:10HRS. SE SACARON 03 DYNOS DE SCRAP POR HUMEDAD BAJA																			
B																						
C																						
D	1695	100																				

Fuente:Empresa Diamante Sede Callao

Anexo E Propiedades

Tabla E1. Propiedades del agua saturada

Temp · T °C	Presión de saturación P _{sat} kPa	Densidad ρ kg/m ³		Entalpía de vaporización h _{fg} kJ/kg	Calor Específico c _p J/kg · K		Conductividad térmica k W/m · K		Viscosidad dinámica μ kg/m · s		Número de Prandtl Pr		Coeficiente de expansión volumétrica β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 x10 ⁻³	1.227 x10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 x10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 x10 ⁻³	1.261 x10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 x10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 x10 ⁻³	1.296 x10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 x10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 x10 ⁻³	1.330 x10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 x10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 x10 ⁻³	1.365 x10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 x10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 x10 ⁻³	1.399 x10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 x10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 x10 ⁻³	1.434 x10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 x10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 x10 ⁻³	1.468 x10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 x10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 x10 ⁻³	1.502 x10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 x10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 x10 ⁻³	1.537 x10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 x10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 x10 ⁻³	1.571 x10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 x10 ⁻³

Fuente: Yunus Cengel (2011)
Elaboración propia

Tabla E2. Propiedades del agua a la presión de 1 atm

Temp. T °C	Densidad ρ kg/m ³	Calor específico c_p J/kg . K	Conductividad térmica k W/m . K	Difusividad térmica α m ² /s	Viscosidad dinámica μ kg/m . s	Viscosidad cinemática ν m ² /s	Número de Prandtl Pr
-50	0.9839	1 892	0.01353	7.271 x 10 ⁻⁶	7.187 x 10 ⁻⁵	7.30 x 10 ⁻⁶	10.047
0	0.8038	1 874	0.01673	1.110 x 10 ⁻⁵	8.956 x 10 ⁻⁵	1.11 x 10 ⁻⁶	10.033
50	0.6794	1 874	0.02032	1.596 x 10 ⁻⁵	1.078 x 10 ⁻⁵	1.58 x 10 ⁻⁵	0.9944
100	0.5884	1 887	0.02429	2187 x 10 ⁻⁵	1.265 x 10 ⁻⁵	2.15 x 10 ⁻⁵	0.9830
150	0.5189	1 908	0.02861	2.890 x 10 ⁻⁵	1.456 x 10 ⁻⁵	2.80 x 10 ⁻⁵	0.9712
200	0.4640	1 935	0.03326	3.705 x 10 ⁻⁵	1.650 x 10 ⁻⁵	3.55 x 10 ⁻⁵	0.9599

Fuente: Yunus Cengel (2011)

Elaboración propia

Anexo F
Modelos De Las Propiedades Térmicas

Conductividad térmica

Proteínas	$k_{prot} = 1.7881x10^{-1} + 1.1958x10^{-3}T - 2.7178x10^{-6}T^2$
Grasa	$k_{grs} = 1.8071x10^{-1} - 2.7604x10^{-4}T - 1.7749x10^{-6}T^2$
Carbohidratos	$k_{carb} = 2.0141x10^{-1} + 1.3874x10^{-3}T - 2.7178x10^{-6}T^2$
Fibra	$k_{fib} = 1.8331x10^{-1} + 1.2497x10^{-3}T - 2.7178x10^{-6}T^2$
Ceniza	$k_{cenz} = 3.2962x10^{-1} + 1.4011x10^{-3}T - 2.7178x10^{-6}T^2$

Fuente: Y. Choi (1986)
Elaboración propia

Calor Específico

Proteínas	$c_{p_{prot}} = 2.0082 + 1.2089x10^{-3}T - 1.3129x10^{-6}T^2$
Grasa	$c_{p_{grs}} = 1.9842 + 1.4733x10^{-3}T - 4.8008x10^{-6}T^2$
Carbohidratos	$c_{p_{carb}} = 1.5488 + 1.9625x10^{-3}T - 5.9399x10^{-6}T^2$
Fibra	$c_{p_{fib}} = 1.8459 + 1.8306x10^{-3}T - 4.6509x10^{-6}T^2$
Ceniza	$c_{p_{cenz}} = 1.0926 + 1.8896x10^{-3}T - 3.6917x10^{-6}T^2$

Fuente: Y. Choi (1986)
Elaboración propia

Densidad

Proteínas	$\rho_{prot} = 1.3299x10^3 - 5.1840x10^{-1}T$
Grasa	$\rho_{grs} = 9.2559x10^2 - 4.1757x10^{-1}T$
Carbohidratos	$\rho_{carb} = 1.5991x10^3 - 3.1046x10^{-1}T$
Fibra	$\rho_{fib} = 1.3115x10^3 - 3.6589x10^{-1}T$
Ceniza	$\rho_{cenz} = 2.4238x10^3 - 2.8063x10^{-1}T$

Fuente: Y. Choi (1986)
Elaboración propia

Propiedades del Agua

Masa molar	$M_A = 18.01 \times 10^{-3}$
Presión de saturación del vapor	$\ln p_W^0 = 16.38 \times 10^{-3} - \frac{3.88}{229.86 + T}$
Densidad	$\rho_A = 9.972 \times 10^2 + 3.144 \times 10^{-3} T - 3.757 \times 10^{-3} T^2$
Calor específico del líquido	$c_{Al} = 2.822 + 1.183 \times 10^{-2} T - 0.35 \times 10^{-4} T^2 + 3.601 \times 10^{-6} T^3$
Calor específico del gas	$c_{Av} = 1.883 - 0.167 \times 10^{-3} T + 0.844 \times 10^{-6} T^2 - 0.844 \times 10^{-6} T^3$
Calor latente	$\Delta h_v = 352.58 (T - 374.14)^{0.33052}$

Fuente: A. S. Mujumdar (2014)

Elaboración propia

Propiedades de Aire

Masa molar	$M_B = 28.9645 \times 10^{-3}$
Densidad	
Calor específico del gas	$c_B = 1.022 - 0.551 \times 10^{-3} T + 0.181 \times 10^{-6} T^2 - 5.122 \times 10^{-11} T^2$

Fuente: A. S. Mujumdar (2014)

Elaboración propia

Calor específico del vaho y la harina

El calor específico de materias compuestas puede ser calculado a partir de los calores específicos de las materias básicas que están compuestas, basado en la fracción de masa que representan

$$c_{p_H} = m_{prot} \cdot c_{p_{prot}} + m_{grs} \cdot c_{p_{grs}} + m_{carb} \cdot c_{p_{carb}} + m_{fib} \cdot c_{p_{fib}} + m_{cenz} \cdot c_{p_{cenz}} + W \cdot c_{p_{Al}}$$

$$c_{p_v} = \frac{1}{1+Y} c_{p_A} + \frac{Y}{1+Y} c_{p_B}$$

Densidad del vaho y harina

La densidad de materias compuestas se calcula a partir de las sumas de las inversas de cada una de sus materias básicas

$$\rho = \frac{1 - \varepsilon}{\sum m_i / \rho_i}$$

$$\rho_H = \frac{1 - \varepsilon}{m_{prot} / \rho_{prot} + m_{grs} / \rho_{grs} + m_{carb} / \rho_{carb} + m_{fib} / \rho_{fib} + m_{cenz} / \rho_{cenz} + W / \rho_{Al}}$$

$$\rho_v = \frac{1}{Y / \rho_A + (1 - Y) / \rho_B}$$

Anexo G

Código de programación en PROOSIS

Modelamiento por Colocación Ortogonal

```

/*-----
LIBRARY: MODELAMIENTO
FILE: MODELAMIENTO_COL_ORT2
CREATION DATE: 10/04/2017
-----*/
FUNCTION REAL pv_Tv (IN REAL Tv)//kg/m3 Densidad del vapor
  DECLS
    REAL pv
    CONST TABLE_1D
  pv_Tv={{343.15,348.15,353.15,358.15,363.15,368.15,373.15,383.15,393.15,403.15,413.15,423.15},{0.1983, 0.2421,
0.2935, 0.3536, 0.4235, 0.5045, 0.5978, 0.8263, 1.121, 1.496, 1.965, 2.546}}
  BODY
    pv = linearInterp1D (pv_Tv, Tv)
  RETURN pv
END FUNCTION

FUNCTION REAL cA_Tv (IN REAL Tv)//J/kg.K Capacidad calorifica del vaho
  DECLS
    REAL cA
    CONST TABLE_1D
  cA_Tv={{343.15,348.15,353.15,358.15,363.15,368.15,373.15,383.15,393.15,403.15,413.15,423.15},{1936,1948,1962,19
77,1993,2010,2029,2071,2120,2177,2244,2314}}
  BODY
    cA = linearInterp1D (cA_Tv, Tv)
  RETURN cA
END FUNCTION

FUNCTION REAL kv_Tv (IN REAL Tv)//W/m.K Conductividad termica
  DECLS
    REAL kv
    CONST TABLE_1D
  kv_Tv={{343.15,348.15,353.15,358.15,363.15,368.15,373.15,383.15,393.15,403.15,413.15,423.15},{0.0221, 0.0225,
0.0230, 0.0235, 0.0240, 0.0246, 0.0251, 0.0262, 0.0275, 0.0288, 0.0301, 0.0316}}
  BODY
    kv = linearInterp1D (kv_Tv, Tv)
  RETURN kv
END FUNCTION

FUNCTION REAL Uv_Tv (IN REAL Tv)//kg/m.s Viscosidad dinamica del vapor
  DECLS
    REAL Uv
    CONST TABLE_1D
  Uv_Tv={{343.15,348.15,353.15,358.15,363.15,368.15,373.15,383.15,393.15,403.15,413.15,423.15},{1.126, 1.142,
1.159, 1.176, 1.193, 1.210, 1.227, 1.261, 1.296, 1.330, 1.365, 1.399}}
  BODY
    Uv = linearInterp1D (Uv_Tv, Tv)*1e-5
  RETURN Uv
END FUNCTION

FUNCTION REAL Deltahv0_Ts (IN REAL Ts)//J/kg Calor latente de vaporización en T0 373.15 K
  DECLS
    REAL Deltahv0

```

```

CONST TABLE_1D
Deltahv0_Ts={{343.15,348.15,353.15,358.15,363.15,368.15,373.15,383.15,393.15,403.15,413.15,423.15},{2334,2321,2
309,2296,2283,2270,2257,2230,2203,2174,2145,2114}}
BODY
Deltahv0 = linearInterp1D (Deltahv0_Ts, Ts)*1e3
RETURN Deltahv0
END FUNCTION

```

```

FUNCTION NO_TYPE CoefTransCalor
(OUT REAL jjv, OUT REAL jtv, OUT REAL jvs, OUT REAL jjts, IN REAL vprom, IN REAL pv, IN REAL cA, IN REAL kv, IN
REAL Uv, IN REAL v, IN REAL Fs, IN REAL Xin, IN REAL Sv)

```

```
DECLS
```

```

REAL Re, Nu, Rej, Ret, Nuj, Nut, Pr1, Pe
REAL vpromJ1, vpromJ, vpromT1, vpromT, vpromV1, vpromV
REAL f, vt, Dpond, Rej2, Ret2, Nuj2, Nut2
REAL Dt, Dj
REAL PrinF, Prs, Pr, CD, g

```

```
BODY
```

```

PrinF=0.9992//
Prs=0.9735//
Pr=0.9830//Numero de Prantl
CD=0.8
Dt=0.127//m Diametro externo de tubos
Dj=3.356//m Diametro de chaqueta
g=9.81//m/s2 Gravedad

```

```
/"Coeficiente de transferencia de calor Chaqueta-Vaho"
```

```

vpromJ1=Dj*pi/10//
vpromJ=sqrt(vprom**2+vpromJ1**2)
Rej=vpromJ*Dj/v//Valor de Reynolds chaqueta
f=(0.79*log(Rej)-1.64)**(-2)//
Nuj=(f/8)*(Rej-1000)*Pr/(1+12.7*((Pr**(2/3))-1)*(f/8)**0.5)//Valor de Nusselt Chaqueta
jjv=kv*Nuj/Dj

```

```
/"Coeficiente de transferencia de calor de Tubos-Vaho"
```

```

Dpond=2.256 //m Diametro ponderado de los tubos
vpromT1=(0.17/(0.17-Dt))*Dpond*pi/10//
vpromT=sqrt(vprom**2+vpromT1**2)//
Ret=vpromT*Dt/v//Valor de Reynolds tubo
Nut=0.27*(Ret**(0.63))*(PrinF**(0.36))*((PrinF/Prs)**0.25)//
jtv=kv*Nut/Dt

```

```
/"Coeficiente de transferencia de calor de Solido-Vaho"
```

```

vpromV1=sqrt(dp*g*ps*Dj/(0.75*CD*pv*Dj+0.5*dp*ps))//Velocidad promedio de caida del solido
vpromV=sqrt(vpromV1**2+vprom**2)
Re=dp*vpromV/v//Reynolds de Vapor-Solido
Nu=2+(0.4*Re**(0.5)+0.06*Re**(2/3))*Pr**0.4

```

```
jvs=kv*Nu/dp
```

```
/"Coeficiente de transferencia de calor por conducción ChaquetaTubo-Solidos"
```

```
jjts=3.5565*kv*Pr**(1/3)/((Ep**(-1/3)-1)*dp)
```

```
END FUNCTION
```

```
/"Polimonio de los puntos de colocación de Radau"
```

```
FUNCTION REAL P1(REAL s1)
```

```
DECLS
```

```
REAL P1
```

```
BODY
```

```
P1=-10*s1**3+18*s1**2-9*s1+1
```

```
RETURN P1
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION REAL P2(REAL s2)
```

```
DECLS
```

```

REAL P2
BODY
    P2=15.5808*s2**3-25.6296*s2**2+10.0488*s2
RETURN P2
END FUNCTION

FUNCTION REAL P3(REAL s3)
DECLS
REAL P3
BODY
    P3=-8.9141*s3**3+10.2963*s3**2-1.3821*s3
RETURN P3
END FUNCTION

FUNCTION REAL P4(REAL s4)
DECLS
REAL P4
BODY
    P4=3.3333*s4**3-2.6667*s4**2+0.3333*s4
RETURN P4
END FUNCTION

/"Derivada del polimonio de los puntos de colocación de Radau"
FUNCTION REAL DP1(REAL s1)
DECLS
REAL DP1
BODY
    DP1=-30*s1**2+36*s1-9
RETURN DP1
END FUNCTION

FUNCTION REAL DP2(REAL s2)
DECLS
REAL DP2
BODY
    DP2=46.7423*s2**2-51.2592*s2+10.0488
RETURN DP2
END FUNCTION

FUNCTION REAL DP3(REAL s3)
DECLS
REAL DP3
BODY
    DP3=-26.7423*s3**2+20.5925*s3-1.3821
RETURN DP3
END FUNCTION

FUNCTION REAL DP4(REAL s4)
DECLS
REAL DP4
BODY
    DP4=10*s4**2-5.3333*s4+0.3333
RETURN DP4
END FUNCTION

COMPONENT MODELAMIENTO_COL_ORT2
DATA
    REAL Ts00 = 95+273.15//K Temperatura inicial de la harina
    REAL Tv00 = 99+273.15//K Temperatura del vaho
    REAL X00 = 0.70//[] Humedad inicial de la harina
    REAL Y00 = 1//[]Humedad absoluta inicial del vaho

```

```

REAL Pt00 = 1//[] Humedad inicial del vaho
REAL Msolido01 = 3.4121*2700*4.1/21.7//kg Masa inicial de solidos de la primera etapa
REAL Msolido02 = 3.4121*2700*17.6/21.7//kg Masa inicial de solidos de la segunda etapa
REAL KX=6//Constante del flujo del vapor saturado

```

DECLS

```

CONST REAL cs=1344//J/kg.K Capacidad calorifica del solido seco
CONST REAL cA1=4217//J/kg.K Capacidad calorifica de agua 100°C
CONST REAL cB=1009//J/kg.K Capacidad calorifica del aire
CONST REAL Ep=0.2//Porosidad, he supuesto el valor debido que porosidad depende de humedad y
temperatura
CONST REAL Deltahs=0//Calor latente de sorción, se considera el valor debido a dificultad de obtenerlo
experimentalmente
CONST REAL NR=8.314//J/K mol Constante universal de los gases
CONST REAL NR1=8.205746e-5//m3.atm/K.molConstante universal de los gases
CONST REAL pit=3.14159//[] Constate de PI
CONST REAL ps=593//kg/m3 Densidad del sólido
CONST REAL pw=957.9//kg/m3 Densidad del agua
CONST REAL dp=0.002//m diametro de la particula
CONST REAL Lt=21.7//m Longitud total del secador
CONST REAL Nt=150//[] Numero de Tubos 6*25
CONST REAL Dt=0.127//m Diametro externo de tubos
CONST REAL Dj=3.356//m Diametro de chaqueta
CONST REAL Lp=0.2//m Ancho de paleta
CONST REAL Np=42//[] Numero de paletas
CONST REAL Xcr=0.25// Humedad critica en base seca
CONST REAL Xinf=0.02// Humedad de equilibrio en base seca
CONST REAL Mw=18.01e-3//Kg/mol Masa molar del agua"
CONST REAL Mair=28.9645e-3//Kg/mol Masa molar del aire"
CONST REAL alpha=2.18e-5

CONST INTEGER sec=7
CONST INTEGER sec1=2//(sec)*4.1/21.7
CONST INTEGER OrdenP=3
CONST REAL s[OrdenP+1]={0, 0.155051, 0.644949, 1}
CONST REAL sr[OrdenP+1]={0, 0.333333, 0.666666, 1}
CONST REAL deltaZ[sec] = {2.05, 2.05, 3.52, 3.52, 3.52, 3.52, 3.52} // 4.1/sec1 - 17.6/(sec-sec1)
REAL Fs[sec,OrdenP+1], Msolido[sec,OrdenP+1], Mharina[sec,OrdenP+1], fr[sec,OrdenP+1],
S[sec,OrdenP+1], SH[sec,OrdenP+1], Sv[sec,OrdenP+1], as[sec,OrdenP+1], av[sec,OrdenP+1], Tau[sec,OrdenP+1],
rf[sec,OrdenP+1], PHI, ap[sec,OrdenP+1], aj1[sec,OrdenP+1], at1[sec,OrdenP+1], aj2[sec,OrdenP+1],
at2[sec,OrdenP+1] //Dimensiones de masa y superficie
REAL jjv[sec,OrdenP+1], jtv[sec,OrdenP+1], jvs[sec,OrdenP+1], jjts[sec,OrdenP+1], ja[sec,OrdenP+1]
//Coeficientes de transferencia de calor
REAL pB[sec,OrdenP+1], Ps[sec,OrdenP+1], Ys[sec,OrdenP+1], Deff[sec,OrdenP+1], kY[sec,OrdenP+1],
wD[sec,OrdenP+1], Theta[sec,OrdenP+1], Pt[sec,OrdenP+1], vprom[sec,OrdenP+1], Avaho, FB // Coeficientes par
difusión
REAL Ts[sec,OrdenP+1], X[sec,OrdenP+1], Tv[sec,OrdenP+1], Y[sec,OrdenP+1] // Estados del sistema
REAL Tw[sec,OrdenP+1] //Vapor Saturado
REAL Fsin, V, Tsin, Xin, Pwsat, Pex// Condiciones de Contorno y a manipular
REAL Tamb, Phiamb// Condiciones de Contorno Constantes
REAL TsDeltaZ[sec,OrdenP+1], XDeltaZ[sec,OrdenP+1], TvDeltaZ[sec,OrdenP+1],
YDeltaZ[sec,OrdenP+1], imDeltaZ[sec,OrdenP+1], igDeltaZ[sec,OrdenP+1], FsDeltaZ[sec,OrdenP+1] // Diferencial en z
REAL pv[sec,OrdenP+1], cA[sec,OrdenP+1], kv[sec,OrdenP+1], Uv[sec,OrdenP+1], v[sec,OrdenP+1],
Deltahv0[sec,OrdenP+1], im[sec,OrdenP+1] // Propiedades del agua saturada
REAL W[sec,OrdenP+1]

REAL FsR[sec,OrdenP+1], TsR[sec,OrdenP+1], XR[sec,OrdenP+1], TvR[sec,OrdenP+1], YR[sec,OrdenP+1]
REAL MsolidoR[sec,OrdenP+1], MharinaR[sec,OrdenP+1], frR[sec,OrdenP+1], SvR[sec,OrdenP+1],
vpromR[sec,OrdenP+1], PsR[sec,OrdenP+1], YsR[sec,OrdenP+1], WR[sec,OrdenP+1]

```

INIT

```

-- Valores iniciales de las variables de estado
FOR (i IN 1,sec)
  FOR (j IN 1,OrdenP+1)
    Ts[i,j] = Ts00
    Tv[i,j] = Tv00
    Y[i,j] = Y00
    Pt[i,j] = Pt00
  END FOR
END FOR
//Msolido[1,1]= Msolido01*(s[4]-s[3])/sec1
FOR (i IN 1,sec1)
  X[i,2]=X00
  X[i,3]=X00
  X[i,4]=X00
  Msolido[i,2]= Msolido01*(s[2]-s[1])/sec1
  Msolido[i,3]= Msolido01*(s[3]-s[2])/sec1
  Msolido[i,4]= Msolido01*(s[4]-s[3])/sec1
END FOR
FOR (i IN sec1+1,sec)
  X[i,2]=X00-0.12*(i-3)-0.03
  X[i,3]=X00-0.12*(i-3)-0.09
  X[i,4]=X00-0.12*(i-3)-0.12
  Msolido[i,2]= Msolido02*(s[2]-s[1])/(sec-sec1)
  Msolido[i,3]= Msolido02*(s[3]-s[2])/(sec-sec1)
  Msolido[i,4]= Msolido02*(s[4]-s[3])/(sec-sec1)
END FOR

FOR (i IN 1,sec1)
  XR[i,2]=X00
  XR[i,3]=X00
  XR[i,4]=X00
  MsolidoR[i,2]= Msolido01*(sr[2]-sr[1])/sec1
  MsolidoR[i,3]= Msolido01*(sr[3]-sr[2])/sec1
  MsolidoR[i,4]= Msolido01*(sr[4]-sr[3])/sec1
END FOR
FOR (i IN sec1+1,sec)
  XR[i,2]=X00-0.12*(i-3)-0.03
  XR[i,3]=X00-0.12*(i-3)-0.09
  XR[i,4]=X00-0.12*(i-3)-0.12
  MsolidoR[i,2]= Msolido02*(sr[2]-sr[1])/(sec-sec1)
  MsolidoR[i,3]= Msolido02*(sr[3]-sr[2])/(sec-sec1)
  MsolidoR[i,4]= Msolido02*(sr[4]-sr[3])/(sec-sec1)
END FOR

```

CONTINUOUS

```

FB=KX*Avaho*sqrt(Pt[1,1]**2-Pex**2)/(Y[1,1]+1)//kg/s Flujo de vaho
PHI=1/(1.101+414*dp)// Esfericidad de los solidos"

```

```

//"Valores iniciales del sistema"
Mharina[1,1]=(X[1,1]+1)*Msolido[1,1]
fr[1,1]=Mharina[1,1]/(ps*S[1,1]*(s[4]-s[3]))
S[1,1]=Dj**2*pi/4
SH[1,1]=S[1,1]*fr[1,1]
Sv[1,1]=S[1,1]*(1-fr[1,1])
av[1,1]=6*fr[1,1]/(PHI*dp)
as[1,1]=av[1,1]*S[1,1]
Tau[1,1]=0
rf[1,1]=(1-cos(Tau[1,1]))*Dj/2
ap[1,1]=0
at1[1,1]=0

```

```

aj1[1,1]=(pit+Tau[1,1]/(2*pit))*Dj/2
aj2[1,1]=Dj*pit+2*0.8*Np*Lp
at2[1,1]=Nt*Dt*pit
pv[1,1]=pv_Tv(Tv[1,1])
cA[1,1]=cA_Tv(Tv[1,1])
kv[1,1]=kv_Tv(Tv[1,1])
Uv[1,1]=Uv_Tv(Tv[1,1])
Deltahv0[1,1]=Deltahv0_Ts(Ts[1,1])
v[1,1]=Uv[1,1]/pv[1,1]
CoefTransCalor (jiv[1,1], jtv[1,1], jvs[1,1], jts[1,1], vprom[1,1], pv[1,1], cA[1,1], kv[1,1], Uv[1,1], v[1,1], Fs[1,1],
X[1,1], Sv[1,1])
Tw[1,1]=43.289+3878.8223/(11.75896-log(Pwsat))
pB[1,1]=1.9174-0.0026*Tw[1,1]
Ps[1,1]=exp(11.75896-3878.8223/(Tv[1,1]-43.289))
vprom[1,1]=(FB/Sv[1,1])*(1/Mair+Y[1,1]/Mw)*NR1*Tw[1,1]/Pt[1,1]
Pt[1,1]=1.018/(Y[1,1]+1)/Y[1,1]
Ys[1,1]=(Mw/Mair)*(Ps[1,1]/(Pt[1,1]-Ps[1,1]))
Deff[1,1]=(-4+150*X[1,1])*1e-5*exp(-(35.2+5.5*X[1,1])/(NR*Tw[1,1]*1e-3))
kY[1,1]=(jvs[1,1]/(pv[1,1]*cA[1,1]))*(Deff[1,1]/alpha)**(2/3)
wD[1,1]=kY[1,1]*Theta[1,1]*(Ys[1,1]-Y[1,1])
ja[1,1]=jiv[1,1]*aj2[1,1]
W[1,1]=X[1,1]/(1+X[1,1])

EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec)
  EXPAND_BLOCK (j IN 2, OrdenP+1)
    Fs[i,j]= Msolido[i,j]*V/(deltaZ[i]*(s[j]-s[j-1]))/"kg Masa de harina del sector "
    Mharina[i,j]=(X[i,j]+1)*Msolido[i,j]/"Relación Harina seca y Harina humeda"
    S[i,j]= ZONE ((i>0) AND (i<sec+1)) Dj**2*pit/4 /"m2 Sección transversal del secador"
      ZONE ((i>sec1) AND (i<sec+1)) (Dj**2-Nt*(Dt**2))*pit/4
      OTHERS 0
    fr[i,j]=Mharina[i,j]/(S[i,j]*deltaZ[i]*(s[j]-s[j-1]))*(1-Ep)/(1/ps+X[i,j]/pw)/" Fracción Volumetrica de
solidos en el secador"
    SH[i,j]=S[i,j]*fr[i,j]/m2 Sección transversal de la harina"
    Sv[i,j]=S[i,j]*(1-fr[i,j])/m2 Sección transversal del vaho"
    av[i,j]=6*fr[i,j]/(PHI*dp)/1/m2 superficial de los solidos por volumen del secador"
    as[i,j]=av[i,j]*S[i,j]/m Área de Tranferencia de calor superficial por unidad de longitud del solido"
    fr[i,j]=(4/(3*pit))*Tau[i,j]**3/" Relación entre fracción parcial de harina de la sección transversal y el
angulo
    rfi,j]=(1-cos(Tau[i,j]))*Dj/2/m Flecha de la porción de harinaDimensión de la flecha
    ap[i,j]=2*0.8*Np*Lp/m2 Área de paletas del cilindro
    aj1[i,j]=(pit+Tau[i,j])*Dj/2+ap[i,j]*Tau[i,j]/pit+ap[i,j]*(pit-Tau[i,j])/(4*pit)/m2/m Área total de transferencia
de calor por unidad de longitud por conducción de la chaqueta o cilindro interno
    at1[i,j]= IF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rfi,j]>0.278) AND (0.448>rfi,j)) 7*Dt*pit/m2/m Área de
transferencia de calor por unidad de longitud por conducción de los tubos
      ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rfi,j]>0.448) AND (0.618>rfi,j))
16*Dt*pit
      ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rfi,j]>0.618) AND (0.778>rfi,j))
27*Dt*pit
      ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rfi,j]>0.778) AND (0.948>rfi,j))
40*Dt*pit
      ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rfi,j]>0.948) AND (1.118>rfi,j))
55*Dt*pit
      ELSE 0
    aj2[i,j]=Dj*pit+ap[i,j]-aj1[i,j]/m2/m Área total de transferencia de calor por unidad de longitud por
convección de la chaqueta o cilindro interno
    at2[i,j]=Nt*Dt*pit-at1[i,j]/m2/m Área de transferencia de calor por unidad de longitud por convección
de los tubos

Tw[i,j]= 43.289+3878.8223/(11.75896-log(Pwsat))/K Temperatura del Vapor Saturado
pB[i,j]=1.9174-0.0026*Tw[i,j]/kg/m3 Densidad de aire seco

```

```

    //Interpolación 1D de propiedades del vaho"
    Deltahv0[i,j]=Deltahv0_Ts(Ts[i,j])
    pv[i,j]=pv_Tv(Tv[i,j])/kg/m3 Densidad del vapor
    cA[i,j]=cA_Tv(Tv[i,j])/J/kg.K Capacidad calorifica del vaho
    kv[i,j]=kv_Tv(Tv[i,j])/W/m.K conductividad termica
    Uv[i,j]=Uv_Tv(Tv[i,j])/kg/m.s Viscosidad dinamica del vapor
    v[i,j]=Uv[i,j]/pv[i,j]/kg/m.s Viscosidad cinematica del vapor
    CoefTransCalor (jv[i,j],jtv[i,j],jvs[i,j],jts[i,j],vprom[i,j],pv[i,j],cA[i,j],kv[i,j],Uv[i,j],v[i,j],Fs[i,j],X[i,j],Sv[i,j])

    vprom[i,j]=(FB/Sv[i,j])*(1/Mair+Y[i,j]/Mw)*NR1*Tv[i,j]/Pt[i,j]/m/s Velocidad promedio
    Ps[i,j]=exp(11.75896-3878.8223/(Tv[i,j]-43.289))/Atm Presión del vapor saturado"
    Pt[i,j]=0/"Depresión de la Presión interna del secador"
    Ys[i,j]=(Mw/Mair)*(Ps[i,j]/(Pt[i,j]-Ps[i,j]))/humedad absoluta en saturación"(Pt[i,j]-Ps[i,j])
    Deff[i,j]=(-4+150*X[i,j])*1e-5*exp(-(35.2+5.5*X[i,j])/(NR*Tv[i,j]*1e-3))/m2/s Difusividad efectiva de la
harina de pesacado
    kY[i,j]= (jvs[i,j]/(pv[i,j]*cA[i,j]))*((Deff[i,j]/alpha)**(2/3))/kg/m2.s Coeficiente de transferencia de masa a
la fase gaseosa
    ja[i,j]= ZONE ((i>0) AND (i<sec+1)) jv[i,j]*aj2[i,j] //W/K Coeficiente de Transferencia de Calor por
convección multiplicada por el Área
                                ZONE ((i>sec1) AND (i<sec+1)) jv[i,j]*aj2[i,j]+jtv[i,j]*at2[i,j]
                                OTHERS 0
    Theta[i,j]= IF (X[i,j]<Xcr) (X[i,j]-Xinf)/(Xcr-Xinf)/[] Pendiente de descenso de la rapidez del secado
    ELSE 1
    wD[i,j]=kY[i,j]*Theta[i,j]*(Mw/Mair)*(Ys[i,j]-Y[i,j])/kg/m2.s Flujo de masa o velocidad de secado por
unidad de área
    END EXPAND_BLOCK
    END EXPAND_BLOCK

    TsDeltaZ[1,1]=0
    XDeltaZ[1,1]=0
    FsDeltaZ[1,1]=0
    imDeltaZ[1,1]=(cs+cA1*X[1,1])*TsDeltaZ[1,1]+(cA1*Ts[1,1]-Deltahs)*XDeltaZ[1,1]
    im[1,1]=(cs+cA1*X[1,1])*Ts[1,1]-Deltahs*X[1,1]

    //Condiciones de Contorno
    X[1,1]=Xin
    Ts[1,1]=Tsin
    Fs[1,1]=Fsin
    Theta[1,1]=1
    Msolido[1,1]=0

    EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec)
    EXPAND_BLOCK (j IN 2, OrdenP+1)
    //Aproximación de la derivada con respecto a "z", por Colocación Ortogonal de VC1, en los
puntos de colocación de Radau"
    TsDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Ts[i,1]+DP2(s[j])*Ts[i,2]+DP3(s[j])*Ts[i,3]+DP4(s[j])*Ts[i,4])/deltaZ[i]
    XDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*X[i,1]+DP2(s[j])*X[i,2]+DP3(s[j])*X[i,3]+DP4(s[j])*X[i,4])/deltaZ[i]
    FsDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Fs[i,1]+DP2(s[j])*Fs[i,2]+DP3(s[j])*Fs[i,3]+DP4(s[j])*Fs[i,4])/deltaZ[i]

    imDeltaZ[i,j]=(cs+cA1*X[i,j])*TsDeltaZ[i,j]+(cA1*Ts[i,j]-Deltahs)*XDeltaZ[i,j]
    im[i,j]=(cs+cA1*X[i,j])*Ts[i,j]-Deltahs*X[i,j]

    //Ecuaciones de Balance de Masa y Energía de VC1"
    -Fs[i,j]*XDeltaZ[i,j]-X[i,j]*FsDeltaZ[i,j]-wD[i,j]*as[i,j]=(1-
Ep)*ps*SH[i,j]*X[i,j]+XDeltaZ[i,j]*Msolido[i,j]//
    -Fs[i,j]*imDeltaZ[i,j]-im[i,j]*FsDeltaZ[i,j]+jvs[i,j]*as[i,j]*(Tv[i,j]-
Ts[i,j])+jts[i,j]*(at1[i,j]+aj1[i,j])*(Tw[i,j]-Ts[i,j])-wD[i,j]*as[i,j]*(cA1*Ts[i,j]+Deltahv0[i,j])=(1-
Ep)*ps*SH[i,j]*((cs+cA1*X[i,j])*Ts[i,j]+(cA1*Ts[i,j]-Deltahs)*X[i,j])+imDeltaZ[i,j]*Msolido[i,j]"

    Msolido[i,j]=Fs[i,j-1]-Fs[i,j]/Balance de masa de los solidos

```

```

W[i,j]=X[i,j]/(1+X[i,j])/Relación de humedad en base seca y humedad en base humeda
END EXPAND_BLOCK

EXPAND_BLOCK (j IN 1,OrdenP)
  //"Aproximación de la derivada con respecto a "z", por Colocación Ortogonal de VC2"
  TvDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Tv[i,1]+DP2(s[j])*Tv[i,2]+DP3(s[j])*Tv[i,3]+DP4(s[j])*Tv[i,4])/deltaZ[i]
  YDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Y[i,1]+DP2(s[j])*Y[i,2]+DP3(s[j])*Y[i,3]+DP4(s[j])*Y[i,4])/deltaZ[i]

  igDeltaZ[i,j]=(cB+cA[i,j]*Y[i,j])*TvDeltaZ[i,j]+(cA[i,j]*Tv[i,j]+Deltahv0[i,j])*YDeltaZ[i,j]

  //"Ecuaciones de Balance de Masa y Energía de VC2"
  FB*igDeltaZ[i,j]+ja[i,j]*(Tw[i,j]-Tv[i,j])-jvs[i,j]*as[i,j]*(Tv[i,j]-
Ts[i,j])+wD[i,j]*as[i,j]*(cA[i,j]*Tv[i,j]+Deltahv0[i,j])=pB[i,j]*Sv[i,j]*((cB+cA[i,j]*Y[i,j])*Tv[i,j]+(cA[i,j]*Tv[i,j]+Deltahv0[i,j])*Y[i,j])
  FB*YDeltaZ[i,j]+wD[i,j]*as[i,j]=pB[i,j]*Sv[i,j]*Y[i,j]
END EXPAND_BLOCK
END EXPAND_BLOCK

//"Igual de Continuidad entre los polinomios de cada elemento"
EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec-1)
  Tau[i+1,1]=Tau[i,OrdenP+1]
  Deff[i+1,1]=Deff[i,OrdenP+1]
  Deltahv0[i+1,1]=Deltahv0[i,OrdenP+1]
  Msolido[i+1,1]=Msolido[i,OrdenP+1]
  Mharina[i+1,1]=Mharina[i,OrdenP+1]
  Ps[i+1,1]=Ps[i,OrdenP+1]
  Pt[i+1,1]=Pt[i,OrdenP+1]
  SH[i+1,1]=SH[i,OrdenP+1]
  Sj[i+1,1]=Sj[i,OrdenP+1]
  Sv[i+1,1]=Sv[i,OrdenP+1]
  Theta[i+1,1]=Theta[i,OrdenP+1]
  Tw[i+1,1]=Tw[i,OrdenP+1]
  Uv[i+1,1]=Uv[i,OrdenP+1]
  W[i+1,1]=W[i,OrdenP+1]
  Ys[i+1,1]=Ys[i,OrdenP+1]
  Ps[i+1,1]=Ps[i,OrdenP+1]
  ap[i+1,1]=ap[i,OrdenP+1]
  aj1[i+1,1]=aj1[i,OrdenP+1]
  at1[i+1,1]=at1[i,OrdenP+1]
  aj2[i+1,1]=aj2[i,OrdenP+1]
  as[i+1,1]=as[i,OrdenP+1]
  at2[i+1,1]=at2[i,OrdenP+1]
  av[i+1,1]=av[i,OrdenP+1]
  cA[i+1,1]=cA[i,OrdenP+1]
  fr[i+1,1]=fr[i,OrdenP+1]
  ja[i+1,1]=ja[i,OrdenP+1]
  jts[i+1,1]=jts[i,OrdenP+1]
  jjv[i+1,1]=jjv[i,OrdenP+1]
  jtv[i+1,1]=jtv[i,OrdenP+1]
  jvs[i+1,1]=jvs[i,OrdenP+1]
  kY[i+1,1]=kY[i,OrdenP+1]
  kv[i+1,1]=kv[i,OrdenP+1]
  pB[i+1,1]=pB[i,OrdenP+1]
  pv[i+1,1]=pv[i,OrdenP+1]
  rff[i+1,1]=rff[i,OrdenP+1]
  v[i+1,1]=v[i,OrdenP+1]
  vprom[i+1,1]=vprom[i,OrdenP+1]
  wD[i+1,1]=wD[i,OrdenP+1]

  X[i+1,1]=X[i,OrdenP+1]
  Ts[i+1,1]=Ts[i,OrdenP+1]
  Y[i+1,1]=Y[i,OrdenP+1]

```

```

Tv[i+1,1]=Tv[i,OrdenP+1]
Fs[i+1,1]=Fs[i,OrdenP+1]

TsDeltaZ[i+1,1]=TsDeltaZ[i,OrdenP+1]
XDeltaZ[i+1,1]=XDeltaZ[i,OrdenP+1]
FsDeltaZ[i+1,1]=FsDeltaZ[i,OrdenP+1]
TvDeltaZ[i+1,1]=TvDeltaZ[i,OrdenP+1]
YDeltaZ[i+1,1]=YDeltaZ[i,OrdenP+1]

igDeltaZ[i+1,1]=igDeltaZ[i,OrdenP+1]
imDeltaZ[i+1,1]=imDeltaZ[i,OrdenP+1]
im[i+1,1]=im[i,OrdenP+1]
END EXPAND_BLOCK

TvDeltaZ[sec,OrdenP+1]=0
YDeltaZ[sec,OrdenP+1]=0
igDeltaZ[sec,OrdenP+1]=0

//Condiciones de Contorno
Tv[sec,OrdenP+1]=Tamb
Y[sec,OrdenP+1]=(Mw/Mair)*(Phiamb*Ps[sec,OrdenP+1]/(Pt[sec,OrdenP+1]-Phiamb*Ps[sec,OrdenP+1]))

MharinaR[1,1]=(XR[1,1]+1)*MsolidoR[1,1]
frR[1,1]=MharinaR[1,1]/(ps*S[1,1]*(s[4]-s[3]))
SvR[1,1]=S[1,1]*(1-frR[1,1])
PsR[1,1]=exp(11.75896-3878.8223/(TvR[1,1]-43.289))
vpromR[1,1]=(FB/SvR[1,1])*(1/Mair+YR[1,1]/Mw)*NR1*TvR[1,1]/Pt[1,1]
YsR[1,1]=(Mw/Mair)*(PsR[1,1]/(Pt[1,1]-PsR[1,1]))
WR[1,1]=XR[1,1]/(1+XR[1,1])

EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec)
EXPAND_BLOCK (j IN 2, OrdenP+1)
FsR[i,j]= MsolidoR[i,j]*V/(deltaZ[i]*(sr[j]-sr[j-1]))/"kg Masa de harina del sector "
MharinaR[i,j]=(XR[i,j]+1)*MsolidoR[i,j]/"Relación Harina seca y Harina humeda"

frR[i,j]=MharinaR[i,j]/(S[i,j]*deltaZ[i]*(sr[j]-sr[j-1])*(1-Ep)/(1/ps+XR[i,j]/pw))/" Fracción Volumetrica de
solidos en el secador"
SvR[i,j]=S[i,j]*(1-frR[i,j])/m2 Sección transversal del vaho"
vpromR[i,j]=(FB/SvR[i,j])*(1/Mair+YR[i,j]/Mw)*NR1*TvR[i,j]/Pt[i,j]/m/s Velocidad promedio

PsR[i,j]=exp(11.75896-3878.8223/(TvR[i,j]-43.289))/"Atm Presión del vapor saturado"
YsR[i,j]=(Mw/Mair)*(PsR[i,j]/(Pt[i,j]-PsR[i,j]))/"humedad absoluta en saturación"(Pt[i,j]-Ps[i,j])
END EXPAND_BLOCK
END EXPAND_BLOCK

XR[1,1]=X[1,1]
TsR[1,1]=Ts[1,1]
FsR[1,1]=Fs[1,1]
MsolidoR[1,1]=0

EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec)
EXPAND_BLOCK (j IN 2, OrdenP+1)
TsR[i,j]=P1(sr[j])*Ts[i,1]+P2(sr[j])*Ts[i,2]+P3(sr[j])*Ts[i,3]+P4(sr[j])*Ts[i,4]
XR[i,j]=P1(sr[j])*X[i,1]+P2(sr[j])*X[i,2]+P3(sr[j])*X[i,3]+P4(sr[j])*X[i,4]

MsolidoR[i,j]=FsR[i,j]-FsR[i,j]
WR[i,j]=XR[i,j]/(1+XR[i,j])
END EXPAND_BLOCK

EXPAND_BLOCK (j IN 1, OrdenP)
TvR[i,j]=P1(sr[j])*Tv[i,1]+P2(sr[j])*Tv[i,2]+P3(sr[j])*Tv[i,3]+P4(sr[j])*Tv[i,4]

```

```

                YR[i,j]=P1(sr[j])*Y[i,1]+P2(sr[j])*Y[i,2]+P3(sr[j])*Y[i,3]+P4(sr[j])*Y[i,4]
            END EXPAND_BLOCK
        END EXPAND_BLOCK

    EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec-1)
        XR[i+1,1]=XR[i,OrdenP+1]
        TsR[i+1,1]=TsR[i,OrdenP+1]
        YR[i+1,1]=YR[i,OrdenP+1]
        TvR[i+1,1]=TvR[i,OrdenP+1]
        FsR[i+1,1]=FsR[i,OrdenP+1]
        MsolidoR[i+1,1]=MsolidoR[i,OrdenP+1]
        MharinaR[i+1,1]=MharinaR[i,OrdenP+1]
        frR[i+1,1]=frR[i,OrdenP+1]
        SvR[i+1,1]=SvR[i,OrdenP+1]
        vpromR[i+1,1]=vpromR[i,OrdenP+1]
        PsR[i+1,1]=PsR[i,OrdenP+1]
        YsR[i+1,1]=YsR[i,OrdenP+1]
        WR[i+1,1]=WR[i,OrdenP+1]
    END EXPAND_BLOCK

    TvR[sec,OrdenP+1]=Tv[sec,OrdenP+1]
    YR[sec,OrdenP+1]=Y[sec,OrdenP+1]
END COMPONENT

```

```

/*-----
LIBRARY: MODELAMIENTO
COMPONENT: MODELAMIENTO_COL_ORT2
PARTITION: partition1
EXPERIMENT: exp1
TEMPLATE: TRANSIENT
CREATION DATE: 11/04/2017
-----*/

```

```

EXPERIMENT exp1 ON MODELAMIENTO_COL_ORT2.partition1
DECLS
OBJECTS
INIT
    -- initial values for state variables

BOUNDS
    -- Set equations for boundaries: boundVar = f(TIME;...)
        Fsin = 3.215//+0.1*sin(TIME/360)
        Pwsat = 4.2
        Tsin = 368.15
        V = 7.9444e-3
        Xin = 0.7

        --Condiciones de Contorno Constantes
        Tamb = 363.15
        Phiamb=0.98
        Avaho=0.5
        Pex=0.8

BODY
    -- creates an ASCII file with the results in table format
    -- REPORT_TABLE("results.rpt", "",TRUE)

    -- set the debug level (valid range [0,4])

```

```

DEBUG_LEVEL= 1
-- detected a very sparse Jacobian matrix. It is recommended to use any sparse solver as IDAS_SPARSE,
DASSL_SPARSE or CVODE_BDF_SPARSE
IMETHOD= IDAS_SPARSE -- default is DASSL_SPARSE, recommended is IDAS_SPARSE
-- Settings for different actions. Valid actions are: SEV_DISABLE, SEV_NONE, SEV_WARNING, SEV_ERROR,
SEV_KILLPOINT, SEV_FATAL
eSetErrorAction(ERR_BAD_OPER,SEV_KILLPOINT) -- Detect bad numerical operations (eg division by zero),
default is SEV_NONE, recommended is SEV_KILLPOINT
eSetErrorAction(ERR_NAN_INF, SEV_KILLPOINT) -- Detect NaN or Inf values, default is SEV_NONE,
recommended is SEV_KILLPOINT
eSetConfig(CFG_FORCE_STOP_CINT,TRUE) -- Force or not to stop the solver each CINT. Sometimes you can
speed up the simulation if you select FALSE
-- set tolerances and other important inputs
REL_ERROR = 1e-06 -- transient solver relative tolerance
ABS_ERROR = 1e-06 -- transient solver absolute tolerance
TOLERANCE = 1e-06 -- steady solver relative tolerance
INIT_INTEG_STEP = -1 -- initial integration step size (-1 means use the solver estimation)
MAX_INTEG_STEP = -1 -- maximum integration step size (-1 means use the solver estimation)
NSTEPS = 1 -- Only for explicit solvers use CINT/NSTEPS as integration step size
REPORT_MODE = IS_EVENT -- by default it reports results at every CINT and event detection. Other valid options
are IS_STEP, IS_CINT and IS_MANUAL_REFRESH

-- simulate a transient in range[TIME,TSTOP] reporting every CINT
TIME = 0
TSTOP = 20000
CINT = 1
INTEG()
END EXPERIMENT

```

Estimación de parámetros desconocidos por Optimización dinámica

```

/*-----
LIBRARY: OPTIMIZACION
FILE: OPT_SEC_COL_ORT
CREATION DATE: 11/04/2017
-----*/

--      Entradas:Tsin      Temperatura de los solidos entrada
--                        Xin      Humedad de harina de entrada
--                        Pwsat Presion de saturación
--                        Fsin      Flujo del solido
--
--      Salidas: (que coinciden con los estados del sistema)
--                        Tsout Temperatura de los solidos salida
--                        Xout Humedad de harina de salida
--
--      Parámetros conocidos:
--      Fs[sec,OrdenP+1], Msolido[sec,OrdenP+1], Mharina[sec,OrdenP+1], fr[sec,OrdenP+1],
S[sec,OrdenP+1], SH[sec,OrdenP+1], Sv[sec,OrdenP+1], as[sec,OrdenP+1], av[sec,OrdenP+1], Tau[sec,OrdenP+1],
rf[sec,OrdenP+1], PHI, ap[sec,OrdenP+1], aj1[sec,OrdenP+1], at1[sec,OrdenP+1], aj2[sec,OrdenP+1],
at2[sec,OrdenP+1] //Dimensiones de masa y superficie
--      jjv[sec,OrdenP+1], jtv[sec,OrdenP+1], jvs[sec,OrdenP+1], jjts[sec,OrdenP+1], ja[sec,OrdenP+1]
//Coeficientes de transferencia de calor
--      pB[sec,OrdenP+1], Ps[sec,OrdenP+1], Ys[sec,OrdenP+1], Deff[sec,OrdenP+1], kY[sec,OrdenP+1],
wD[sec,OrdenP+1], Theta[sec,OrdenP+1], Pt[sec,OrdenP+1], vprom[sec,OrdenP+1], FB // Coeficientes par difusión
--      Ts[sec,OrdenP+1], X[sec,OrdenP+1], Tv[sec,OrdenP+1], Y[sec,OrdenP+1] // Estados del sistema
--      Tw[sec,OrdenP+1], Twsat //Temperatura del Vapor Saturado
--      Tamb, Phiamb, V, Pex, Avaho// Condiciones de Contorno Constantes
--      TsDeltaZ[sec,OrdenP+1], XDeltaZ[sec,OrdenP+1], TvDeltaZ[sec,OrdenP+1],
YDeltaZ[sec,OrdenP+1],imDeltaZ[sec,OrdenP+1], igDeltaZ[sec,OrdenP+1], FsDeltaZ[sec,OrdenP+1] // Aproximación de
la derivada por Colocación Ortogonal
--      pv[sec,OrdenP+1], cA[sec,OrdenP+1], kv[sec,OrdenP+1], Uv[sec,OrdenP+1], v[sec,OrdenP+1],
Deltahv0[sec,OrdenP+1], im[sec,OrdenP+1] // Propiedades del agua saturada
--      W[sec,OrdenP+1]//Humedad de la harina en base humeda
--
--      Parámetros a estimar:
--      KX
--      KS
--      Ep
--      Xcr

```

```

FUNCTION NO_TYPE CoefTransCalor
(OUT REAL jjv, OUT REAL jtv, OUT REAL jvs, IN REAL vprom,IN REAL pv,IN REAL cA,IN REAL kv,IN REAL Uv,IN
REAL v, IN REAL Fs, IN REAL Xin, IN REAL Sv)

```

```
DECLS
```

```

REAL Re, Nu, Rej, Ret, Nuj, Nut, Pr1, Pe
REAL vpromJ1, vpromJ, vpromT1, vpromT, vpromV1, vpromV
REAL f, vt, Dpond//, Rej2, Ret2, Nuj2, Nut2
REAL Dt, Dj
REAL PrinF, Prs, Pr, CD, g

```

```
BODY
```

```

PrinF=0.9992//
Prs=0.9735//
Pr=0.9830//Numero de Prantl
CD=0.8
Dt=0.127//m Diametro externo de tubos
Dj=3.356//m Diametro de chaqueta
g=9.81//m/s2 Gravedad

```

```

//Coeficiente de transferencia de calor Chaqueta-Vaho"
vpromJ1=Dj*pit/10//
vpromJ=sqrt(vprom**2+vpromJ1**2)
Rej=vpromJ*Dj/v//Valor de Reynolds chaqueta
f=(0.79*log(Rej)-1.64)**(-2)//
Nuj=(f/8)*(Rej-1000)*Pr/(1+12.7*((Pr**(2/3))-1)*(f/8)**0.5)//Valor de Nusselt Chaqueta
jjv=3*kv*Nuj/Dj
//Coeficiente de transferencia de calor de Tubos-Vaho"
Dpond=2.256 //m Diametro ponderado de los tubos
vpromT1=(0.17/(0.17-Dt))*Dpond*pit/10//
vpromT=sqrt(vprom**2+vpromT1**2)//
Ret=vpromT*Dt/v//Valor de Reynolds tubo
Nut=0.27*(Ret**(0.63))*(Prin**(0.36))*((Prin/Prs)**0.25)//
jtv=3*kv*Nut/Dt
//Coeficiente de transferencia de calor de Tubos-Vaho"
vpromV1=sqrt(dp*g*ps*Dj/(0.75*CD*pv*Dj+0.5*dp*ps))//Velocidad promedio de caida del solido
vpromV=sqrt(vpromV1**2+vprom**2)
Re=dp*vpromV/v//Reynolds de Vapor-Solido
Nu=2+(0.4*Re**(0.5)+0.06*Re**(2/3))*Pr**0.4
jvs=3*kv*Nu/dp

```

END FUNCTION

COMPONENT OPT_SEC_COL_ORT (INTEGER nent =4, INTEGER nsal = 2)

DATA

```

REAL Ts00 = 90+273.15//K Temperatura inicial de la harina
REAL Tv00 = 99+273.15//K Temperatura del vaho
REAL X00 = 0.70//[] Humedad inicial de la harina
REAL Y00 = 1//[] Humedad absoluta inicial del vaho
REAL Pt00 = 1//[] Humedad inicial del vaho
REAL Msolido01 = 3.4121*2700*4.1/21.7//kg Masa inicial de solidos de la primera etapa
REAL Msolido02 = 3.4121*2700*17.6/21.7//kg Masa inicial de solidos de la segunda etapa

```

--Condiciones de Contorno Constantes

```

REAL V = 7.9444e-3 //m/s Velocidad de traslado de harina a lo largo del secador
REAL Tamb = 367.15//K Temperatura ambiental
REAL Phiamb=0.8//[] Humedad relativa del ambiente
REAL Avaho=0.5//[] Porcentaje de area en el damper
REAL Pex=0.8//Atm Presión generada antes del damper

```

-- Parametros a estimar, valores iniciales

```

REAL KX=6
REAL KS=0.5
REAL Ep=0.2
REAL Xcr=0.25

```

REAL tsamp = 3600 -- Periodo de muestreo de recogida de datos (s)

INTEGER N1 = 1 -- Inicio horizonte de estimación

INTEGER NE = 12 -- Número de muestras, datos reales tomados

-- Pesos en el coste para las diferencias entre predicciones y datos reales

REAL pesos[2] = {1.0, 1.0} -- pesos[nsal]

-- Valores medios de los datos experimentales, factor de escala

REAL media[2] = {0.08, 365} -- Humedad del Solido Xout, Temperatura Tsout

```

REAL LiminfXout = 0.02
REAL LimsupXout = 0.2
REAL LiminfTsout = 273.15+75
REAL LimsupTsout = 273.15+110

```

DECLS

```

CONST REAL cs=1344//J/kg.K Capacidad calorifica del solido seco
CONST REAL cA1=4217//J/kg.K Capacidad calorifica de agua 100°C
CONST REAL cB=1009//J/kg.K Capacidad calorifica del aire
CONST REAL Deltahs=0//Calor latente de sorción, se considera el valor debido a dificultad de
obtenerlo experimentalmente
CONST REAL NR=8.314//J/K mol Constante universal de los gases
CONST REAL NR1=8.205746e-5//m3.atm/K.mol Constante universal de los gases
CONST REAL pit=3.14159//[] Constate de PI
CONST REAL ps=593//kg/m3 Densidad del sólido
CONST REAL pw=957.9//kg/m3 Densidad del agua
CONST REAL dp=0.002//m diametro de la particula
CONST REAL Lt=21.7//m Longitud total del secador
CONST REAL Nt=150//[] Numero de Tubos 6*25
CONST REAL Dt=0.127//m Diametro externo de tubos
CONST REAL Dj=3.356//m Diametro de chaqueta
CONST REAL Lp=0.2//m Ancho de paleta
CONST REAL Np=42//[] Numero de paletas
CONST REAL Xinf=0.02// Humedad de equilibrio en base seca
CONST REAL Mw=18.01e-3//Kg/mol Masa molar del agua"
CONST REAL Mair=28.9645e-3//Kg/mol Masa molar del aire"
CONST REAL alpha=2.18e-5
CONST REAL Pr=0.9830

CONST INTEGER sec=7
CONST INTEGER sec1=2//(sec)*4.1/21.7
CONST INTEGER OrdenP=3
CONST REAL s[OrdenP+1]={0, 0.155051, 0.644949, 1}
CONST REAL deltaZ[sec] = {2.05, 2.05, 3.52, 3.52, 3.52, 3.52, 3.52} // 4.1/sec1 - 17.6/(sec-sec1)
REAL Fs[sec,OrdenP+1], Msolido[sec,OrdenP+1], Mharina[sec,OrdenP+1], fr[sec,OrdenP+1],
S[sec,OrdenP+1], SH[sec,OrdenP+1], Sv[sec,OrdenP+1], as[sec,OrdenP+1], av[sec,OrdenP+1], Tau[sec,OrdenP+1],
rf[sec,OrdenP+1], PHI, ap[sec,OrdenP+1], aj1[sec,OrdenP+1], at1[sec,OrdenP+1], aj2[sec,OrdenP+1],
at2[sec,OrdenP+1] //Dimensiones de masa y superficie
REAL jjv[sec,OrdenP+1], jtv[sec,OrdenP+1], jvs[sec,OrdenP+1], jjts[sec,OrdenP+1],
ja[sec,OrdenP+1] //Coeficientes de transferencia de calor
REAL pB[sec,OrdenP+1], Ps[sec,OrdenP+1], Ys[sec,OrdenP+1], Deff[sec,OrdenP+1],
kY[sec,OrdenP+1], wD[sec,OrdenP+1], Theta[sec,OrdenP+1], Pt[sec,OrdenP+1], vprom[sec,OrdenP+1], FB //
Coeficientes par difusión
REAL Ts[sec,OrdenP+1], X[sec,OrdenP+1], Tv[sec,OrdenP+1], Y[sec,OrdenP+1] // Estados del
sistema
REAL Tw[sec,OrdenP+1] //Vapor Saturado
REAL TsDeltaZ[sec,OrdenP+1], XDeltaZ[sec,OrdenP+1], TvDeltaZ[sec,OrdenP+1],
YDeltaZ[sec,OrdenP+1], imDeltaZ[sec,OrdenP+1], igDeltaZ[sec,OrdenP+1], FsDeltaZ[sec,OrdenP+1] // Aproximación de
la derivada por Colocación Ortogonal
REAL pv[sec,OrdenP+1], cA[sec,OrdenP+1], kv[sec,OrdenP+1], Uv[sec,OrdenP+1],
v[sec,OrdenP+1], Deltahv0[sec,OrdenP+1], im[sec,OrdenP+1] // Propiedades del agua saturada
REAL W[sec,OrdenP+1]//Humedad de la harina en base humeda

-- Condiciones de Contorno y a manipular
REAL Fsin, Tsin, Xin, Pwsat

-- Salidas medidas del proceso
-- REAL Xout, Tsout
REAL y_modelo[nsal] -- Salidas del modelo que se quiere ajustar
REAL y_real[nsal] -- Salidas muestreadas experimentales
REAL u_real[nent] -- Entradas experimentales

REAL coef1, coef2 -- Coeficiente que activa la función de coste

DISCR REAL J1 -- Subtotal del índice de coste
DISCR REAL J2 -- Subtotal del índice de coste

```

```

        BOOLEAN Sample = TRUE          -- Variable bucles

-- Tablas correspondientes a los datos experimentales
-- tab1=Fs tab2=Pwsat tab3=Tsin tab4=Xin Tab5=Xout tab6=Tsout
TABLE_1D tab1, tab2, tab3, tab4, tab5, tab6

-- El índice que se minimiza
    DISCR REAL J_costo

-- Vector con la funcion objetivo y las restricciones no lineales
    REAL F_optim[5]

-- Variable auxiliar para el calculo de maximos y minimos
    REAL Xmin, Xmax
    REAL Tmin, Tmax

INIT
-- Valores iniciales de las variables de estado
    FOR (i IN 1,sec)
        FOR (j IN 1,OrdenP+1)
            Ts[i,j] = Ts00
            Tv[i,j] = Tv00
            Y[i,j] = Y00
            Pt[i,j]= Pt00
        END FOR
    END FOR
    X[1,1]=X00
    FOR (i IN 1,sec1)
        X[i,2]=X00
        X[i,3]=X00
        X[i,4]=X00
        Msolido[i,2]= Msolido01*(s[2]-s[1])/sec1
        Msolido[i,3]= Msolido01*(s[3]-s[2])/sec1
        Msolido[i,4]= Msolido01*(s[4]-s[3])/sec1
    END FOR
    FOR (i IN sec1+1,sec)
        X[i,2]=X00-0.12*(i-3)-0.03
        X[i,3]=X00-0.12*(i-3)-0.09
        X[i,4]=X00-0.12*(i-3)-0.12
        Msolido[i,2]= Msolido02*(s[2]-s[1])/(sec-sec1)
        Msolido[i,3]= Msolido02*(s[3]-s[2])/(sec-sec1)
        Msolido[i,4]= Msolido02*(s[4]-s[3])/(sec-sec1)
    END FOR

    J_costo = 0.0
    J1 = 0.0
    J2 = 0.0

-- Entradas
-- tab1=Fs tab2=Pwsat tab3=Tsin tab4=Xin
u_real[1] = linearInterp1D (tab1, TIME)
Fsin = u_real[1]
u_real[2] = linearInterp1D (tab2, TIME)
Pwsat = u_real[2]
u_real[3] = linearInterp1D (tab3, TIME)
Tsin = u_real[3]
u_real[4] = linearInterp1D (tab4, TIME)
Xin = u_real[4]

-- Salidas
-- Tab5=Xout tab6=Tsout

```

```

y_real[1] = linearInterp1D (tab5, TIME)           -- valor real, leído de planta
X[7,4] = y_real[1]
y_modelo[1] = X[7,4]                             -- valor del modelo
y_real[2] = linearInterp1D (tab6, TIME)         -- valor real, leído de planta
Ts[7,4] = y_real[2]
y_modelo[2] = Ts[7,4]                           -- valor del modelo

-- coeficiente que activa el índice de coste
coef1 = 1
coef2 = 1
-- coef = 1 AFTER N1*tsamp
Xmin= X[7,4]
Xmax= X[7,4]
Tmin= Ts[7,4]
Tmax= Ts[7,4]
DISCRETE
WHEN (Sample) THEN
  -- Subtotales del índice de coste
  J1 += coef1*((y_modelo[1] - y_real[1])/media[1])**2
  J2 += coef2*((y_modelo[2] - y_real[2])/media[2])**2
  J_costo = pesos[1]*J1 + pesos[2]*J2

  Sample = FALSE
  Sample = TRUE AFTER tsamp
END WHEN

CONTINUOUS

-- Entradas medibles
u_real[1] = linearInterp1D (tab1, TIME)
Fsin = u_real[1]
u_real[2] = linearInterp1D (tab2, TIME)
Pwsat = u_real[2]
u_real[3] = linearInterp1D (tab3, TIME)
Tsin = u_real[3]
u_real[4] = linearInterp1D (tab4, TIME)
Xin = u_real[4]

-- Salidas medibles
y_real[1] = linearInterp1D (tab5, TIME)         -- valor real, leído de planta
y_real[2] = linearInterp1D (tab6, TIME)         -- valor real, leído de planta

-- ECUACIONES DIFERENCIALES DEL MODELO (mezcla perfecta)

FB=KX*Avaho*sqrt(Pt[1,1]**2-Pex**2)/(Y[1,1]+1)//kg/s Flujo de vaho
PHI=1/(1.101+414*dp)//[] Esfericidad de los solidos"

//"Valores iniciales del sistema"
Mharina[1,1]=(X[1,1]+1)*Msolido[1,1]
fr[1,1]=Mharina[1,1]/(ps*S[1,1]*(s[4]-s[3]))
S[1,1]=Dj**2*pit/4
SH[1,1]=S[1,1]*fr[1,1]
Sv[1,1]=S[1,1]*(1-fr[1,1])
av[1,1]=6*fr[1,1]/(PHI*dp)
as[1,1]=av[1,1]*S[1,1]
Tau[1,1]=0
rf[1,1]=(1-cos(Tau[1,1]))*Dj/2
ap[1,1]=0
at1[1,1]=0
aj1[1,1]=(pit+Tau[1,1]/(2*pit))*Dj/2
aj2[1,1]=Dj*pit+2*0.8*Np*Lp

```

```

at2[1,1]=Nt*Dt*pit
pv[1,1]=pv_Tv(Tv[1,1])
cA[1,1]=cA_Tv(Tv[1,1])
kv[1,1]=kv_Tv(Tv[1,1])
Uv[1,1]=Uv_Tv(Tv[1,1])
Deltahv0[1,1]=Deltahv0_Ts(Ts[1,1])
v[1,1]=Uv[1,1]/pv[1,1]
CoefTransCalor (jv[1,1], jtv[1,1], jvs[1,1], vprom[1,1], pv[1,1], cA[1,1], kv[1,1], Uv[1,1], v[1,1], Fs[1,1],
X[1,1], Sv[1,1])
jjts[1,1]=3.5565*KS*kv[1,1]*Pr**(1/3)/((Ep**(-1/3)-1)*dp)
Tw[1,1]=43.289+3878.8223/(11.75896-log(Pwsat))
pB[1,1]=1.9174-0.0026*Tv[1,1]
Ps[1,1]=exp(11.75896-3878.8223/(Tv[1,1]-43.289))
vprom[1,1]=(FB/Sv[1,1])*(1/Mair+Y[1,1]/Mw)*NR1*Tv[1,1]/Pt[1,1]
Pt[1,1]=1.018
Ys[1,1]=(Mw/Mair)*(Ps[1,1]/(Pt[1,1]-Ps[1,1]))
Deff1[1,1]=(-4+150*X[1,1])*1e-5*exp(-(35.2+5.5*X[1,1])/(NR*Tv[1,1]*1e-3))
kY[1,1]=(jvs[1,1]/(pv[1,1]*cA[1,1]))*(Deff1[1,1]/alpha)**(2/3)
wD[1,1]=kY[1,1]*Theta[1,1]*Ys[1,1]-Y[1,1]
ja[1,1]=jv[1,1]*aj2[1,1]
W[1,1]=X[1,1]/(1+X[1,1])

EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec)
EXPAND_BLOCK (j IN 2, OrdenP+1)
Fs[i,j]= Msolido[i,j]*V/(deltaZ[i]*(s[j]-s[j-1]))/"kg Masa de harina del sector "
Mharina[i,j]=(X[i,j]+1)*Msolido[i,j]/"Relación Harina seca y Harina humeda"
S[i,j]= ZONE ((i>0) AND (i<sec1+1)) Dj**2*pit/4 /"m2 Seccion transversal del secador"
ZONE ((i>sec1) AND (i<sec+1)) (Dj**2-Nt*(Dt**2))*pit/4
OTHERS 0
fr[i,j]=Mharina[i,j]/(S[i,j]*deltaZ[i]*(s[j]-s[j-1]))*(1-Ep)/(1/ps+X[i,j]/pw)/" Fracción Volumetrica
de solidos en el secador"
SH[i,j]=S[i,j]*fr[i,j]/m2 Sección transversal de la harina"
Sv[i,j]=S[i,j]*(1-fr[i,j])/m2 Sección transversal del vaho"
av[i,j]=6*fr[i,j]/(PHI*dp)/1/m2 superficial de los solidos por volumen del secador"
as[i,j]=av[i,j]*S[i,j]/m Área de Tranferencia de calor superficial por unidad de longitud del
solido"
fr[i,j]=(4/(3*pit))*Tau[i,j]**3/[] Relación entre fracción parcial de harina de la sección
transversal y el angulo
rf[i,j]=(1-cos(Tau[i,j]))*Dj/2/m Flecha de la porción de harinaDimensión de la flecha
ap[i,j]=2*0.8*Np*Lp/m2 Área de paletas del cilindro
aj1[i,j]=(pit+Tau[i,j])*Dj/2+ap[i,j]*Tau[i,j]/pit+ap[i,j]*(pit-Tau[i,j])/(4*pit)/m2/m Área total de
transferencia de calor por unidad de longitud por conducción de la chaqueta o cilindro interno
at1[i,j]= IF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rf[i,j]>0.278) AND (0.448>rf[i,j])) 7*Dt*pit/m2/m
Área de transferencia de calor por unidad de longitud por conducción de los tubos
ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rf[i,j]>0.448) AND
(0.618>rf[i,j])) 16*Dt*pit
ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rf[i,j]>0.618) AND
(0.778>rf[i,j])) 27*Dt*pit
ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rf[i,j]>0.778) AND
(0.948>rf[i,j])) 40*Dt*pit
ELSEIF ((i>sec1) AND (i<sec+1) AND (rf[i,j]>0.948) AND
(1.118>rf[i,j])) 55*Dt*pit
ELSE 0
aj2[i,j]=Dj*pit+ap[i,j]-aj1[i,j]/m2/m Área total de transferencia de calor por unidad de longitud
por convección de la chaqueta o cilindro interno
at2[i,j]=Nt*Dt*pit-at1[i,j]/m2/m Área de transferencia de calor por unidad de longitud por
convección de los tubos

Tw[i,j]= 43.289+3878.8223/(11.75896-log(Pwsat))/K Temperatura del Vapor Saturado
pB[i,j]=1.9174-0.0026*Tv[i,j]/kg/m3 Densidad de aire seco
/"Interpolación 1D de propiedades del vaho"

```

```

Deltahv0[i,j]=Deltahv0_Ts(Ts[i,j])
pv[i,j]=pv_Tv(Tv[i,j])/kg/m3 Densidad del vapor
cA[i,j]=cA_Tv(Tv[i,j])/J/kg.K Capacidad calorifica del vaho
kv[i,j]=kv_Tv(Tv[i,j])/W/m.K conductividad termica
Uv[i,j]=Uv_Tv(Tv[i,j])/kg/m.s Viscosidad dinamica del vapor
v[i,j]=Uv[i,j]/pv[i,j]/kg/m.s Viscosidad cinematica del vapor
CoefTransCalor ((jv[i,j],jtv[i,j],jvs[i,j],vprom[i,j],pv[i,j],cA[i,j],kv[i,j],Uv[i,j],v[i,j],Fs[i,j],X[i,j],Sv[i,j])
//Coeficiente de transferencia de calor por conducción Chaqueta Tubo-Solidos"
jjts[i,j]=3.5565*KS*kv[i,j]*Pr**(1/3)/((Ep**(-1/3)-1)*dp)

vprom[i,j]=(FB/Sv[i,j])*(1/Mair+Y[i,j]/Mw)*NR1*Tv[i,j]/Pt[i,j]/m/s Velocidad promedio
Ps[i,j]=exp(11.75896-3878.8223/(Tv[i,j]-43.289))/Atm Presión del vapor saturado"
Pt[i,j]=0//Depresión de la Presión interna del secador"
Ys[i,j]=(Mw/Mair)*(Ps[i,j]/(Pt[i,j]-Ps[i,j]))//humedad absoluta en saturación"(Pt[i,j]-Ps[i,j])
Deff[i,j]=(-4+150*X[i,j])*1e-5*exp(-(35.2+5.5*X[i,j]))/(NR*Tv[i,j]*1e-3))/m2/s Difusividad
efectiva de la harina de pesacado
kY[i,j]= (jvs[i,j]/(pv[i,j]*cA[i,j]))*((Deff[i,j]/alpha)**(2/3))/kg/m2.s Coeficiente de transferencia
de masa a la fase gaseosa
ja[i,j]= ZONE ((i>0) AND (i<sec1+1)) jv[i,j]*aj2[i,j] //W/K Coeficiente de Transferencia de
Calor por convección multiplicada por el Área
ZONE ((i<sec1) AND (i<sec+1)) jv[i,j]*aj2[i,j]+jtv[i,j]*at2[i,j]
OTHERS 0
Theta[i,j]= IF (X[i,j]<Xcr) (X[i,j]-Xinf)/(Xcr-Xinf)/[] Pendiente de descenso de la rapidez del
secado
ELSE 1
wD[i,j]=kY[i,j]*Theta[i,j]*(Mw/Mair)*(Ys[i,j]-Y[i,j])/kg/m2.s Flujo de masa o velocidad de
secado por unidad de área
END EXPAND_BLOCK
END EXPAND_BLOCK

TsDeltaZ[1,1]=0
XDeltaZ[1,1]=0
FsDeltaZ[1,1]=0
imDeltaZ[1,1]=(cs+cA1*X[1,1])*TsDeltaZ[1,1]+(cA1*Ts[1,1]-Deltahs)*XDeltaZ[1,1]
im[1,1]=(cs+cA1*X[1,1])*Ts[1,1]-Deltahs*X[1,1]

//Condiciones de Contorno
X[1,1]=Xin
Ts[1,1]=Tsin
Fs[1,1]=Fsin
Theta[1,1]=1
Msolido[1,1]=0

EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec)
EXPAND_BLOCK (j IN 2, OrdenP+1)
//Aproximación de la derivada con respecto a "z", por Colocación Ortogonal de
VC1, en los puntos de colocación de Radau"

TsDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Ts[i,1]+DP2(s[j])*Ts[i,2]+DP3(s[j])*Ts[i,3]+DP4(s[j])*Ts[i,4])/deltaZ[i]

XDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*X[i,1]+DP2(s[j])*X[i,2]+DP3(s[j])*X[i,3]+DP4(s[j])*X[i,4])/deltaZ[i]

FsDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Fs[i,1]+DP2(s[j])*Fs[i,2]+DP3(s[j])*Fs[i,3]+DP4(s[j])*Fs[i,4])/deltaZ[i]

imDeltaZ[i,j]=(cs+cA1*X[i,j])*TsDeltaZ[i,j]+(cA1*Ts[i,j]-Deltahs)*XDeltaZ[i,j]
im[i,j]=(cs+cA1*X[i,j])*Ts[i,j]-Deltahs*X[i,j]

//Ecuaciones de Balance de Masa y Energía de VC1"
-Fs[i,j]*XDeltaZ[i,j]-X[i,j]*FsDeltaZ[i,j]-wD[i,j]*as[i,j]=(1-
Ep)*ps*SH[i,j]*X[i,j]+XDeltaZ[i,j]*Msolido[i,j]//

```

```

-Fs[i,j]*imDeltaZ[i,j]-im[i,j]*FsDeltaZ[i,j]+jvs[i,j]*as[i,j]*(Tv[i,j]-
Ts[i,j])+jits[i,j]*(at1[i,j]+aj1[i,j])*(Tw[i,j]-Ts[i,j])-wD[i,j]*as[i,j]*(cA1*Ts[i,j]+Deltahv0[i,j])=(1-
Ep)*ps*SH[i,j]*(cs+cA1*X[i,j])*Ts[i,j]+(cA1*Ts[i,j]-Deltahs)*X[i,j])+imDeltaZ[i,j]*Msolido[i,j]'

Msolido[i,j]=Fs[i,j-1]-Fs[i,j]/Balance de masa de los solidos

W[i,j]=X[i,j]/(1+X[i,j])/Relación de humedad en base seca y humedad en base
humeda

END EXPAND_BLOCK

EXPAND_BLOCK (j IN 1,OrdenP)
//Aproximación de la derivada con respecto a "z", por Colocación Ortogonal de VC2"

TvDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Tv[i,1]+DP2(s[j])*Tv[i,2]+DP3(s[j])*Tv[i,3]+DP4(s[j])*Tv[i,4])/deltaZ[i]
YDeltaZ[i,j]=(DP1(s[j])*Y[i,1]+DP2(s[j])*Y[i,2]+DP3(s[j])*Y[i,3]+DP4(s[j])*Y[i,4])/deltaZ[i]
igDeltaZ[i,j]=(cB+cA[i,j]*Y[i,j])*TvDeltaZ[i,j]+(cA[i,j]*Tv[i,j]+Deltahv0[i,j])*YDeltaZ[i,j]

//Ecuaciones de Balance de Masa y Energía de VC2"
FB*igDeltaZ[i,j]+ja[i,j]*(Tw[i,j]-Tv[i,j])-jvs[i,j]*as[i,j]*(Tv[i,j]-
Ts[i,j])+wD[i,j]*as[i,j]*(cA[i,j]*Tv[i,j]+Deltahv0[i,j])=pB[i,j]*Sv[i,j]*((cB+cA[i,j]*Y[i,j])*Tv[i,j]+(cA[i,j]*Tv[i,j]+Deltahv0[i,j])*Y[i,j])
FB*YDeltaZ[i,j]+wD[i,j]*as[i,j]=pB[i,j]*Sv[i,j]*Y[i,j]'

END EXPAND_BLOCK
END EXPAND_BLOCK

//Igual de Continuidad entre los polinomios de cada elemento"
EXPAND_BLOCK (i IN 1, sec-1)
Tau[i+1,1]= Tau[i,OrdenP+1]
Deff[i+1,1]=Deff[i,OrdenP+1]
Deltahv0[i+1,1]=Deltahv0[i,OrdenP+1]
Fs[i+1,1]=Fs[i,OrdenP+1]
Mharina[i+1,1]=Mharina[i,OrdenP+1]
Ps[i+1,1]=Ps[i,OrdenP+1]
Pt[i+1,1]=Pt[i,OrdenP+1]
SH[i+1,1]=SH[i,OrdenP+1]
S[i+1,1]=S[i,OrdenP+1]
Sv[i+1,1]=Sv[i,OrdenP+1]
Theta[i+1,1]=Theta[i,OrdenP+1]
Tw[i+1,1]=Tw[i,OrdenP+1]
Uv[i+1,1]=Uv[i,OrdenP+1]
W[i+1,1]=W[i,OrdenP+1]
Ys[i+1,1]=Ys[i,OrdenP+1]
Ps[i+1,1]=Ps[i,OrdenP+1]
ap[i+1,1]=ap[i,OrdenP+1]
aj1[i+1,1]=aj1[i,OrdenP+1]
at1[i+1,1]=at1[i,OrdenP+1]
aj2[i+1,1]=aj2[i,OrdenP+1]
as[i+1,1]=as[i,OrdenP+1]
at2[i+1,1]=at2[i,OrdenP+1]
av[i+1,1]=av[i,OrdenP+1]
cA[i+1,1]=cA[i,OrdenP+1]
fr[i+1,1]=fr[i,OrdenP+1]
ja[i+1,1]=ja[i,OrdenP+1]
jits[i+1,1]=jits[i,OrdenP+1]
jiv[i+1,1]=jiv[i,OrdenP+1]
jtv[i+1,1]=jtv[i,OrdenP+1]
jvs[i+1,1]=jvs[i,OrdenP+1]
kY[i+1,1]=kY[i,OrdenP+1]
kv[i+1,1]=kv[i,OrdenP+1]
pB[i+1,1]=pB[i,OrdenP+1]
pv[i+1,1]=pv[i,OrdenP+1]
rf[i+1,1]=rf[i,OrdenP+1]

```

```

v[i+1,1]=v[i,OrdenP+1]
vprom[i+1,1]=vprom[i,OrdenP+1]
wD[i+1,1]=wD[i,OrdenP+1]

X[i+1,1]=X[i,OrdenP+1]
Ts[i+1,1]=Ts[i,OrdenP+1]
Y[i+1,1]=Y[i,OrdenP+1]
Tv[i+1,1]=Tv[i,OrdenP+1]
Msolido[i+1,1]=Msolido[i,OrdenP+1]

TsDeltaZ[i+1,1]=TsDeltaZ[i,OrdenP+1]
XDeltaZ[i+1,1]=XDeltaZ[i,OrdenP+1]
FsDeltaZ[i+1,1]=FsDeltaZ[i,OrdenP+1]
TvDeltaZ[i+1,1]=TvDeltaZ[i,OrdenP+1]
YDeltaZ[i+1,1]=YDeltaZ[i,OrdenP+1]

igDeltaZ[i+1,1]=igDeltaZ[i,OrdenP+1]
imDeltaZ[i+1,1]=imDeltaZ[i,OrdenP+1]
im[i+1,1]=im[i,OrdenP+1]
END EXPAND_BLOCK

TvDeltaZ[sec,OrdenP+1]=0
YDeltaZ[sec,OrdenP+1]=0
igDeltaZ[sec,OrdenP+1]=0

//Condiciones de Contorno
Tv[sec,OrdenP+1]=Tamb
Y[sec,OrdenP+1]=(Mw/Mair)*(Phiamb*Ps[sec,OrdenP+1]/(Pt[sec,OrdenP+1]-
Phiamb*Ps[sec,OrdenP+1]))

-- calcular las restricciones no lineales (expresiones c(x) <= 0)
F_optim[1] = J_costo
F_optim[2] = minabs(X[sec,OrdenP+1], Xmin)
F_optim[3] = maxabs(X[sec,OrdenP+1], Xmax)
F_optim[4] = minabs(Ts[sec,OrdenP+1], Tmin)
F_optim[5] = maxabs(Ts[sec,OrdenP+1], Tmax)

-- Asignación de valores del modelo
y_modelo[1] = X[sec,OrdenP+1]
y_modelo[2] = Ts[sec,OrdenP+1]
END COMPONENT

/*-----
LIBRARY: OPTIMIZACION
COMPONENT: OPT_SEC_COL_ORT
PARTITION: partition1
EXPERIMENT: EXP1_OPT_SEC_COLORT
TEMPLATE: TRANSIENT
CREATION DATE: 11/04/2017
-----*/

EXPERIMENT EXP1_OPT_SEC_COLORT ON OPT_SEC_COL_ORT.partition1
DECLS
OBJECTS
INIT
-- initial values for state variables

BOUNDS
-- Set equations for boundaries: boundVar = f(TIME;...)
coef1 = 1
coef2 = 1

```

```

BODY
    -- tab1=Fs tab2=Pwsat tab3=Tsin tab4=Xin Tab5=Xout tab6=Tout
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,2,tab1)//1
    //readTableCols1D ("Datos1.txt",1,3,tab1)//2
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,4,tab2)
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,5,tab3)
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,6,tab4)
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,7,tab5)//1
    //readTableCols1D ("Datos1.txt",1,8,tab5)//2
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,9,tab6)//1
    //readTableCols1D ("Datos1.txt",1,10,tab6)//2
-- creates an ASCII file with the results in table format
-- REPORT_TABLE("results.rpt", "**")

-- set the debug level (valid range [0,4])
DEBUG_LEVEL= 1
-- select default integration solver
IMETHOD= DASSL
-- Set flag to stop when bad numerical operation occurs (eg division by 0). By default do not stop.
setStopWhenBadOperation(FALSE)
-- set relative and absolute tolerance for DASSL solver (transient solver)
REL_ERROR = 1e-006
ABS_ERROR = 1e-006
-- set relative tolerance for algebraics solver (steady solver)
TOLERANCE = 1e-006
-- when to report results
REPORT_MODE = IS_CINT -- by default report at every CINT time or event detection

-- calculates a steady state
--STEADY()

-- calculates a transient integration
TIME = 0
TSTOP = 39600
CINT = 1
INTEG()
END EXPERIMENT

/*-----
LIBRARY: OPTIMIZACION
COMPONENT: OPT_SEC_COL_OR_T
PARTITION: partition1
EXPERIMENT: EXP2_OPT_SEC_COLORT
TEMPLATE: TRANSIENT
CREATION DATE: 12/04/2017
-----*/
FUNCTION INTEGER coste_y_restricciones(IN REAL esnopt_x[], IN INTEGER needF, OUT REAL esnopt_F[], IN
INTEGER explicit_derivatives, IN INTEGER needG, OUT REAL esnopt_G[])

BODY

    RESET_VARIABLES ()

        KX = esnopt_x[1]
        KS = esnopt_x[2]
        Ep = esnopt_x[3]
        Xcr = esnopt_x[4]

        pesos[1] = 1

```

```

        pesos[2] = 1

    SET_INIT_ACTIVE(TRUE)

    TIME = 0
    TSTOP = 39600
    CINT = 1

    INTEG()

    esnopt_F[1] = F_optim[1]
    esnopt_F[2] = F_optim[2]
    esnopt_F[3] = F_optim[3]
    esnopt_F[4] = F_optim[4]
    esnopt_F[5] = F_optim[5]

    RETURN 0
END FUNCTION

EXPERIMENT EXP2_OPT_SEC_COLORT ON OPT_SEC_COL_ORT.partition1
DECLS

        INTEGER n_dec_vars = 4
        INTEGER n_constraints = 4          -- numero restricciones
        INTEGER n_total                   -- (numero restricciones + una funcion objetivo)

        REAL param_estim[4]  -- variables de decision, size n_dec_var

        REAL xlow[4]         -- valor inferior de las variables de decision, size n_dec_var
        REAL xupp[4]         -- valor superior de las variables de decision, size n_dec_var

        REAL Flow[5]         -- valor inferior de la funcion objetivo y las restricciones, size n_total
        REAL Fupp[5]         -- valor superior de la funcion objetivo y las restricciones, size n_total
OBJECTS
INIT
    -- initial values for state variables

BOUNDS
    -- Set equations for boundaries: boundVar = f(TIME;...)
    coef1 = 1
    coef2 = 1

BODY
    -- tab1=Fs tab2=Pwsat tab3=Tsin tab4=Xin Tab5=Xout tab6=Tsout
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,2,tab1)//1
    //readTableCols1D ("Datos1.txt",1,3,tab1)//2
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,4,tab2)
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,5,tab3)
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,6,tab4)
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,7,tab5)//1
    //readTableCols1D ("Datos1.txt",1,8,tab5)//2
    readTableCols1D ("Datos1.txt",1,9,tab6)//1
    //readTableCols1D ("Datos1.txt",1,10,tab6)//2

    -- Inicializaciones
    /*REAL KX=6
    REAL KS=0.5
    REAL Ep=0.2
    REAL Xcr=0.25*/
    n_total = n_constraints + 1

```

```

-- Formar vector de variables de decisión
param_estim[1] = KX
param_estim[2] = KS
param_estim[3] = Ep
param_estim[4] = Xcr

-- Limites de las variables de decision
-- KX
xlow[1] = 2
xupp[1] = 8
-- KS
xlow[2] = 0.1
xupp[2] = 1
-- Ep
xlow[3] = 0.1
xupp[3] = 0.25
-- Xcr
xlow[4] = 0.15
xupp[4] = 0.3

Flow[1] = -1.0e6
Fupp[1] = 1.0e6
Flow[2] = LiminfXout
Fupp[2] = LimsupXout
Flow[3] = LiminfXout
Fupp[3] = LimsupXout
Flow[4] = LiminfTsout
Fupp[4] = LimsupTsout
Flow[5] = LiminfTsout
Fupp[5] = LimsupTsout

--Optimization extern routine call
setSilentMode(TRUE)
SET_REPORT_ACTIVE("#MONITOR",FALSE)

esnopt_init (n_dec_vars, n_constraints)

esnopt_set_variables_bounds_and_initial_values (xlow, xupp, param_estim)

esnopt_set_constraints_bounds_and_initial_values (Flow, Fupp, F_optim)

esnopt_set_cost_function_and_constraints (coste_y_restricciones)

esnopt_set_explicit_derivatives (0)

esnopt_set_function_precision (1.0e-5)

REL_ERROR = 1.0e-7

esnopt_set_iterations_limit (200)

esnopt ()

setSilentMode(FALSE)
SET_REPORT_ACTIVE("#MONITOR",TRUE)

RESET_VARIABLES ()

esnopt_get_variables_values(param_estim)

```

```

esnopt_free ()

KX= param_estim[1]
KS= param_estim[2]
Ep= param_estim[3]
Xcr= param_estim[4]

        SET_INIT_ACTIVE(TRUE)

WRITE("\nVariables de decisión:\n")
FOR (i IN 1,n_dec_vars)
    WRITE ("%ft", param_estim[i])
END FOR
WRITE ("\n\n")

-- set the debug level (valid range [0,4])
DEBUG_LEVEL= 1
-- detected a very sparse Jacobian matrix. It is recommended to use any sparse solver as IDAS_SPARSE,
DASSL_SPARSE or CVODE_BDF_SPARSE
IMETHOD= IDAS_SPARSE -- default is DASSL_SPARSE, recommended is IDAS_SPARSE
-- Settings for different actions. Valid actions are: SEV_DISABLE, SEV_NONE, SEV_WARNING, SEV_ERROR,
SEV_KILLPOINT, SEV_FATAL
eSetErrorAction(ERR_BAD_OPER,SEV_KILLPOINT) -- Detect bad numerical operations (eg division by zero),
default is SEV_NONE, recommended is SEV_KILLPOINT
eSetErrorAction(ERR_NAN_INF, SEV_KILLPOINT) -- Detect NaN or Inf values, default is SEV_NONE,
recommended is SEV_KILLPOINT
eSetConfig(CFG_FORCE_STOP_CINT,TRUE) -- Force or not to stop the solver each CINT. Sometimes you can
speed up the simulation if you select FALSE
-- set tolerances and other important inputs
REL_ERROR = 1e-06 -- transient solver relative tolerance
ABS_ERROR = 1e-06 -- transient solver absolute tolerance
TOLERANCE = 1e-06 -- steady solver relative tolerance
INIT_INTEG_STEP = -1 -- initial integration step size (-1 means use the solver estimation)
MAX_INTEG_STEP = -1 -- maximum integration step size (-1 means use the solver estimation)
NSTEPS = 1 -- Only for explicit solvers use CINT/NSTEPS as integration step size
REPORT_MODE = IS_EVENT -- by default it reports results at every CINT and event detection. Other valid options
are IS_STEP, IS_CINT and IS_MANUAL_REFRESH

-- simulate a transient in range[TIME,TSTOP] reporting every CINT
TIME = 0
TSTOP = 39600
CINT = 1
INTEG()

END EXPERIMENT

```