



# MODELACIÓN, SIMULACIÓN, CONTROL PID Y CONTROL PREDICTIVO DE UN SECADOR ROTA DISCO EN LA INDUSTRIA PESQUERA

César Augusto Vallejos Romaña

Piura, abril de 2013

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Vallejos, C. (2013). *Modelación, simulación, control PID y control predictivo de un secador rota disco en la industria pesquera*. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una <u>licencia</u> <u>Creative Commons Atribución-</u> <u>NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú</u>

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

# UNIVERSIDAD DE PIURA

## FACULTAD DE INGENIERÍA



"Modelación, simulación, control PID y control predictivo de un secador rota disco en la industria pesquera"

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico - Eléctrico

César Augusto Vallejos Romaña

Asesor: PhD. Dr. Ing. William Ipanaqué Alama

Coasesor: Dr. Ing. Rafael Saavedra Garcia Zabaleta

Piura, Abril 2013

A mis queridos padres Pedro Vallejos y María Romaña por su incansable apoyo.

A mis hermanos y a D'angela, persona muy especial en mi vida, gracias por sus palabras de aliento.

# Índice

Introducci	ónón	1
Capítulo 1	Secadores insdustriales	3
1.1.	El proceso de secado	
1.2.	Clasificación y tipos de secadores industriales	
1.2.1	Clasificación de secadores industriales	4
1.2.2	Tipos de secadores industriales	12
1.3.	Aplicación de secadores en la industria	14
1.3.1	r - 1	
1.3.2	Precnología en las industrias pesqueras	25
1.3.3		
1.3.4	Secadores infrarrojos destinados al secado de pinturas	28
	2 Secador rota disco en la industria pesquera	
2.1	Introducción	
2.2	Proceso de obtención de la harina de pescado	
2.2.1		
2.2.2	1 1	
2.3	El mercado de la harina de pescado	31
2.4	Equipos del proceso de la empresa IEPA (Import Export Pesca y	
	Agricultura)	
2.4.1		
2.4.2	- 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
2.5	Descripción del secador rota disco	
2.5.1	1	
2.5.2		
2.6	Otros secadores rotatorios	36
-	3 Modelo matemátuco de un secador rotatorio	
3.1	Introducción	
3.2	Objetivo del modelo de un secador rota disco	
3.3	Modelo matemático de un secador de disco rotatorio	
3.3.1		
3.3.2	<i>3</i>	
3.3.3	1	
3.3.4		
3.3.5	Planteamiento del modelo	43

3.3.6	Estudio de las pérdidas en el secador	47
3.3.7	Planteamiento del ahorro energético	50
Capítulo 4 I	Estado del comportamiento del proceso en el simulador	53
4.1	Introducción	
4.2	Descripción del programa para el secador rota disco	53
4.3	Comportamiento del proceso en el simulador	55
4.3.1	Simulaciones a lazo abierto del proceso de evaporación	55
4.3.2	Respuesta del modelo frente a variaciones de flujo de vapor	
4.3.3	Respuesta del modelo frente a una variación de concentración de entra <i>keke integral</i>	
4.3.4	Respuesta del modelo frente a cambio de flujo del <i>keke integral</i> a la en del secador	ntrada
4.4.1	Análisis referido a la ganancia.	
Capítulo 5 I	dentificación de procesos	73
5.1	Introducción	
5.1.1	Aplicación de la identificación de sistemas	
5.2	Métodos de identificación	
5.2.1	Métodos de identificación de modelos no paramétricos	
5.2.2	Métodos de identificación de modelos paramétricos. Métodos analítico	
5.3	Identificación del modelo	
5.3.1	Método de respuesta escalón	
5.3.2	Cálculo de la PRBS del modelo	
5.3.3	Identificación del modelo por el método OE	
5.3.4	Identificación del modelo por el método ARMAX	
5.3.5	Identificación del modelo por el método ARX	94
Capítulo 6 C	Controlador PID, diseño y sintonización	95
6.1	Generalidades	
6.2	Control PID.	95
6.3	Sintonización del PID	
6.3.1	Método de Ziegler-Nichols lazo abierto	97
6.3.2	Determinación de los parámetros del proceso con el método de respues escalón de Ziegler Nichols	sta
6.3.3	Método de Cohen-Coon.	
6.3.4	Métodos de la minimización de la integral del error	
6.3.5	Método del predictor de Smith	
6.4	Técnicas de control complementarias	
6.4.1	Objetivo del control	
6.4.2	Implementación del controlador PI y PID	
6.4.3	Control predictivo generalizado GPC	
6.4.2	Comparación entre los controladores GPC, PI, PI Predictor Smith, PI y	
0.7.2	Lopéz por el criterio de MITAE	
Conclusione	S	

## Resumen

Esta tesis presenta el modelo matemático de un secador rota disco basado en las ecuaciones de conservación de la masa y la energía aplicado a la industria pesquera, el cual se valida con datos reales de dos plantas ubicadas en el Norte del Perú. También se realizó un control predictivo lineal, el cual ha sido probado para disturbios en la humedad de entrada al secador y flujo de *keke* integral así como para un cambio de set point.

La tesis se desarrolla en seis capítulos. El primer capítulo presenta el estado del arte de los diferentes tipos de secadores que existen a nivel industrial y la clasificación del sistema de secado que utilizan, asimismo se mencionan las principales empresas pesqueras en el Perú que utilizan secadores rotatorios. El segundo capítulo presenta el proceso de la obtención de harina de pescado de la planta en estudio y también las especificaciones sobre el secador de disco rotatorio. El tercer capítulo presenta la investigación acerca de modelos matemáticos en secadores rotatorios directos, también se desarrolla el modelo matemático basado en las ecuaciones de balance de masa y energía del secador de disco rotatorio. El cuarto capítulo muestra el comportamiento del proceso de secado en el simulador. El quinto capítulo desarrolla el planteamiento del sistema basado en modelos lineales y el sexto capítulo plantea el control del modelo mediante dos métodos, un controlador PID con una estructura de predictor Smith para retardos grandes y un control predictivo lineal GPC.

Los resultados de esta tesis muestran que es posible controlar la humedad de salida actuando sobre la válvula de flujo de vapor, pero debido a que es un proceso largo, existen otras maneras de alcanzar los valores óptimos de humedad, uno de estos puede ser aumentando el tiempo de permanencia de la harina en el secador.

## Introducción

En la industria de productos alimenticios, el secador es uno de los componentes del proceso más relevantes, en algunos casos, puede presentar fuertes demandas de energía térmica. Por ello, la modelación de este tipo de procesos para su posterior control es muy importante. Fenómenos de transferencia de calor y masa gobiernan este proceso [5]. Hay diversos tipos de secadores, los rotativos son ampliamente utilizados y algunos de ellos han sido tratados en la literatura científica. Savaresi Sergio describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar [21]. Iguaz A. presenta un modelo aplicado a residuos vegetales [1], Helge Dridksen modela un secador rotatorio aplicando un control basado en modelos no lineales [9]. En la literatura científica también se pueden encontrar otros tipos de secadores como los solares. En el caso de los secadores tipo rota disco hay escasas publicaciones relacionadas con su aplicación orientada al proceso de obtención de harina de pescado. Esta tesis, se orienta al modelo dinámico de un secador de tipo rota disco y al control de la humedad de la harina de pescado con una metodología de control predictivo lineal y un PID con estructura de control predictor Smith. Los resultados del modelo del secador se comparan con datos experimentales de dos plantas, ubicadas en la zona norte del Perú, las cuales utilizan este tipo de secador.

El proceso de harina de pescado consta de una cocina donde entra la materia prima procedente del mar, luego sigue el proceso de prensa, cuyo producto de salida se conoce como *keke de prensa*. Éste es mezclado con el jugo concentrado procedente de la planta de agua de cola, la mezcla se conoce como *keke integral*, el cual entra al secador y sale la harina. Aquí se presenta el modelo y control no lineal de un secador rota disco, cuyo principal funcionamiento se basa en la transferencia de calor por conducción, también son conocidos como secadores indirectos. El secador rota disco tiene dos funciones principales: calentar y transportar el sólido. El tiempo de residencia del sólido a lo largo del secador depende de varios mecanismos propios del secador [7].

El secador rotatorio directo funciona bajo el principio de convección. Este tipo de secador ha sido utilizado en la industria pesquera durante años porque su transferencia de calor y masa son muy eficientes. Sin embargo, la exposición del producto a los gases de combustión a temperaturas superiores a los 800 °C induce una serie de reacciones y deterioros que afectan a la calidad final de la harina [7]. Existen distintos trabajos relacionados al modelo matemático de secadores rotatorios por convección cuyo comportamiento es distinto por el contacto que existe entre los gases de combustión y la harina. El objetivo de esta tesis es desarrollar los balances de energía y masa de un secador rota disco el cual pertenece a la familia de secadores indirectos, comparando su dinámica con valores reales de industrias pesqueras y posteriormente, realizar el control del mismo.

A diferencia del secador directo, el secador rota disco indirecto mejora la calidad del producto final, evitando contaminar y quemar la harina con las cenizas contenidas en los gases de combustión. Cabe mencionar que existe muy poca bibliografía referente a este tipo de secadores rota discos, pero las ecuaciones de balance de masa y energía de los evaporadores cumplen para este análisis.

## Capítulo 1

## **Secadores industriales**

## 1.1. El proceso de secado

En muchos procesos industriales, el secado es, habitualmente, la etapa final de una serie de operaciones, el cual se puede definir como un proceso de transferencia de calor y masa entre un sólido húmedo y el medio calorífico utilizado para secarlo. Debido a la gran variedad de materiales que se secan y los diferentes equipos comerciales que se utilizan, no existe una sola teoría para el secado que comprenda todos los materiales y secadores.

Existen dos fenómenos que ocurren en el momento de la desecación de un sólido, estos son:

- Transferencia de calor de los alrededores hacia la superficie para evaporar la humedad.
- Transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido.

## 1.2. Clasificación y tipos de secadores industriales

Existe una amplia variedad de secadores construidos con la finalidad de realizar un proceso de secado eficiente. Para llevar a cabo una clasificación adecuada es necesario primero definir los requerimientos térmicos, sin perjudicar la calidad del producto.

#### Mecanismos de transferencia de calor en los secadores

- Por convección: este método, por lo general, utiliza aire caliente como medio calorífico, el cual se encuentra en contacto directo con el sólido, también se conoce cómo método directo.
- Por conducción: el calor se transmite indirectamente. Solo existe contacto entre el sólido húmedo y una superficie caliente, también se conoce como el método indirecto.
- Por radiación: el calor se propaga en forma de ondas electromagnéticas a través del vacío o de un medio material.

De acuerdo a los métodos presentados y a los requerimientos exigidos por la industria, se debe elegir el secador más adecuado para el proceso. A continuación se presenta una clasificación de los principales secadores industriales.

#### 1.2.1 Clasificación de secadores industriales

## 1.2.1.1 Según el mecanismo de transmisión de calor a los sólidos húmedos

**Secadores directos.-** En este tipo de secadores predomina la transferencia de calor por convección, el sólido húmedo se encuentra en constante contacto con el aire caliente o gases calientes dependiendo del tipo de secador que se esté utilizando. Sus aplicaciones son principalmente para sólidos que necesitan altas temperaturas.

Estos secadores tienen las siguientes características generales de operación:

- El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos, se aprovecha para calentarlos y separar el vapor.
- Tienen como limitante la temperatura de 1000 K, porque es la que puede soportar casi todos los materiales estructurales.
- La eficiencia del equipo es directamente proporcional al flujo másico del gas de entrada. Por lo tanto, si se mantiene una misma temperatura y aumenta el flujo másico de gas, la eficiencia será mayor.
- Las cantidades de gas necesarios para proporcionar el calor de desecación dependen de la temperatura de entrada del gas, la temperatura de desecación y la cantidad de materia a tratar.

Secadores indirectos.- El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención o chaqueta caliente, ya no existe contacto entre el sólido y el gas, mientras mayor sea el área de contacto entre el sólido húmedo y las paredes del secador, la velocidad de secado aumentará, por lo tanto, es importante que el área de transferencia sea la máxima posible. Los secadores indirectos rotativos son los más utilizados para productos con tamaños de partículas pequeñas, también se utilizan para procesos que requieren un control extremo de la salida. Estos secadores dependen de la transferencia de calor por conducción y radiación. Una de las desventajas es la dificultad de secar materiales que tienden a pegarse en las paredes calientes del cilindro.

Estos secadores tienen como características generales de operación las siguientes:

- La temperatura de superficie puede variar desde niveles inferiores de congelación hasta mayores que 800K, como es el caso de secadores calentados por productos de combustión.

- Estos secadores son apropiados para desecar a presiones reducidas y en atmósferas inertes, para poder recuperar los disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas y la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.
- En cuestión de economía, desde el punto de vista del calor, se prefiere utilizar secadores indirectos con fluido de condensación como medio de calentamiento.
- La recuperación de polvos y material finamente pulverizados es mejor en los secadores indirectos.

**Secadores diversos.-** Dentro de este grupo de secadores se tiene:

## a) Secadores dieléctricos

Estos secadores operan bajo el principio de calor dentro de los sólidos, colocándolos dentro de un campo eléctrico de alta frecuencia.

El secado dieléctrico puede ser efectuado a todas las frecuencias electromagnéticas superiores o iguales al espectro de infrarrojos, este calentamiento dieléctrico se realiza a frecuencias que van de 1 a 100 Hz a diferencia del calentamiento infrarrojo que va desde 300 Mhz hasta 300 Ghz, siendo sus principios básicos los mismos pero equipos distintos.

Se debe tener en cuenta que tanto micro ondas como infrarrojos no son formas de calor sino son energías que se manifiestan como calor, calentando al material mismo, siendo diferente al calentamiento por métodos convencionales, ya que estos dependen de la lentitud del calentamiento que va desde la superficie del material hacia el interior a diferencia del calentamiento con microondas y dieléctrico que es un calentamiento global debido a la interacción del campo electromagnético con el material.

Los parámetros que rigen el calentamiento viene a ser la masa del material, la geometría, eficiencia acoplada, propiedades dieléctricas y mecanismos de pérdidas de calor, todo esto lleva a la conclusión que dependen de las potencias aplicada y absorbida por el material.

El secado por este método presenta una serie de ventajas, empezando por su rapidez de secado en el proceso, tiene un calentamiento bastante uniforme, no es necesario invertir en energía porque no se tiene que calentar ni el aire o paredes de horno, su control es más eficaz y sencillo pues basta con controlar la potencia del generador dando un exacto control de calentamiento, mejora la calidad de los productos ya que no se generan elevadas temperaturas en la superfície y a diferencia de los métodos convencionales no se generan encostramientos ni sobrecalentamientos.

Se diferencia de los secadores ordinarios, porque en estos la humedad se evapora rápidamente en la superficie pero el agua sigue difundiéndose hacia el exterior, siendo el gradiente de temperatura un factor importante. Para la transferencia de masa viene a ser el gradiente de concentración de masa entre el interior y la superficie.

Por otro lado, el secado por microondas o dieléctrico es diferente porque la transferencia de masa se da gracias a un gradiente de presión que produce una generación de vapor dentro del material, mientras mayor sea la humedad del sólido mayor será el gradiente de presión forzando el líquido a salir hacia la superficie, frecuentemente como

vapor, hay ciertas condiciones que se debe tener en cuenta, saber que este tipo de secadores pueden calentar muy rápido, pero un calentamiento excesivamente rápido sería perjudicial para el sólido.

## b) Secadores solares

Estos operan con energía solar, existen diversos tipos de secadores solares para las diferentes condiciones de secado que se necesiten, los más importantes son:

- Cabina del tipo convección natural
- Tipo indirecto de convección forzada
- Secador solar con colector tipo casa

Estos tres secadores utilizan el efecto invernadero de manera intensa, la desecación del material se realiza a través de un paso continuo del aire caliente sobre el material produciéndose un intercambio de calor, en el cual la humedad del material es absorbida por el aire. Con la ayuda de un ventilador centrífugo en el caso de los de convección forzada hará que a medida que la humedad relativa del sólido disminuya la humedad del aire aumente, siendo necesario renovar el aire circulado para que el proceso continúe, estableciendo así el gradiente entre ambas temperaturas. Para saber cuándo renovar el aire, el secador presenta un dispositivo que controla la humedad, de acuerdo a los parámetros de calidad establecidos. Este sensor controla el arranque de los ventiladores centrífugos, tanto de extracción e invección. El secado quedará completo cuando la humedad alcance las condiciones preestablecidas según las exigencias comerciales de su uso. Es importante recordar que para este tipo de secadores existen condiciones iniciales que se deben tener en cuenta, como son la humedad inicial del producto, la distancia entre ellos al momento de ser colocados, las características físicas propias del producto, también condiciones externas que son, el estado climático, las horas que dura el día y la noche, la latitud del lugar de emplazamiento ya que esto define el ángulo de incidencia del sol. Las figuras 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4 muestran los tipos de secadores clásicos mencionados anteriormente.

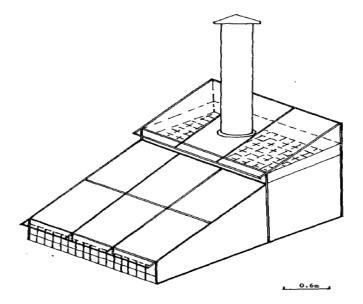


Fig. 1.1 Prototipo de secador solar con colector tipo casa [15]

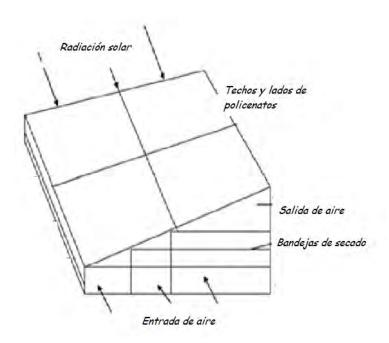


Fig. 1.2 Secador de cabina por convección natural [15]

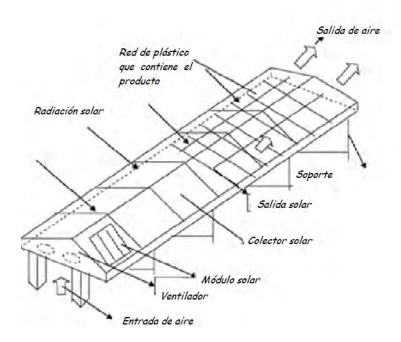


Fig. 1.3 Secador solar tipo túnel [15]

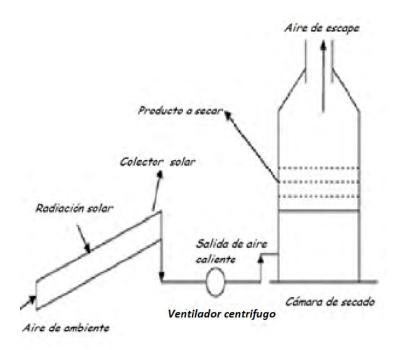


Fig. 1.4 Secador solar de convección forzada [15]

Junto a estos modelos básicos existen otros que presentan mejoras tecnológicas en cuanto al diseño y control:

## I. El secador de cabina de placa plana invertida

La placa de absorción (A) es horizontal y está colocada mirando hacia abajo. En la parte inferior se coloca un reflector cilíndrico (B) con la finalidad de introducir radiación solar desde abajo, el área de la abertura es la misma que la de la placa de absorción. La cabina de secado (C) es montada encima de la placa de absorción (A) para mantener un espacio y permitir que el aire caliente fluya y entre al secador desde el fondo calentando los cultivos. El aire húmedo sale por el respiradero (I) por efecto de la presión de vapor entre el interior de la cabina y el exterior utilizando el secador en modo natural de operación. En la figura 1.5 se muestra el esquema de un secador de cabina de placa plana invertida.

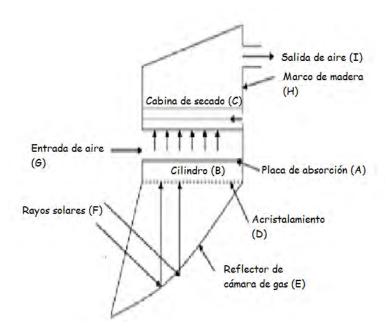


Fig. 1.5 Secador de cabina de placa plana invertida [15]

## II. Secador portátil de múltiples plataformas

Este secador tiene tres partes importantes que son, el rack de múltiples bandejas (E), bandejas perforadas (B), vidrios movibles, como se puede observar en la figura 1.6.

El aire del ambiente entra desde (A) y se mueve hacia arriba del material cargado en diferentes bandejas (B) pasando a través de estas y sale por la parte superior, el rack de múltiples bandejas es inclinado dependiendo de la latitud del lugar para la mejor captación de la radiación solar y cuatro capas negras de HPD (*High density polymer*) son envueltas alrededor del rack múltiple haciendo que las pérdidas en el aire ambiente se reduzcan tanto en los lados como la parte posterior.

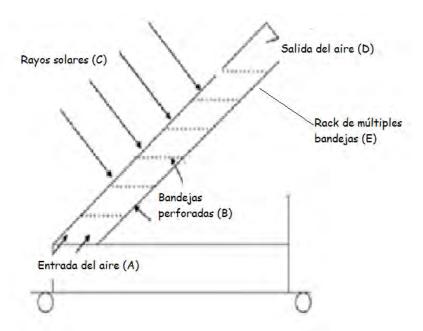


Fig. 1.6 Secador de múltiples bandejas [15]

## III. Secador de tipo escalera

Como su nombre lo dice es un secador desarrollado en forma de escalera con base de metal y en los lados tiene una doble pared de metal galvanizado con una cavidad llena de aislamiento térmico no degradable.

La figura 1.7 muestra que el producto a secar es colocado en (B) y a través de la capa de policarbonato (C) permite que los rayos del sol pasen a través de este y queden atrapados, el policarbonato acristalado de la superficie superior está divido en tres partes iguales que pueden estar abiertos para dar acceso a los tres compartimientos dentro del secador.

La base del secador tiene cuatro entradas de acceso (A) y la partición de las paredes también tiene cuatro agujeros para la entrada del flujo de aire moviéndose por convección natural desde el fondo hasta la parte superior del secador.

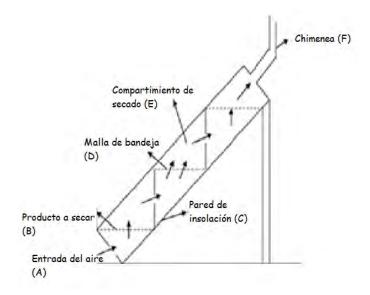


Fig. 1.7 Secador tipo escalera [15]

#### IV. Secador de columna cilíndrica rotativa

El secador de columna cilíndrica rotativa contiene tres partes importantes que son: la región de aire de soplado que es el ventilador ubicado en (A), la región del calentador de aire que es el colector solar (C) y la región de secado (D). Su principio de funcionamiento es el siguiente:

Un ventilador de velocidad variable es conectado al colector solar utilizando una tela especial. El secador de la figura 1.8 es fabricado con planchas de madera (B) que van desde la parte superior hasta la inferior y con planchas más delgadas en los costados para poder darle la forma de un cilindro, una ranura rectangular que se abre sobre la pared lateral del secador donde se encuentra el calentador solar para el paso del aire caliente a través de la tela, del otro lado de esta ranura se encuentra una puerta por donde se cargará y descargarán los productos a secar, este secador rotará con la ayuda de un motor de DC y un sistema de correas y poleas. En la figura 1.8 se muestra un esquema de un secador de columna rotativa.

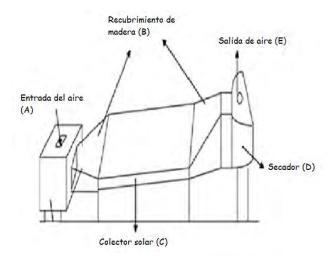


Fig. 1.8 Secador de columna rotativa [15]

## 1.2.1.2 Por las características del manejo y las propiedades físicas del sólido húmedo

- **Secadores discontinuos por lotes.** están diseñados para operar con un tamaño específico de lote. En este tipo de secadores los valores de humedad varían continuamente en cualquier punto del equipo.
- **Secadores continuos.** en este tipo de secadores el sólido a secar se coloca en fajas transportadoras o algún mecanismo que permita que el secado del sólido sea de forma continua, teniendo la opción de utilizarlo por lotes o en forma intermitente.

## 1.2.2 Tipos de secadores industriales

## 1.2.2.1 Secadores discontinuos por lotes

En este rubro se tienen los siguientes tipos:

- Secadores por conducción o indirectos: están diseñados para trabajar con aire calentado por vapor o también con agua para las operaciones a temperaturas bajas. La transferencia de calor es por radiación y conducción desde las paredes metálicas del secador. Aquí se tienen los de vacío, atmosférico, bandeja, sartén agitado, doble cono, rotatorio.
- Secadores por convección o directos: están diseñados para trabajar con transferencia de calor por contacto entre los sólidos húmedos y gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación, es decir con los gases calientes. Dentro de este grupo se tienen secadores bandeja y lecho fluidizado.

A continuación se menciona el secador típico en esta clasificación:

## Secadores de bandeja

El material se coloca en bandejas (D) que pueden o no montarse en carretillas removibles, el aire sopla sobre el material contenido. Son llamados también secadores de gabinete, anaqueles o de compartimientos, el material ingresado puede ser un sólido en forma de una pasta o terrones y se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad. El ventilador (C) es utilizado para recircular el aire calentado con vapor o resistencia (B) paralelamente a la superficie, después del secado se abre el gabinete y las bandejas se remplazan con otras con más material para secado, ahora se utilizan bandejas con carretillas para la mejor movilización puesto que pueden cargarse y descargarse fuera del secador. En la figura 1.9 se muestra un esquema de un secador discontinuo directo del tipo bandeja.

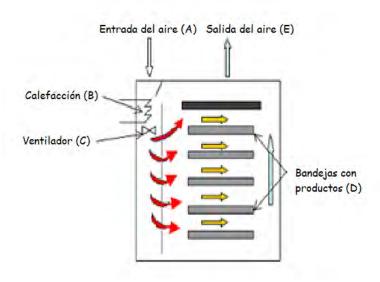


Fig. 1.9 Secador de bandeja [15]

### 1.2.2.2 Secadores continuos

En este rubro se tienen los siguientes tipos:

- **Secadores por radiación**: están diseñados para operar en forma continua con un tamaño específico de lote, en este tipo de secadores las condiciones de contenido y humedad varían continuamente en cualquier punto del equipo. Aquí se tienen los de tipo infrarrojo.
- Secadores por convección o directos: están diseñados para una operación continua siempre y cuando se suministre una alimentación húmeda continua. Dentro de este grupo se tienen los de bandeja, rotatorio, túneles de bandeja, lecho fluidizado, neumático, spray, bandeja rotatoria, bandeja de transporte, de pulverización.

- Secadores por conducción o indirectos: están diseñados para una operación continua, donde no exista contacto entre el aire caliente y el sólido húmedo. Los más conocidos son los secadores rotatorios dentro de este grupo están los secadores de disco rotatorio y secadores por tubos.

## 1.3. Aplicación de secadores en la industria

A continuación se mencionan los secadores típicos en esta clasificación:

### Secadores de transportador mecánico

La desecación se realiza a menudo en combinación con la trituración del material, este se transporta dentro de gases a altas temperaturas y velocidades elevadas hasta llegar a un colector de ciclón.

#### Secadores continuos de túnel

Secador formado por un túnel, por el cual se pasan bandejas o carretillas con el material a secar, generalmente, se hace fluir aire a contracorriente, típico en la industria alimenticia, el tiempo de estadía del sólido en el secador puede variar en un rango muy amplio, lo cual lo diferencia de un secador por bandejas ya que el área de contacto no es tan importante. Por lo general es utilizado para el secado de materiales grandes.

#### Secadores flash

Como su nombre lo dice son secadores donde el tiempo de contacto entre el sólido y el gas caliente es muy rápido, de unos 3 a 4 segundos, la temperatura del gas es elevada, con frecuencia se encuentra en el orden de 650 °C a la entrada, pero como el tiempo de contacto es corto, por lo general, el sólido solo alcanza una temperatura de 50 °C durante el secado. Este secador se aplica a materiales sensibles que en otro tipo de secadores tendrían que secarse indirectamente con un medio de calefacción mucho más frio.

### Secado por fluidización

El secado por este tipo consiste en eliminar la humedad de un sólido mediante el paso de gas o líquido a través de un lecho donde se encuentra depositado el sólido, en esta técnica es importante la velocidad del fluido ya que los sólidos deben "flotar" sobre él. Por lo general, es aplicada en numerosos procesos físicos, metalúrgicos y químicos, teniendo como principal variable a controlar la temperatura del lecho, es preciso llevar un control de la temperatura pues esta debe ser constante durante todo el secado, esta es establecida por el operador, por lo tanto, es necesario realizar un control que permita neutralizar las perturbaciones en la temperatura. En la figura 1.10 se muestra un esquema de un secador continuo directo del tipo de lecho fluidizado [22].

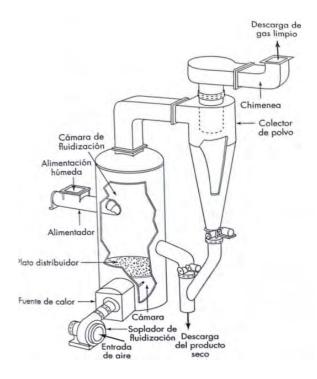


Fig. 1.10 Secador de lecho fluidizado [22]

## Secadores de película delgada

Estos secadores son capaces de admitir una alimentación líquida o en suspensión para dar lugar a un producto sólido seco que fluye libremente. En este actúan dos secciones, una que es un secador — evaporador con agitado vertical, en esta sección la mayor parte del líquido es separado de la alimentación y el sólido parcialmente húmedo se descarga en la segunda sección, donde el contenido residual del líquido del material procedente de la primera sección se reduce hasta el valor deseado.

Una de sus ventajas es que su eficiencia térmica es elevada, teniendo una escasa pérdida de sólidos ya que muy poco o nada de gas se retira de la unidad, siendo útiles para recuperar y separar solventes de productos sólidos, aunque presentan una desventaja en cuanto el costo y su limitada área de transferencia. La velocidad de alimentación es aceptable y se encuentra entre 100 y 200 kg/m².h. En la figura 1.11. Se muestra un esquema de un secador continuo directo del tipo de película delgada [1].

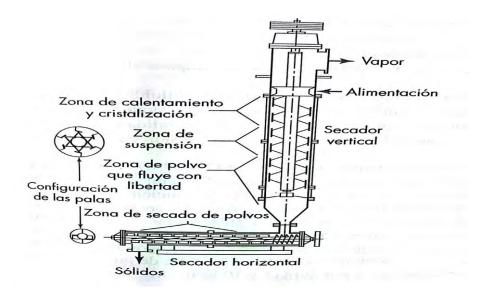


Fig. 11 Secador de película delgada [22]

#### Secadores rotativos

Uno de los equipos industriales más utilizados en el proceso de secado es el secador rotatorio, este consiste en una carcasa cilíndrica que gira horizontalmente y está ligeramente inclinada hacia la salida. En su interior tiene unas pestañas que levantan los sólidos para luego dejarlos caer en forma de lluvia a través del interior de la carcasa. La alimentación húmeda entra por un extremo del cilindro y el producto seco descarga por el otro.

Los secadores rotatorios se calientan por contacto directo entre el sólido y el gas caliente que pasa a través de un encamisado externo, o por medio de vapor de agua que condensa en un conjunto de tubos instalados sobre la superficie interior de la carcasa o también por unos discos que se encuentran a lo largo de todo el secador. Estos dos tipos de secadores son conocidos como secadores rotatorios indirectos, más adelante se detallarán.

En la figura 1.12 se presenta un típico secador rotatorio adiabático que opera con aire caliente en contracorriente. Una carcasa rotatoria A con chapa de acero, está soportada sobre dos conjuntos de rodillos B y accionada por medio de un engranaje y un piñón C. En el extremo superior hay una campana D, que a través del ventilador E conecta con una chimenea y una conducción E que introduce el material húmedo desde la tolva de alimentación. Las pestañas E0, que elevan el material que se seca y le dejan caer después a través de la corriente de aire caliente, están soldadas sobre la superficie interior de la carcasa E1.

En la parte derecha hay un conjunto de tubos con aletas calentados con vapor para pre calentar el aire, el cual circula a través del secador mediante un ventilador

Opcionalmente, el ventilador puede estar situado en la descarga, con lo cual aspira el aire a través del secador y mantiene el sistema con un ligero vacío. Esto resulta útil cuando el material tiende a formar polvos [5].

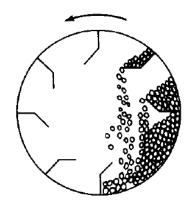


Fig. 12.a Secador rotatorio [22]

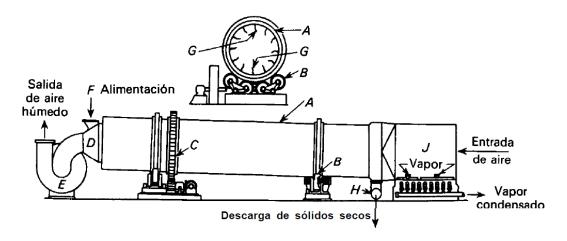


Fig. 12.b Secador rotatorio calentado con aire en contracorriente [22]

Debido a la pendiente del secador, el material rueda sobre sí mismo mientras está en la parte inferior del cilindro, pasando entre o sobre las paletas. Este efecto crece conforme aumenta la cantidad de material retenido en el secador o al aumentar el número de paletas.

En secadores de pequeñas dimensiones, existe el rebote hacia delante de las partículas contra las paredes del secador, existe una cantidad de acumulación de material sin flujo de aire en el secador esto quiere decir que independientemente de la alimentación de material, velocidad de rotación, pendiente y diámetro del secador, el efecto de añadir flujo de aire varia la retención en una cantidad constante.

El efecto total de aumentar el caudal de aire puede considerarse como la suma de dos efectos simultáneos: un aumento o disminución de la retención de material; el aumento de los coeficientes de transferencia entre las partículas del material y las paredes del secador que incrementa el coeficiente global.

El aumento de la velocidad de rotación no parece afectar apreciablemente el coeficiente de transferencia, para caudal de aire y material constantes, porque el cambio en rotación cambia la frecuencia con que las paletas arrojan el material, sin embargo el efecto

en la acumulación es contrario. La suma de estos dos efectos opuestos, hace que la cantidad de material que atraviesa la corriente de aire permanezca constante [22].

## Secadores de tornillo transportador

Este secador pertenece al grupo de secadores continuos de calentamiento directo, este consiste en un transportador horizontal de tornillo que se encuentra dentro de una carcasa cilíndrica encamisada, al igual que un secador rotativo la entrada de los sólidos es por uno de los extremos del secador y la salida por el otro, circulando muy lento a través de la zona calentada, se expulsa el aire caliente por unas tuberías ubicadas en la parte superior de la carcasa. La carcasa tiene un diámetro de 750 a 600 mm y una longitud hasta 6 metros, si se necesita una longitud mayor es posible colocar uno encima de otro formando una bancada, donde la parte inferior se encuentra a menor temperatura dado que el sólido antes de su descarga es enfriado por tuberías de agua u otro refrigerante.

Muy parecido al secador rotativo con una velocidad de giro de 2 a 30 rpm, sus coeficientes de transferencia de calor están basados en la superficie interior de la carcasa. Por lo general, esta carcasa está llena entre un 10 a 60 % de su capacidad.

Era de esperarse que en este equipo el coeficiente de transferencia de calor también dependa de la carga y la velocidad, este coeficiente está comprendido entre 15 a 60 W/m<sup>2</sup> °C.

A diferencia del secador rotatorio estos son capaces de tratar con sólidos demasiado finos y también demasiado espesos.

## Secadores por conducción o indirectos

Están diseñados para trabajar en forma continua con aire calentado con vapor o también con agua para las operaciones a temperaturas bajas. La transferencia de calor de estos equipos es por radiación y conducción, predominando este último, desde las paredes metálicas del secador hacia el sólido húmedo. Aquí se tienen los de vacío, atmosférico, bandeja, película de tambor, doble cono, rota disco y rota tubo.

Dentro de este grupo de secadores, el más utilizado en la industria de la harina de pescado es el secador rota disco, secador rota tubos, por lo que a continuación se detalla su funcionamiento.

### Secadores rota disco

De similares especificaciones externas que el secador rotatorio pero con principio de funcionamiento diferente, el calentamiento del producto se realiza a través de las paredes del secador y con los discos que contiene a los largo del rotor, ya no existe contacto entre los gases calientes y el producto, este tipo de secadores son utilizados en la industria pesquera y a diferencia del secador rotatorio directo mejoran la calidad final del producto, no quemando ni contaminando con los gases de combustión producidos en el quemador de

un secador rotatorio directo. En la figura 1.13 se muestra una vista asimétrica de un secador rota disco.



Fig. 1.13 Secador rota disco [22].

#### Secador rota tubo

También pertenece a la familia de los secadores indirectos, el calentamiento se realiza a través de los tubos dentro de los cuales ingresará el vapor sobrecalentado, son utilizados en la industria pesquera por su gran área de transferencia de calor, reduciendo de esta manera el tiempo de residencia de la harina dentro de este [7]. En la figura 1.14 se muestra un esquema de un secador rota tubo.

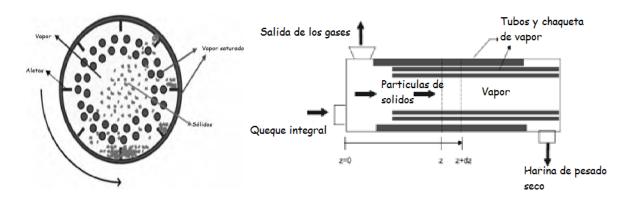


Fig. 1.14 Secador rota tubo [7].

## 1.3.1. Secadores en la industria pesquera

A nivel industrial se han diseñados distintos tipos de secadores, siempre atendiendo a las características y propiedades físicas del material húmedo a tratar, entonces de acuerdo a esto se hace una breve descripción de qué tipos de secadores corresponden para los distintos materiales.

- En el caso de secadores rotativos, son el tipo de secadores más complejos, debido a su diseño, construcción y control. Estos son utilizados con frecuencia en la industria pesquera, pero también se utiliza para el secado del orujo, arena, piedra, minerales y abono.
- En el caso de los secadores a vacío son utilizados para productos fibrosos, pulverulentos, lodos.
- Para secadores de lecho fluidizado son principalmente para material granulado.
- Lo secadores solares, que hoy en día están siendo muy conocidos por su economía son utilizados, generalmente, para frutas y verduras.
- Secadores de baja temperatura, aquí se tienen para productos cárnicos, tabaco, etc.

Tal como se indicó anteriormente el secador más utilizado en la industria pesquera es el secador rotativo, rota disco y rota tubo contando su aplicación en muchas plantas pesqueras a nivel nacional, a continuación se detallan las más importantes:

#### a) Planta Austral

Al 2012 la empresa internacional Austral cuenta con 6 plantas de producción de harina y aceite de pescado, con 2 plantas de producción de conservas y con 2 plantas de congelados.

Esta planta tiene el sistema de secado de dos fases Austral Group que incorpora bajas temperaturas, siendo la primera fase de secado un secador a vapor rota tubo a baja presión, la segunda fase usa el sistema de secado por aire caliente Geka Termal Oil obteniendo un producto final con una humedad del 7% manteniendo la temperatura de salida de la harina a 75°C, el sistema de secado de dos fases proporciona una harina de pescado con la mejor calidad de proteína, la digestibilidad más alta y la densidad específica más alta. En la figura 1.15, se muestra la ubicación geográfica de las plantas de la empresa Austral en el mapa de Perú.



Fig. 1.15 Ubicación geográfica de las plantas de la empresa Austral

- Planta de Paita: con una capacidad instalada de 84 TM/h, de harina de pescado, secado directo.
- Planta de Coishco: con una capacidad instalada de 80TM/h de harina de pescado, secado directo.
- Planta de Huarmey: con una capacidad instalada de 113TM/h de harina de pescado, secado directo.
- Planta de Chancay: con una capacidad instalada de 100TM/h de harina de pescado, secado al vapor o indirecto.
- Planta de Pisco: con una capacidad instalada de 120TM/h de harina de pescado, secado al vapor o indirecto.

• Planta de Ilo: con una capacidad instalada de 100 TM/h de harina de pescado, secado al vapor o indirecto.

Todas estas plantas utilizan la anchoveta como materia prima. En cuanto al secado, utilizan el secado indirecto según lo expuesto. La materia prima tiene las siguientes características:

Composición			Super	Prime	Agua	Estándar
			prime			
Proteína	%	Min	68-70	67-70	66-68	64-68
Grasas	%	Max	10	10	10	10
Humedad	%	Max	10	10	10	10
FFA	%	Max	7.5	10	10	-
Ash	%	Max	16	17	20	-
Sales y arena	%	Max	4	4.5	5	5
TVN	Mg/100gr	Max	100	120	150	200
Histamina	Ppm	Max	500	1000	-	-
Digestibilidad	%	Min	94	94	90	-
Antioxidante	Ppm	Min	150	150	150	-

Tabla N°1. Composición de la materia prima

## b) Planta pesquera el Diamante

La empresa Diamante S.A, es una de las más grandes en el Perú, abasteciendo de harina y aceite de pescado a todo el mundo cumpliendo con los más altos niveles de estándar exigidos en el mercado. Esta empresa cuenta con las siguientes plantas a nivel nacional:

- Planta Mollendo: ubicada en la ciudad de Mollendo a 800 km al sur de Lima, esta planta tiene una capacidad de 50 TM/h, cuenta con dos secadores de gases calientes rota tubo, de marca EnerCom. Con una capacidad de almacenaje de 1250 TM.
- Planta de Supe: ubicada en el puerto de Supe, a 200 km del norte de Lima, esta planta tiene una capacidad de 80 TM/h, contando con seis secadores a vapor, 2 rota disco y 4 rota tubos con una capacidad de almacenaje de 1480 TM.
- Planta de Chancay: ubicada en el distrito de Chancay al norte de Lima, cuenta con una capacidad de 88 TM/h, utilizando un sistema de secado FAQ.
- Planta Callao: ubicada en la provincia Constitucional el Callao, cuenta con una capacidad de 114 TM/h, se utilizan dos líneas de secado, FAQ, con dos secadores calientes EnerCom en dos fases y vapor, con tres secadores rota disco en primera fase y dos secadores rota tubo en segunda fase.
- Pisco planta norte: ubicada en la ciudad de Pisco a 250 km del sur de Lima, contando con una capacidad de 78 TM/h de harina de pescado, esta planta para su proceso de

secado utiliza 4 secadores rota disco y un secador de gases calientes, tiene una capacidad de almacenaje de 1800 TM.

## c) Planta pesquera Copeinca

Esta empresa también cuenta con plantas a nivel nacional mencionadas a continuación:

- Planta con sede en Bayóvar: ubicada en la ciudad de Piura, Bayóvar, con una capacidad de procesamiento de 170 TM/h con diferente método de secado, 50 TM para harinas especiales sistema de secado a vapor y 120 TM con sistema de secado directo.
- Plante sede en Chicama: cuenta con una capacidad de 259 TM/h de materia prima, al igual que en Bayóvar se divide en dos tipos de secado, 80 TM con el sistema secado a vapor y 179 con el sistema de secado a fuego directo.
- Planta sede en Chimbote: con una capacidad de procesamiento de 407 TM/h de materia prima donde 185 TM son secadas a vapor y 222 TM son secadas a fuego directo.
- Planta de Chancay: con una capacidad de 80 TM/h este utiliza un sistema de secado indirecto de dos etapas.

## d) Planta Hayduk

Hayduk corporación, una de las compañías líderes del sector pesquero en el Perú, dedicada a la producción y comercialización de conservas, congelados, harina y aceite de pescado. Actualmente, Hayduk cuenta con 9 plantas de procesamiento ubicadas a lo largo del litoral nacional y 42 embarcaciones propias. Cada una de las plantas desarrolla sus actividades siguiendo estrictas normas de protección al medio ambiente, utilizan secadores rota disco y secadores rota tubos, este tipo de equipos evita la contaminación medioambiental. En la figura 1.16 se muestra la ubicación geográfica de las plantas de la empresa Hayduk.



Fig. 1.16 Ubicación geográfica de las plantas

## 1.3.1.1 Resumen de plantas pesqueras en el norte del Perú

Se debe destacar que dentro de nuestro departamento de Piura, en la ciudad de Paita, se tiene diversas plantas productoras de harina de pescado, la mayoría son de capacidad que varía entre las 5 a 20 toneladas, también existen plantas que están por encima de las 80 TM/h, la preparación de harina de pescado es altamente rentable debido que los cuidados de la materia prima son bajos siendo su principal consumidor, los animales. Existe una alta demanda en el extranjero la cual hace posible este negocio en nuestro país y sobretodo en la zona norte.

A continuación se presenta una lista de todas las plantas en Paita, clasificadas por zonas:

Tabla N° 2 Resumen de plantas de harina de pescado en Paita

PLANTAS DE HARINA UBICADAS EN PAITA							
ITEM	EMPRESA	UBICACIÓN	DETALLE DE UBICACIÓN	ACTIVIDAD TIPO DE PRODUCTO	CAPACIDAD DE PLANTA	COMENTARIOS	
1	CONSORCIO PACIFICO SUR S.R.L.	ZONA INDUSTRIAL PAITA	Mz. A Lote 5 - Zona Industrial	Harina residual	5 t/h	Procesan congelado	
2	DISTRIBUIDORES		Mz. A Lote 7 Y 8. Zona Industrial II	Harina residual	3 t/h		
3	DEXIM S.R.L.		Zona Industrial II Carretera Paita - Sullana	Harina residual	3 t/h	Procesan congelado	
4	NEPTUNE OCEAN FOODS S.A.		Zona Industrial Km. 6.5 Carretera a Sullana.	Harina residual	5 t/h	Procesan congelado	
5	PROVEEDORA DE PRODUCTOS MARINOS S.A.C.		Mz. A. Lote 3 Y 4. Zona Industrial II	Harina residual	9 t/h	Procesan congelado	

6	ARCOPA S.A.		Av. N 4041 Mz F Lote 1 Zona Industrial Paita	Harina residual	10 t/h	Procesan congelado
7	PESQUERA RIBAUDO S.A.		Zona Industrial II Mz. H Lote 1	Harina residual	10 t/h	Procesan congelado y conservas
8	SEAFROST S.A.C.		Zona Industrial II Mz. B Lote 1	Harina residual	3 t/h	Procesan congelado y conservas
9	PACIFIC FREEZING COMPANY EIRL		Mz. B Lote 4 Zona Industrial - Paita	Harina residual	9 t/h	Procesan congelado
10	PERUVIAN SEA FOOD S.A.		Mz. K Lote 1 Zona Industrial II - Paita	Harina residual	5 t/h	Procesan congelado
11	TRADING FISHMEAL CORPORATION S.A.C.		Zona Industrial Mz. C Lote 3 - Paita	Harina de pota residual	10 t/h	
12	IMPORT EXPORT PESCA Y AGRICULTURA S.C.R.L.		Zona Industrial II Mz. Z Lote 3 - Paita	Harina residual	10 t/h	
13	NUTRIFISH S.A.C.		Av. Los Diamantes Lote 16, Zona Industrial II Etapa - Paita	Harina residual	5 t/h	
14	AUSTRAL GROUP S.A.		Av. Los Pescadores N° 1230. Zona Industrial	Harina de alto contenido proteinico	84 t/h	Procesan conservas
15	ESTACION NAVAL DE PAITA	ZONA BASE PAITA	Playa Seca S/N.	Harina residual	10 t/h	Procesan congelado
16	PESQUERA HAYDUK S.A.		Playa Seca S/N.	Harina convencional	80 t/h	Procesan congelado conservas y curado
17	AGROPESCA S.A.		Tierra Colorada S/N.	Harina residual	10 t/h	Procesan congelado
18	CORPORACION DEL MAR S.A.		Tierra Colorada S/N. Paita.	Harina convencional	50 t/h	Procesan congelado
19	DEL MAR S.A.	ZONA TIERRA COLORADA PAITA	Av. Los Pescadores N° 1240. Zona Industrial	Harina convencional	90 t/h	Produccion de enlatados de cajas/turno
20	GRUPO SINDICATO PESQUERO DEL PERU S.A.		Tierra Colorada S/N.	Harina de alto contenido proteinico	100 t/h	
21	INDUSTRIAL PESQUERA YACILA S.A.		Tierra Colorada S/N. Paita - Zona Industrial	Harina residual	8 t/h	

# 1.3.2 Tecnología en las industrias pesqueras

En la zona norte de nuestro país, ciudad de Paita, se albergan alrededor de 20 plantas productoras de harina de pescado de diferente capacidad. En las visitas realizadas para el desarrollo de esta tesis se encuentran las plantas IEPA (Import Export Pesca y Agricultura) y PTC (pesquera Tierra Colorada). Conociendo a detalle el proceso de obtención de la harina de pescado y teniendo un buen control automático sobre los equipos críticos de una planta pesquera, prensa, evaporadores, calderas y secador, se puede lograr un fuerte ahorro energético sobre la empresa.

Actualmente la planta IEPA no tiene implementado la automatización en ninguno de estos equipos utilizando solo los métodos convencionales para el control de la humedad en la salida de la prensa y el secador, los cuales demoran en promedio 1 hora. Tampoco existe un control en el flujo de vapor que ingresa al secador y en la velocidad del motor que controla el avance de la prensa. Estos son muy importantes porque teniendo un adecuado control se podría ahorrar en el consumo de vapor para el secador y mejorar la calidad de la harina al final del proceso.

Por otro lado, la empresa pesquera Tierra Colorada tiene en marcha un proyecto de automatización financiado por el Fincyt (Fondo para la innovación la ciencia y la tecnología) este proyecto trata de la incorporación de un sistema de medición de humedad online a la salida de la prensa, con los datos obtenidos de este medidor se cierra el control realizado sobre el motor de la prensa, este aumenta o disminuye de acuerdo al % de humedad que tiene el *keke* de prensa, con esto se mantendría una salida de humedad uniforme optimizando el uso del flujo de vapor en el secador. Hoy en día, el proyecto se encuentra en su etapa final, el cual es la calibración del equipo validando los valores de humedad medidos de forma convencional contra los del medidor online. Este proyecto, en el cual forma parte del equipo se muestra, grandes expectativas y pretende ser innovador en la industria pesquera.

#### 1.3.3 Secadores solares para la agricultura y área alimenticia

#### 1.3.3.1 Secadores solares destinados a la desecación del café

En el Perú este tipo de secadores se utiliza como una alternativa para los productores de café, a raíz de principales problemas como la contaminación y la presencia de hongos que se desarrollan sobre los granos cuando estos no secan adecuadamente. En la figura 1.17 se muestra un sembrío de café secado adecuadamente.



Fig. 1.17 Sembríos de café [21]

#### 1.3.3.2 Secadores industriales rotatorios destinados al cacao

Cada alimento presenta ciertas características y si bien es cierto para el cacao es posible utilizar secadores solares pues también se puede hacer de forma industrial utilizando secadores rotatorios mejorando así la calidad del cacao aumentando la cantidad a secar y disminuyendo los tiempos.

Se están utilizando secadoras rotatorias continuas de isocorriente, con la finalidad de disminuir la humedad desde 60 % hasta 7 %, evitando la descomposición orgánica, facilitando la transportación y ayudando en la preparación del grano fino.

El uso de este tipo de secadores nace de una realidad que se vive en distintos países donde el clima juega un factor importante porque al no ser estable el tiempo de secado se prolonga por varios días, también por el extenso tiempo que dedican los cacaoteros para la obtención de los granos listos para almacenar, el uso de estos equipos disminuye la intervención de la mano del hombre. En la figura 1.18 se muestra un secador directo rotatorio. La figura 1.19 presenta la apariencia de las formas de cacao antes, durante y después de la fermentación.



Fig. 1.18 Secador rotatorio



Fig. 1.19 Estado del grano de cacao durante la fermentación

#### 1.3.4. Secadores infrarrojos destinados al secado de pinturas

Estos secadores son muy utilizados en la industria de secado de pinturas de carrocería debido a la gran exigencia de calidad que se le da al cliente. Existen varias formas de secado mediante infrarrojos, pues puede ser de forma global, en la cual abarca todo el automóvil o puede ser equipos manuales o portátiles para masillas y aparejos.

Estos equipos portátiles únicamente son utilizados para pinturas de fondo, ya que para pinturas de acabado es necesario instalaciones más complejas y que estas sean parte de la cabina donde se colocará el automóvil.

Uno de los principales beneficios es reducir el tiempo de espera entre operación, y operación pudiéndose aprovechar en la fase del pintado.

Es importante saber que el secado por infrarrojos es un secado que va desde adentro hacia afuera, la pintura antes de aplicar el infrarrojo deberá estar completamente seca para evitar los problemas de hervidos, cabe mencionar que si va al secador el aparejo aplicado después de una masilla, es recomendable que ésta también haya sido secada con infrarrojo para que no emita disolventes que hayan podido quedar de un secado al ambiente.

La calidad del secado mediante infrarrojos no es muy superior a la del secado convencional pero hay que considerar que los tiempos son muy distintos y como se mencionó anteriormente el secado median IR es mucho más rápido que uno convencional.

En la figura N° 1.20 se muestra a una persona utilizando un secador infrarrojo portátil para secar parte de la carrocería de un automóvil.



Fig. 1.20 Secador infrarrojo destinado para pinturas de automóviles

# Capítulo 2

## Secador rota disco en la industria pesquera

#### 2.1 Introducción

La presente tesis tiene la finalidad de mostrar algunas soluciones a los problemas de control que aparecen en el secado de sólidos en los secadores rota discos. Un secador rota disco es un tipo de secador por excelencia que consiste en un tambor rotativo compuesto de un rotor y un estator, el rotor cuenta con discos los cuales transfieren el calor al sólido por conducción. El tambor además de calentar a través de discos también transfiere calor por la chaqueta del estator calentando al sólido por conducción. Estos discos poseen unas paletas que permiten elevar la materia prima a medida que gira el tambor hasta la parte más alta de tal manera que se formen cortinas sucesivas con la finalidad de que la materia prima esté en contacto con la superfície el mayor tiempo posible. Lo que se busca en el diseño es acelerar el proceso de secado. Existen ciertas exigencias del producto al final del proceso como: el grado de humedad con el que termina, su granulometría y su degradación térmica.

Para que estas condiciones se cumplan es necesario llevar un control estricto y continuo de todo el proceso ya que de otra manera resultaría difícil obtener las condiciones especificadas.

Ciertamente las dificultades para el control de este tipo de equipos vienen derivadas de las características del sólido y del cambio de sus propiedades ante distintos grados de humedad que pueda presentar.

No se tiene un conocimiento completo del proceso de secado ya que se encuentran involucrados fenómenos como: Transferencia de calor, transferencia de masa, evaporación, movimiento de sólido, capilaridad, difusión, tensión superficial, y una mezcla de todos ellos relacionados entre sí lo que da como resultado un comportamiento no lineal del cual resulta difícil obtener un modelo matemático aproximado.

En varias investigaciones se han realizado modelos matemáticos para describir el comportamiento de los secadores rotatorios, tanto directo como indirecto, presentando problemas en el ajuste de los parámetros para que los resultados coincidan con los experimentales resultando solamente válido para un tipo de producto a secar y unas condiciones específicas.

## 2.2 Proceso de obtención de la harina de pescado

#### 2.2.1 Generalidades

La harina de pescado es un producto orgánico, fundamentalmente, usado para la alimentación animal, con un 70 a 80 % del producto en forma de proteína y grasa digerible, de acuerdo a las exigencias del mercado su contenido de proteínas es por lo menos el 65%, contenido de grasas están por debajo del 12%, la humedad oscila alrededor del 10%, contenido combinado entre sal y arena menor o igual que el 5% siendo el contenido máximo de arena del 2%, su contenido de energía es notablemente mayor que muchas otras proteínas animales o vegetales proporcionando una fuente concentrada de proteínas de alta calidad y una grasa rica en ácidos grasos, Omega 3, DHA y EPA indispensables para el rápido crecimiento de los animales.

Uno de los factores que determinan la calidad del producto final de la harina, es el pescado utilizado como materia prima. Por lo tanto, la frescura con la que el pescado llega a la planta es muy importante, para esto es necesario un sistema de refrigeración de los contenedores para mantenerlos frescos desde el momento de la pesca hasta el momento del arribo, sin embargo en nuestro medio no está muy difundida tal tecnología y alternativamente se utiliza hielo de escamas para llenar los contenedores presentando evidentes complicaciones, otro punto importante de tomar en cuenta es el sistema de descarga de la materia prima, pues lo que se debe cuidar es de no dañar o destrozar el pescado al momento de ser descargado.

Además del control de la humedad como parámetro de calidad, existen otros que dependen sobretodo del proceso de obtención, que son de interés para el productor ya que estos determinan la aceptación del producto sobre todo para los mercados internacionales que cada vez son más exigentes. Estos son, nivel máximo de cloruros, ausencia de microorganismos patógenos (salmonella, shigella y hongos); ausencia de toxinas sobre todo las que producen el vómito negro o erosión de molleja.

# 2.2.2 Descripción del proceso 1

#### a) Descarga del pescado

Al descargar el pescado, se pesa y en base a su peso se evalúa la frescura del mismo, una forma de incentivar a que los pescadores realicen la descarga de forma eficiente y rápida es evaluándolos de acuerdo al peso de cada bandeja descargada, evitando el destrozo del pescado y de esta forma facilitar el proceso auto lítico y microbiano.

#### b) Cocido

Primera etapa del proceso, se busca coagular las proteínas y romper las células de la materia prima, también se esterilizan los pescados con el fin de detener la actividad enzimática y microbiana.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Descripción del proceso de la planta IEPA

#### c) Prensado

El prensado es una parte clave de todo el proceso, pues aquí se extraerá una gran cantidad de agua de *keke de prensa*. Esta cuenta con unos tornillos que presionarán el *keke de prensa* sustrayendo su contenido de agua, por lo general, el *keke de prensa* sale con un 45 % de humedad y, posteriormente, es mezclado con lo que sale de la separadora de sólidos y la planta de agua de cola, a esta unión se le conoce como *keke integral*, es el que entrará directamente al secador.

## d) Separación de sólidos, centrifugación y evaporación

El separador de sólidos separa las partículas finas que no han podido ser retenidas por la prensa y que han sido evacuadas junto con el agua y el aceite. El *keke* que se obtiene se vuelve a mezclar con el de la prensa mientras que el agua y el aceite son separados en la bomba centrífuga, este aceite es almacenado para su comercialización. El agua de cola pasa a la planta evaporadora donde se concentran los sólidos para luego volver a mezclarse con la torta de prensa antes de volver a entrar al secador.

#### e) Secado

Al secador ingresa el *keke integral* resultado de la unión del keke de prensa, planta de agua de cola y separadora de sólidos. Esta etapa se considera la de mayor incidencia en el proceso de la harina, siendo el propósito convertir una mezcla húmeda e inestable de *keke integral* a una de concentrado de harina seca y estable, la humedad final debe ser menor del 10% la cual ya se considera lo suficientemente baja para que exista actividad microbiológica. Es importante mencionar que la temperatura de secado no debe exceder los 90°C, para evitar deteriorar los valores nutricionales.

Si bien es cierto que los secadores rotativos de fuego directo se vienen usando desde hace mucho tiempo en la industria, las exigencias del mercado en cuanto a nivel proteico y contenido de impurezas están haciendo que la tendencia sea de usar secadores indirectos tipo roto plato y rota disco, obteniendo así harinas de mejor calidad.

#### 2.3 El mercado de la harina de pescado

Las exportaciones de harina de pescado aumentaron para el primer bimestre del 2011 en 13.4% en comparación con el mismo periodo del 2010, a raíz de esta crecida se estimó un aumento de 12.2 % para el 2012. En todo el 2011, las exportaciones crecieron cerca de 9.25% alcanzando en términos monetarios US\$1,762.8 millones, este incremento se hizo posible por el alza de las exportaciones en China 22.6%, supliendo las pérdidas generadas en Alemania (13%) y (22.9%) Japón.

El análisis realizado por principales mercados de destino ubica a China como principal demandante del producto con una aportación de 58.8%, por otro lado también figuran Alemania y Japón con 8.9% y 7.6%, respectivamente.

Dentro de las pesqueras líderes en la exportación de harina de pescado tenemos: la Tecnología de alimentos TASA, con 24.8% de la participación en el valor exportado, también está la pesquera Diamante que tiene el 11.6%, Corporación pesquera Inca con 11.5% y Austral Group con 9.6%.

Para el año 2012, la harina de pescado mantendrá una tendencia al alza, en particular en el caso de la harina de alta calidad, según Humberto Speziani (asesor de la alta dirección de la empresa Tecnológica de alimentos).

En el verano 2012, el precio ya empezó a aumentar, donde la harina super prime se encuentra en los US\$ 1300 la tonelada, superando su precio anterior de US\$1200 indicando una tendencia positiva en los próximos meses, por otro lado la harina de pescado según Humberto Speziani se mantendrá estable. Aunque hay buenas expectativas, no se considera que el incremento llegue a limites considerables, pero si mejores que los obtenidos en el 2011 [13]

El Perú depende mucho de productos como la soya, el combustible y otros, todo esto depende de la demanda internacional, donde China se ha presentado con fuerza y las exportaciones a Europa que se han reactivado. Tanto China, Japón, Indonesia y Canadá se encuentran entre los primeros compradores de harina de pescado.

#### 2.4 Equipos del proceso de la empresa IEPA (Import Export Pesca y Agricultura)

#### 2.4.1 Generalidades

Esta tesis toma como base el secador rota disco de la planta IEPA (Import Export Pesca y Agricultura). Ubicada en la carretera Piura-Paita km 22, zona industrial. Esta planta cuenta con una producción instalada de 10 TM/h, siendo su materia prima la anchoveta y pota. Como se mencionó en el capítulo 1 la planta no cuenta con la automatización de la prensa y el secador, en ambos equipos se utiliza el medidor de humedad offline mostrado en la figura 2.1, este da sus resultados en aproximadamente una hora dependiendo de la materia prima y la humedad con que se encuentre. Por otro lado, la experiencia adquirida a través de los años por los operadores es usada algunas veces para discernir si la humedad a la salida de la prensa es óptima o no y de acuerdo a esto varían o no la velocidad de avance del tornillo de la prensa. El interés en esta empresa se basó en la facilidad de adquirir información para el estudio y la factibilidad de realizar visitas técnicas para la toma de los datos correspondientes.



Fig. 2.1 Vista de planta y frontal de estufa medidora de humedad

## 2.4.2 Esquema del proceso

El esquema del proceso se presenta en la figura 2.1.

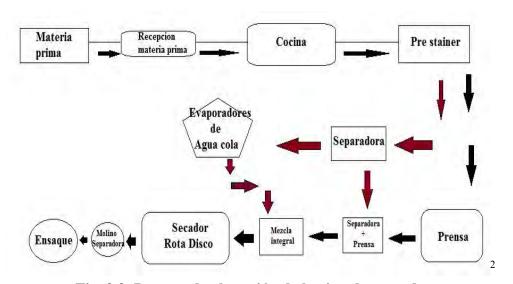


Fig. 2.2. Proceso de obtención de harina de pescado

En el anexo 1 se presenta la descripción de los grupos utilizada en la planta.

## 2.5 Descripción del secador rota disco

El secador rota disco pertenece al grupo de secadores por conducción y fue una versión mejorada del secador rotatorio de fuego directo. Este tipo de secadores se presentan como una opción para el secado de productos con bajo contenido de grasa y que necesiten una gran superficie de calefacción. Su alta eficiencia térmica y su diseño robusto aseguran un perfecto secado y un producto de calidad. En la actualidad, la empresa

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Esquema obtenido de la Planta Import Export Pesca y Agricultura

Haarslev es una de las principales diseñadoras de estos grandes equipos teniendo dos modelos de secadores rota disco.

#### Secador rota disco TST

El secador rota disco TST combina un diseño robusto y una operación segura y simplificada. Su disco son dos placas levemente separadas formando un cono, fue especialmente proyectado para procesar productos viscosos como lodo municipal o industrial. Se presenta como una máquina rentable y con alta capacidad de proceso garantizando un secado delicado y con calidad de producto. En la figura 2.3 se muestra un secador rota disco TST.



Fig. 2.3 Secador rota disco TST fabricado por la empresa Haarslev

#### Secador RCD

Tiene una alta capacidad de evaporación y una calefacción moderada en el diseño de sus discos. Una de las ventajas de la calefacción en formato de disco es que proporciona un contacto perfecto entre el producto y la superficie de calefacción, de esta manera se tiene una gran ahorro del consumo de vapor y menor desgaste. Esta tecnología RCD se utiliza para productos con muy poca grasa, como lo son sangre, plumas o planta de subproducto animal por vía húmeda. Siendo su principal aplicación en plantas de harina de pescado. En

La figura 2.4 muestra un secador rota disco RCD.



Fig. 2.4 Vista general del secador rota disco RCD

## 2.5.1 Aplicaciones del secador rota disco

Las aplicaciones de estos dos modelos de secador rota disco no solo se centran en la industria pesquera sino también han sido utilizados con el fin de convertir los residuos (lodos de papel) en combustible biológico útil. Anteriormente, estos volúmenes de lodo eran utilizados como relleno sanitario. Hoy en día gracias al proceso de secado se hace posible el uso de residuos problemáticos como fuente de energía valiosa.

El secador rota disco TST tiene como principal ventaja, su alta eficiencia energética recuperando el 75% del consumo de energía para el calentamiento previo del agua de alimentación de calderas. Su taza de impacto ambiental es reducida así como el riesgo de explosiones de polvo, mejora en su control automático y bajo costo de mantenimiento.

## 2.5.2 Secador rota disco en la empresa IEPA

El secador rota disco que tiene la planta cuenta con las siguientes dimensiones:

Tiene 61 discos, cada uno tiene 01 paleta de avance en forma de S, 02 paletas de retención y 01 paleta recta, la altura de cada paleta es de 0.10 m.

La entrada de vapor se realiza por una tubería principal conectada en la parte lateral del secador, como se muestra en la figura 2.5, este vapor ingresa tanto por el rotor como por el estator calentando de manera uniforme las paredes del secador. Una vez que el secador alcanza una temperatura estable se permite el ingreso del *keke integral*, esto se hace porque el calentamiento es más uniforme, cuando el *keke integral* se encuentra dentro toma unos minutos en absorber el calor necesario para empezar a evaporar el agua en su interior. La figura 2.6 muestra el esquema del área de transferencia del secador a vapor.



Fig. 2.5 Entrada de vapor al secador rota disco

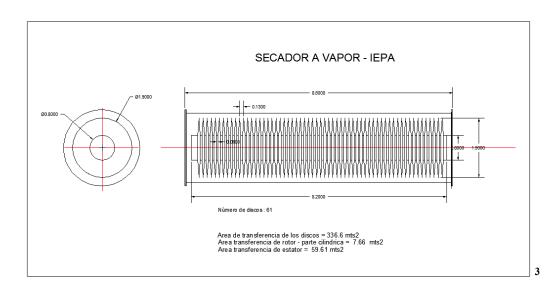


Fig. 2.6 Esquema del área de transferencia del secador a vapor

## 2.6 Otros secadores rotatorios

Si bien es cierto que el secador rota disco o rota tubos son muy eficientes, la tecnología ha continuado su desarrollo y se han creado nuevos modelos de secadores como:

#### • Los secadores directos con aire caliente

En estos los gases calientes de combustión ya no estarán en contacto con la harina de pescado porque estos serán quienes calentarán a un intercambiador de calor de tubos y que entrará y estará en contacto con el sólido.

-

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Plano del secador rota disco de la planta Import Export Pesca y Agricultura

## • Secadores directos con vapor sobrecalentado

Última generación, similar al FAQ, no utiliza aire como medio y no evacúa ningún gas no condensable, consumo de combustible es menor por kg de agua evaporada. Todo el calor utilizado es recuperable por equipos de condensación, tiene un bajo tiempo de exposición a temperaturas altas y un aumento del 30% en el TVN (índice volátil total), el cual indica la frescura del producto al final del secado.

## Capítulo 3

#### Modelo matemático de un secador rotatorio

#### 3.1 Introducción

En la industria de productos alimenticios, el secador es uno de los componentes más relevantes, el cual requiere de energía térmica para el proceso. Por ello, la modelación de este tipo de procesos para su posterior control es muy importante. Fenómenos de transferencia de calor y masa gobiernan este proceso. Hay diversos tipos de secadores, los rotatorios son ampliamente aplicados y algunos de ellos han sido tratados en la literatura científica: Savaresi Sergio describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar [21]. En Iguaz A. presenta un modelo aplicado a residuos vegetales [1]; Helge Dridksen modela un secador rotatorio aplicando un control basado en modelos no lineales [9], también se pueden encontrar otros tipos de secadores como los solares. Sin embargo, hay escasas publicaciones relacionadas con secadores de tipo rota disco con aplicación orientada al proceso de obtención de harina de pescado. Esta tesis se orienta al modelo dinámico de un secador de tipo rota disco y el control de su humedad adecuado a la harina de pescado con una metodología de control PID y GPC.

A continuación una breve descripción de algunos modelos de secadores rotatorios realizados:

Iguaz expone que: el secado es uno de los procesos de acondicionamiento que se utilizan en la industria agrícola y agroalimenticia de subproductos antes de utilizarlos como alimento para el ganado o abono. En este documento se presenta el modelo dinámico para simular el proceso de deshidratación de los desechos de origen vegetal a partir de un mercado mayorista en un secador rotatorio, fue validado con una secadora semi-industrial. El modelo predice la humedad del aire y del producto en función del trabajo, se ha demostrado que la variable que tiene más efecto en la humedad de salida es la temperatura de entrada del aire. [1]

Savaresi expone un modelo basado en ecuaciones diferenciales, realizando balances de masa y energía aplicados para un secador rotatorio utilizado para el secado de trozos de remolacha azucarera en una fábrica de azúcar. [21]

R. Arjona presenta el control y modelación de un secador rotatorio para el orujo, este producto es el desecho del aceite de oliva que aun contiene una cantidad de aceites

significativos, antes de extraer el aceite restante es necesario secar el orujo de una humedad de 65% a 8%, lo que se plantea es desarrollar un control PID que permita un ahorro energético y minimizar los problemas operacionales. [17]

Edgardo R. presenta un modelo en estado estacionario de un secador indirecto por tubos para una planta piloto de procesamiento de harina de pescado. Este modelo está basado en balances de energía y masa aplicando ecuaciones de transferencia de calor. Se presentaron los resultados de las simulaciones donde la humedad predicha por el modelo concuerda satisfactoriamente con los valores experimentales obtenidos en la planta piloto dentro de los rangos permitidos [7].

#### 3.2 Objetivo del modelo de un secador rota disco

El objetivo es realizar el estudio de un secador rota disco indirecto aplicado a la industria pesquera basado en las ecuaciones de transferencia de masa y energía. A diferencia del secador directo, el rota disco indirecto mejora la calidad del producto final, evitando contaminar y quemar la harina con las cenizas que presentes de los gases combustión. Las ecuaciones de balance de masa y energía de los evaporadores cumplen para este análisis.

Este modelo facilita la realización de pruebas para evaluar su comportamiento frente a cambios en las entradas sin perjudicar la producción en la planta debido que en esta no se pueden realizar porque las realizadas impidieron modificar parámetros relevantes que generaron pérdidas tanto en la calidad del producto final, como en el combustible utilizado para generar el vapor.

#### 3.3 Modelo matemático de un secador de disco rotatorio

El secador rota disco es uno de los tipos más comunes en la industria del secado, está compuesto por un cilindro de acero ligeramente inclinado con un diámetro entre 0.3-5m y de largo entre 5-15m, el sólido ingresa por uno de los extremos del secador y se moverá a través de los discos hacia el otro extremo. El secador rota disco tiene dos funciones principales que son el calentar y transportar el sólido. El tiempo de residencia del sólido a lo largo del secador depende de muchos mecanismos propios de éste.

#### 3.3.1 Humedad

La humedad se considera como el principal factor que interviene en el proceso de secado, la materia prima es la anchoveta, esta especie tiene una humedad aproximada de 70.8%, pero antes de ingresar al secador pasa a través de una serie de procesos ingresando al mismo con una humedad que se encuentra entre 54-67% para terminar con una humedad menor al 10%.

## 3.3.2 Flujo másico de la harina a la entrada del secador

Debido a la carencia de medidores de flujo para harina, lo que normalmente se aplica es un balance de masa estático en una hoja de Excel de toda la planta tomando en cuenta las eficiencias de cada uno de los equipos: cocina, prensa, separadora, planta de agua de cola, bomba de sólidos y secador. La planta IEPA se dedica a procesar anchoveta y pota, pero el análisis realizado se aplica para la anchoveta, tiene como capacidad de planta 10 Tn/h.

Por lo tanto para validar el modelo se tomarán datos de este balance de masa en el cual también muestra como dato el flujo de vapor necesario para un determinado flujo de *keke integral* y humedad de entrada.

## 3.3.3 Propiedades de la anchoveta

Tabla 3.1. Análisis aproximado

COMPONENTE	PROMEDIO (%)
Humedad	70.8
Grasa	8.2
Proteína	19.1
Sales minerales	1.2
Calorías (100g)	185

**Tabla 3.2 Componentes minerales** 

MACROELEMENTO	PROMEDIO (%)
Sodio (mg/100g)	78
Potasio (mg/100g)	241.4
Calcio (mg/100g)	77.1
Magnesio (mg/100g)	31.3

Tabla 3.3 Propiedades físicas

PRODUCTO	<b>DENSIDAD</b> (kg/m <sup>3</sup> )
Pescado entero	910
Pescado entero con hielo	801
Harina de pescado en polvo	520-720
Harina de pescado en pellets	600-800

Para la realización del modelo se tomaron las siguientes consideraciones:

#### 3.3.4 Consideraciones

Se han planteado muchos modelos de secadores directos, donde el gas caliente tiene contacto con la harina y predomina la transferencia de calor por convección, el resultado es un modelo útil pero a la vez difícil de validar con datos reales debe la interacción que existe entre los gases de combustión y la harina. Aquí se plantean las ecuaciones para un secador de vapor, donde el vapor saturado que entra al secador únicamente calienta los discos y paredes, son estos quienes tienen contacto con la harina.

Esquema del secador rota disco se muestra en la figura 3.1

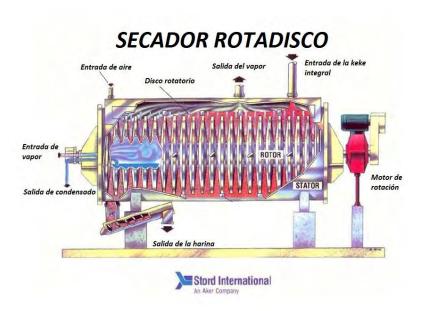


Fig. 3.1 Secador de flujo indirecto rota disco

## Hipótesis del modelo

- a) La velocidad de entrada de la harina es constante, se considera de esta manera para que el calentamiento sea uniforme. En la realidad es casi constante pues depende de la velocidad de rotación del tornillo de transporte.
- b) El tamaño de las partículas de los sólidos es uniforme, esta consideración se toma porque así la evaporación del agua de cada partícula será también uniforme.
- c) En el primer planteamiento de las ecuaciones no se asumirán las pérdidas de calor pero luego se tratará acerca del cálculo de éstas.
- d) La dispersión de los sólidos dentro del secador es despreciable, quiere decir en la mayoría del tiempo la harina estará en contacto con los disco y las paredes del secador.
- e) No existen reacciones químicas en el proceso, por ser un secador indirecto no existe contacto entre los gases calientes y la harina.
- f) La energía específica dentro del volumen de control es uniforme.

#### 3.3.5 Planteamiento del modelo

Las variables consideradas para realizar el modelo son las siguientes:

#### 3.3.5.1 Variables conocidas

# Variables de entrada de vapor

Nomenclatura	Nomenclatura Parámetros físicos	
$P_{vapor}$	Presión del vapor de calentamiento	[Pa]
$T_{sat_{i-1}}$	Temperatura de saturación del vapor de calefacción	[°C]
$H\!v_{i-1}$	Entalpía específica separar del vapor de calefacción	[J/kg]
$P_{cond}$	Presión del condensado	[Pa]
$m_{vapor}$	Masa del vapor	[kg]

#### Variables de la harina de entrada

Nomenclatura	Parámetros físicos	Unidades
$F_{{\scriptscriptstyle harina\_entrada}}$	Flujo masivo de harina a la entrada	[kg/s]
$T_{harina\_entrada}$	Temperatura de la harina a la entrada	[°C]

$T_{harina\_salida}$	Temperatura de la harina a la salida	[°C]
$h_{\scriptscriptstyle harina}$	Entalpía de la harina	[J/kg]
$X_{\it harina\_entrada}$	Concentración de sólidos en la harina a la entrada	Adimensional
$h_{agua\_evap}$	Entalpía específica de agua evaporada	[J/kg]

## Variables desconocidas:

Nomenclatura	Parámetros físicos	Unidades
$F_{vapor}$	Flujo masivo de vapor al ingreso del secador	[kg/s]
$h_{\it cond}$	Entalpía específica del condensado	[J/kg]
$X_{\mathit{harina\_salida}}$	Concentración de sólidos en la harina a la salida	Adimensional
$F_{\it harina\_sal}$	Flujo de harina a la salida	[kg/s]
$W_{agua\_evap}$	Flujo de agua evaporada	[kg/s]
$\overset{\cdot}{\mathcal{Q}}_{\mathit{Calor\_entregado}}$	Calor requerido por la harina	[J/s]
$Cp_{\ {\it harina}}$	Calor específico de la harina	[kJ/kg°C]
Nomenclatura	Parámetros físicos	Unidades
$p_i$	Presión interna del secador	[atm]
$m_{\it masa\_harina}$	Masa de la harina dentro del secador	[kg]
$A_{i}$	Área transferencia de calor del secador	$[m^2]$
$V_{ci}$	Volumen del secador	$[m^3]$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[°C]

A continuación se exponen las ecuaciones matemáticas que representan la dinámica del secador rota disco.

El modelo matemático se ha dividido en tres partes:

## i. Balance de masa y energía del vapor

De acuerdo al esquema 3.1 obtenemos las siguientes ecuaciones:



Esquema 3.1 Balance de energía y masa

• Balance de masa

$$\frac{dm_{vapor}}{dt} = F_{vapor} - F_{cond} \tag{3.1}$$

Como se mencionó anteriormente, se asume que no existen pérdidas por las paredes ni en los discos, por lo tanto todo el vapor que ingresa al secador será expulsado como condensado.

$$F_{vapor} = F_{cond} \tag{3.2}$$

• Balance de energía

De acuerdo al esquema 3.2 tenemos:



Esquema 3.2 Balance de energía

$$\frac{d(m_{vapor}e_{vapor})}{dt} = F_{vapor}h_{vapor} - F_{cond}h_{cond} - \dot{Q}_{entregado}$$
(3.3)

Despejando  $Q_{\it entregado}$  de la ecuación (3.3) se obtiene

$$Q_{entregado} = F_{vapor} h_{vapor} - F_{cond} h_{cond}$$
(3.4)

## ii. Balance de masa y energía de la harina:

Balance de masa

$$\frac{d(m_{harina})}{dt} = F_{harina\_ent} - F_{harina\_sal} - W_{agua\_evap}$$
(3.5)

Balance de energía

$$\frac{d(m_{harina}h_{harina})}{dt} = F_{harina\_ent}h_{harina\_ent} - F_{harina\_sal}h_{harina\_sal}...$$

$$\dots + \dot{Q}_{entregado} - W_{agua\_evap}h_{agua\_evap}$$
(3.6)

#### iii. Balance de masa de la concentración

• Balance de la concentración [17]:

$$\frac{d(m_{harina}X_{harina})}{dt} = F_{harina\_ent}X_{harina\_entrada} - F_{harina\_sal}X_{harina\_salida}$$
(3.7)

Despejando el  $Flujo_{harina\_sal}$  de la ecuación (3.5), reemplazando en la ecuación (3.7) y considerando la masa en el secador constante obtenemos la siguiente ecuación

$$\frac{d(X_{harina})}{dt} = \frac{F_{harina\_ent}(X_{harina\_entrada} - X_{harina\_salida}) + W_{agua\_evap}X_{harina\_salida}}{m_{harina}}$$
(3.8)

Despejando  $W_{agua\ evap}$  de la ecuación (3.6) se obtiene:

$$W_{agua\_evap} = \frac{F_{harina\_ent}(h_{harina\_entrada} - h_{harina\_salida}) + \dot{Q}_{entregado}}{h_{agua\_evap} - h_{harina\_salida}}$$
(3.9)

## **Otras Ecuaciones [23]:**

Entalpia de vapor, está dada por la ecuación:

$$h_{vapor} = 2.5 \times 10^{6} + 1813T_{sat\_vapor} + 0.47T_{sat\_vapor} -0.011T_{sat\_vapor}^{3} + 2090(T_{vapor} - T_{sat\_vapor}) \left[ \frac{J}{s} \right]$$
(3.10)

Entalpia del condensado se calcula por la ecuación:

$$h_{cond} = 1500 + 4122T_{cond} + (0.55T_{cond})^2 \left[ \frac{J}{s} \right]$$
 (3.11)

Temperatura de saturación, en función de la presión de vapor

$$T_{sat} = \frac{2147}{10.76 - \log(P_{vapor})} [^{\circ}C]$$
 (3.12)

$$Cp_{harina} = 1 \times \% agua + 0.52 \times \% s\'olidos +0.40 \times \% grasas$$
 (3.13)

## 3.3.6 Estudio de las pérdidas en el secador

En esta sección se estimarán las pérdidas utilizando la ecuación (3.14), dado que el análisis por transferencia de calor resulta complejo, siendo necesario calcular los coeficientes de convección de la harina y del ambiente, se realizara de forma experimental de acuerdo a los valores obtenidos en la planta.

$$\dot{Q}_{entregado\ vapor} = \dot{Q}_{requerido\ harina} + \dot{Q}_{P\'{e}rdidas}$$
 (3.14)

Se van a realizar diferentes pruebas con valores de entrada de humedad distintos pero dentro de los rangos permisibles de la planta, esto servirá para estimar un valor promedio de las pérdidas del secador rota disco.

De acuerdo al balance de energía y masa de la empresa se tiene que el calor entregado al secador para un valor del 62% de humedad de *keke integral* y que se reduzca

a un 8% es de  $1.551*10^6 \left[\frac{J}{s}\right]$ , calculando el valor del  $Q_{requerido\_harina}$  mediante la siguiente ecuación se tiene:

$$\dot{Q}_{requerido\_harina} = W_{agua\_evap}(\lambda_{vaporización}) + W_{agua\_evap} * cp_{agua\_gasseosa}(T_f - T_i)...$$

$$... + F_{Harina\_entrada} Cp_{harina}(T_f' - T_i)$$
(3.15)

Donde  $W_{agua\_evap}$  es del flujo másico de agua evaporada,  $\lambda_{vaporización}$  esta en tn/pie de vaporización Cp  $_{agua\_harina}$  excede calor específico del agua presente en la harina Tf, Ti.

Del balance de masa de la planta, el agua que se evapora es  $0.5822 \left[\frac{kg}{s}\right]$ , el valor de la entalpía de vaporización ( $\lambda_{vaporización}$ ) a 95°C es 2269664.28  $\frac{J}{kg}$ , la temperatura inicial de la harina es alrededor de 60°C y la temperatura a la cual el agua evapora es 100°C, él  $F_{Harina\_entrada}$  es de 0.9828 kg/s y por último los valores de  $Cp_{Harina}$  es de 3423.127  $\left[Jkg^{-1}C^{-1}\right]$  y  $CP_{agua\_gaseosa}$  es 2080  $\left[J.kg^{-1}.C^{-1}\right]$ 

Entonces reemplazando los valores anteriores en la ecuación (3.14) tenemos:

$$1.551*10^{6} = 0.5822(2269664.28) + 0.5822*2.080*10^{3}(100-60)...$$
$$+0.9828*3423.17*(80-60) + Q_{p\'{e}rdidas}$$
(3.16)

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = 65024.5866 \left\lfloor \frac{J}{s} \right\rfloor \tag{3.17}$$

Esto resulta ser cerca del 4.19 % del calor total, de esta misma forma se realizaron más pruebas para tener un valor del porcentaje promedio.

Por lo tanto se tiene que considerar esta aproximación de pérdidas en la ecuación (3.4)

Según el esquema 3.3 tenemos:



Esquema 3.3 Balance de energía con pérdidas

$$\dot{Q}_{entregado} = F_{vapor} h_{vapor} - F_{cond} h_{cond} - \dot{Q}_{p\'erdidas}$$
 (3.18)

De la misma forma como se desarrolló la aproximación de las pérdidas para el caso en que la humedad de entrada es de 62% se calcularon los demás valores de las pérdidas para luego obtener un valor promedio se presenta en porcentajes, la tabla 3.1 muestra los datos necesarios para las pruebas y también los resultados.

Humedad inicial	Flujo de agua evaporada (kg/s)	Flujo de la harina a la entrada(kg/s)	$\lambda_{vaporización}$	$cp_{harina\_\sec a}$	cp <sub>agua_gaseosa</sub>	$\overset{\cdot}{Q}_{\it entregado\_vapor}$	$\overset{\cdot}{Q}_{ extit{p\'erdidas}}$	% Pérdidas
62%	0.5822	0.32055	2269664.28	3423.1278	2080	1.551*10 <sup>6</sup>	65024.586	4.1924
67%	0.6386	0.2961	2269664.28	3523.61088	2080	1.69611*10 <sup>6</sup>	71930.985	4.2409
60%	0.5677	0.37	2269664.28	3382.9344	2080	1.5153*10 <sup>6</sup>	65450.386	4.319
65%	0.6113	0.2944	2269664.28	3483.4176	2080	1.62740*106	69128.200	4.247
58%	0.5366	0 3947	2269664 28	3342 7412	2080	1 4386*10 <sup>6</sup>	65185 891	4 5312

Tabla 3.1 Valores de Planta

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 3.1 se obtiene un promedio de pérdidas del 4.3063% del calor total entregado.

Con la ecuación 3.18 se resuelve el sistema y se simula haciendo uso del programa MATLAB.

## 3.3.7 Planteamiento del ahorro energético

Es de suma importancia que el flujo de vapor utilizado por el secador y los distintos equipos en la industria pesquera sean los más óptimos evitando así gastos incensarios. Aquí revisaremos el ahorro energético en un secador rotatorio indirecto.

#### 3.3.7.1 Análisis en un secador rota disco indirecto

En un secador indirecto no existe contacto entre el vapor que ingresa y el *keke integral*, de la misma manera el agua evaporada de la harina se elimina en lo que se llama VAHOS, ese vapor de agua es utilizado en otro proceso de la planta.

A continuación se presenta el cálculo necesario para determinar el calor requerido por la harina para llevar de la humedad inicial hasta un valor final del 8%

I. Humedad inicial 51% Humedad Final 8%

El flujo másico de harina húmeda a la entrada del secador es 33 tn/h

Según los porcentajes se tiene:

Por lo tanto el agua evaporada será:

Flujo 
$$_{masico} = 16.83-2.64=14.19 \text{ tn/h}$$

La harina entra al secador a una temperatura aproximadamente de 40°C y de acuerdo a valores tomados en las empresas, la temperatura de salida es aproximadamente 80°C. También es necesario el calor para evaporar el agua esto quiere decir que se debe elevar la temperatura desde los 40 a 100°C. Para este análisis se necesitan los siguientes datos:

Se sabe que el  $Cp_{agua}$  = 4186 J/kg°C y  $\lambda_{vaporización}$  =2333 kJ/kg agua, entonces se plantea la siguiente ecuación:

$$Q_{1} = Cp_{agua} * Flujo_{agua\_evaporada} * (T_{f} - T_{i}) + Flujo_{agua\_evaporada} * \lambda_{vaporización}$$
(3.19)

Ahora el calor necesario para elevar la temperatura de la harina seca desde los 40 a 80°C, sigue la siguiente formula.

$$Q_2 = Cp_{harina\_seca} * Flujo\_másico_{harina\_entrada} * (T_f - T_i)$$
(3.20)

$$Cp_{Harina} = \left[1*\%agua + 0.52*\%S\'olidos + 0.40\%grasas\right]*4186\left[\frac{J}{kg^{\circ}.C}\right]$$
 (3.21)

Entonces reemplazando los valores en las ecuaciones (3.19), (3.20) y (3.21) se obtiene el calor requerido por la harina.

$$Q_{1} = 35.47597 \left[ \frac{GJ}{h} \right]$$

$$Q_{2} = 4.2259 \left[ \frac{GJ}{h} \right]$$

$$Q_{requerido\_harina} = Q_{1} + Q_{2} = 39.7018 \left[ \frac{GJ}{h} \right]$$

El mismo procedimiento se repite para un valor diferente de humedad inicial manteniendo el flujo de *keke integral* constante a la entrada:

II. Humedad inicial = 60% Humedad final= 8%

Los valores obtenidos son los siguientes:

Por lo tanto, el agua evaporada será:

$$Flujo\_m\'asico_{agua\_evaporada} = 19.8-2.64=17.16 \text{ tn/h}$$

$$Cp_{agua} = 4186 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C y } \lambda_{vaporización} = 2333 \text{ kJ/kg agua}$$

Entonces los valores de calor obtenidos de las ecuaciones 3.19 y 3.20 son los siguientes:

$$Q_1 = 42.9075 \left\lceil \frac{GJ}{h} \right\rceil$$

$$Q_2 = 4.4646GJ / h$$

$$\dot{Q}_{\text{Re querido\_harina}} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = 47.3721 \left[ \frac{GJ}{h} \right]$$

Para una humedad del 60%, él  $Q_{requerido}$  es 47.372GJ/h, mientras que para un valor inicial del 50% él  $Q_{requerido}$  es 39.7018GJ/h, obteniéndose un ahorro energético del **20.41%.** De acuerdo a los resultados mostrados, mientras mayor humedad tenga el keke de prensa a la salida mayor será el calor que necesitará el secador para reducir la humedad a los valores aceptables. Por lo tanto, el vapor que utilizará el secador será mayor, esto genera un aumento del combustible a quemar en las calderas generando un costo mayor.

Este problema se soluciona automatizando la prensa, como mencioné en el capítulo 1 en la planta Tierra Colorada de la ciudad de Paita se encuentra en proceso un proyecto de automatización sobre la prensa que consta en colocar un medidor de humedad online, donde los valores de este medidor serán las entradas para el controlador que actuará sobre el variador de frecuencia del motor que hace girar la prensa, por lo tanto si la humedad es demasiado alta este motor girará más lento para que el *keke* de prensa esté más tiempo dentro y salga con menos humedad, si la humedad es baja realizará lo contrario, de esta forma la humedad del *keke de prensa* siempre se mantendrá constante y en un valor óptimo.

En los siguientes capítulos se planteará la simulación del modelo del secador rota disco y la automatización del mismo mediante un control PID y control GPC mostrando los beneficios que estos determinan.

# Capítulo 4

# Estudio del comportamiento del proceso en el simulador

#### 4.1 Introducción

En el desarrollo del simulador del proceso de secado se han considerado las ecuaciones de los balances de masa y energía tanto del vapor, harina y la humedad de la harina obteniendo de esta manera el modelo matemático, el mismo que ha sido implementado en el programa de modelación matemática "*Matlab*"

A continuación se presenta el simulador desarrollado en el entorno SIMULINK.

## 4.2 Descripción del programa para el secador rota disco

El secador consta de varios subsistemas, donde se encuentran los balances de masa y energía, contiene fórmulas para calcular entalpias de la harina, temperatura de saturación del vapor, entalpias de vapor y condensado, también cuenta con un bloque donde está la ecuación diferencial que calcula la variación de la concentración de sólidos en la harina.

La figura 4.1 presenta el diagrama de bloques con las de entradas constantes y variables necesarias para realizar el modelo.

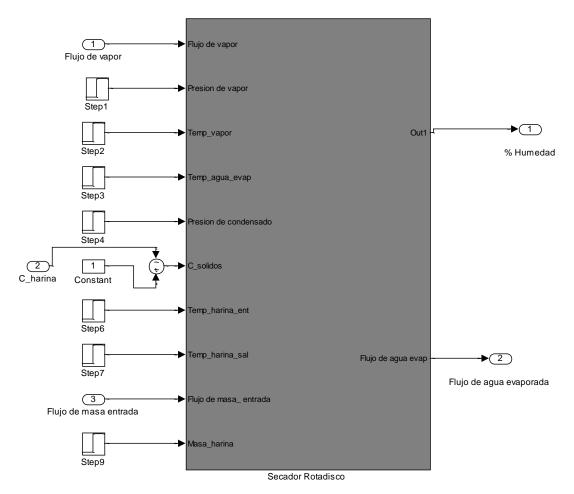


Fig. 4.1 Primer diagrama de bloques, secador rota disco

La figura 4.2 muestra las entradas variables que presenta la planta, estas son: el flujo de vapor, la humedad de entrada del *keke integral* y el flujo de *keke integral* en la entrada, de estas tres entradas, la variable manipulable es el flujo de vapor las otras dos serán consideradas como disturbios, porque tanto el flujo *keke integral* como la humedad del *keke integral* en la entrada usualmente permanecen casi constantes durante el proceso. Dentro de los subprocesos de la harina de pescado se encuentra el prensado siendo necesario realizar un control de este equipo para asegurar que la humedad sea uniforme antes de entrar al secador.

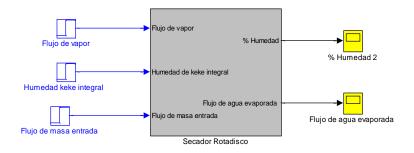


Fig. 4.2 Diagrama de bloques, secador rota disco

## 4.3 Comportamiento del proceso en el simulador

Para las simulaciones a lazo abierto a realizar se varían los tres parámetros de entrada, Fuljo de vapor, Humedad del *keke integral* a la entrada, flujo del *keke integral* de acuerdo a esto ingresando un flujo de vapor el programa en SIMULNIK es capaz de calcular la humedad de salida en función del tiempo.

## 4.3.1 Simulaciones a lazo abierto del proceso de evaporación

Para las simulaciones hemos comparado con datos de la planta IEPA (Import Export pesca y agricultura) y FISHMEAL CORPORATION ubicadas en Paita, estos son: flujo de vapor, flujo de la harina, humedad de entrada, humedad de salida.

En la planta FISHMEAL el proceso de secado cuenta con dos etapas, dos secadores conectados en serie. La primera etapa es un secador a vapor (rota disco) y la segunda etapa un secador de aire caliente. La salida del *keke integral* del secador a vapor tiene una humedad entre el 45% a 35% este *keke integral* ingresa al secador de aire caliente reduciendo su humedad a un 8%. presenta la prueba a lazo abierto de la primera etapa de este proceso, el cual representa al secador a vapor (rota disco).

La planta IEPA cuenta en su proceso un único secador a vapor (rota disco), el cual reduce la humedad del *keke integral* desde 65% al 8%, este proceso demora en promedio 2 horas.

A continuación se presentan las tablas comparativas entre el modelo y los datos experimentales.

La tabla N°4 representa los valores reales y valores del simulador referentes a la planta Fishmeal, donde  $X_{inicial}$ % representa la humedad del *keke integral* en la entrada al secador de la primera etapa y  $X_{final}$ % representa la humedad de salida del *keke integral* en la primera etapa (secador a vapor).

Tabla N°4.1 Tabla de valores reales de planta

	Valores reales	de la planta	Valor del simulador	Pérdidas	
Experimento	$F_{vapor}[Kg/s]$	$X_{inicial}\%$	$X_{\it final}$ %	$X_{\mathit{final\_mod}\mathit{elo}}$ %	% Pérdidas
Experimento A	0.3522	55	37.92	34.06	10.17
Experimento B	0.39639	62	45.47	40.9	10.503

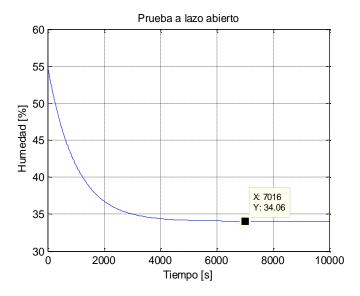


Fig. 4.3 Prueba a lazo abierto secador rota disco

En la figura 4.3 se muestra la prueba a lazo abierto del modelo para el experimento A, con un flujo de *keke integral* en la entrada al secador de 0.98 kg/s. Se muestra un error del 10 % entre  $X_{\mathit{final}}$ % y  $X_{\mathit{final}\_modelo}$ % esta diferencia de valores se debe a las pérdidas de calor existentes en el secador rota disco obteniendo diferentes valores en la humedad de salida para cada proceso de secado, de acuerdo al capítulo 3 las perdidas en el secador fueron calculadas en base a promedios. De igual manera sucede con la simulación mostrada en la figura 4.4.

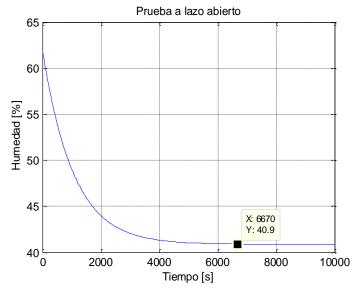


Fig. 4.4 Prueba a lazo abierto del modelo

A continuación se va a realizar una prueba a lazo abierto de la planta IEPA, esta solo cuenta con un secador por lo tanto la humedad de salida debe ser del 8%.

Tabla N°4.2 Tabla de valores reales de planta

	Valores rea	ales de la plant	Valor del simulador	Pérdidas	
Experimento	$F_{vapor}[Kg/s]$	$X_{inicial}\%$	$X_{\it final}$ %	$X_{\mathit{final\_mod}\mathit{elo}}\%$	% Pérdidas
Experimento A	0.60583	55	8	7.973	0.338
Experimento B	0.69667	62	8	8.324	4.05

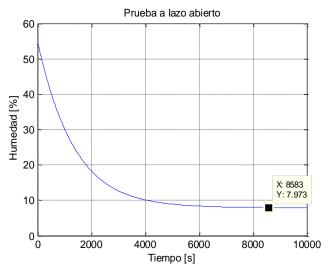


Fig. 4.5 Prueba a lazo abierto del modelo

En la figura 4.5 se muestra la prueba a lazo abierto con un flujo de *keke integral* en la entrada del secador de 0.98 kg/s, obteniendo el *keke integral* con valores de humedad de 7.973 %, en esta planta los valores de perdida de calor son más exactos, es por ello que el error se reduce al 0.338 % respecto del valor experimental.

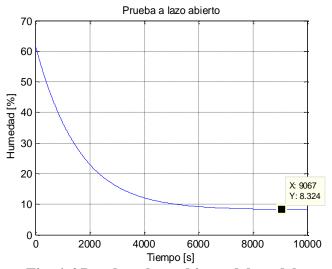


Fig. 4.6 Prueba a lazo abierto del modelo

La figura 4.6 muestra la prueba a lazo abierto con 62% de humedad inicial, obteniendo como salida 8.34% de humedad final. Este valor se aproxima con un error del 4.05 % del valor experimental.

## 4.3.2 Respuesta del modelo frente a variaciones de flujo de vapor

Es importante conocer como varia la humedad frente a un cambio de flujo de vapor, estas pruebas resultan perjudiciales para la empresa porque cambian la calidad final de la harina, por lo tanto son realizadas en un simulador. La primera prueba corresponde a una entrada escalón positivo en el flujo de vapor, inicio en 0.699667 kg/s y en el t=13000s incrementa a 0.72kg/s, manteniendo el valor de humedad de entrada constante en 62% variamos. En la figura 4.7a muestra una entrada de escalón positivo del con variación del 3.24% obteniendo como respuesta una variación negativa del 3.94 % de humedad en la salida frente al cambio de vapor.

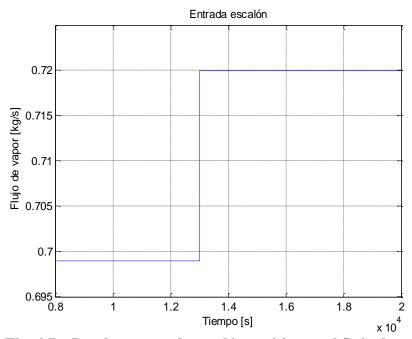


Fig. 4.7a Prueba a entrada escalón positivo en el flujo de vapor



Fig. 4.7b Salida del simulador

La figura 4.8a se muestra una variación negativa en la entrada escalón del 6.69 % en el flujo de vapor lo que corresponde una variación positiva del 6.92 % en la humedad de salida mostrado en la figura 4.8b.

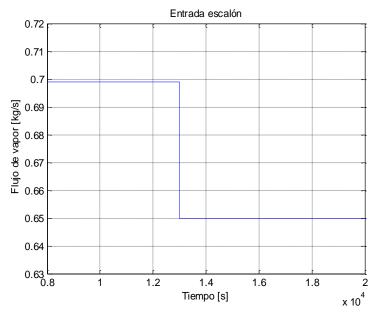


Fig. 4.8a Entrada escalón negativo

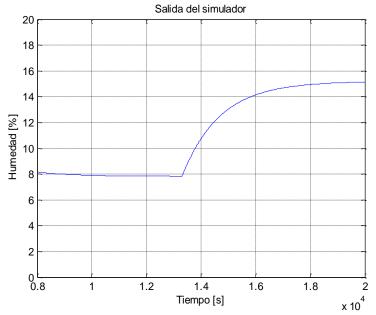


Fig. 4.8b Salida del simulador

# 4.3.3 Respuesta del modelo frente a una variación de concentración de entrada en keke integral

Manteniendo el mismo flujo de vapor 0.69667 kg/s. La figura 4.9 muestra la aplicación de un escalón con una variación positiva del 5% en la humedad de entrada, este cambio es importante porque presenta uno de los principales disturbios en la entrada, esto se debe que el control aplicado en la prensa no es exacto o también que la materia prima no es uniforme en sus porcentajes de agua, sólidos y aceites. Debido a esta variación de humedad en el *keke integral* a la entrada del secador, la humedad de salida aumenta un 10.75 % como muestra la figura 4.9b.

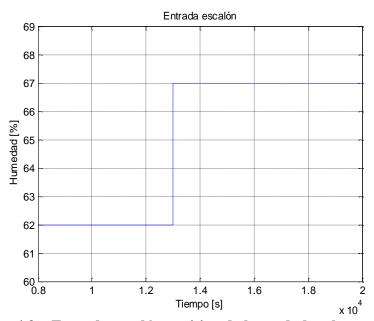


Fig. 4.9a Entrada escalón positivo de humedad en la entrada

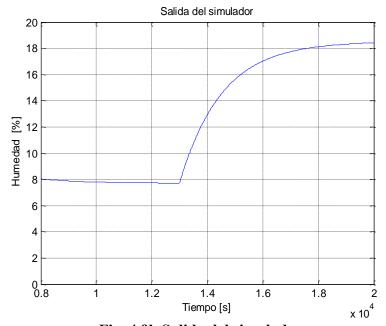


Fig. 4.9b Salida del simulador

De acuerdo a estos resultados observamos que un cambio de humedad del *keke* integral varia en gran porcentaje la humedad de la harina en la salida del secador, por lo tanto es necesario corregir ese error aplicando técnicas de control.

La figura 4.10 muestra la aplicación de un escalón negativo del 5% en la humedad inicial obteniendo como respuesta un cambio del 10.8%.

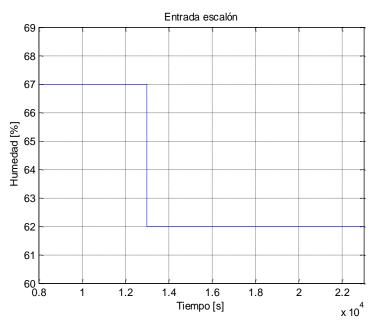


Fig 4.10a Entrada escalón negativo de humedad en la entrada

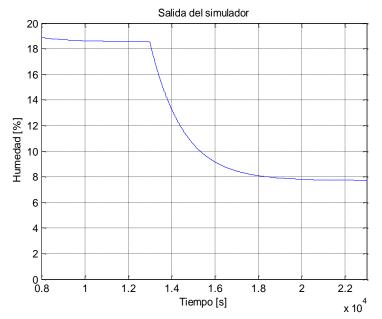


Fig. 4.10b Salida del simulador

# 4.3.4 Respuesta del modelo frente a cambio de flujo del *keke integral* a la entrada del secador

Manteniendo los valores de humedad del *keke integral* en 62% y el flujo de vapor en 0.69667 kg/s. La figura 4.11a corresponde a una variación positiva en el flujo de *keke integral* a la entrada del 4.166%, obteniendo como resultado un incremento del 4.492% en la humedad de salida mostrado en la figura 4.11b, manteniendo un flujo de vapor constante.

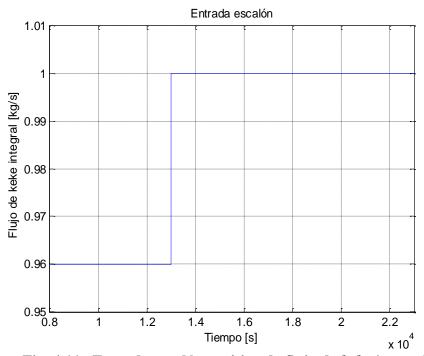


Fig. 4.11a Entrada escalón positivo de flujo de keke integral

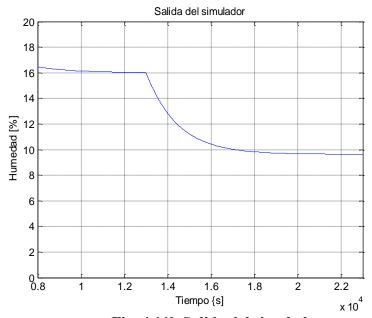


Fig. 4.11b Salida del simulador

La figura 4.12a muestra la simulación para un escalón negativo con una variación del 4% obteniendo una disminución del 4.65% en la salida de la humedad.

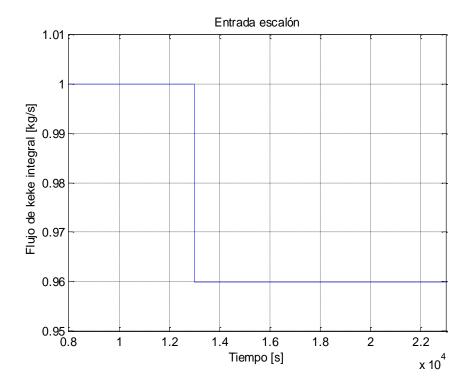


Fig. 4.12a Entrada escalón negativo

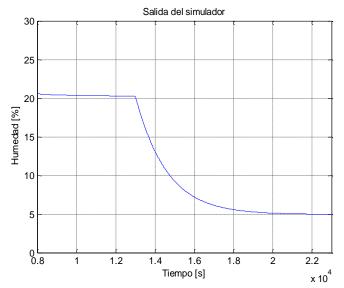


Fig. 4.12b Salida del simulador

De la misma manera que en el cambio de la humedad a la entrada , este también es considerado como un disturbio porque el flujo en la planta varía de acuerdo a la velocidad del tornillo de arrastre y también a la cantidad de harina que sale de la prensa por lo tanto es importante simular esta variación de humedad en la salida del secador frente a cambios de flujo de *keke integral* a la entrada del secador.

## 4.4.1 Análisis referido a la ganancia

### 4.4.1.1 Ganancia referida al flujo de vapor

Para este análisis se excita el sistema con entradas escalonadas como muestra la figura 4.13. Cada escalón debe ser suficiente para que la variable de salida alcance su valor estacionario, la figura 4.14 muestra la curva salida vs entrada, esta dará una idea más clara acerca de la linealidad del sistema.

Manteniendo una humedad de *keke integral* del 65% y un flujo de entrada de *keke integral* del 0.9828 se muestra en la tabla 4.3 como la humedad de salida varía de acuerdo a un cambio en la entrada de flujo de vapor, se trabajó en una banda de 0.42 kg/s a 0.74 kg/s con 9 escalones.

Tabla  $N^{\circ}$  4.3 Relación de flujo de vapor vs Humedad

Flujo de vapor (kg/s)	Concentración de agua en la harina de salida	% Humedad de salida
0.42	0.3911	39.11
0.46	0.359	35.9
0.5	0.3236	32.36
0.54	0.2844	28.44
0.58	0.2409	24.09
0.62	0.1923	19.23
0.66	0.1379	13.79
0.7	0.0767	7.67
0.74	0.004693	0.4693

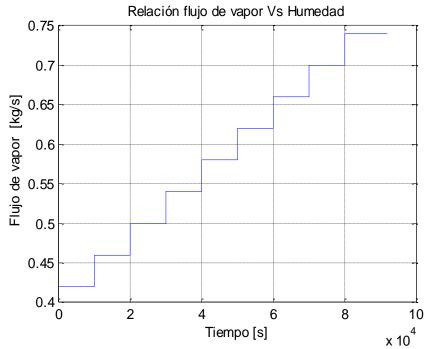


Fig. 4.13a Entrada de escalones

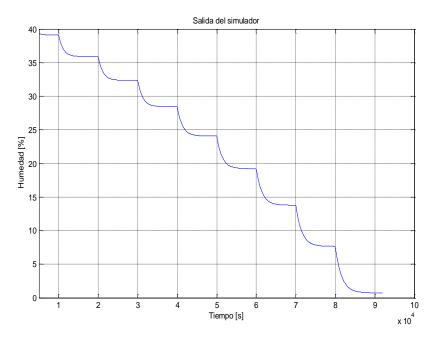


Fig. 4.13b Salida del simulador

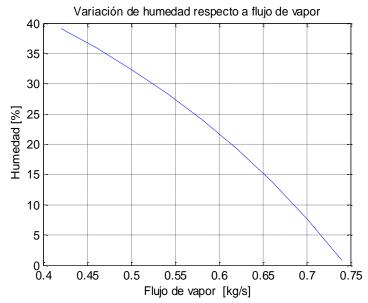


Fig. 4.14 Puntos de funcionamiento por cada valor de flujo de vapor

La figura 4.15 describe la ganancia instantánea, con esto se puede predecir la ganancia que se obtiene al aplicar un escalón alrededor de un punto y así hallar el incremento en % de humedad de la salida, la ecuación 4.1 describe la operación.

$$\Delta G = \frac{\Delta Concentración\_agua}{\Delta Flujo\_de\_vapor}$$
(4.1)

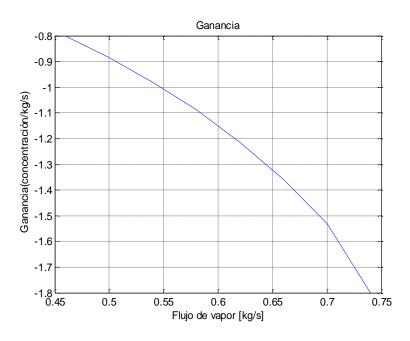


Fig. 4.15 Ganancia respecto al flujo de vapor de calentamiento

## 4.4.1.2 Ganancia referido al flujo de alimentación

Se excito el sistema con variaciones de flujo de *keke integral* a la entrada con la suficiente duración en cada escalón para llegar al estacionario, en la figura 4.16a tenemos variaciones de flujo de *keke integral*, estos no deben ser menores que 0.95 kg/s porque para un mismo flujo de vapor de entrada, la humedad de salida tendrá valores negativos, esto se debe que el flujo del *keke integral* es demasiado pequeño para un mismo vapor de entrada. Es importante mencionar que a la salida del secador los valores de humedad deben ser entre 10 al 7% siendo estas simulaciones no aplicables en la realidad porque generaría una pérdida de dinero en cuanto al vapor utilizado siendo no productivo para la empresa, es por ello la importancia de un simulador. La figura 4.17 muestra la relación entre el flujo de alimentación *keke integral* y la humedad de salida.

Tabla 4.4 Detalle el experimento realizado

Flujo de keke integral (kg/s)	Concentración de agua	% Humedad de salida
0.95	0.0424	4.24%
1.00	0.1008	10.08%
1.05	0.149	14.9%
1.1	0.189	18.9%
1.15	0.2227	22.27%
1.20	0.2515	25.15%
1.25	0.2763	27.63%
1.30	0.2979	29.79%
1.35	0.3168	31.68%

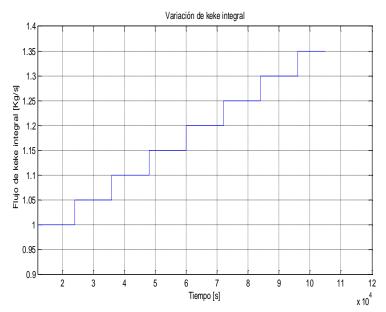


Fig. 4.16a Entradas escalón

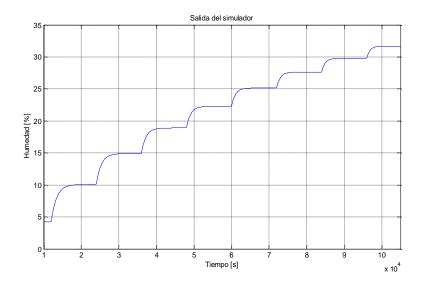


Fig. 416b Salida del simulador

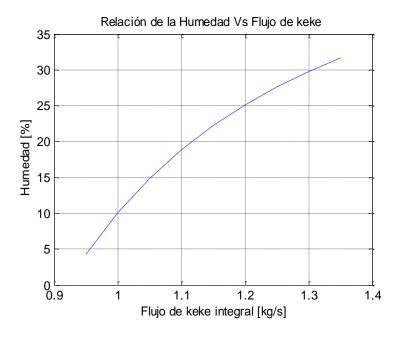


Fig. 4.17 Punto de funcionamiento para cada valor de flujo de harina

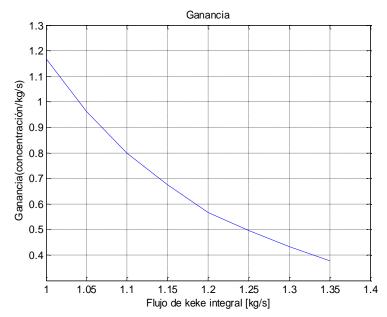


Fig. 4.18 Ganancia respecto al flujo de alimentación

## 4.4.1.3 Ganancia referido a la concentración de keke integral en la entrada

Se excitó el sistema, con entradas escalón del % de humedad inicial. Estas variaciones son consideradas como disturbios y es importante conocer su efecto a la salida, se mantuvo constante el flujo de vapor en 0.69667 kg/s y el flujo de *keke integral* en 0.9828 kg/s. La figura 4.19a muestra las entradas escalón.

Tabla 4.5 Detalle el experimento realizado

% Humedad del keke integral (kg/s)	% Humedad salida	
60%	4%	
61%	6.06%	
62%	8.18%	
63%	10.3%	
64%	12.45%	
65%	14.6%	
66%	16.79%	
67%	118.95%	
68%	21.15%	

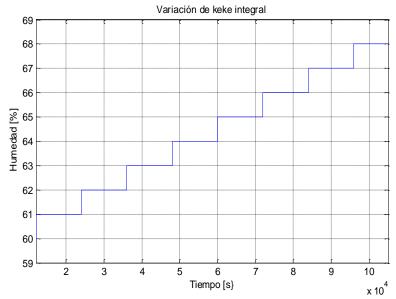


Fig. 4.19a Entradas escalón

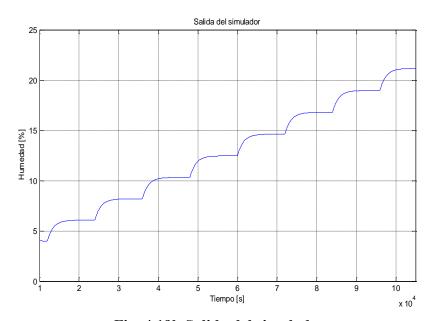


Fig. 4.19b Salida del simulador

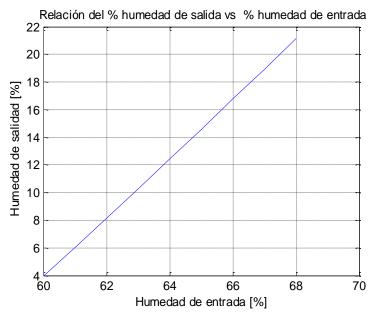


Fig. 4.20 Relación % Humedad de entrada vs % Humedad de salida

# Capítulo 5

# Identificación de procesos

#### 5.1 Introducción

La determinación de un modelo a partir de un grupo de datos experimentales de entrada y de salida sin necesidad de conocer las leyes internas que gobiernan el comportamiento del sistema se le conoce como identificación por lo tanto es muy útil contar con un modelo descriptivo de sistemas dinámicos, en particular para el control. Existen dos campos de construcción de modelos.

Tenemos la modelación matemática, donde las ecuaciones del modelo son obtenidas a partir del conocimiento de las leyes físicas y químicas que gobiernan el comportamiento del proceso.

Por otro lado tenemos la identificación de procesos, este es un enfoque experimental. Como se mencionó anteriormente el modelo se obtiene a partir de un grupo de datos experimentales recolectados de una prueba en la planta, este método se basa en experiencias

Respecto al primer enfoque se vuelve difícil considerar todas las leyes físicas que pueden intervenir en el proceso, por lo tanto resulta complejo manejar las técnicas de diseño de sistemas de control, por otro lado también existen en la práctica los disturbios y estos pueden ser, las fuentes de ruido, desgastes, cambio de las condiciones de entrada, etc. estas hacen que el comportamiento real nunca sea el comportamiento previsto.

En la práctica se combinan los dos enfoques, tanto la etapa de análisis donde se consideran las hipótesis sobre la estructura y propiedades del modelo y la otra etapa experimental donde se adoptan las hipótesis obtenidas anteriormente y se tienen en cuenta para las mediciones del modelo [2].

En el análisis es conveniente que así el modelo sea no lineal adaptemos uno lineal con el objeto de estudiar su comportamiento frente a variaciones muy pequeñas de entrada, estas variaciones deberían darse en la planta real, en este caso se cuenta con un modelo matemático que representa el proceso en cuestión, por lo tanto se harán las pruebas a través de la plataforma de simulación *Matlab*.

## 5.1.1 Aplicación de la identificación de sistemas

Para la aplicación de sistemas existe una metodología determinada por etapas de esta manera se obtiene reproducir nuestro proceso de forma más confiable. Las etapas son las siguientes:

- Planificación experimental
- Selección de la estructura del modelo
- Formulación de un criterio
- Estimación de parámetros
- Validación del modelo obtenido

# **5.1.1.1** Planificación experimental

En esta primera etapa, cuando se tiene un proceso en el cual existe un conocimiento previo pobre, lo razonable es comenzar con un análisis transitorio o respuesta en frecuencia para lograr una estimación inicial de la dinámica y las perturbaciones, utilizando los resultados para posteriores experimentos, por ejemplo la respuesta al salto nos brinda información útil sobre el retraso, constantes de tiempo y ganancias del sistema.

Uno de los grandes inconvenientes de este sistema es que la posibilidad de llevar a saturación o a valores que puedan poner en riesgo la infraestructura del proceso, entonces un experimento importante para superar esta limitación es la fabricación de un modelo basado en ecuaciones matemáticas, físicas y químicas dependiendo del proceso. Sobre los resultados obtenidos se puede mejorar la estructura del modelo pudiendo diseñarse nuevos experimentos, aun si estos esta hechos sobre un simulador se pueden obtener buenas aproximaciones.

#### 5.1.1.2 Selección de la estructura

Para determinar las estructuras del modelo es necesario tener un conocimiento previo del proceso y de las perturbaciones.

En varios casos lo único que se puede conocer del proceso es que se pueden describir como un sistema lineal en un rango de operación concreto, entonces es válido utilizar representaciones de sistemas lineales tipo "Caja negra" donde un ejemplo típico es el modelo representado por la siguiente ecuación.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t)$$
(5.1)

Donde y. (t) representa la salida, u(t) representa la entrada, e(t) las perturbaciones del tipo ruido blanco.

#### 5.1.1.3 Formulación de un criterio

Es necesario formular un criterio cuando se tiene un problema de identificación, este debe ser de reducción de error y así obtener un modelo que se ajuste a datos experimentales, mediante hipótesis estadísticas se pueden deducir estos criterios de base probabilística. Frecuentemente los criterios de los sistemas discretos se expresan de la forma siguiente:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^{n} g(\varepsilon(t))$$
 (5.2)

Donde  $\varepsilon(t)$  es el error de entrada,  $g(\varepsilon(t))$  el error de salida o un error generalizado, frecuentemente g se elige del tipo cuadrático, pero puede ser de muchas otras formas. Gauss formuló el problema de identificación como un problema de optimización e introdujo el principio de mínimos cuadrados, un modelo basado en la minimización de la suma de los cuadrados del error.

Cuando las perturbaciones de un proceso se describen como procesos estocásticos o al azar, el problema de identificación se formula como un problema estadístico de estimación de parámetros.

#### 5.1.1.4 Estimación de parámetros

Resolver un problema de estimación de parámetros requiere de los siguientes componentes:

- a) Datos de entrada y salida del proceso
- b) Una clase de modelos
- c) Un criterio

La estimación de los parámetros se puede formular como un problema de optimización en que el mejor modelo es aquel que se ajusta a los datos, de acuerdo a un criterio dado.

### 5.1.1.5 Validación del modelo

Luego de haber obtenido el modelo a partir de datos experimentales es necesario comprobarlo para encontrar sus inadecuaciones y lograr una mayor reproductibilidad del proceso. Para llevar a cabo esta validación es útil determinar factores tales como respuesta a un escalón, respuesta a impulsos, polos y ceros, errores del modelo y errores de predicción.

La validación determina los posibles defectos del modelo y diagnosticar sus características si estos efectos no aparecen entonces el modelo está listo para ser utilizado caso contrario se repiten los ciclos iterativos de identificación hasta que se encuentren con un modelo apropiado.

#### 5.2 Métodos de identificación

Es posible efectuar múltiples clasificaciones de métodos de identificación, teniendo en cuenta las mediciones disponibles y la forma de aplicación del sistema de identificación se distinguen los siguientes métodos:

- a) Métodos de identificación en línea, su aplicación es posible sin perturbar significativamente las condiciones de trabajo del sistema.
- b) Métodos de identificación en tiempo real.
- c) Métodos que utilizan mediciones históricas de funcionamiento del proceso. Estos son imprescindibles cuando no es posible realizar ensayos o resulta muy costoso.
- d) Métodos que utilizan la respuesta ante señales de ensayo sobre el sistema.

Considerando las características de los modelos que se pretenden obtener permite establecer otras clasificaciones de métodos de identificación, estas son:

- Métodos de identificación de modelos no paramétricos
- Métodos de identificación de modelos paramétricos

## 5.2.1 Métodos de identificación de modelos no paramétricos

Este tipo de métodos se caracterizan porque se pueden determinar los parámetros del modelo mediante gráficos, aunque su precisión no es tan alta fueron utilizados por mucho tiempo, hoy en día existen programas que han desarrollado algoritmos para mejorar su precisión. Estos modelos no tienen una relación directa con parámetros que rigen las leyes físicas o químicas de cada proceso.

A continuación se nombran algunos de estos métodos:

- Análisis transitorio: La entrada es un escalón o un impulso y los datos de salida constituyen el modelo
- Análisis en frecuencia: La entrada es sinusoidal. Para un sistema lineal en estado estacionario. Los cambios de amplitud y de fase darán la respuesta en frecuencia.
- Análisis de correlación: La entrada es un ruido blanco. Una función normalizada de covarianza cruzada entre la salida y entrada proporcionara las funciones de peso.

### 5.2.1.1 Métodos basados en las respuestas a escalón o métodos gráficos

Este método es considerado como la prueba más utilizada en la práctica pero solo puede lograrse de forma aproximada ya que es imposible lograr un cambio brusco de una variable en un tiempo infinitesimal, una de las ventajas de ese método es su sencillez y su corto periodo de identificación, como desventaja se puede mencionar la introducción de

una alteración relativamente grande en el comportamiento del sistema lo cual no es siempre permisible, ahora el procedimiento para obtener los parámetros del modelo será correspondiente al modelo propuesto para la identificación, estos métodos pueden ser los siguientes.

### • Método de primer orden:

Para un sistema del tipo

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \tag{5.3}$$

Es necesario estimar la ganancia K y la contaste de tiempo  $\tau$ .

A continuación se muestra un ejemplo obteniendo una función de transferencia de primer orden, a partir de un modelo a lazo abierto, por lo tanto excitaremos el sistema con una entrada escalón de amplitud  $r_1 - r$ , a partir de cualquier estado estacionario.

La ganancia calculada tendrá la siguiente forma:

$$\frac{c_1 - c}{r_1 - r} = \frac{\Delta c}{\Delta r} \tag{5.4}$$

Y la constante de tiempo  $\tau$  se calcula tomando el valor de t para el cual  $k=c+0.63\Delta c$ , quiere decir que la respuesta del valor de c(t) ha alcanzado el 63.2% de su variación real. En la figura 5.1a se muestra la entrada escalón del flujo de vapor, se calcula  $\Delta r$  y la figura 5.1b muestra la respuesta del sistema, se calcula  $\Delta c$ .

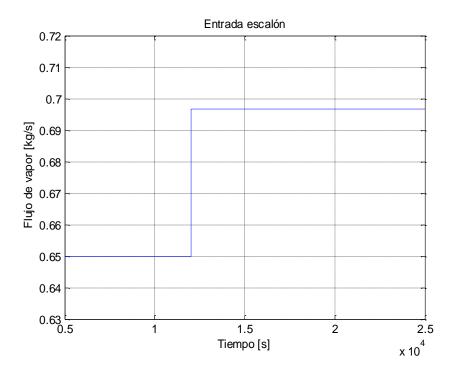


Fig. 5.1 Entrada escalón

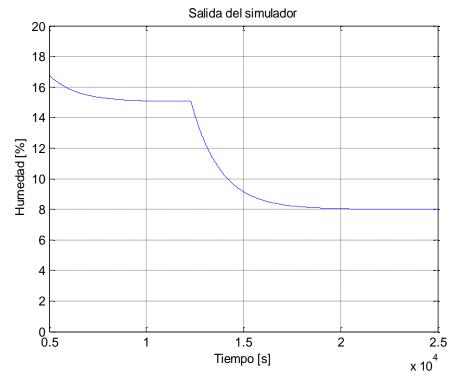


Fig. 5.1b Salida del simulador en % de humedad

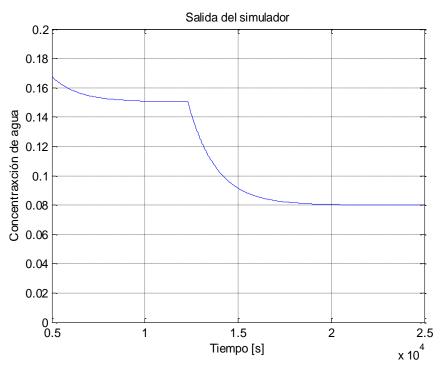


Fig. 5.1c Salida del simulador en concentración

De la figura 5.1c tenemos que:

$$\frac{0.0820 - 0.1505}{0.69667 - 0.65} = \frac{\Delta c}{\Delta r} \tag{5.5}$$

El valor de la ganancia K = -1.4668y la constante de tiempo  $\tau = 1500s$  obteniendo la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{-1.4668}{1500s + 1} \tag{5.6}$$

La figura 5.2 muestra el curva que representa el modelo y también la curva que representa la función de transferencia, se puede observar que son muy parecidas, por lo tanto la aproximación es muy precisa, cabe mencionar que esta función de transferencia se ha hecho alrededor de un punto de trabajo, teniendo en cuenta los siguientes valores de entrada en el modelo, flujo de vapor en *t*=0s es de 0.65 [kg/s] y en *t*=12000 0.69667 [kg/s] correspondiente a la figura 5.1a, flujo de *keke integral* = 0.9828 [kg/s], humedad de entrada 62% y de salida la humedad =8.2%, equivalentes a concentraciones en la entrada 0.62 y a la salida 0.082.

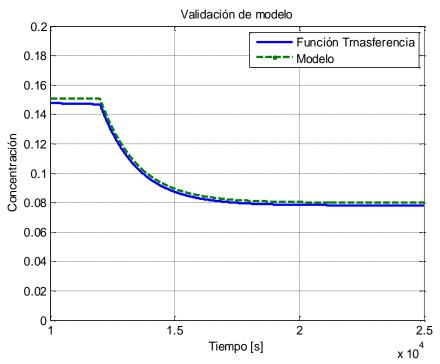


Fig. 5.2a Validación de función transferencia expresada en concentración de agua

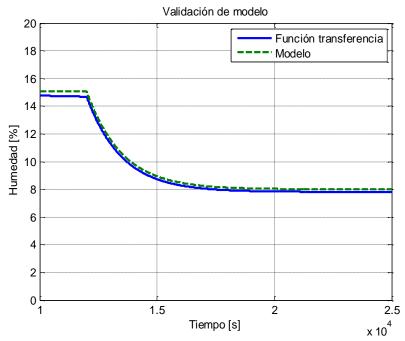


Fig. 5.2b Validación de función transferencia expresada en % de humedad

Además de este método grafico de primer orden existen otros métodos los cuales solo se mencionaran porque no se aplicaran en el modelo estudiado.

## • Método de Oldenbourg - Sartorius

Se utiliza para sistema de segundo orden oscilatorio, la ganancia se calcula de igual manera que en la de primer orden

$$K = \frac{\Delta c}{\Delta r} \tag{5.7}$$

Ahora la función de transferencia tendrá la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K}{(t_1 s + 1) * (t_2 s + 1)}$$
(5.8)

# • Respuesta escalón ante sistemas oscilatorios

Es conocido que un sistema de segundo orden tenga la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{Kw_n}{s^2 + 2\xi w_n + w_n^2}$$
 (5.9)

Estos parámetros se pueden obtener identificando gráficamente los valores de sobre oscilación (*Over Shoot*=OV), siendo esta la primera oscilación de la gráfica 5.3.

$$OV = e^{\frac{\xi \tau}{\sqrt{1-\xi^2}}} \tag{5.10}$$

Donde  $\xi$  es el coeficiente o factor de amortiguamiento.

Para obtener la frecuencia natural no amortiguada  $w_n$  se utilizan las siguientes expresiones

$$w_n = \frac{w}{\sqrt{1 - \xi^2}}; \quad w = \frac{2\pi}{t}$$
 (5.11)

Donde t es el tiempo que hay entre el pico mayo y el siguiente, conocido como el periodo de oscilación amortiguada.

En la figura 5.3 se puede observar un sistema amortiguado que tiene la siguiente función de transferencia

$$G(s) = \frac{1}{(s^2 + 0.5s + 1)}$$
 (5.12)

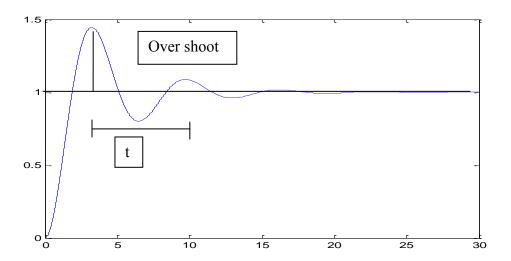


Fig. 5.3 Sistema oscilatorio

## Método de Strejc, modelo de orden n

Este método es usado para los modelos que tienen la siguiente forma

$$G(s) = \frac{K}{(s+1)^n} \tag{5.13}$$

Se debe estimar los valores de K,  $\tau$  y n a partir de la respuesta a una entrada escalón, de igual forma que en el método de primer orden, la ganancia K se calcula con la relación de  $\frac{\Delta c}{\Delta r}$ , se traza la curva que representa al sistema y luego se traza la tangente al punto de inflexión determinados por los tiempos  $T_L$  y  $T_A$  de la figura 5.4

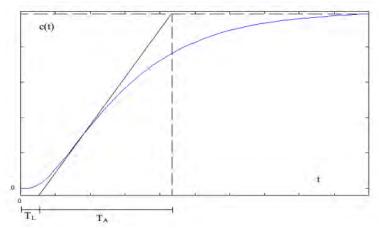


Fig. 5.4 Determinación de  $T_L$  y  $T_A$  para la aplicación del método de Strejc

La relación que existe entre  $T_L$  y  $T_A$  es una función de n, estas son proporcionales al valor de  $\tau$  y estos factores de proporcionalidad dependen de n, la tabla N°5.1 muestra las relaciones entre  $T_L$  y  $T_A$  y  $\tau$  en función de n. Tabla N° 5.1 Relaciones

n	$\frac{T_L}{T_A}$	$\frac{T_A}{\tau}$	$\frac{T_L}{\tau}$
2	0.104	2.718	0.282
3	0.218	3.695	0.805
4	0.319	4.463	1.425
5	0.410	5.119	2.106
6	0.493	5.7	2.811

Primero sería necesario obtener los valores de  $T_L$  y  $T_A$  del gráfico de la respuesta del sistema escalón luego con esos valores establecer la relación entre estos dos valores  $\frac{T_L}{T_A}$ , ahora con el valor de  $T_A$ / $\tau$  de la tabla anterior corresponde al valor de un n determinado anteriormente y el de  $T_A$ , se calcula  $\tau$ .

### • Método de correlación. Forma continua

Estos son métodos no paramétricos se basan en la aplicación de señales aleatorias a la entrada y actualmente son de gran importancia.

Se deben conocer dos conceptos importantes:

• La función de correlación cruzada entre dos variables aleatorias r(t) y c(t) se designa por:

$$R_{rc}(t_2) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} r(t)c(t+t_2)dt$$
 (5.14)

Esta función da una medida de la dependencia del valor de una variable en  $t+t_2$  con respecto al valor de la misma variable en t.

Se sabe que si r(t) y c(t) son las variables de entrada y salida de un sistema, cuya respuesta a un impulso o función pesante es g(t), se puede plantear que:

$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t - t_1)g(t_1)dt_1$$
 (5.15)

De manera que  $c(t+t_2)$  está dada por:

$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t + t_2 - t_1)g(t_1)dt_1$$
 (5.16)

Si se sustituye  $c(t+t_2)$  en la correspondiente función de correlación cruzada, se tiene que:

$$R_{rc}(t_2) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} r(t)dt \int_{-\alpha}^{\alpha} r(t + t_2 - t_1)g(t)dt_1$$
 (5.17)

Y al intercambiar el orden de integración se obtiene:

$$R_{rc}(t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t_1)dt \left| \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} r(t)r(t + t_2 - t_1)dt \right|$$
 (5.18)

se puede observar que la función entre corchetes corresponde a la función de auto correlación de r(t) en  $t=t_2-t_1$  o sea, que la función de correlación cruzada puede escribirse:

$$R_{rc}(t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{rr}(t_2 - t_1)g(t_1)dt_1$$
 (5.19)

Si se tiene que la señal de entrada aplicada a un sistema tiene función de auto correlación proporcional a una función impulso, entonces,  $R_{rr}(t_2) = k \partial(t_2)$  y sustituyendo en la expresión anterior, se tiene que:

$$R_{rc} = kg(t_2) \int_{-\infty}^{\infty} \partial(t_2 - t_1) g(t_1) dt_1$$
 (5.20)

Dónde:

k es una constante de proporción y  $\partial(t_2)$  es la función impulso

En esta expresión el resultado de la integral es diferente de cero solo cuando  $t_2 = t_1$ , luego puede escribirse:

$$R_{rc}(t_2) = kg(t_2) \int_{-\infty}^{\infty} \partial(t_2 - t_1) dt_1$$
 (5.21)

Y finalmente, dado que:  $\int_{-\infty}^{\infty} \partial(t_2 - t_1) dt_1 = 1$  se llega a:

$$R_{rc} = k\partial(t_2) \tag{5.22}$$

Esto significa que si a un sistema se le aplica como estímulo una señal aleatoria con función de auto correlación dada por  $k\partial(t)$ , el resultado de calcular la función de correlación cruzada de la variable de salida y el estímulo correspondiente es proporcional a la respuesta a impulso. Como esta función caracteriza al sistema se puede decir que hemos identificado el sistema.

En sistemas industriales es posible, a veces, usar las propias perturbaciones aleatorias que sufren las variables de entrada o generarlas.

### 5.2.2 Métodos de identificación de modelos paramétricos. Métodos analíticos

Estos métodos son los más comunes y existe una gran variedad en la literatura, aquí se trata de obtener los valores numéricos de los coeficientes de las funciones o matrices de transferencias o los elementos de las matrices de representación mediante variables de estado.

La forma general de la estructura de un modelo paramétrico en discreto es:

$$y(t) = G(q^{-1}, \theta)u(t) + H(q^{-1}, \theta)e(t)$$
(5.23)

Donde y(t) es la salida del sistema, u(t) es la entrada del sistema y e(t) es un ruido blanco medible

G y H son funciones de transferencia en el operador de retardo q, el cual está definido en forma genérico como:

$$q^{-1}f(t) = f(t-1), f(t+1) = qf(t)$$
 (5.24)

 $\theta$  es el vector paramétrico que contiene los coeficientes G y H.

En muchos casos las funciones G y H son de orden finito. Luego son funciones racionales de  $q^{\wedge -1}$ . El modelo de la ecuación 5.23 se encuentra representado por la figura 5.4.

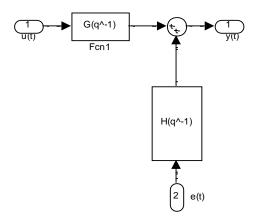


Fig. 5.4 Diagrama de bloques de un modelo general

 $G(q^{\wedge^{-1}},\theta)$  y  $H(q^{\wedge^{-1}},\theta)$  son funciones del vector paramétrico  $\theta$ . La ecuación 5.23 describe un modelo lineal general.

### 5.2.2.1 Estructura general de un modelo SISO

Para un caso general se puede escribir la ecuación (5.23)

$$y(t) = \frac{B(q^{\wedge^{-1}})}{A(q^{\wedge^{-1}})F(q^{\wedge^{-1}})}u(t) + \frac{C(q^{\wedge^{-1}})}{A(q^{\wedge^{-1}})D(q^{\wedge^{-1}})}e(t)$$
(5.25)

En este caso, las funciones  $G(q^{-1})$  y  $H(q^{-1})$  se definen como:

$$G(q^{\wedge^{-1}}) = \frac{B(q^{\wedge^{-1}})}{A(q^{\wedge^{-1}})F(q^{\wedge^{-1}})} y H(q^{\wedge^{-1}}) = \frac{C(q^{\wedge^{-1}})}{A(q^{\wedge^{-1}})D(q^{\wedge^{-1}})}$$
(5.26)

Con:

$$A(q^{\wedge -1}) = 1 + a_1 q^{\wedge -1} + a_2 q^{\wedge -2} + \dots + a_{na} q^{\wedge -na}$$

$$B(q^{\wedge -1}) = b_1 q^{\wedge -1} + b_2 q^{\wedge -2} + \dots + b_{nb} q^{\wedge -nb}$$

$$C(q^{\wedge -1}) = 1 + c_1 q^{\wedge -1} + c_2 q^{\wedge -2} + \dots + c_{nc} q^{\wedge -nc}$$

$$D(q^{\wedge -1}) = 1 + d_1 q^{\wedge -1} + d_2 q^{\wedge -2} + \dots + c_{nd} q^{\wedge -nd}$$

$$F(q^{\wedge -1}) = 1 + f_1 q^{\wedge -1} + f_2 q^{\wedge -2} + \dots + c_{nf} q^{\wedge -nf}$$
(5.27)

El vector paramétrico está definido por la ecuación 5.25

$$\theta = [a_1..a_{na}b_1...b_{nb}c_1...c_{nc}d_1...d_{nd}f_1...f_{nf}]$$
(528)

Dentro de estos tenemos los siguientes casos particulares:

• Si na=nc=nd=0 tenemos:

$$y(t) = \frac{B(q^{\wedge^{-1}})}{F(q^{\wedge^{-1}})}u(t) + e(t)$$
 (5.29)

En este caso  $H(q^{-1}, \theta) = 1$ , la ecuación 5.29 es muchas veces referida como estructura de error de salida, ya que esto implica que:

$$e(t) = y(t) - \frac{B(q^{\wedge -1})}{F(q^{\wedge -1})}u(t)$$
(5.30)

Es el error de salida (OE, *output error*), es decir, la diferencia entre la salida medida y(t) y la salida del modelo  $B(q^{\wedge -1})/F(q^{\wedge -1})u(t)$ .

• Si na=0 tenemos:

$$y(t) = \frac{B(q^{\wedge -1})}{F(q^{\wedge -1})}u(t) + \frac{C(q^{\wedge -1})}{D(q^{\wedge -1})}e(t)$$
(5.31)

La estructura presentada en 5.31 es conocida como BJ (*Box-Jenkis*) una propiedad particular de esta estructura es que  $G(q^{\wedge -1}, \theta)yH(q^{\wedge -1}, \theta)$  no tienen parámetros comunes.

• Si nd=nf= 0  $(D(q^{-1})) = F(q^{-1}) = 1)$ , tenemos la estructura del modelo determinado ARMAX *(Auto Regresive Moving Average)* y está representada por el modelo:

$$y(t) = \frac{b(q^{\wedge^{-1}})}{A(q^{\wedge^{-1}})}u(t) + \frac{C(q^{\wedge^{-1}})}{A(q^{\wedge^{-1}})}e(t)$$
(5.32)

• Si nc=nd=nf=0, tenemos el modelo ARX(*AutoRegresive with External imput*) y está representado por el modelo.

$$y(t) = \frac{B(q^{\wedge^{-1}})}{A(q^{\wedge^{-1}})}u(t) + \frac{1}{A(q^{\wedge^{-1}})}e(t)$$
 (5.33)

#### 5.3 Identificación del modelo

Luego de detallar algunos de los métodos de identificación, se va a excitar el sistema usando el método de respuesta escalón y PRBS (*Pseudo Ramdon Binary Signal*) observando las señales de entrada y de salida en un intervalo de tiempo.

### 5.3.1 Método de respuesta escalón

En este método se excita el modelo del secador rota disco con una entrada escalón positiva y de la gráfica de respuesta se obtendrá la función de transferencia por los métodos descritos anteriormente. Las condiciones iniciales del modelo son: flujo de *keke integral* 0.9828 kg/s y la humedad inicial 62%.

En la figura 5.5a muestra la excitación del sistema con una entrada escalón de flujo de vapor en t=0 segundos a 0.65 [kg/s] y en t=12000 segundos a 0.69667 kg/s de flujo de vapor

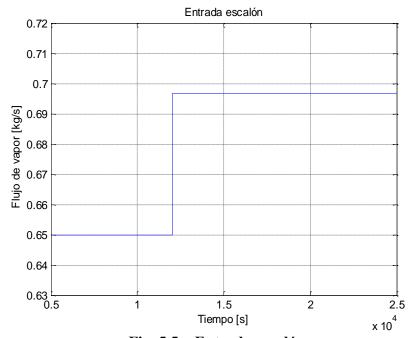


Fig. 5.5a Entrada escalón

La figura 5.5b muestra la respuesta del modelo a la entrada escalón de flujo de vapor. Podemos observar que existe un tiempo donde la harina absorbe el calor para luego evaporar el agua, este es de 300 segundos aproximadamente, este retardo se consideró en el modelo para aproximarlo más a la realidad, a partir de los 300 segundos el sistema empieza su proceso de secado hasta llegar a su valor de salida 8%.

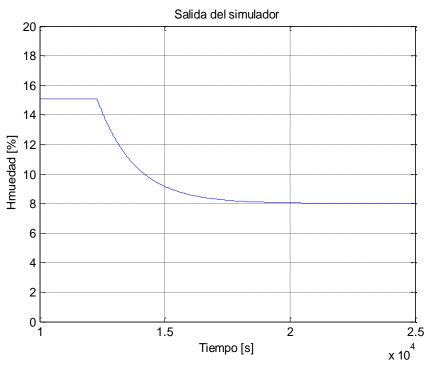


Fig. 5.5b Salida del simulador en % de humedad

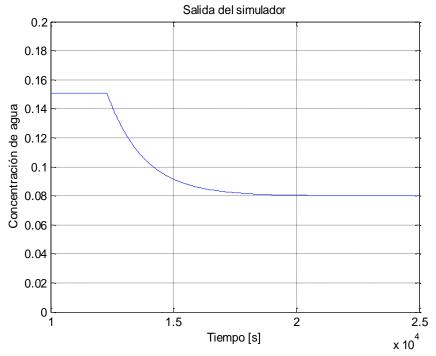


Fig. 5.5c Salida del simulador en concentración de agua

De los gráficos anteriores tenemos que:

$$\frac{0.082 - 0.1505}{0.69667 - 0.65} = \frac{\Delta c}{\Delta r} \tag{5.34}$$

El valor de la ganancia K = -1.4668, constante de tiempo  $\tau = 1500$  y retardo  $\tau_0$  de 300 segundos obteniendo la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{-1.4668}{1500s + 1}e^{-300s} \tag{5.35}$$

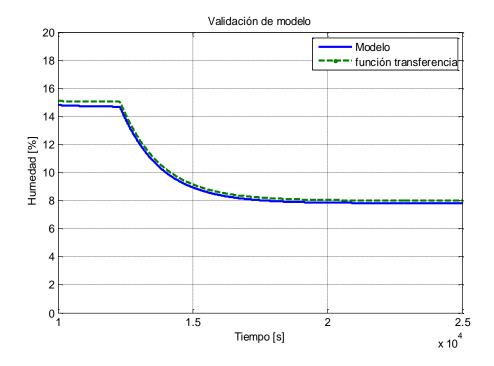


Fig. 5.6a Salida del simulador en % de humedad

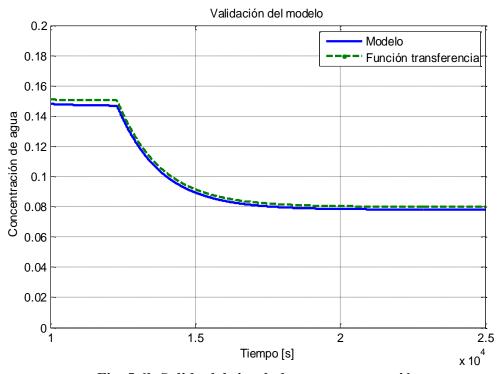


Fig. 5.6b Salida del simulador en concentración

La figura 5.6 muestra la salida del simulador junto con la gráfica de la función transferencia, se observa que existe similitud en las curvas por lo tanto la función transferencia representa de forma aceptable la dinámica del modelo.

## 5.3.2 Cálculo de la PRBS del modelo

Esta vez se excita el sistema con una entrada PRBS (*Pseudo Ramdon Binary Sequence*).

Los datos tomados para la entrada son:

- Tiempo de simulación 105000 segundos
- Tiempo de muestreo 1 segundo
- Valor nominal de la variable manipulable es 0.69667
- Tiempo mínimo de conmutación de la señal 300 segundos
- Valor máximo y mínimo de variación de la señal respecto a la referencia 5 %

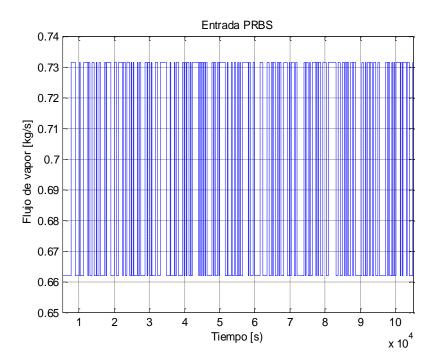


Fig. 5.7 Entrada PRBS

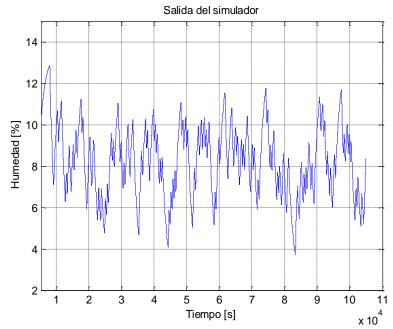


Fig. 5.7b Salida del simulador en % de humedad

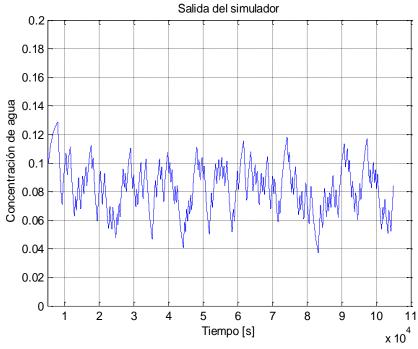


Fig. 5.7c Salida del simulador en concentración de agua

# 5.3.3 Identificación del modelo por el método OE

Aplicando el método de identificación OE se encontró la siguiente función de transferencia con una aproximación al modelo del 87.61 % como se muestra en la figura 5.9.

Tenemos la siguiente función transferencia en discreto:

$$T(z) = \frac{-0.0005964z^{-2} + 0.0005947z^{-1}}{-0.00119z^{-3} + 0.9989z^{-2} - 1.998z^{-1} + 1}$$
(5.36)

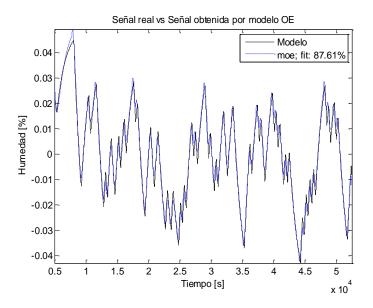


Fig. 5.8 Validación del modelo OE

De la misma manera se aplicara el método de identificación ARMX

# 5.3.4 Identificación del modelo por el método ARMAX

Aplicando el método de identificación ARMAX se encontró la siguiente función transferencia con un FIT del 90.24 % como se muestra en la figura 5.9.

Tenemos la siguiente función transferencia en discreto:

$$T(z) = \frac{-4.452 * 10^{-10} z^{-1}}{0.9844 z^{-4} - 3.953 z^{-3} + 5.953 z^{-2} - 3.984 z^{-1} + 1}$$
(5.37)

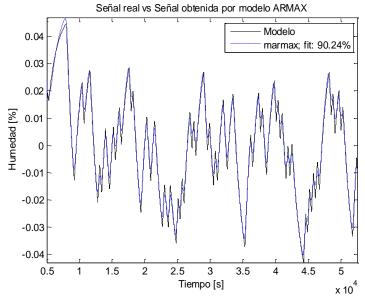


Fig. 5.9. Validación del modelo

# 5.3.5 Identificación del modelo por el método ARX

Aplicando el método de identificación ARX se encontró la siguiente función transferencia con un FIT del 98.28 % como se muestra en la figura 5.14.

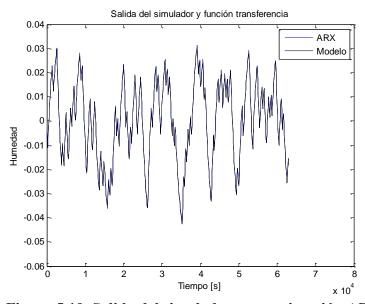


Figura 5.10. Salida del simulador y aproximación ARX

'enemos la siguiente función transferencia en discreto:

$$T(z) = \frac{-0.07288z^{-3} - 0.0255z^{-2} + 0.004313z^{-1}}{-0.08396z^{-3} + 0.3918z^{-2} - 1.248z^{-1} + 1}$$
(5.36)

# Capítulo 6

# Controlador PID, diseño y sintonización

#### 6.1 Generalidades

Debido que casi todos los controladores PID se ajustan en el sitio, en la literatura se han propuesto muchos tipos diferentes de reglas de sintonización, estas permiten una delicada y fina sintonización de los controladores PID. Este capítulo trata del diseño del controlador y cómo variaciones que se presentan en los dominios del tiempo continuo afectan en gran medida las propiedades del sistema de control, estos pueden ser disturbios y ruidos. Revisaremos algunas técnicas de ajuste que corresponden a los métodos empleados en esta tesis, sintonización del controlador y la estructura del PID. Por último se realizara un control predictivo lineal (GPC) del sistema para comparar los resultados de obtenidos.

#### 6.2 Control PID

Desde la mitad de los 90's el control PID ha sido utilizado en más del 90% de los bucles de control para procesos. Además esta última mitad del siglo se ha dado un gran esfuerzo por mejorar el control PID principalmente en el área de las normas de ajuste, esquemas de identificación y las técnicas de adaptación, donde sus mejores prestaciones del controlador solo podrían lograrse si está bien sintonizado. La manera en como los controladores por retroalimentación toman una decisión para mantener el punto de control, es mediante el cálculo de la salida con base en la diferencia entre la variable que se controla y el punto de control. La figura 6.1 representa el clásico diagrama de bloques de un sistema de control a lazo cerrado, donde P(s) es el proceso que es medido por el sensor  $H_m$ , este es controlado por el controlador C(s), la salida del controlador se le denomina con la letra u, la señal de salida y. la señal de entrada con la nomenclatura Ref, se asume que  $H_m = 1$ , pero si es necesario en el análisis la dinámica del sistema de medida puede ser incluido en el proceso P(s). Un controlador PID ideal de tiempo continuo calcula la señal u basada en el error donde los parámetros del controlador son K (ganancia proporcional),  $T_i$  (tiempo del integrador) y  $T_d$  (tiempo del derivativo).

## **Conclusiones**

Hoy en día en muchas empresas productoras de harina de pescado los subprocesos son controlados de manera manual y cada vez son mayores las exigencias en las condiciones finales de la harina de pescado (calidad y propiedades), a raíz de esto nació el interés de plantear el control del proceso de secado de la harina de pescado diseñando técnicas que compensen los grandes retardos debido que las técnicas clásicas de control no mostraron buenos resultados frente a este sistema. Con estos resultados se tiene una idea más clara del proceso así como del control.

- a) Un proyecto de automatización que justifique una mejora en la calidad de producto final en una planta productora de harina de pescado debería comprender desde el subproceso de prensado, controlando la velocidad de rotación del motor que acciona la prensa y luego un control sobre el flujo de vapor de ingreso en el secador. Para ello es necesario un medidor de humedad online que retroalimente los valores de humedad en la salida de cada uno de los equipos. Este equipo de medición *online* se encuentra en implementación en la planta Tierra Colorada de la ciudad de Paita.
- b) De los dos tipos de secadores más comunes para obtener la harina de pescado se elegió el secador indirecto por sus mejoras expuestas anteriormente, para su modelación no se ha considerado las interacciones que existen entre las variables, solo se considera una entrada y una salida en el sistema de control (SISO)
- c) El modelo matemático se dedujo en base las ecuaciones de transferencia de energía y masa para un sistema de parámetros distribuidos. Es importante deducir el modelo matemático del secador en base a la influencia en la salida debido al cambio de variables en la entrada y parámetro de funcionamiento.
- d) De acuerdo a los resultados obtenidos muestran que frente a un cambio de flujo de vapor de entrada se controlaría la humedad de salida, pero en la realidad no es tan cierto pues esta humedad de salida depende de muchos otros factores que son el tiempo de permanencia de la harina dentro del secador, la rotación del secador, la temperatura del vapor de ingreso.
- e) Las técnicas empleadas tales como Ziegler Nichols, Cohen Coon, método de la minimización del error no obtuvieron buenos resultados en cuanto al tiempo de establecimiento y las sobre oscilaciones que presentaba.

Los parámetros del controlador se basan fundamentalmente en los parámetros del proceso por lo tanto se aplicaron técnicas de compensación de retardos tales como (Predictor de Smith y un control predictivo generalizado GPC) sintonizando el controlador como si no tuviera el retardo.

f) De todos los métodos aplicados para el control del sistema se muestra en la figura 6.22 que el control por GPC y Predictor de Smith responden mejor frente a disturbios tales como cambios en la humedad de entrada y en el flujo de masa de harina en la entrada.

## Referencias

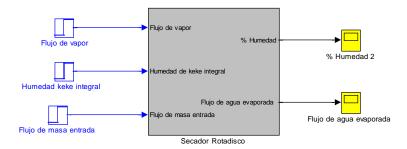
- [1] A. Iguaz, A. Esnoz, G. Martinez, P. Virseda, Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. Abril 2002.
- [2] Åström Hägglund K. J., T., PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nded., Instrument Society of America, 1995.
- [3] Åström, T. Hägglund K. J., "Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control", Journal of Process Control, Vol. 14, pp. 635-650, 2004
- [4] Åström, T. Hägglund K. J., Advanced PID Control, Instrument Society of America, 2005.
- [5] Castaño F., Rubio F. R., Ortega M.G, Modelado de secadores en isocorriente, Revista Iberoamericana de Automática e informática Industrial, Vol 6, N. N 4, Octubre 2009, pp 32-43.
- [6] Carmen Jover, Alastruey. Mutlivariable Control for an industrial Rotary dryer. (2006).
- [7] Canales Eduardo R. , Rodrigo M. Borquez, Diógenes L. Melo, Steady State Modeling of an indirect rotary dryer. 2000
- [8] Cohen G. H., G. A. Coon, "Theoretical Consideration of Retarded Control", Transactions of the ASME, Vol. 75, pp. 827-834, 1953.
- [9] Didriksen Helge, *Model based predictive control of a rotary dryer*, Chemical Engineerin Journal 86 (2002) 53-60.
- [10] Flores A, "Control de procesos con retardo", Universidad de Ingeniería de Ciencias, 2006.
- [11] Hallak H, Hilal J, Hilal F, Rahhal R. The staircase solar dryer: design andcharacteristics. Renewable Energy 1996
- [12] Hoyos A., & Mejia M., Fundamentos de la termodinámica clásica para ingeniería. 2009, pp 133-162.

- [13] Índice de noticias del MINCETUR, 27 de Marzo 2012
- [14] Ipanaqué W., Control Predictivo, Una técnica para el futuro de la industria. 2005, pp 19-48
- [15] M.V Ramana Murthy, A review of new technologic, models and experimental investigations, 2008
- [16] Manrique Jose. Ipanaqué William. Modeling and simulation of a multistage evaporator in ethanol plant using ECOSIMPRO environment. ICCA. Santiago de Chile. Diciembre 2011.
- [17] Ollero P., Arjona R., Vidal F., Automation of an olive waste industrial rotary dryer, 2004.
- [18] O'Dwyer, A. PI and PID controller tuning rules for time delay processes: a summary, Technical Report AOD-00-01, Ed. 1, School of Control Systems and Electrical Engineering, Dublin Institute of Technology, 2000.
- [19] O'Dwyer A., Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, Imperial College Press, London, 2003.
- [20] Sarsilmaz C, Yildiz C, Pehlivan D. Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with solar energy. Renewable Energy2000
- [21] Savaresi SergioM., Bitmead Robert R., Pierce Robert. *On modelling and control of a rotary sugar dryer*. Control Engineering Practice 9 (2001) 249-266
- [22] Smith Julian C. L.McCabe Warren Harriott Peter. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", Cuarta edición, 1998.
- [23] Simón Perez Esther., Modelado y simulación en Ecosimpro de una estación de evaporación en la industria Azucarera. 2005.
- [24] Ziegler, J. G. N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", Transactions of the ASME, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.

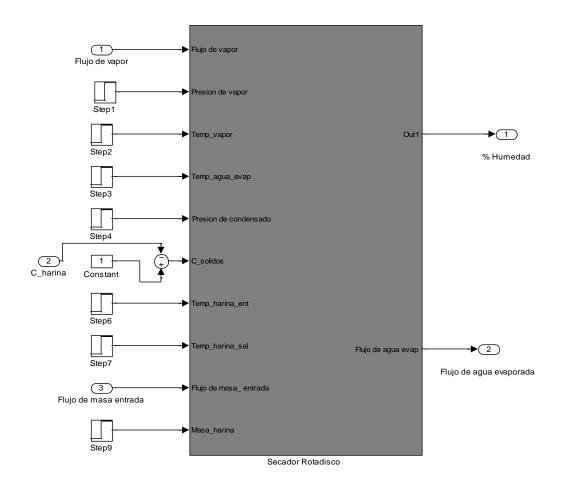
# Anexo A

### Diagrama de bloque

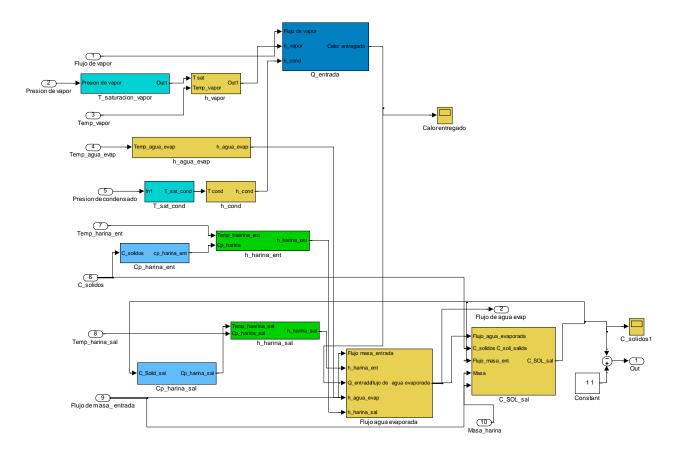
Vista principal del simulador a lazo abierto



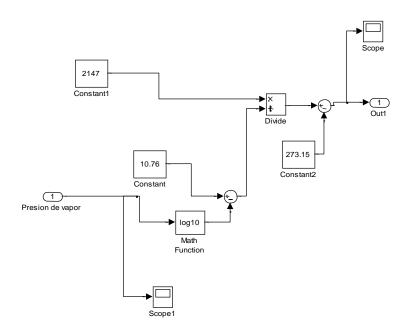
### Vista general del simulador



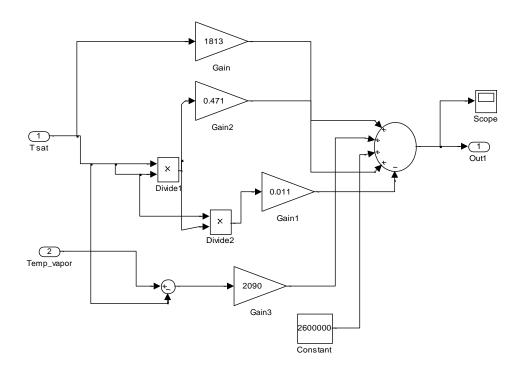
# Vista de los bloques contenidos en el secador



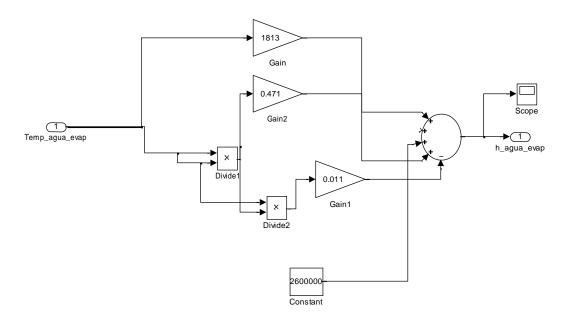
### Calculo de la temperatura de saturación del vapor



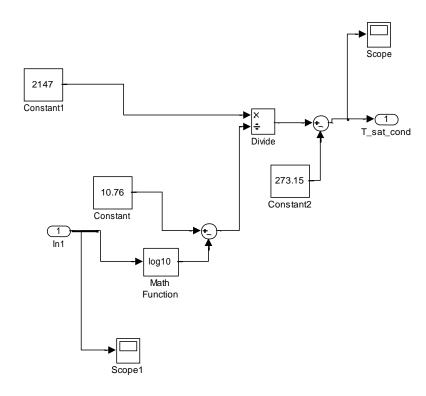
# Calculo de la entalpia de vapor



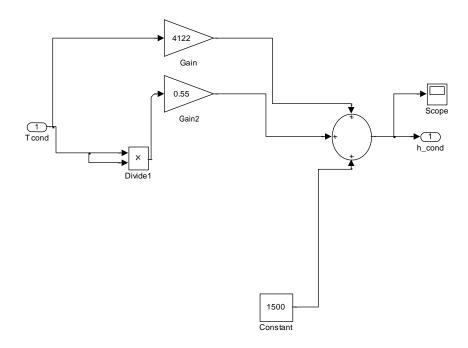
# Calculo de la entalpia del agua evaporada



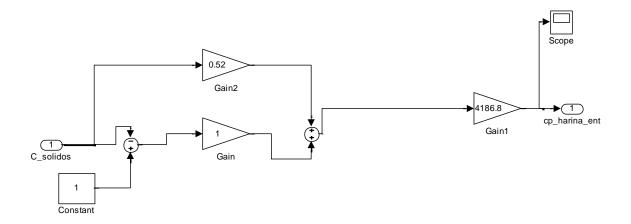
### Calculo de la temperatura de saturación del condensado



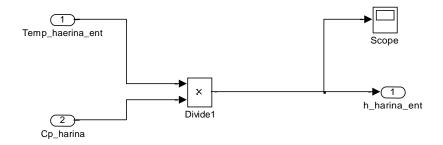
# Calculo de la entalpia del condensado



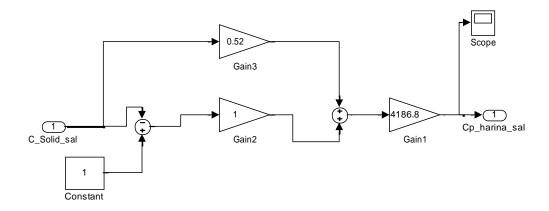
### Calculo del calor específico de la harina a la entrada



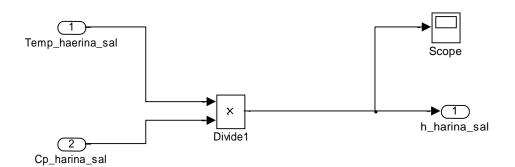
### Calculo de la entalpia de la harina a la entrada



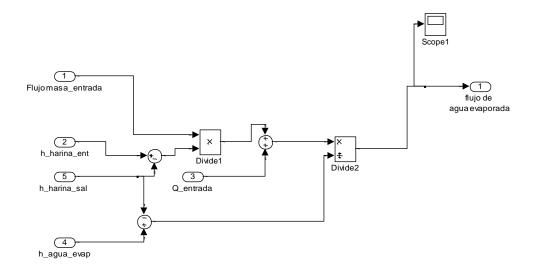
# Calculo del calor específico a la salida



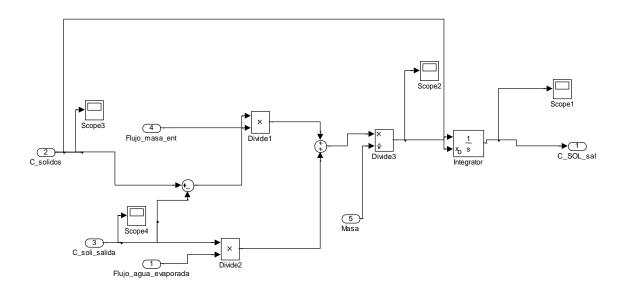
### Calculo de la entalpia a la salida



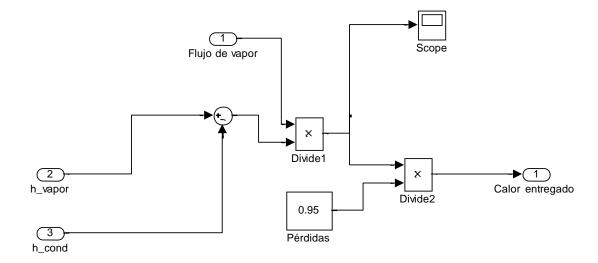
### Calculo del flujo de agua evaporada



### Calculo de concentración de sólidos



### Cálculo del calor entregado por el vapor

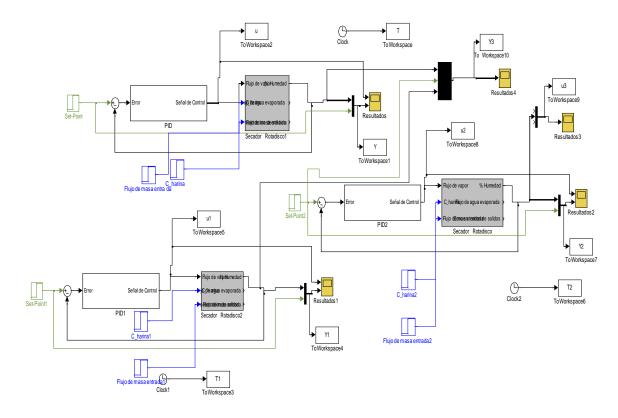


### 1. Representación del modelo matemático del secador en código Matlab

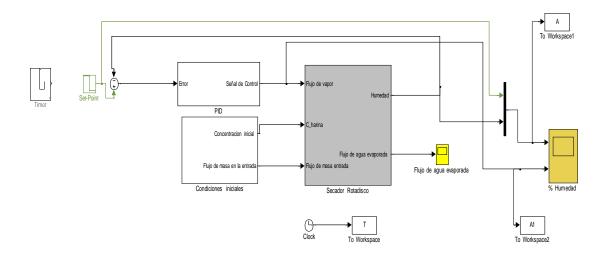
```
%=== BALANCE DE ENERGIA Y MASA DEL VAPOR ===
function [f]=Evapor(t,x,u)
% parametros
Flujo vapor=u(1);Flujo masa ent=u(2);P vapor=u(3);Hume sol=u(4);
P cond=u(5);T entrada torta=u(6);T salida torta=u(7);Tvapor=u(8);masa harina=u(9);
H sol sal=x(1);
% Calculo del Porcentaje de solidos y agua en la masa [kg/s]
%=
Flujo solidos=Flujo masa ent*(Hume sol);
Flujo agua ent=Flujo masa ent*(1-Hume sol);
%Cálculo de la entalpia del vapor de ingreso [j/kg]
Tsat_vapor=(2147/(10.76-log10(P_vapor)))-273.15;
h vapor=(2.6*10^6)+1813*Tsat vapor+0.471*(Tsat vapor)^2-
0.011*(Tsat vapor)^3+2090*(Tvapor-Tsat vapor);
%====
%==== Calculo de la entalpia de agua evaporada==
T agua eva=100
h agua evap=(2.6*10^6)+1813*T agua eva+0.471*(T agua eva)^2-
0.011*(T agua eva)^3;
% Cálculo de la entalpia del condensado [j/kg]
Tsat cond=(2147/(10.76-\log 10(P \text{ cond})))-273.15;
h cond=1500+4122*Tsat cond+0.55*Tsat cond^2;
%=
% Calculo del calor especifico de la harina en la entrada
% y en la salida
```

```
Cp masa entrada=(1*(1-\text{Hume sol})+0.52*\text{Hume sol})*(4186.8)
Cp masa salida=(1*(1-H \text{ sol sal})+0.52*H \text{ sol sal})*(4186.8)
0/0======
% Cálculo del Calor entregado Qentrada [j/s]
Q entrada=Flujo vapor*(h vapor-h cond)
0/0======
%=== Calculo de la entalpia de la harina de entrada j/kg==
h harina ent=Cp masa entrada*T entrada torta;
%=== Calculo de la entalpia de la harina a la salida j/kg===
h harina sal=Cp masa salida*T salida torta;
% BALANCE DE ENERGIA Y MASA DE LA HARINA
%______
% Calculo Flujo de agua evaporada [Kg/s]
% Cp1 [j/Kg°C]
% Cp2 [j/Kg°C]
%======
Flujo agua ev=(Flujo masa ent*(h harina ent-
h harina sal)+Q entrada*0.95)/(h agua evap-h harina sal)
Flujo harina sal=Flujo masa ent-Flujo agua ev;
Flujo agua sal=Flujo harina sal*(1-H sol sal);
f(1)=(Flujo masa ent*((Hume sol)-
(H sol sal))+Flujo agua ev*(H sol sal))/masa harina;
return
Código de simulación
clear all
u=[0.7\ 0.98\ 821881.08\ 0.38\ 513685.437\ 60\ 90\ 170\ 700]
% parametros
Flujo vapor=u(1);Flujo masa ent=u(2);P vapor=u(3);Hume sol=u(4);
P cond=u(5);T entrada torta=u(6);T salida torta=u(7);Tvapor=u(8);masa harina=u(9)
[t,Y] = ode45(@(t,y)Evapor(t,y,u),[0 10000],0.38);
d=length(Y);
for i=1:d Y1(i)=1-
  Y(i);
end
plot(t,Y1*100,'b');
grid on
```

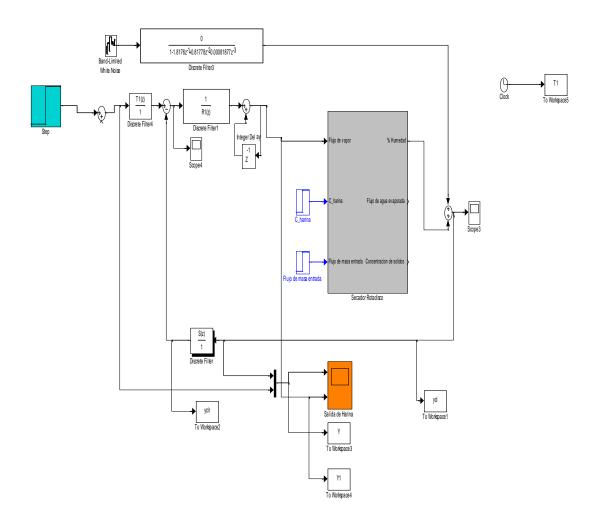
### 2. Esquema representados en simulink del método de control Rovira y Lopez



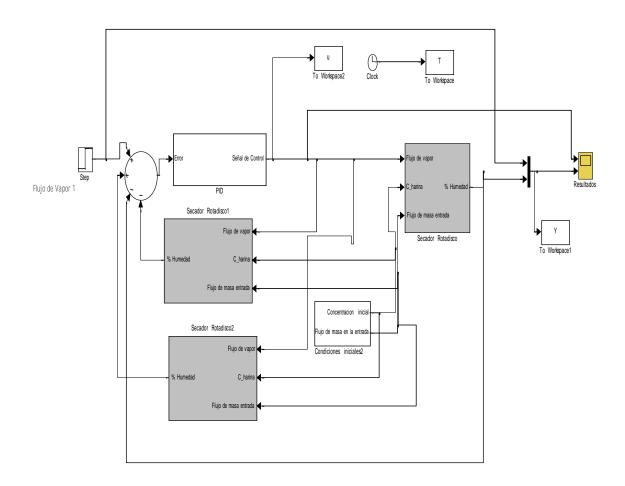
### 3. Esquema representados en simulink del método de control PID



# 4. Esquema representados en simulink del método de control GPC



### 5. Esquema representados en simulink del método de control Predictor de Smith



### 6. Descripción de los equipos utilizados en la Planta

Tabla 1 Cocina

COCINADOR	UNIDADES
Largo de cocinador	8.40 m
Ø de estator	0.960 m
Ø de rotor	0.940 m
Ø eje	0.430 m
Altura helicoidal	0.255 m
Paso helicoidal	0.250 m

Vapor indirecto	01 trampa marca Spirax Sarco Ø 1 ½" Modelo PN 16 GCG 68 4164, con su respectivo filtro Y, Visor.	
Chaqueta	El cocinador tiene 04 chaquetas cada una con purgador de cubeta invertida para vapor Spirax Sarco serie HM 34 de Ø ¾", con su respectivo filtro tipos.	
Vapor directo	04 flautas (02 por lado) cada una con 04 inyectores de vapor de Ø ½".	
PRESIONES DE TRABAJO		
Vapor del eje	55 psi	
Vapor de chaqueta	60 psi	
Vapor directo	15 psi	

### Tabla 2 Pre stainer

MEDIDAS DEL PRE STAINER	UNIDADES
Diámetro de tambor	1.08 m
Altura de la hélice	0.12 m
Paso	0.255 m
Velocidad de rotación del motor	32 rpm
Longitud de malla de agujero	1.97 m
Porcentaje de área perforada	(d = 4.7  mm  c = 7  mm) = 41.970 %
Medidas de caja	Largo: 2.38 m, Ancho: 1.22 m, Altura: 1.08 m

### Tabla 3 Prensa

MEDIDAS DE LA PRENSA	UNIDADES
Largo	5.53 m
Ancho	1.46 m
Distancia entre ejes	0.45 m

Altura	1.83 m
Potencia nominal del motor	60 hp
Amperaje de operación	50 amp
Velocidad de rotación máx/h	3 ½ rpm
Velocidad de rotación mín/h	1 ¼ rpm

# Tabla 4 **Detalle de los tornillos**

DETALLE DE LOS TORNILLOS		
Inicio - Alimentación	Paso – 0.460 m	Ø Eje: 0.180 m
Salida – Descargar	Paso – 0.240 m	Ø Eje: 0.40 m
Humedad de salida	44 - 48 %	

Tabla 5 Secador rota disco

SECADOR ROTA DISCO		
Total de discos		o tiene 1 paleta de avance en forma on y 1 paleta recta, la altura de cada
D	MENSIONES DEL ESTA	ATOR
Largo	8.60 m	
Diámetro	2.22 m	
Área de transferencia	59.61 m2	
DIMENSIONES DEL ROTOR		
Largo	8.20 m	
Diámetro	1.90 m	
Área de transferencia	336.6 m2	
Capacidad	10 t/h Ar	nchoveta
Potencia nominal del motor de l	00 Hp 7.5 t/h Po	ota

Corriente nominal del motor	90 a 100 amp	
Velocidad de rotación del secador	11 rpm	
ESPECIFICACIONES DEL SECADOR		
Es un secador isocorriente de flujo paralelo y de calor indirecto.		

# Tabla 6 **Evaporador de película descendente**

EVAPORADOR DE PELÍCULA DESCENDENTE UNIDADES			
Número de efectos	03		
Material	Carcasa en Fe Ne. Tubos: acero inoxidable		
Fabricación nacional	Asesoría pesquera		
	CALANDRIA 1		
Numero de tubos	194		
Diámetro de tubos	0.032 m		
Longitud de tubo	6 m		
Bomba de circulación	DB 65/26, Descarga 122 m3/h, Motor: 20 hp		
Diámetro de calandria	0.9 m		
Altura de Calandria	10.21 m		
	CALANDRIA 2		
Numero de tubos	118		
Diámetro de tubos	0.032 m		
Longitud de tubo	6 m		
Bomba de circulación	DB 65/26, Descarga 122 m3/h, motor: 15 hp		
Diámetro de calandria	0.68 m		
Altura de Calandria	10.21 m		
CALANDRIA 3			

118		
0.032 m		
6 m		
DB 65/26, Descarga 122 m3/h, motor : 15 hp		
0.68 m		
10.21 m		
NSADOR		
2.73 m		
0.760 m		
6 ½"		
8"		
0.510 m		
LPHX 45316 AB, Motor 15 hp		
TORRE DE ENFRIAMIENTO		
2 m		
2.80 m		
3 m		
15 hp		

### Tabla 7 **Transporte mecánico**

TRANSPORTE NEUMÁTICO	
Diámetro exterior	0.526 m
Ancho	0.270 m
Diámetro eje	3.0"
Diámetro álabes	8"

Diámetro ducto de vahos a condensador barométrico	6 instalados a 60°	
DIMENSIONES	DE LA CARCAZA	
Ancho	2 m	
Diámetro exterior	2.80 m	
Velocidad de rotación	3 Rpm	
Potencia nominal del motor	15 hp	
Intensidad de corriente nominal del motor	20-25 amp	
DUCTO N	EUMÁTICO	
Diámetro	0.40 m	
Longitud	16.25 m	
CIO	CLON	
Diámetro	1.12 m	
Altura cilíndrica	2.430 m	
Ducto interior de ciclón	2.40 m	
Diámetro	0.6 m	
Longitud	1.21 m (inicio 0.16 m sobre tapa de ciclón)	
TEMPERATURA		
Harina	1.12 °C	
Día	2.430 °C	
Noche	2.40 °C	
Invierno	0.6 °C	

Tabla 8 Calderos

CALDEROS 1	
Marca	Johnston Boiler Company
Modelo	PFTA 600 4 HG – 150
Año de fabricación	1993
ВНР	600
Combustible	Bunker 6 / Gas Natural
Presión de trabajo	120 psi
Máxima Presión	150 psi

Tabla 9 **Transportadores helicoidales** 

COLECTOR DE PRENSAS		
Material		
Longitud	6.72 m	
Diámetro de la caja	0.32 m	
Diámetro del eje	3	
Paso helicoidal	0.3 m	
Velocidad de rotación	43 rpm	
Potencia del motor	12 hp	
Intensidad de corriente nominal del motor	6.5 amp	
COLECTOR DE ALIMENTACION MOLINO HUMEDO		
Material		
Longitud	5.52 m	
Diámetro de la caja	0.32 m	
Diámetro del eje	3	
Paso	0.3 m	

Velocidad de rotación	43 rpm	
Potencia del motor	12 hp	
Intensidad de corriente nominal del motor	6.3 amp	
COLECTOR DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR		
Material	Fe, Ne	
Longitud	6 m	
Diámetro de la caja	0.30 m	
Diámetro del eje	3	
Paso	0.26m	
Velocidad de rotación	52 rpm	
Potencia del motor	15 hp	
Intensidad de corriente nominal del motor	6.5 amp	
COLECTOR DE ALIMENTACIÓN A MOLINO SCRAP		
Material	Acero inoxidable	
Longitud	5.02 m	
Diámetro de la caja	0.32 m	
Diámetro del eje	3	
Paso	0.26 m	
Velocidad de rotación	51 rpm	
Potencia del motor	12 hp	
Intensidad de corriente nominal del motor	6.8 amp	
COLECTOR DE CICLÓN DE TRANSPORTE NEUMÁTICO		
Material	Acero inoxidable	
Longitud	5.91 m	
Diámetro de la caja	0.32 m	
Diámetro del eje	3	

Paso	0.26 m
Velocidad de rotación	41 rpm
Potencia del motor	12 hp
Intensidad de corriente nominal del motor	6.2 - 6.8 amp