

**DISEÑO DE UN SECADOR TIPO FLASH PARA DESHIDRATAR ALMIDÓN
NATIVO DE YUCA A NIVEL EXPERIMENTAL**

FRANCISCO JAVIER GIRALDO CUERO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2017**

**DISEÑO DE UN SECADOR TIPO FLASH PARA DESHIDRATAR ALMIDÓN
NATIVO DE YUCA A NIVEL EXPERIMENTAL**

FRANCISCO JAVIER GIRALDO CUERO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director.
MARTÍN ALONSO MORENO SANTANDER
Ingeniero Agrícola, MSc.

Codirector.
THIERRY TRAN
Ingeniero de Procesos, Phd.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2017

Nota de aceptación:

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Santiago de Cali, Febrero de 2017

CONTENIDO

	pág.
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	6
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	7
<u>RESUMEN</u>	8
<u>INTRODUCCIÓN</u>	9
<u>OBJETIVO GENERAL</u>	11
<u>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</u>	11
1. <u>RESUMEN DE RESULTADOS DEL MODELO DE DISEÑO</u>	12
2. <u>ESPECIFICACIONES DEL SECADOR FLASH PILOTO</u>	16
2.1 <u>CONDICIONES DE OPERACIÓN</u>	16
2.2 <u>REQUERIMIENTOS DE CONTROL Y MONITOREO</u>	17
3. <u>DISEÑO DEL SECADOR FLASH PILOTO Y SUS COMPONENTES</u>	19
3.1 <u>GEOMETRÍA DEL DUCTO DE SECADO</u>	19
3.2 <u>SISTEMA ELÉCTRICO CALENTADOR DE AIRE</u>	23
3.3 <u>SISTEMA DE ALIMENTACIÓN</u>	25
3.4 <u>CICLÓN</u>	31
3.5 <u>VENTILADOR</u>	34
4. <u>INSTRUMENTACIÓN: SISTEMA DE MONITOREO Y DE CONTROL</u>	37
4.1 <u>DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA</u>	37
4.2 <u>SENSORES Y TRANSMISORES</u>	40

4.3	<u>CONTROLADORES</u>	43
4.4	<u>PRECISIÓN DE LA MEDICIÓN Y CONTROL</u>	45
4.5	<u>SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO A LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES EXPERIMENTALES</u>	50
	<u>CONCLUSIONES</u>	53
	<u>RECOMENDACIONES</u>	54
	<u>REFERENCIAS</u>	55
	<u>APÉNDICE A. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE Y DEL ALMIDÓN</u>	56
1.	<u>PROPIEDADES DEL AIRE HÚMEDO</u>	56
1.1	<u>TEORÍA DE GASES</u>	56
1.2	<u>PRESIÓN DE SATURACIÓN</u>	56
1.3	<u>CALOR LATENTE</u>	56
1.4	<u>CAPACIDAD CALORÍFICA</u>	56
1.5	<u>PROPIEDADES DE TRANSPORTE: VISCOSIDAD Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA</u>	57
2.	<u>PROPIEDADES DEL ALMIDÓN</u>	58
2.1	<u>DIFUSIVIDAD DEL AGUA EN EL ALMIDÓN</u>	58
2.2	<u>CAPACIDAD CALORÍFICA DEL ALMIDÓN</u>	59
2.3	<u>SORCIÓN ISOTÉRMICA DE AGUA</u>	59
2.4	<u>CALOR DE SORCIÓN</u>	59
	<u>APÉNDICE B. IMAGENES Y PLANOS DEL SECADOR Y SUS PARTES</u>	61

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificaciones iniciales del secador flash	17
Tabla 2. Lista de variables a medir y/o controlar	18
Tabla 3. Descripción del funcionamiento del secador piloto en su capacidad nominal, mínima y máxima como se calculó en el modelo.	21
Tabla 4. Información útil para el dimensionado del calentador de aire	25
Tabla 5. Dimensiones del tornillo alimentador	29
Tabla 6. Condiciones de operación del tornillo alimentador	29
Tabla 7. Dimensiones del ciclón diseñado	32
Tabla 8. Parámetros y rendimiento del ciclón	33
Tabla 9. Caída de presión de los principales elementos del secador en el flujo másico de aire máximo.	36
Tabla 10. Especificaciones funcionales de los Sensores	39
Tabla 11. Especificaciones funcionales de los controladores	40
Tabla 12. Precisiones típicas de los sensores considerados	47
Tabla 13. Resultados de la propagación del error en el calculo de la tasa de sacado con base en las propiedades del aire	47
Tabla 14. Sensores recomendados y su precisión.	48
Tabla 15. Variables del proceso en el balance de masa del almidón	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Resultados de la simulación obtenidos para diferentes diámetros	12
Figura 2. Resultado de la simulación para varios valores de velocidad del aire.	13
Figura 3. Resultado de la simulación para valores de temperatura del aire.	14
Figura 4. Resultado de la simulación para valores de diámetro de partícula.	14
Figura 5. Geometría y dimensiones del ducto de secado	22
Figura 6. Ducto calentador pre-ensamblado	23
Figura 7. Elementos calefactores tubulares aleteados	24
Figura 8. Calentador de aire pre-ensamblado con conexiones de tubería	24
Figura 9. Molino de pines usado para triturar rocas	26
Figura 10. Despiece del molino de pines	27
Figura 11. Despiece del tornillo alimentador	28
Figura 12. Vista seccionada de la descarga del tornillo alimentador	29
Figura 13. Vista en sección del sistema de alimentación	30
Figura 14. Ciclón	32
Figura 15. Diagrama de instrumentación del secador	38
Figura 16. Sensor de humedad capacitivo	41
Figura 17. Flujómetro de dispersión térmica	43
Figura 18. Variación del error relativo en la determinación de la tasa de secado	50
Figura 19. Sensibilidad a las variaciones en la tasa de alimentación de almidón	51
Figura 20. Sensibilidad a la variación de la humedad inicial del almidón	52
Figura 21. Sensibilidad a la variación de la temperatura inicial del aire	52

RESUMEN

En el presente trabajo se encuentran las especificaciones completas para la construcción de un secador flash piloto. El objetivo es construir un equipo experimental que permita investigar los efectos de las condiciones de operación en el rendimiento del secado. El diseño se definió de acuerdo a simulaciones numéricas realizadas en un trabajo previo dedicado al modelado del secado flash de almidón de yuca.

Este documento también presenta el diseño y dimensionado de los equipos que componen el secador, como son, el calentador de aire, el sistema de alimentación, el ciclón y el ventilador. Además se definieron los requerimientos en términos de instrumentación para el monitoreo y control del equipo y se propone una lista de sensores con base en la propagación de la incertidumbre de las medidas en el cálculo del balance de masa.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo hace parte de las actividades de investigación y desarrollo realizadas dentro del programa de investigación del CGIAR: Roots, Tubers and Bananas (RTB). Está enfocado en el desarrollo de equipos eficientes para el secado a pequeña escala de productos derivados de la yuca como almidón y harina. Es la continuación de las actividades de investigación pos-doctorales desarrolladas en el modelado y optimización de secadores neumáticos para almidón de yuca en la Universidad Kasetsart de Tailandia, con el apoyo y la supervisión de CIRAD – Qualisud.

En muchos países tropicales el desarrollo del procesamiento de yuca está ligado a la disponibilidad de equipos de pequeña escala eficientes. El secado es una operación clave en la producción de almidón de yuca, porque tiene una gran influencia en la calidad y ciclo de vida del producto final y porque es la operación del proceso de producción que consume más energía y por tanto la más costosa.

En la mayoría de unidades productoras de almidón y harina de yuca, se emplea el secado solar: el almidón se extiende en láminas delgadas sobre plástico negro y se deja secar al sol durante varias horas. Este método entrega resultados satisfactorios para producción muy pequeña y tiene la ventaja de usar la energía libre y renovable del sol. Sin embargo, ésta tiene muchas limitaciones que la hacen inadecuada a gran escala. Primero, el secado solar directo es difícil de manejar porque se requieren áreas de secado muy grandes y en caso de lluvia el producto se debe recoger rápidamente. Además, son comunes problemas en la calidad del producto ya que este está expuesto a la contaminación externa y la humedad es poco homogénea y mal controlada.

Por otro lado, la demanda local de productos de yuca es limitada, entonces las pequeñas fábricas dispuestas a aumentar su producción necesitan llegar a grandes mercados, nacionales o internacionales y para lograrlo, sus productos deben cumplir los estándares de calidad de la industria. Por lo tanto, muchos procesadores (en Nigeria, Colombia, Perú), tomando ejemplo de fábricas industriales, están intentando desarrollar secadores neumáticos de pequeña capacidad. Sin embargo, fueron reportados muchos problemas como el control de la humedad y gelatinización del producto y baja eficiencia energética.

Entonces se iniciaron varias actividades de investigación para abordar este asunto, incluyendo una investigación pos-doctoral de un año en Tailandia, en donde se desarrollo un modelo numérico para simular el secado neumático de almidón de yuca. Se analizaron los efectos de las condiciones de diseño y operación y con los resultados se establecieron lineamientos para el diseño de secadores flash eficientes. De antemano el modelo fue probado usando datos de varios secadores industriales de gran escala y arrojó resultados muy consistentes. Este trabajo fue publicado en la revista científica *Drying Technology*.

El siguiente paso es usar estas conclusiones en la construcción de un secador flash piloto de baja capacidad con la adecuada instrumentación y control para llevar a cabo un extensivo análisis del rendimiento del equipo y la validación del modelo. Este punto será implementado en el CIAT en un trabajo conjunto con Univalle y CIRAD.

Arnaud Chapuis, PhD en Ingeniería Química y del Medio Ambiente de la Universidad de Toulouse, fue el investigador principal en el desarrollo del modelo numérico, participó, como consultor especializado adscrito al CIRAD, en el estudio que entregó los resultados presentados en este documento. Su participación en el presente proyecto y acompañamiento al estudiante tesista tuvo lugar en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle durante tres meses en el año 2015, en el diseño del secador y sus partes y en la selección de la instrumentación requerida.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un secador tipo flash para deshidratar almidón nativo de yuca

Objetivos específicos

- Definir los parámetros de diseño del secador flash
- Realizar el diseño conceptual del secador flash
- Diseñar en detalle los componentes del secador y la distribución en planta
- Seleccionar la instrumentación necesaria para realizar la correcta evaluación del equipo.

1. RESUMEN DE RESULTADOS DEL MODELO DE DISEÑO

La descripción detallada del modelo de secado y los resultados de la simulación se encuentran en (Chapuis et al., 2015). Este capítulo es un recuento de los principales resultados que justifican algunas elecciones hechas en el diseño del secador piloto. El modelo de secado calcula la transferencia de momento, energía y agua entre el aire y las partículas de almidón a lo largo del ducto de secado. Como resultado entrega los perfiles de velocidad, humedad y temperatura del aire y el almidón durante el proceso. Se asume que las partículas tienen forma esférica y que todas son del mismo tamaño.

El programa de simulación se ajustó para entregar la longitud de la tubería necesaria para alcanzar la humedad del almidón introducida y su correspondiente consumo de energía y así poder analizar el efecto de las condiciones de diseño y operación en el rendimiento del secado. Se evaluaron distintos valores de diámetro del ducto dejando todos los demás parámetros constantes (temperatura y velocidad del aire, tasa de alimentación, etc). Al variar el diámetro se controla el flujo másico de aire y como la tasa de alimentación también es constante, se controla la razón de dilución de almidón, es decir la relación entre el flujo de aire y el flujo de almidón. La Figura 1 presenta el resultado de tal simulación para un secador con una capacidad de producción de 80 kg/h, velocidad del aire en el punto de alimentación (U_a^0) de 15 m/s, temperatura en este punto (T_a^0) de 170 °C, humedad del almidón a la entrada (X_{in}) de 37% y humedad deseada del producto (X_{out}) 12,5%.

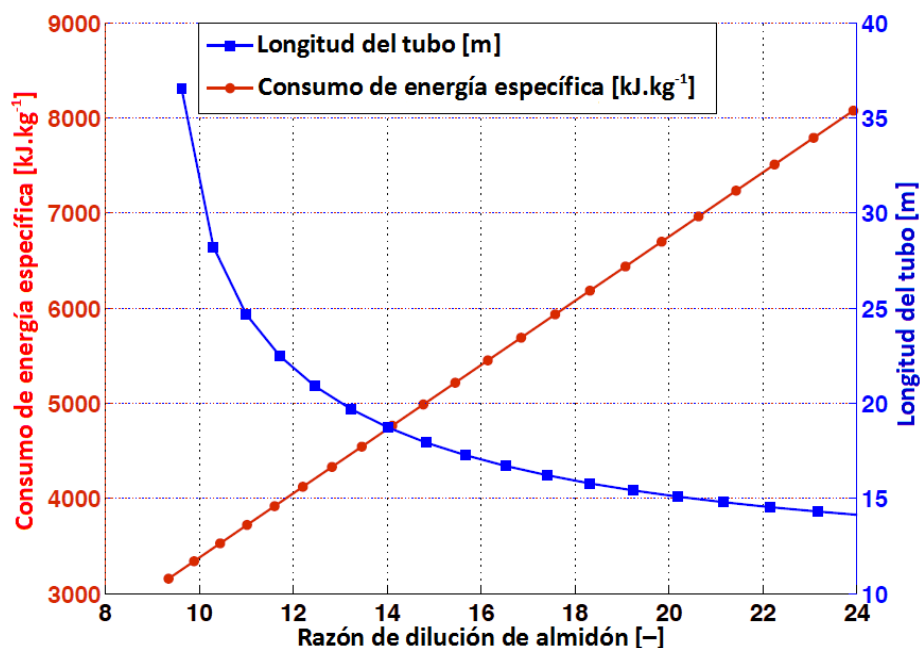


Figura 1. Resultados de la simulación obtenidos para diferentes diámetros del tubo.

El resultado de la Figura 1 hace hincapié en la relación entre la longitud de la tubería y el consumo de energía. Cuando incrementa la dilución, decrece la longitud del tubo necesaria para alcanzar la humedad deseada e incrementa el consumo de energía específica. En otras palabras, con un tubo corto, se necesita un flujo de aire elevado para secar el almidón porque el tiempo de residencia es corto, entonces el aire de secado a la salida continua caliente y no saturado de agua, lo que es un desperdicio de energía. En contraste, un tubo largo proporciona un tiempo de residencia mayor permitiendo que el almidón se aproxime al equilibrio con el aire de secado, resultando en una eficiencia alta. De acuerdo al modelo este resultado es valido para cualquier capacidad de producción.

Para analizar el efecto de otros parámetros, se realizó la misma simulación (variando el diámetro del tubo) usando tres valores de velocidad (U_a^0), tres valores de temperatura (T_a^0) y tres diámetros de partícula (D_p) distintos. Los resultados se presentan respectivamente en las figuras 2, 3 y 4.

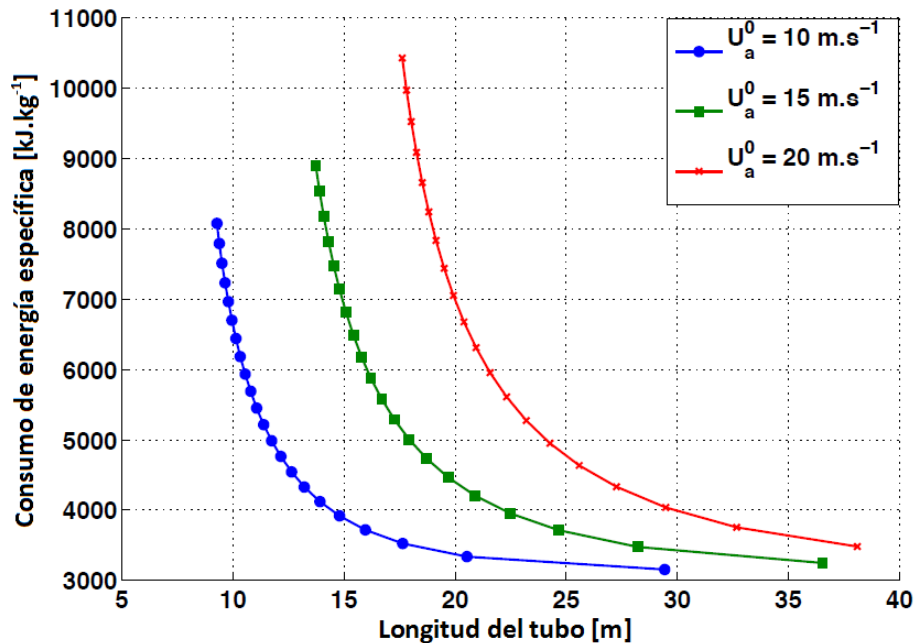


Figura 2. Resultado de la simulación obtenido variando el diámetro del tubo bajo varios valores de velocidad del aire.

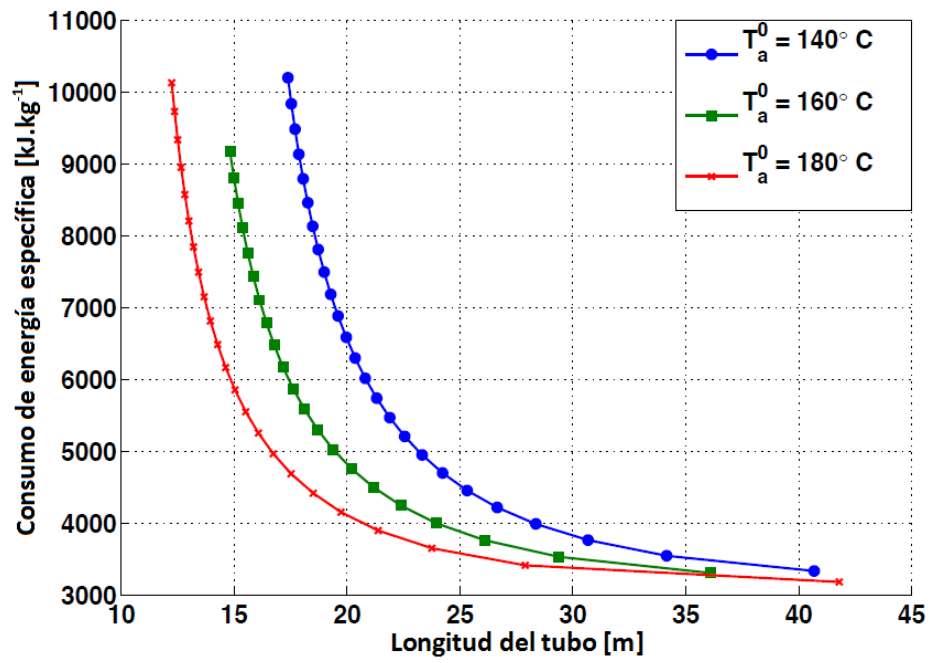


Figura 3. Resultado de la simulación obtenido variando el diámetro del tubo bajo varios valores de temperatura del aire.

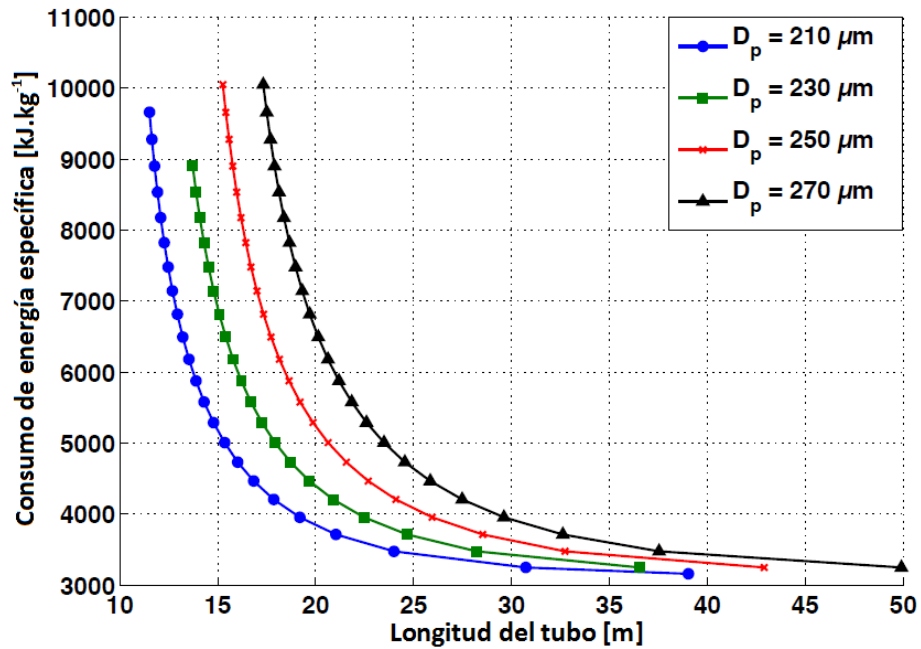


Figura 4. Resultado de la simulación obtenido variando el diámetro del tubo bajo varios valores de diámetro de partícula.

Las observaciones hechas en este análisis fueron sintetizadas para ofrecer los lineamientos generales en el diseño de secadores flash para almidón de yuca:

- La velocidad del aire debe ser tan baja como sea posible pero debe asegurar el adecuado transporte y mezclado de las partículas.
- La temperatura del aire debe ser tan alta como lo permitan las restricciones de calidad del producto (para almidón de yuca, no mayor que 180°C).
- La longitud del tubo debe ser al menos de 20 metros para garantizar un secado eficiente.
- El diámetro del ducto debe proveer un flujo másico de aire de alrededor el 30% del flujo másico de saturación adiabática.

2. ESPECIFICACIONES DEL SECADOR FLASH PILOTO

Esta sección describe las características y funciones deseadas del equipo piloto, incluye las condiciones de operación del secador y los requerimientos en términos de control y monitoreo.

2.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las especificaciones funcionales del secador piloto fueron definidas con base en las necesidades de los participantes del proyecto. El equipo es diseñado para secar almidón nativo de yuca, sin embargo, podría ser ensayado con otros productos derivados de la yuca como harina y almidón agrio. La capacidad de procesamiento deseada era de alrededor 50 kg de almidón húmedo por hora. El contenido de humedad promedio del almidón húmedo es de 35 % w.b. (base húmeda) mientras que el objetivo después del secado es entre 12 y 13 % w.b. Con el equipo se pretende demostrar la factibilidad de construir secadores flash eficientes de pequeña capacidad, el piloto debe exhibir una eficiencia energética alta en las condiciones nominales de operación (idealmente por debajo de 3500 kJ/kg de agua evaporada).

Antes de diseñar el secador, fue necesario definir las condiciones de operación nominal y el rango de variación de las variables del proceso, como se presentan en la Tabla 1. Las elecciones están basadas en los resultados de la simulación numérica presentada en la sección 1 y en observaciones hechas en secadores industriales. Así, fueron fijadas una velocidad del aire baja y una temperatura alta como condiciones nominales para asegurar una eficiencia energética alta. Se escogió un rango de variación relativamente amplio ya que en un contexto experimental es útil investigar los límites prácticos de temperatura y velocidad. La capacidad de producción depende directamente de las condiciones de operación y será calculada en la definición de la geometría del ducto en la sección 3.1.

En la Tabla 1 también se muestran las posibles variaciones en las condiciones ambientales de humedad y temperatura para ser tomadas en cuenta en el dimensionado del equipo.

Tabla 1. Especificaciones iniciales del secador flash: condiciones ambientales y de operación

	Unidad	Valor nominal	Mínimo	Máximo
Variables de proceso				
Capacidad	Kg/h	50	-	-
Velocidad del aire	m/s	12	10	20
Temperatura del aire	°C	180	140	200
Humedad del almidón alimentado	% w.b.	35	34	37
Condiciones ambientales				
Temperatura	°C	30	25	35
Humedad relativa	%RH	70	60	80

2.2 REQUERIMIENTOS DE CONTROL Y MONITOREO

El equipo será operado desde un computador permitiendo ajustar las condiciones de operación y monitorizando las principales variables del proceso. El computador también debe permitir la grabación de datos durante los experimentos. Las variables a medir se requieren para analizar el rendimiento del secador, en términos de eficiencia energética y calidad del producto.

El contenido de humedad del almidón húmedo puede ser controlado o simplemente medido. Cuando viene directamente de una planta procesadora de raíces, se analiza su contenido de humedad, teniendo cuidado de homogeneizar los lotes antes de los experimentos. Si se necesita, el contenido de humedad en el almidón húmedo puede ser controlado preparando lotes de almidón seco y agua.

Las condiciones de operación son controladas por tres variables del proceso: la velocidad del aire a la entrada, la temperatura del aire a la entrada y la tasa de alimentación o flujo de almidón. Por lo cual, el sistema de control debe permitir ajustar y regular estas variables y proporcionar las formas de operación manual y automática, brindando la posibilidad de que el usuario defina las reglas de automatización. Un ejemplo de automatización común en secadores industriales consiste en ajustar la tasa de alimentación para mantener constante la temperatura del aire a la salida. No obstante, se pueden investigar otros caminos.

El análisis de calidad del producto se llevará a cabo probablemente mediante muestreo y análisis de laboratorio, para lo cual no se requiere montar equipos de medición en el secador. Si es necesario, se pueden fijar puntos de muestreo a lo largo del tubo, sin embargo esto no se considera una prioridad y no será incluido en este estudio.

Luego, la evaluación de la eficiencia energética requiere el monitoreo de varias variables. La instrumentación debe permitir la medición de todas las variables necesarias para calcular los balances de masa y energía del proceso, presentados respectivamente en las ecuaciones (1) y (2).

$$\dot{m}_{da} \cdot (Y_{out} - Y_{in}) = \dot{m}_{ds} \cdot (X_{in} - X_{out}) = \dot{m}_w \quad (1)$$

$$\dot{m}_{da} \cdot (h_{out}^{da} - h_{in}^{da}) + \dot{m}_{ds} \cdot (h_{out}^{ds} - h_{in}^{ds}) + Q_{loss} = 0 \quad (2)$$

Donde $\dot{m}_{da}$ es el flujo de aire seco, $\dot{m}_{ds}$ es el flujo de almidón seco, Y_{in} y Y_{out} son la humedad absoluta inicial y final del aire, X_{in} y X_{out} son la humedad inicial y final del almidón, $\dot{m}_w$ es la tasa de secado, h_{in}^{da} y h_{out}^{da} son la entalpía inicial y final del aire seco, h_{in}^{ds} y h_{out}^{ds} son la entalpía inicial y final del almidón seco y Q_{loss} son las pérdidas por calor.

Las variables requeridas para calcular el balance de masa del agua son todas medibles, tanto por el lado del aire como por el lado del almidón. Gracias esto es posible calcular la tasa de secado por dos caminos diferentes, lo que permitiría comparar los resultados para revisar la consistencia de las mediciones. En contraste, el balance de energía es muy difícil de evaluar con una exactitud alta debido a que algunos términos de la ecuación no pueden ser medidos: las perdidas por calor y la entalpía del almidón. De hecho, las características termodinámicas del almidón húmedo no son tan conocidas como las del aire húmedo, el cual ha sido extensamente descrito y tabulado en la literatura.

Por último, para analizar la potencia requerida del ventilador para mover el aire seco a través del sistema, es necesario medir la caída de presión a lo largo del ducto de secado, en el ciclón y en el filtro colector de polvos.

Tabla 2. Lista de variables a medir y/o controlar

Variables a controlar	Variables a medir
Velocidad inicial del aire	Humedad del aire: inicial y final
Temperatura inicial del aire	Temperatura del aire: ambiental, inicial y final
Tasa de alimentación de almidón	Presión: atmosférica, antes del ciclón, antes del ventilador
(Humedad inicial del almidón)	Humedad del almidón: inicial y final
	Temperatura final del almidón

3. DISEÑO DEL SECADOR FLASH PILOTO Y SUS COMPONENTES

Esta sección describe el secador flash piloto diseñado para cumplir las especificaciones funcionales previamente definidas. Incluye la geometría del ducto desarrollado usando el modelo numérico y el diseño de todos los componentes requeridos para operar el secador que son: el sistema de calentamiento de aire, el sistema de alimentación, el ciclón separador y el ventilador.

El diseño de la mayoría de estos elementos se hizo con base en la literatura de procesos de ingeniería, que provee reglas y métodos generales para la selección y dimensionado de equipos industriales (Couper, 2010; Green and Perry, 2007; Mujumdar, 2014). Además de la literatura científica, fue muy útil en el desarrollo del diseño del secador piloto la experiencia práctica adquirida por Arnaud Chapuis en los experimentos conducidos en el laboratorio de secado a escala de KMUTT, Tailandia.

3.1 GEOMETRÍA DEL DUCTO DE SECADO

El ducto de secado está constituido por una sección de subida seguido por una sección de bajada, ya que este diseño convencional ha probado su efectividad en la industria. Además, es probablemente la configuración menos costosa de construir y no existen razones científicas obvias para una forma más sofisticada.

Luego, como la velocidad nominal del aire es baja, el tubo debe incluir una sección Venturi en el punto de alimentación para incrementar la velocidad del aire (de 2 a 3 veces) y asegurar una buena dispersión de las partículas de almidón. Adicionalmente, como se implementa en varios secadores industriales, el diámetro del tubo será ligeramente expandido en la sección de bajada para lograr mayor tiempo de residencia.

El primer paso en la definición de la geometría del tubo de secado fue definir su longitud. De hecho, de acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación numérica, la longitud del ducto de secado puede ser escogida basado en la eficiencia energética deseada, independientemente de la capacidad de procesamiento que está determinada por el diámetro del tubo. Por consiguiente, la longitud del tubo se estableció en 25 m, consiguiendo así unas dimensiones razonables mientras se asegura una alta eficiencia y flexibilidad de operación (variación de temperatura, tasa de alimentación, etc.).

el segundo paso fue definir el diámetro del tubo que entregara la capacidad de producción deseada (50 kg/h) en condiciones nominales de operación. Sin embargo, además de la capacidad, hay otra restricción de tamaño. Mientras que una capacidad muy baja es más conveniente para conducir experimentos, el sistema de alimentación no debe ser demasiado pequeño para evitar problemas de obstrucción. En secadores industriales usualmente está compuesto de una

tolva, un tornillo transportador y un desintegrador (molino de martillos generalmente). Pero, debido al comportamiento grumoso y pegajoso del almidón húmedo, cuando este equipo es muy pequeño tiende a pegarse muy frecuentemente. Por lo tanto, el diámetro del tubo en el punto de alimentación (en la reducción debida al Venturi) debe permitir un espacio estimado para el sistema desintegrador de al menos 10 cm.

Asumiendo que el diámetro del tubo es constante (fuera de la sección Venturi la cual no es modelada), se calculó que, para lograr la capacidad de producción deseada de 50 kg/h, se necesita un tubo de 12,5 cm de diámetro. Sin embargo, en este caso, el diámetro de la sección Venturi debería tener 7,3 cm y 8,9 cm para duplicar y triplicar la velocidad promedio del aire respectivamente. Se juzgó que esto era demasiado pequeño para construir un desintegrador de dimensiones razonables para evitar problemas de obstrucción. Se decidió entonces incrementar la capacidad de procesamiento y así tener más espacio para el alimentador. Finalmente, después de correr el modelo varias veces al ensayo y error, se definió la geometría del ducto de la siguiente manera:

- longitud de secado (del alimentador al ciclón): 25 m
- diámetro en el punto de alimentación: 10 cm
- diámetro en la sección de subida: 15 cm
- diámetro en la sección de bajada: 18 cm

La geometría y dimensiones del ducto de secado son presentadas en la Figura 5. la curva en la parte alta tiene un radio relativamente ancho de 50 cm para evitar una caída de presión excesivamente alta y problemas de transporte. La Tabla 3 entrega una vista general del rendimiento del secador en su capacidad de procesamiento nominal, mínima y máxima. El ensanchamiento del tubo en la sección de bajada permite incrementar la capacidad en 2,9% y disminuir el consumo de energía específica en 3,2%. los datos de la Tabla 3 son útiles para el dimensionado de los componentes presentados en las siguientes secciones.

Tabla 3. Descripción del funcionamiento del secador piloto en su capacidad nominal, mínima y máxima como se calculó en el modelo.

	Unidad	Nominal	Mínimo	Máximo
Condiciones ambientales				
Temperatura	°C	30	30	30
Humedad relativa	%	0,7	0,8	0,6
Aire de secado				
Inicial				
Velocidad del aire	m/s	12	10	20
Flujo másico	kg d.a./s	0,142	0,129	0,227
	kg/s	0,145	0,132	0,232
Temperatura	°C	180	140	200
Humedad absoluta	kg w. (agua)/kg d.a. (aire seco)	0,0213	0,0244	0,0181
Final				
Temperatura	°C	53,4	52,9	66,9
Humedad	kg w./kg d.a.	0,0699	0,0581	0,0675
Flujo másico	kg/s	0,152	0,136	0,243
Almidón				
Inicial				
Tasa de alimentación	kg d.s. (almidón seco)/s	0,0175	0,0098	0,0300
	kg/h	97,0	56,1	164,2
Temperatura	°C	30	30	30
Humedad	% w.b. (base húmeda)	35,1	37,1	34,2
	% d.b. (base seca)	54,0	59,0	52,0
Final				
Humedad	% w.b.	12,8	12,8	12,7
	% d.b.	14,6	14,7	14,6
Temperatura	°C	51,1	49,5	59,5
Flujo másico	kg/h	72,2	40,5	123,8
Energía				
Consumo de energía específica	kJ/kg w	3242	3445	3601
Perdidas de calor a través del ducto	W	357	322	517
Potencia	W	22329	14945	40411

	Unidad	Nominal	Mínimo	Máximo
Indicadores				
Densidad de flujo solido	kg d.s./m ² s	1,0	0,6	1,7
Densidad de flujo de aire	kg d.a./m ² s	8,0	7,3	12,9
Tasa de dilución	kg d.a./kg d.s.	8,1	13,2	7,6

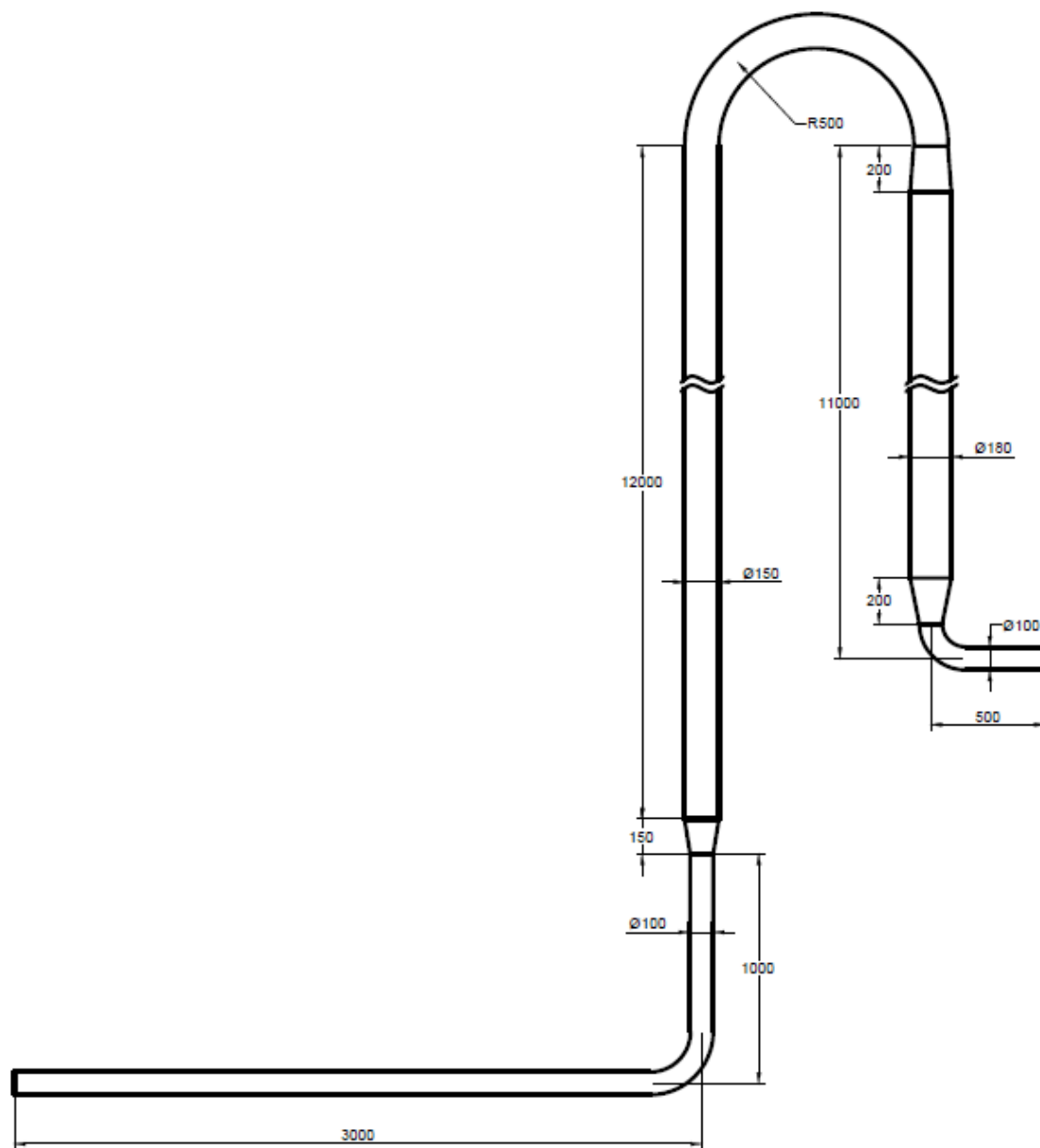


Figura 5. Geometría y dimensiones del ducto de secado

3.2 SISTEMA ELÉCTRICO CALENTADOR DE AIRE

El secador flash necesita un sistema para calentar el aire que permita producir aire caliente a temperatura constante, ajustable entre 140°C y 200°C, para un flujo másico entre 470 kg/h y 840 kg/h correspondiente a una variación de potencia entre 15 kW y 40 kW.

El calentador debe ser fácil de operar y utilizar una fuente de energía disponible en cualquier momento. El costo del equipo debe ser razonable en comparación con el costo total del secador. Dadas las anteriores restricciones la opción más adecuada es un calentador eléctrico. Sin embargo se debe aclarar que un calentador eléctrico puede ser la peor opción para un equipo de producción en cuanto a costo e impacto ambiental. Esta opción es aceptable para un secador experimental, dada la flexibilidad de operación que provee y su bajo costo en comparación con otras soluciones. Un calentador a gas natural habría sido igual de flexible, pero la inversión sería más alta debido al quemador y al intercambiador de calor.

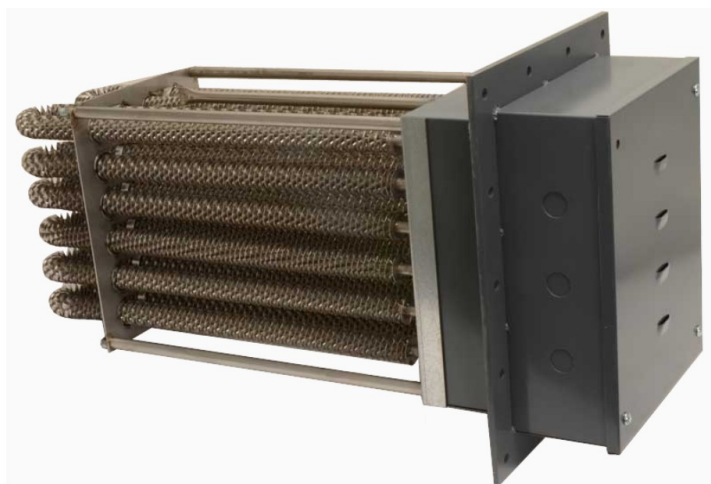


Figura 6. Ducto calentador pre-ensamblado con elementos calefactores tubulares con aletas.
(Tempco Electric Heater Corporation, Wood Dale, USA, www.tempco.com)

Un calentador eléctrico de aire está compuesto por un conjunto de resistencias eléctricas montadas en una brida o insertadas en la tubería, perpendicular al flujo de aire (ver Figura 6). Las resistencias pueden estar desnudas o equipadas con aletas para incrementar el área de intercambio de calor, haciendo el calentador más compacto para potencias equivalentes. Algunos fabricantes elaboran calentadores pre-ensamblados hasta potencias de 100 kW. También hay disponibles elementos calefactores individuales para sistemas personalizados (ver figura 7). Existen en diversas formas, con una potencia unitaria de hasta 6 kW.



Figura 7. Elementos calefactores tubulares aleteados. (Fuente: www.wattco.com)

Para el secador se recomienda usar un calentador con elementos aleteados para mayor compactación y mejor control de temperatura. De hecho, al incrementar el coeficiente de intercambio de calor, las aletas reducen la inercia térmica permitiendo un control de temperatura más preciso. Los elementos deben ser hechos de acero inoxidable o cualquier otro material no corrosivo y resistente a la temperatura.

Si el calentador es comprado ya sea pre-ensamblado o de elementos separados, se deberá construir una carcasa aislada, que incluya las bridas para conectar a la tubería. Un ejemplo de diseño para tales carcasas se da en la Figura 8.



Figura 8. Calentador de aire pre-ensamblado con conexiones de tubería. (Fuente: ELMESS Thermosystemtechnik GmbH & Co, Uelzen, Germany, www.elmess.de)

La mayoría de constructores recomiendan velocidades de entrada del aire entre 1 y 10 m/s, para prevenir sobrecalentamiento de los elementos eléctricos. Un aumento en la velocidad del aire incrementa la transferencia convectiva de calor y esto reduce el área requerida para el intercambio de calor del flujo de aire, y por tanto se reduce el tamaño del dispositivo. La Tabla 4 muestra el flujo y el caudal con la carga más baja y la más alta de operación del secador. El área máxima de la sección transversal del calentador que asegura una velocidad de entrada del aire mayor a 3 m/s con la carga más baja fue calculada de 400 cm² (correspondiente a un cuadrado de 20 cm de lado). En este caso la velocidad de salida del aire con la carga más alta sería de 8,2 m/s, que se encuentra en el

rango recomendado. Además, se requiere una consulta con un fabricante para ir más allá en el diseño, ya que es necesaria más información sobre la potencia y dimensión de los elementos del calentador.

Tabla 4. Información útil para el dimensionado del calentador de aire

	Unidad	Carga más baja (15 kW) ($T_{out} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_o = 10\text{ m/s}$)	Carga más alta (42 kW) ($T_{out} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U_o = 20\text{ m/s}$)
Flujo de aire	kg d.a./s	0,129	0,227
Caudal de entrada (a 30°C)	m^3/s	0,129	0,227
Caudal de salida (a T_{out})	m^3/s	0,177	0,352
Sección máxima para mantener la velocidad de entrada del aire mayor a 2 m/s	cm^2	645	-
Velocidad de salida del aire con la sección máxima	m/s	2,7	5,5

3.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El flujo másico debe ser tan regular y continuo como sea posible, ajustable entre 50 y 160 kg/h. La mayor restricción para el diseño del alimentador es la pobre capacidad para fluir que tiene el almidón, de modo que, cuando pasa a través de secciones pequeñas tiende a formar puentes, causando bloqueos en el sistema. Para evitar el riesgo de atascamiento, las partes del alimentador se diseñaron con las secciones de flujo más amplias posibles. Otra restricción para la construcción es que el sistema no debe permitir la entrada de aire fresco al secador. El diseño se basó en observaciones hechas en secadores industriales y en la siguiente literatura: (Green and Perry, 2007; Mujumdar, 2014).

3.3.1 Desmenuzador: molino de pines

Las partículas de almidón deben ser tan finas como sea posible para asegurar un buen transporte y secado rápido. Si las partículas son muy grandes podrían no alcanzar la humedad deseada o podrían ser demasiado pesadas para ser transportadas. En la mayoría de secadores industriales el desmenuzador es un molino de martillos. Algunos secadores en Sur América usan una válvula rotatoria con una velocidad alta (1800 rpm).

El desmenuzador es más importante en un secador de pequeña capacidad que en uno de gran escala. Como el ducto es pequeño, el flujo de aire es menos turbulento a una velocidad equivalente resultando en un menor efecto de mezclado y dispersión. Además, como la relación entre la superficie de la pared y el volumen interno es mucho más alta en un sistema pequeño, las partículas tienen más probabilidad de golpear la pared del tubo y aglomerarse.

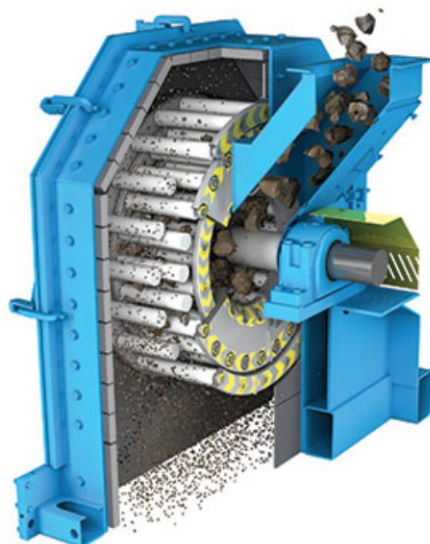


Figura 9. Molino de pines usado para triturar rocas. (Fuente: Stedman Machine Company, Aurora, USA. <http://www.stedman-machine.com>)

De acuerdo a la literatura científica, la mejor tecnología para conseguir un tamaño de partícula fino es el molino de pines en lugar del molino de martillos. Un molino de pines está constituido por una caja cilíndrica que es alimentada por el centro. La caja incluye varias líneas de varillas o pines rotando a altas velocidades en direcciones opuestas. Así, el material grueso es empujado por la fuerza centrífuga hacia la salida a través de las diferentes líneas de varillas, sometiéndose a múltiples impactos y resultando en una tritución fina. La figura 9 muestra una vista general de este principio de operación. Además, esta tecnología es recomendada también para la alimentación de material pegajoso en secadores flash. Los molinos de martillos de menor tamaño tienden a bloquearse cuando trabajan con almidón húmedo. Por estas razones se escogió un molino de pines para desintegrar el almidón.

El dimensionado de este tipo de equipo es mayormente empírico y no se dispone de reglas generales. Para definir las dimensiones apropiadas, se condujeron ensayos con un par de pequeños ventiladores centrífugos, cuyo diseño es similar a un molino de pines con una sola fila de varillas. En el ensayo se alimentó cada ventilador con almidón húmedo a una tasa equivalente a la capacidad máxima del secador para observar si podían dispersarlo. El ventilador con rotor de 8 cm tenía

dificultades para absorber el flujo másico, mientras que el de 15 cm lo hacía con facilidad, ambos ventiladores giraban a 1700 rpm. También se observó que el ventilador centrífugo no entregaba el almidón suficientemente fino, sugiriendo la necesidad de utilizar más de una fila de varillas.

Con base en esta información, se diseñó el molino de pines presentado en la figura 10. Este incluye tres filas de varillas, dos filas móviles y una fija. La fila más pequeña tiene un diámetro de 13 cm y la más grande de 20 cm. El disco móvil debe ir conectado directamente a un motor de 250 W y 1700 rpm. Se recomienda controlar el motor con un convertidor de frecuencia para analizar el efecto de la velocidad rotacional en el rendimiento del secado.

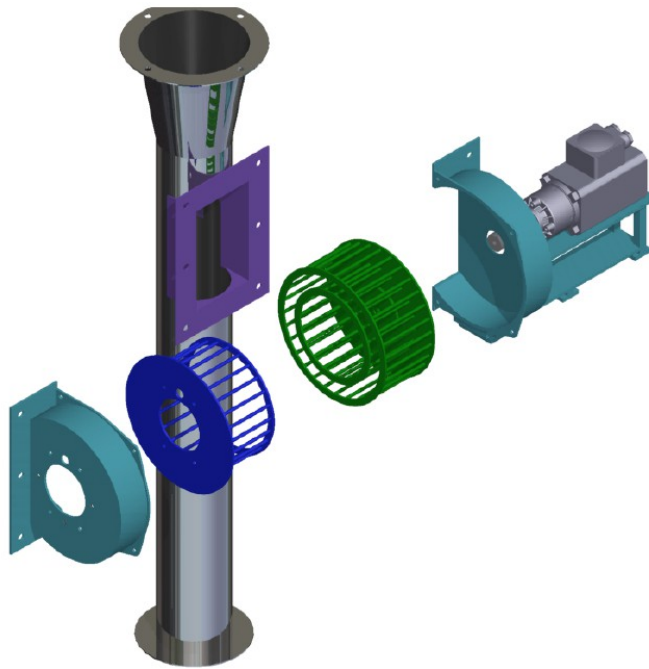


Figura 10. Despiece del molino de pines

3.3.2 Tornillo transportador

La función del tornillo transportador es llevar el almidón húmedo desde la tolva al desintegrador y además regular el flujo másico. En un tornillo transportador, el flujo másico entregado, asumiendo una densidad constante, es directamente proporcional a la velocidad de rotación. Por lo cual, el tamaño de un tornillo transportador puede ser evaluado usando la ecuación (3), con el flujo volumétrico como función de las dimensiones del tornillo y de la velocidad angular.

$$\dot{m}_{st} = \rho_b \cdot 60 \cdot N \cdot p \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot f \quad (3)$$

Donde $\dot{m}_{st}$ es el flujo másico entregado, N es la velocidad angular del eje, p es el paso del tornillo, D y d son los diámetros externo e interno respectivamente y f es el factor de carga del transportador.

El tornillo transportador será ubicado en la parte baja de la tolva, por lo que el factor de carga puede ser considerado entre 95-100%. En experimentos previos se comprobó que la densidad aparente del almidón húmedo (entre 25% y 35%) está en el rango de 380-400 kg/m³. Esta densidad corresponde a almidón no compactado tal como sale de una tolva agitadora.

Luego, el dimensionado consiste en definir el tamaño del tornillo para que el sistema alimentador opere en un rango adecuado de velocidades angulares. Si la velocidad angular es baja, la descarga de producto tiende a ser discontinua porque el almidón cae en bloques al final del tornillo. Por otro lado, velocidades angulares demasiado altas, además de generar un consumo innecesario de energía, ocasiona la formación de puentes en la parte baja de la tolva.



Figura 11. Despiece del tornillo alimentador

Para cumplir con estas restricciones se pueden ajustar tres parámetros, que son: el diámetro del eje y del tornillo y el paso del tornillo. Las características de diseño y operación del tornillo alimentador son presentadas en las tablas 5 y 6. En un tornillo estándar, el paso es igual al diámetro del tornillo. En el presente trabajo, para asegurar buenas dimensiones junto con una velocidad angular relativamente alta, se escogió el paso igual a la mitad del diámetro.

Tabla 5. Dimensiones del tornillo alimentador

	Unidad	Valor
Diámetro	m	0,07
Diámetro del eje	m	0,02
Paso	m	0,035
Volumen generado	m ³ /rev	0,0001237
Densidad aparente del almidón	kg/m ³	380

Tabla 6. Condiciones de operación del tornillo alimentador

	Unidad	Mín	Máx
Velocidad angular	rpm	18	60
Flujo másico entregado	kg/h	50	169

Para evitar acumulación de presión, la hélice del tornillo tendrá forma de arandela en lugar de una hélice llena, como lo recomienda (Mujumdar 2014). Además, el tornillo estará equipado con cuatro palas pequeñas en la zona de descarga al molino para romper los bloques de almidón que se puedan formar y entregar una alimentación continua. El tornillo estará acoplado directamente a un motor de 300 W. El diseño es presentado en la Figura 11 y el ensamble con el desintegrador en la Figura 12.

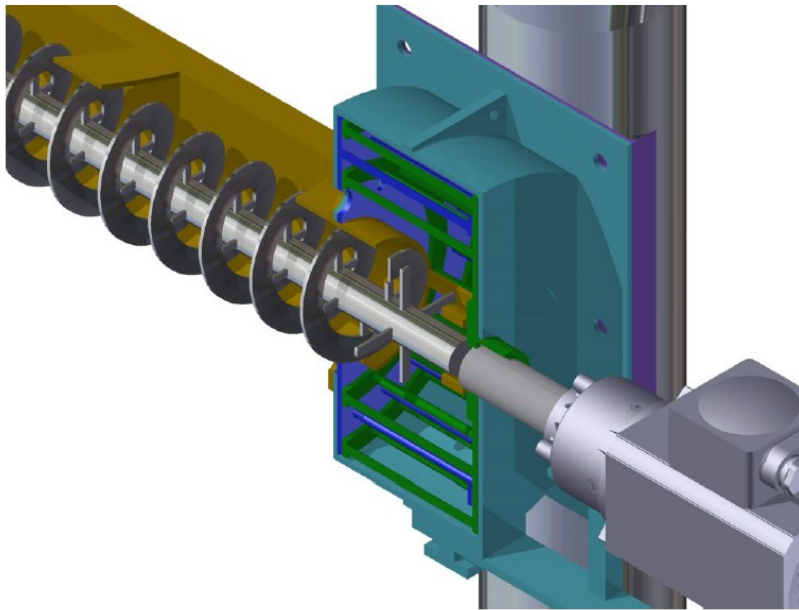


Figura 12. Vista seccionada de la descarga del tornillo alimentador

3.3.3 Tolva

El tornillo alimentador será surtido por una tolva con una capacidad que permita entre 10 y 15 minutos de operación, es decir, al rededor de 20 kg de almidón húmedo. Asumiendo una densidad de 380 kg/m^3 , el volumen de la tolva debe ser cercano a 50 L.

El diseño de la tolva se hizo con base en la tecnología utilizada en la mayoría de las plantas industriales, la cual es simple y efectiva. Consiste en un tanque cilíndrico con una abertura en la parte de abajo que va conectada directamente a la parte de arriba del tornillo alimentador. La tolva incluye un sistema de agitación con un eje vertical unido a dos pares de palas. Las palas de la parte baja del tanque son inclinadas para empujar el almidón dentro del tornillo. Por otro lado, las palas mezcladoras en la zona media del tanque serán orientadas hacia arriba para evitar la compactación del almidón. Una vista seccionada de todo el sistema de alimentación es presentado en la Figura 13.

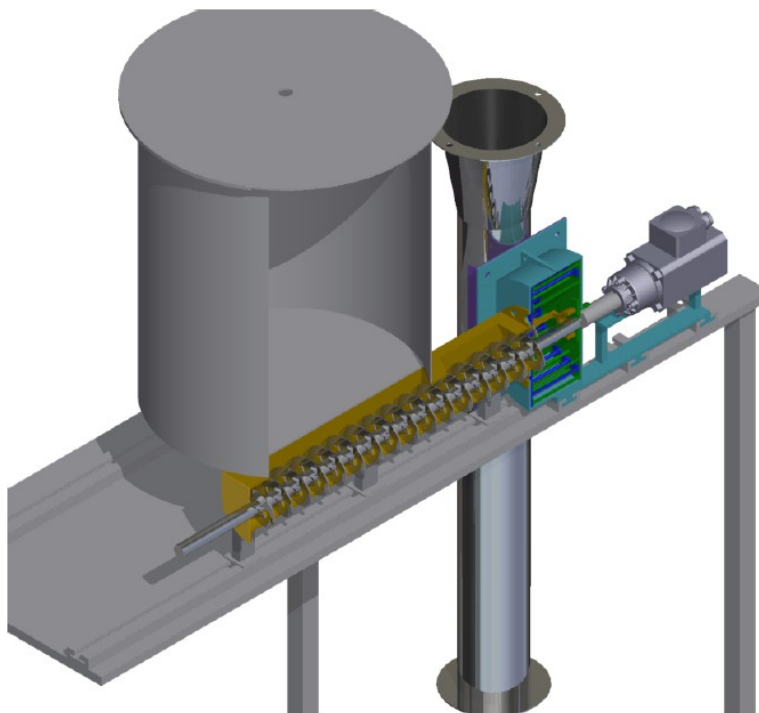


Figura 13. Vista en sección del sistema de alimentación

La velocidad angular de las palas debe ser ajustada a la del tornillo. El rango de velocidad del tornillo es de 18 a 60 rpm. En este caso, la tolva cubre el tornillo en una longitud equivalente a 8 pasos, quiere decir que toma 8 revoluciones vaciar completamente el fondo de la tolva. Entonces, podemos asumir que 4 pasadas de la pala son suficientes para llenar adecuadamente el tornillo antes de que deje la

tolva. Con 2 palas esto implica que el mezclador debe hacer 2 revoluciones cuando el tornillo haga 8.

De modo que la velocidad angular del agitador debe ser proporcional a la del tornillo, en 0,25, es decir, de 4,5 a 15 rpm. Este coeficiente puede ser ajustado después de ensayos prácticos. Debido a la pegajosidad del almidón la potencia del motor debe ser al menos de 500 W.

3.4 CICLÓN

El diseño del ciclón fue optimizado para las condiciones de operación nominal de el secador. Antes de entrar al ciclón la temperatura del aire es cercana a 54 °C (ver Tabla 3) y el caudal correspondiente es 0,164 m³/s. El rango de tamaños de partículas de almidón va desde aproximadamente 10 µm hasta 400 µm. Como las partículas más pequeñas pueden estar formadas por solo uno o dos gránulos de almidón, su densidad es de 1200 kg/m³. Por otro lado, las partículas están formadas por la aglomeración de varios gránulos, entonces su densidad debido a la porosidad desciende a 800 kg/m³. La concentración volumétrica de partículas es de aproximadamente 160 g/m³.

El método utilizado para diseñar el ciclón está ampliamente descrito y explicado en (Echeverri Londoño, 2006). Se basa en tipos de ciclones pre-definidos que tienen proporciones establecidas. Existen tres tipos de ciclones con entrada tangencial: convencionales, de eficiencia alta y de capacidad alta. El procedimiento de calculo del diseño presentado se repitió para cada tipo de ciclón y para distintas dimensiones con el fin de seleccionar el ciclón más adecuado.

El tamaño de partícula y la densidad son importantes para el diseño de un ciclón. Entre más densa y de mayor tamaño sea la partícula es más fácil de separar. Este aspecto se tuvo en cuenta al realizar los cálculos de diseño simultáneamente para tres diámetros de partícula, cubriendo el rango completo de 5 a 450 µm. Como las partículas grandes son fáciles de separar solo se presentan los resultados para tres valores en el rango bajo: 5 µm, 15 µm y 100 µm, con densidades de 1200 kg/m³, 1000 kg/m³ y 800 kg/m³ respectivamente. Como resultado, el método proporciona una visión general del rendimiento del ciclón sobre la distribución completa del tamaño de partícula.

Diseñar un ciclón implica escoger un tipo de ciclón entre los disponibles en la literatura y seleccionar un diámetro. Una vez se selecciona el diámetro, las otras dimensiones son calculadas de acuerdo a las proporciones especificadas para el tipo de ciclón elegido. Para cada tipo de ciclón existen correlaciones para estimar la eficiencia de colección y la caída de presión. La eficiencia de colección es el porcentaje de sólidos separados para un diámetro de partícula dado. De modo que, el ciclón fue diseñado por ensayo y error, ensayando varios tipos de ciclones y luego refinando las dimensiones para ajustarse a las necesidades.

Tabla 7. Dimensiones del ciclón diseñado (tipo Lapple convencional)

Dimensión	Símbolo	Proporción	Valor
Diámetro del ciclón	D_c	1	0,3
Altura de entrada	a	0,5	0,15
Ancho de entrada	b	0,25	0,075
Altura de salida	S	0,625	0,188
Diámetro de salida	D_s	0,5	0,15
Altura parte cilíndrica	h	2	0,6
Altura parte cónica	z	2	0,6
Altura total del ciclón	H	4	1,2
Diámetro salida partículas	B	0,25	0,08
Factor de configuración	G		402,88
Número cabezas de velocidad	N_H		8
Número de vórtices	N		6

La geometría del ciclón seleccionado se muestra en la Figura 14 y sus proporciones en la Tabla 7, donde se incluyen además las dimensiones finales, seleccionadas después de varias iteraciones del cálculo de la eficiencia.

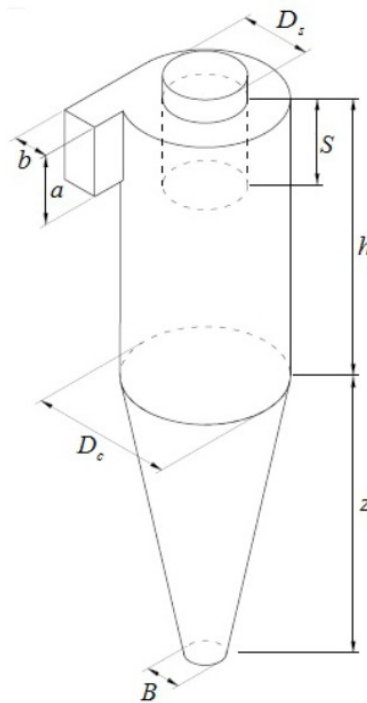


Figura 14. Ciclón

La Tabla 8 presenta el rendimiento del ciclón incluyendo las formulas de cálculo y todos los valores de los parámetros intermedios para los tres diámetros de partícula bajo condiciones de operación nominal. A la salida del ducto de secado, la temperatura es de 53,4 °C y el contenido de humedad es 0,07 kg de agua/kg de aire seco. La densidad y la viscosidad dinámica son $\rho = 0,923 \text{ kg/m}^3$ y $\mu = 1,88 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ respectivamente.

Tabla 8. Parámetros y rendimiento del ciclón

Parámetro	Ecuación	Unidad	Valor		
Diámetro de partícula		μm	5	15	100
Velocidad equivalente	$W = \sqrt[3]{\frac{4 g \mu (\rho_p - \rho)}{3 \rho^2}}$	m/s	0,70	0,66	0,61
Velocidad de saltación	$V_s = \frac{4,913 W K_b^{0,4} D_c^{0,067} \left(\sqrt[3]{V_i^2}\right)}{\sqrt[3]{1 - K_b}}$	m/s	12,02	11,31	10,50
Indicador de resuspensión	$\frac{V_i}{V_s} < 1,35$	-	1,22	1,29	1,39
Tiempo de relajación	$T_i = \frac{\rho_p D_p^2}{18 \mu}$	s	$8,8 \times 10^{-5}$	$6,64 \times 10^{-4}$	0,024
Exponente de vórtice	$n = 1 - (1 - 0,67 D_c^{0,14}) \left[\frac{T}{283} \right]^{0,3}$	-	0,547		
Eficiencia de colección	$\eta = 1 - e \left[-2 \left(\frac{G T_i Q (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{1}{2(n+1)}} \right]$	-	0,75	0,93	1
Eficiencia de colección corregida	$\eta' = 1 - \left(\frac{1 - \eta}{\left(\frac{c}{2}\right)^{0,182}} \right)$	-	0,89	0,97	1
Caída de presión	$\Delta P = N_H \frac{\rho V_i^2}{2} \text{ Con } N_H = 8$	Pa	788		

Donde g : Gravedad, μ : viscosidad dinámica del gas, ρ_p : densidad de partículas, ρ : densidad del gas, V_i : velocidad de entrada del gas, $K_b = b/D_c = 0,25$, T : temperatura del gas, c : concentración de partículas.

Una condición general para asegurar una adecuada operación del ciclón es verificar que la relación entre la velocidad de entrada y la de saltación no sea mayor a 1,35. De lo contrario se produciría resuspensión del material ya

capturado. Como se ve en la Tabla 8 esta condición se cumple para partículas pequeñas mientras que para partículas grandes la relación es ligeramente mayor a 1,35. Sin embargo, en este caso la eficiencia de colección corregida es suficientemente alta ($> 0,99$) para compensar el riesgo de resuspensión además que la razón de velocidad no se encuentra muy arriba del límite (1,39).

Cuando la concentración de partículas es mayor que 2 g/m^3 , se aplica un factor de corrección a la eficiencia para tener en cuenta el hecho de que las partículas son más fáciles de separar cuando están altamente concentradas. Entonces, en condiciones nominales de operación, la eficiencia de colección predicha para el ciclón de acuerdo al diámetro de partícula es de 89%, 97% y 100% para $5 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$ y $100 \mu\text{m}$ respectivamente. De acuerdo a este resultado, las pérdidas totales serán despreciables. La caída de presión correspondiente estimada es de 788 Pa.

Se evaluó el rendimiento para las capacidades de operación máxima y mínima. En la capacidad de operación más baja, la eficiencia de colección es equivalente, se cumple la condición de la relación de velocidades y la caída de presión es más baja. En la capacidad más alta, la eficiencia predicha continua siendo alta y la caída de presión es de 2000 Pa. Sin embargo, la relación de velocidades llega a 1,6 para las partículas más grandes indicando riesgo de resuspensión. Una manera de resolver este asunto es usando un filtro colector de polvos después del ciclón para retener las partículas residuales.

3.5 VENTILADOR

El ventilador es colocado al final del sistema de secado, después del ciclón, y genera el flujo de aire por succión. Esta configuración mantiene una ligera presión negativa en el secador, evitando la expulsión del almidón en caso de fugas en el sistema. Por tanto, en el equipo experimental, se debe tener el mayor cuidado con las filtraciones de aire ya que pueden introducir un sesgo en el balance de masa.

El dimensionado del ventilador toma en cuenta la caída de presión de todos los aparatos del sistema con el flujo de aire máximo. El método aplicado para estimar las perdidas por fricción en las diferentes secciones de la tubería y los accesorios fue obtenido de (Green y Perry, 2007). La caída de presión debida a la fricción en tubos cilíndricos rectos está dada por la ecuación 4.

$$\Delta p = \frac{2\rho f U^2}{D} \cdot L \quad (4)$$

Donde f es un factor de fricción que depende del régimen de flujo y de la calidad de la superficie del ducto. Como la tubería de secado se va a construir en acero inoxidable de alta calidad, se consideró el factor de fricción para tubos lisos. Que fue calculado usando la ecuación de Blasius, presentada en la ecuación 5.

$$f = \frac{0,079}{\text{Re}^{0,25}} \quad (5)$$

Además, las pérdidas por fricción a través de los diferentes elementos de la tubería, como las contracciones o expansiones, fueron evaluados usando la ecuación de Bernoulli dada en la ecuación 6.

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2 \cdot g} \cdot (U_2^2 - U_1^2) + \Delta p_f \quad (6)$$

Donde p_1 y p_2 y U_1 y U_2 son respectivamente la presión y la velocidad del aire antes y después del elemento. Δp_f son las pérdidas por fricción a través del elemento, y se calcula usando la ecuación 7.

$$\Delta p_f = K \cdot \frac{\rho \cdot U_1^2}{2} \quad (7)$$

K es el coeficiente de pérdidas por fricción de acuerdo al tipo de accesorio considerado. A través de una contracción repentina $K = \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)$, donde A_1 y A_2 son la sección del tubo antes y después respectivamente. En la entrada del tubo $K = 1$. En una expansión repentina, $K = \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2$. Para una expansión con un ángulo constante α , se multiplican las pérdidas por $2,6 \sin(\alpha/2)$ para tener en cuenta una reducción. El secador flash incluye dos expansiones, ambas con un ángulo de divergencia cercano a 15° . por último, a través de un codo de 90° $K = 0,75$ y a través de una curva de 180° $K = 1,5$.

El ventilador debe ser dimensionado según la máxima potencia requerida por el secador (ver ecuación 8), la cual se alcanza con el flujo de aire máximo, es decir a 140°C y 20 m/s , donde el flujo másico de aire seco es $0,260 \text{ kg/s}$. Asumiendo un contenido de humedad de $0,7 \text{ kg}$ de agua/ kg de aire seco a la salida, el flujo másico de aire total es $0,280 \text{ kg/s}$, correspondiente a un caudal de $775 \text{ m}^3/\text{h}$ en condiciones estándar de temperatura y presión (0°C ; $100\,000 \text{ Pa}$; $\rho = 1,292 \text{ kg/s}$). Inversamente, el flujo másico más bajo de aire, se alcanza con la velocidad de 10 m/s y 200°C , es igual a $0,122 \text{ kg/s}$ correspondiente a $340 \text{ m}^3/\text{h}$.

Usando el método descrito, se calculó la caída de presión a lo largo de varios elementos de tubería, con el flujo de aire máximo. La Tabla 9 muestra el resumen de estos resultados. las pérdidas por fricción a través de los tramos de tubería recta se obtuvieron de simulaciones numéricas. La caída de presión a través del ciclón se estimó en el método de dimensionado descrito en la sección correspondiente. El colector de polvos normalmente opera con una caída de

presión entre 500 y 1500 Pa, para permitir eventuales picos de presión mayores, el valor máximo se incrementó.

Tabla 9. Caída de presión de los principales elementos del secador en el flujo másico de aire máximo.

Elemento	Caída de presión (Pa)
Entrada al ducto	842
Tramo recto 1 (aire frío)	256
Sistema calentador de aire	500
Sección recta 2 (aire caliente)	246
Codo 1	570
Expansión 1 (punto de alimentación 10/15)	-610
Ducto de secado (del modelo)	170
Curva en la parte alta	173
Expansión 2 (sección de bajada 150/180)	-60
Contracción (antes del ciclón 150/100)	639
Codo 2 (antes del ciclón)	383
Ciclón	2000
Codo 3 (después del ciclón)	76
Colector de polvos	2000
Codo 4 (después del colector)	76
Caída de presión total	7261

Basado en la caída de presión estimada y el caudal de aire máximo se calculó la potencia nominal del ventilador usando la ecuación (8).

$$P_{el} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{tot}}{\eta_m \cdot \eta_{el}} \quad (8)$$

Donde $\eta_m = 70\%$ y $\eta_{el} = 85\%$ son la eficiencia mecánica y eléctrica del ventilador.

De acuerdo a la formula, el ventilador debe tener una potencia eléctrica nominal de 2627 W. Para establecer un margen de seguridad se recomienda instalar un ventilador con al menos 3000 W.

4. INSTRUMENTACIÓN: SISTEMA DE MONITOREO Y DE CONTROL

Las especificaciones funcionales en términos de control y monitoreo del secador fueron presentadas en la sección 2.2. De acuerdo a esto, se definió la instrumentación requerida para proporcionar las funcionalidades deseadas. Se incluye el tipo y características de sensores/transmisores y controladores, la ubicación de los puntos de medición y la precisión requerida con base en la propagación del error de las mediciones y el análisis de sensibilidad del modelo.

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

La solución más conveniente para operar un equipo experimental es un computador central que permita controlar las variables manipuladas, fijar el control automático y grabar el registro de las mediciones. La tecnología más común que entrega estas funciones es el controlador lógico programable (PLC). Un PLC es un computador instalado en un bastidor eléctrico con muchas entradas y salidas análogas. Puede leer casi cualquier entrada análoga del proceso entregada por los sensores y transmisores, como presión, humedad, temperatura y más. También incluye salidas para el control de actuadores como motores eléctricos, relés, etc.

El estándar más común para transmitir señales a nivel industrial es 4-20mA (4 a 20 miliamperios), una escala ajustable usada para codificar los valores de las variables del proceso. Por ejemplo para medir un proceso de temperatura entre 20°C y 220°C usando un sensor RTD, el transmisor mide la resistencia en la sonda y la convierte en una señal de corriente proporcional a la temperatura, donde 4 mA corresponde a 20°C y 20 mA a 220°C. El 4-20mA también se usa para controlar los dispositivos del proceso como los motores eléctricos a través de un variador de frecuencia o las resistencias del calentador a través de un relé de estado sólido.

Para organizar la lista de sensores y controladores, se usó el estándar de simbología ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society). Se define de la siguiente manera:

FDC – RH – IT – 01

Referencia del equipo – Variable medida – Función – Número

La referencia del equipo para todos los dispositivos es FDC que significa Flash Dryer Cassava.

Las siguientes abreviaciones son usadas para referir las variables de proceso:

- F: Flujo
- P: Presión

- RH: Humedad relativa
- T: Temperatura

Las siguientes abreviaciones son usadas para las funciones:

- I: indicar
- T: Transmitir
- C: Controlar

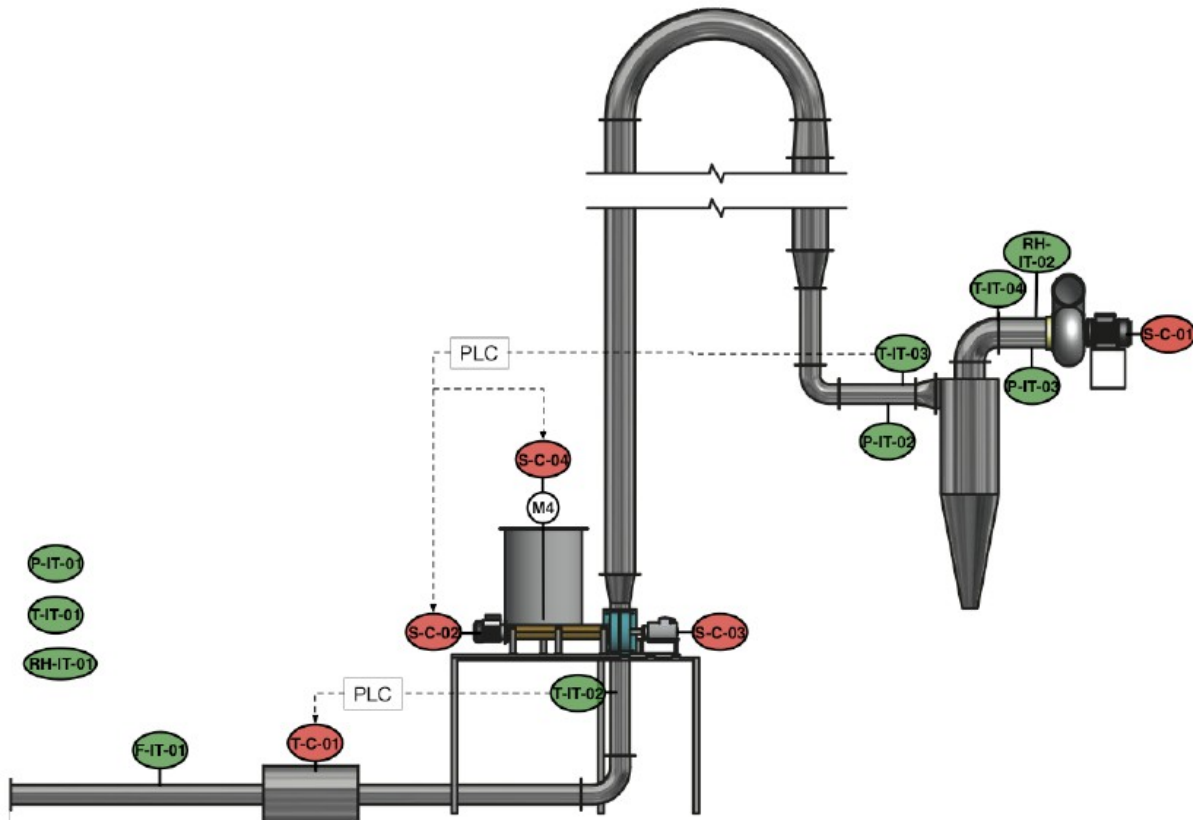


Figura 15. Diagrama de instrumentación del secador

La Figura 15 muestra la ubicación de los sensores y controladores del secador y sus funciones y características son descritas en la Tabla 10. El flujo de aire se mide antes del calentador, por lo tanto el sensor no necesita ser resistente a la temperatura. La presión absoluta se mide en el ambiente y antes y después del ciclón. La humedad relativa del aire de secado se mide en el ambiente y después del ciclón. Nótese que una medición antes del ciclón sería útil en la validación del modelo, sin embargo la presencia de polvo de almidón distorsionaría la medida o dañaría el sensor. Por último, la temperatura es medida en el ambiente, después del calentador y antes y después del ciclón. Cada transmisor debe tener un indicador local de las mediciones.

La velocidad de cada motor se controla independientemente usando un variador de frecuencia para cada uno. La velocidad del tornillo alimentador determina la tasa de alimentación de almidón. El agitador de la tolva debe estar sincronizado con el tornillo como se vio en la sección 3.3. El PLC permite el control manual o automático de la tasa de alimentación del almidón, basado en la temperatura del aire de salida (T-IT-03 o T-IT-04). Por último, el PLC regula la temperatura del aire antes de la alimentación de almidón T-IT-02 ajustando la potencia eléctrica entregada por el calentador.

Los niveles de precisión mencionados en las tabla 10 y 11 son una indicación del comportamiento deseado. Los valores reales pueden cambiar de según la elección de los sensores y controladores, como se verá en las siguientes secciones.

Tabla 10. Especificaciones funcionales de los Sensores

N°	ID del instrumento	Función	Rango	Precisión
1	FDC-F-IT-01	Flujo de aire a la entrada, aire ambiente.	0,1 – 0,3 kg/s	± 1,0%
2	FDC-P-IT-01	Presión atmosférica absoluta.	0 – 150 kPa	± 0,10%
3	FDC-P-IT-02	Presión absoluta antes del ciclón. Presión negativa. Presencia de almidón. Posible alta temperatura al iniciar.	0 – 150 kPa	± 0,10%
4	FDC-P-IT-03	Presión absoluta después del ciclón. Presión negativa. Presencia de almidón residual. Posible alta temperatura al iniciar.	0 – 150 kPa	± 0,10%
5	FDC-RH-IT-01	Humedad relativa del aire ambiente.	0 – 100%	± 1% RH
6	FDC-RH-IT-02	Humedad relativa del aire de secado a la salida. Alta humedad, posible condensación. Posible alta temperatura al iniciar.	0 – 100%	± 1% RH
7	FDC-T-IT-01	Temperatura ambiente, aire seco.	0 – 50°C	± 0,15%
8	FDC-T-IT-02	Temperatura del aire a la entrada (usado para control FDC-T-C-01).	0 – 250°C	± 0,15%
9	FDC-T-IT-03	Temperatura del aire antes del ciclón. Presencia de almidón, alta humedad, posible condensación. Posible alta temperatura al iniciar.	0 – 200°C	± 0,15%
10	FDC-T-IT-04	Temperatura del aire después del ciclón. Presencia de almidón, alta humedad, posible condensación. Posible alta temperatura al iniciar.	0 – 200°C	± 0,15%

Tabla 11. Especificaciones funcionales de los controladores

N°	ID del instrumento	Función	Rango	Precisión
1	FDC-S-C-01	Variación manual de la velocidad del ventilador (variador de velocidad). Trifásico, 3 kW.	300 – 780 m ³ /h	± 1%
2	FDC-S-C-02	Control manual y automático de tasa de alimentación de almidón (basado en T-IT-03). Trifásico, 500 W.	15 – 70 rpm	± 0,5%
3	FDC-S-C-03	Control manual de la velocidad del desintegrador. Trifásico, 250 kW.	500 – 2000 rpm	± 1%
4	FDC-S-C-04	Control manual y automático de la tasa de alimentación de almidón (basado en T-IT-03). Trifásico, 500 W.	4 – 20 rpm	± 5%
5	FDC-T-C-01	Control automático de la potencia para regular la temperatura del aire seco a la entrada.	15 – 40 kW	± 1%

4.2 SENSORES Y TRANSMISORES

4.2.1 Temperatura

En procesos industriales se usan mayormente dos tecnologías para medir temperatura: termocuplas y resistencias detectoras de temperatura (RTDs). Las RTDs tienen la ventaja de ser lineales y muy precisas pero no son adecuadas para altas temperaturas (>400°C). Las termocuplas, por otro lado, pueden soportar altas temperaturas y son muy sensibles pero menos precisas. Las temperaturas a medir en el proceso son relativamente bajas y la sensibilidad no es un problema en la operación en estado estable, por lo cual se recomienda el uso de sensores RTD.

Existen sensores RTD con varios niveles de precisión, siendo el más común el grado B, el cual es suficiente para la presente aplicación. Este entrega una precisión de $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se incrementa al alejarse de 0 ($0,25 + 0,0042 \cdot |T|$). Se recomiendan los productos de Pyromation. Una solución adecuada es un transmisor de la serie 642 (código de orden: 642A – D – 3 85 U – S(0-250)C) y un sensor RTD con su sistema de fijación (código de orden: RAF 185L 28 3 XXX).

Nótese que solo se requieren dos sensores RTD porque los sensores de humedad ya incluyen medición de temperatura.

4.2.2 Humedad relativa

Existen muchos tipos de higrómetros dependiendo de la aplicación. Dados los requerimientos y restricciones del presente estudio, se recomienda un sensor de humedad (RH) capacitivo.

El elemento sensor de un higrómetro capacitivo es un capacitor cuyo dieléctrico consiste en una sustancia higroscópica polimérica. La absorción de la humedad del aire en el polímero conduce a un cambio en la capacitancia. Este tipo de sensor cubre casi el rango completo de humedad, de 5% a 100% y puede soportar polvo y condensación. Además, pueden alcanzar un alto nivel de precisión, de $\pm 1\%$ RH a $\pm 5\%$ RH dependiendo del modelo.

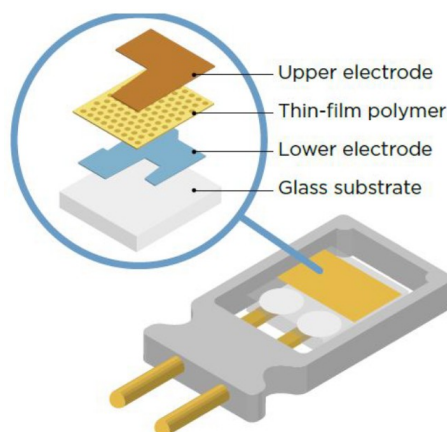


Figura 16. Sensor de humedad capacitivo. (fuente: Vaisala, Helsinki, Finlandia, 2015. www.vaisala.com)

La única tecnología que entrega una precisión más alta es el higrómetro condensador, el cual determina directamente el punto de rocío del aire enfriando un espejo hasta la condensación. Incorpora un sistema óptico complejo para la detección de condensación en el espejo. Este tipo de sensor tiene una precisión alta, pero es lento, incomodo de usar y sensible al polvo. Además de las razones descritas esta opción fue excluida porque su adquisición y mantenimiento son costosos.

Algunos fabricantes de higrómetros son Vaisala, Rotronics y Endress+Hauser. Algunos industriales entrevistados recomendaron Rotronics por su confiabilidad, robustez y bajo costo.

Los productos recomendados en Rotronics son:

- Transmisor HygroFlex 832 Type C + 2 Probe HC2 con filtro
- Transmisor HygroFlex 520 Type C + Probe HC2 con filtro

Ambas soluciones tienen rendimientos idénticos y alta precisión para humedad y temperatura: $\pm 0,8\%$ RH y $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ a 23°C .

La primera solución es un transmisor con entrada para dos sondas: una en el ambiente y otra después del ciclón. Para reducir el costo, la otra alternativa usa un solo sensor: la humedad y temperatura atmosféricas se miden al principio del experimento y después se coloca el sensor en el ducto de secado por medio de una válvula.

4.2.3 Presión

En la presente aplicación, se requieren sensores de presión absoluta. Los dos sensores a instalar en el secador deben ser capaces de medir presión negativa. Fabricantes de sensores de presión son Yokogawa, Foxboro o Rosemount. El transmisor de presión Yokogawa EJX 310A M es un producto confiable. Va de 0 a 130 kPa y tiene una precisión de 0,04% en toda la escala, es decir, para la escala completa de 130 kPa el error absoluto es ± 50 Pa.

4.2.4 Flujo de aire

Existen principalmente dos métodos para medir flujo másico gaseoso. El primer método es global y consiste en medir una cantidad física relacionada directamente con el flujo. El segundo método, local, es la integración del perfil de velocidad.

La medición de la velocidad local se realiza fácilmente usando equipos de mano como tubos Pitot o anemómetros de hilo caliente. Sin embargo, la precisión general de este tipo de método es bastante limitada ($\pm 2,5\%$ a lo mejor) y altamente dependiente de la calidad en la ejecución de la medición. La principal ventaja de esta solución es su bajo costo.

Los métodos de medición global tienen precisiones más altas. Una tecnología reciente y práctica es el flujómetro de dispersión térmica. Está compuesto por un transmisor conectado a una sonda que incorpora dos sensores RTD (Figura 17). El primer sensor mide la temperatura del proceso. El segundo se calienta a una temperatura más alta que la del proceso. Entonces, el calor es dispersado por el fluido y la potencia de dispersión está directamente relacionada con el flujo. La ventaja de esta técnica es que mide el flujo independientemente de las variaciones de presión y temperatura y permite alcanzar errores menores que el 1,5% de la lectura.

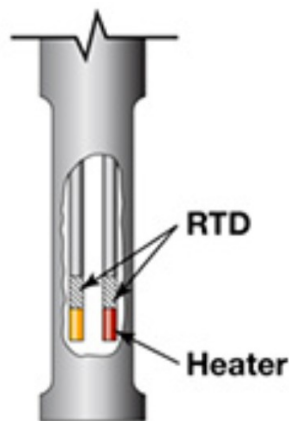


Figura 17. Flujómetro de dispersión térmica. (Fuente: Magnetrol Inc., Aurora, USA, www.us.magnetrol.com)

Este tipo de sensores no tienen partes mecánicas, son compactos, robustos, rápidos y la medición dinámica es bastante alta (1:100). sin embargo, son más costosos que los anemómetros. Así como con otras tecnologías, se debe proporcionar una sección de tubería recta de 20 diámetros de longitud, sin ningún elemento, antes del sensor y una sección de 5 diámetros de longitud después del sensor para asegurar una medición precisa. Algunos fabricantes proponen elementos de acondicionamiento de flujo para reducir estas longitudes.

Algunos fabricantes de sensores térmicos de flujo son Magnetrol, Kurz o Endress+Hauser. Un sensor recomendado es el Magnetrol Thermatel TA-2. Entrega una precisión de $\pm 1\%$ de la lectura + 0,5% de la escala completa.

4.3 CONTROLADORES

4.3.1 Motores eléctricos con variadores de frecuencia

La velocidad angular de los motores AC puede ser controlada fácilmente usando un convertidor de frecuencia, a menudo llamado variador de frecuencia, el cual es un dispositivo electrónico que permite ajustar la frecuencia y el voltaje de la corriente entregada al motor, haciendo posible el control de la velocidad angular y el torque. Además, protege el motor de sobrecargas y proporciona el arranque y parada del motor para evitar picos de corriente. Puede ser controlado desde un PLC usando el estándar 4-20mA.

La precisión en el control de la velocidad depende del tipo de variador de frecuencia y del ajuste. En control de lazo abierto la velocidad puede ser controlada con una precisión típica de 0,5 – 1%. En control de lazo cerrado, usando un codificador para retroalimentar la velocidad del motor: la precisión puede llegar a 0,01%.

Para todos los motores en el secador experimental, el control de lazo abierto debe ser suficientemente preciso, ya que las variaciones de carga son bastante pequeñas. Los 3 motores del sistema de alimentación requerirán ensayos específicos para ajustar las velocidades angulares y la sincronización de las palas de la tolva con el tornillo alimentador. Además, será necesario realizar curvas de calibración para el tornillo alimentador (flujo de almidón vs velocidad). Es muy recomendable revisar el efecto del nivel de llenado de la tolva en el flujo entregado, ya que este afecta la densidad aparente del almidón y la carga que debe soportar el motor.

Los motores del tornillo de alimentación y del agitador de la tolva requieren un reductor de engranajes para operar en el rango bajo de velocidades angulares. Un motor AC de cuatro polos con corriente de 60 Hz tiene una velocidad nominal de 1725 rpm y generalmente es recomendable no operar el motor por debajo del 10% de la velocidad nominal. Por lo tanto, los motores tanto del tornillo como del agitador requieren reductores con relaciones de 25 y 85 respectivamente, que les permita operar al 20-100% de la velocidad nominal.

El motor del desintegrador no requiere reductor. Un ventilador comercial normalmente viene con el motor y el reductor si lo requiere. Una alternativa económica al variador de frecuencia para controlar la velocidad del aire es un controlador mecánico tal como una válvula iris.

4.3.2 Control del calentador de aire

Existen principalmente tres técnicas para regular la temperatura producida por un calentador eléctrico de aire: control on/of, control proporcional y control PID (proportional integral derivative). El control on/of es el sistema más simple y económico. Simplemente enciende la potencia de calefacción cuando la temperatura está por debajo del valor fijado y la apaga cuando está por encima. Esto da como resultado un ciclo continuo al rededor del valor de temperatura establecido. De modo que este método solo es utilizado cuando no se requiere un control de temperatura preciso.

El control proporcional consiste en reducir la potencia cuando la temperatura se acerca al valor fijado. Por consiguiente, el tiempo de calentamiento es más largo pero no se supera el valor establecido y la temperatura se puede mantener estable. La potencia de calefacción se ajusta encendiendo y apagando, en ciclos muy cortos, más cortos que la frecuencia de la corriente. Esta alta frecuencia se consigue usando relés de estado sólido, un tipo especial de relé electrónico que no tiene partes mecánicas.

El control de temperatura proporcional puede ser adecuado para el secador. El control PID solo agrega refinamiento al control proporcional, especialmente para mejorar la reactividad del sistema, lo cual no es importante aquí porque el

quemador debe operar a una carga constante. Los bucles de control proporcional y PID pueden ser implementados en un controlador PLC. El elemento costoso en este sistema puede ser el relé de estado sólido (solid-state relays, SSR), porque la potencia de calefacción es relativamente alta.

Una alternativa económica al control proporcional sería construir el calentador eléctrico de modo que los elementos de calefacción puedan ser encendidos independientemente. Un set de resistencias de 15 kW se podrían conectar juntas para entregar el límite de potencia inferior, después varias resistencias independientes hasta 40 kW. Esto proporcionaría un cierto número de niveles de temperatura fijos, pero sin la posibilidad de ajustar de manera precisa el punto de referencia. Se tiene la dificultad de que el rango de potencia es relativamente alto.

4.4 PRECISIÓN DE LA MEDICIÓN Y CONTROL

La calidad de los resultados experimentales producidos con el secador flash piloto dependen de la exactitud de los controles y las mediciones. Para evaluar el desempeño de las soluciones propuestas en la sección anterior, se analiza la propagación de errores de medición y de control en las ecuaciones de balance de masa. Luego se analiza la sensibilidad usando el modelo numérico para investigar el efecto de las variaciones de las variables manipuladas en las variables de salida del proceso. Los resultados entregan información útil acerca del nivel de precisión requerido en la regulación y control de la temperatura del aire y de la tasa de alimentación de aire y de almidón.

4.4.1 Método y objetivo: precisión del $\pm 5\%$ sobre la tasa de secado

Como se mencionó en la sección 3.2, la ecuación de balance de masa del agua (Ecuación 1) fue tomada como referencia para evaluar la precisión de los resultados experimentales porque todos los términos de la ecuación pueden ser medidos. De modo que, la tasa de secado $\dot{m}_w$ puede ser calculada tanto por el lado del almidón como por el lado del aire y los resultados se pueden comparar para verificar su consistencia. La meta aquí es conseguir un error menor que $\pm 5\%$ en la determinación de la tasa de secado por ambos lados.

Se evaluó la propagación del error en los cálculos de la tasa de secado, para ayudar a elegir los sensores y los controladores. Se aplicó la fórmula de la varianza (ecuación 9) como recomienda (Liptak, 2003). Para una variable $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, función de varias mediciones x_i , la incertidumbre de z , Δz , puede ser estimada como función de las incertidumbres Δx_i sobre x_i .

$$\Delta z = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

4.4.2 Propagación de incertidumbres en la determinación de la tasa de secado con las propiedades del aire

Por el lado del aire, la tasa de secado se calcula como $\dot{m}_w = \dot{m}_{da} \cdot (Y_{out} - Y_{in})$. Los errores surgen principalmente de las mediciones directas:

- Medición del flujo másico de aire (o determinación de la velocidad)
- Determinación de la humedad absoluta con:
 - Medición de la humedad relativa
 - Medición de la temperatura
 - Medición de la presión

Por lo tanto la propagación del error en el calculo de la tasa de secado se evaluó con base en la precisión de los sensores. Se consideraron varias tecnologías para los sensores y se evaluaron cuatro combinaciones.

Se consideran dos soluciones para medir el flujo de aire:

- Flujómetro de dispersión térmica (directo)
- Anemómetro mecánico o de hilo caliente (indirecto)

Se consideran dos soluciones para la medición de la humedad del aire:

- Higrómetro capacitivo
- Higrómetro resistivo

La medida de la humedad relativa junto con la temperatura de bulbo seco y la presión permiten determinar la humedad absoluta del aire. El sensor RH resistivo tiene la desventaja de no soportar condensación y necesita tiempo para recuperarse cuando se humedece.

La Tabla 12 resume la precisiones consideradas para cada tecnología de sensor, los cuales son valores promedio típicos de sensores comerciales. Los sensores que usan la misma tecnología generalmente tienen una precisión similar. Los valores de referencia solo se muestran para dar la correspondiente precisión relativa. Nótese que es preferible utilizar un sensor en el rango alto y usar un rango escalable cuando esté disponible.

Tabla 12. Precisiones típicas de los sensores considerados

Sensor	Valor de referencia	Precisión absoluta	Precisión relativa
Temperatura			
RTD Pt 100 Grade B	30°C	± 0,3°C	± 0,17%
Presión			
Sensor de presión absoluta	89876 Pa	± 50 Pa	± 0,05%
Contenido de humedad			
Sensor RH capacitivo	70%	± 1,5%	± 2,1%
Sensor RH resistivo	23°C	± 2,5%	3,60%
Flujo másico			
Anemómetro (veleta, hilo caliente, etc)	18 m/s	± 0,7 m/s	3,90%
Flujómetro de dispersión térmica	0,145 kg/s	± 0,002 kg/s	1,40%

Para identificar la mejor solución, se evaluó la precisión de cuatro configuraciones de los sensores en el punto de operación nominal:

- Configuración N°1: anemómetro + sensor RH resistivo
- Configuración N°2: anemómetro + sensor RH capacitivo
- Configuración N°3: flujómetro de dispersión térmica + sensor RH resistivo
- Configuración N°4: flujómetro de dispersión térmica + sensor RH capacitivo

En todas las configuraciones los sensores para medir presión y temperatura de bulbo seco son los mismos, como se describen en la Tabla 12. Para cada caso, se calculó la propagación de los errores de las medidas a través de parámetros intermedios hasta la tasa de secado. Los resultados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de la propagación del error en el cálculo de la tasa de sacado con base en las propiedades del aire

Variable	Config. 1 Vel. + RH R	Config. 2 Vel. + RH C	Config. 3 ST + RH R	Config. 4 ST + RH C
Flujo de aire (m_{da})	3,9%	3,9%	1,5%	1,5%
Humedad del aire (Y_i y Y_o)	4,2%	2,9%	4,2%	2,9%
Tasa de secado (m_w)	7,5%	5,8%	6,6%	4,7%

Se puede observar que la exactitud de las medidas tiene un efecto significativo en el error global y particularmente la exactitud de los sensores de humedad. La única configuración que entrega un error global menor a 5% es la configuración N°4, y por eso es la más recomendable. El cálculo se refinó usando las precisiones de los sensores recomendados específicamente, que se muestran en la Tabla 14. Eligiendo sensores en el rango alto de su categoría, el error global en la determinación de la tasa de secado se puede llevar por debajo de $\pm 3,0\%$.

Tabla 14. Sensores recomendados y su precisión.

Sensor	Valor de referencia	Precisión relativa
Temperatura		
Pyromation series 642 RTD Pt 100 Grade B RAF 185L 28 3 642A – D – 3 85 U – S(0-250)C	$0,25 + 0,0042* T $	$\pm 0,17\%$
Presión		
Yokogawa Sensor de presión absoluta EJX 310A M	0,4% de la escala total	$\pm 0,06\%$
Higrometro (capacitivo)		
Rotronics HygroFlex 832 Type C + 2 Probe HC2 con filtro	$\pm 0,8\%RH$ $\pm 0,1 + 0,0017* T $	$\pm 1,14\%$ $\pm 0,08\%$
Flujómetro		
Magnetrol Flujómetro de dispersión térmica Thermatel TA-2	$\pm 1\%$ de la lectura + $0,5\%$ de la escala total	$\pm 1,5\%$

Finalmente, la precisión global estimada es un valor optimista, ya que solo se consideran los errores de medición de los sensores. En la práctica, pueden haber errores en la medición más elevados cuando el sensor opera en condiciones lejanas al estándar definido por el fabricante. La calidad de la instalación del sensor también influye en la precisión de las mediciones. Además, la precisión de los sensores tiende a deteriorarse con el tiempo. Por todas estas razones, se recomienda conseguir sensores de alta calidad, que son más confiables en el tiempo y se pueden adaptar a varias condiciones de operación.

4.4.3 Propagación de incertidumbres en la determinación de la tasa de secado con las propiedades del almidón

Por el lado del almidón, la tasa de secado se calcula como:
 $\dot{m}_w = \dot{m}_{ds} \cdot (X_{in} - X_{out})$. Entonces los errores surgen de:

- Control de la tasa de alimentación del almidón (por medio de la calibración del alimentador)
- Preparación del almidón húmedo
- Muestreo para la determinación del contenido de humedad (método del horno)

Debido al origen de las incertidumbres (control, muestreo), el error en el cálculo de la tasa de secado es difícil de evaluar. Sin embargo, el análisis de propagación del error en esta ecuación proporciona indicaciones útiles sobre la precisión requerida para el control de la tasa de alimentación y el error máximo aceptable en la determinación de la humedad.

La Tabla 15 muestra las tres variables del proceso involucradas en la ecuación del balance de masa, incluyendo sus valores nominales y la precisión por defecto de la medición y control. Se asume que los niveles de precisión propuestos permiten alcanzar un error relativo de $\pm 5\%$ en el cálculo de la tasa de secado. Una precisión relativa de 2% en el contenido de humedad del almidón húmedo preparado parece realista ya que depende sobre todo del pesado y mezclado adecuado del almidón y el agua. La precisión de la medición de la humedad final del almidón depende de la estabilidad de operación del proceso, sobre el muestreo y la medición del contenido de humedad. Mientras que el método del horno para medir el contenido de humedad entrega resultados de alta precisión, el posible error debido a la regulación del proceso de muestreo es difícil de evaluar: $\pm 4\%$ parece factible.

Tabla 15. Variables del proceso en el balance de masa del almidón

Variable	Valor nominal	Unidad	Precisión absoluta	Precisión relativa
Alimentación de almidón (m_{ds})	0,0175	kg d.s./s	$\pm 0,00070$	$\pm 4,00\%$
Humedad inicial del almidón (X_i)	0,5400	kg w/kg d.s.	$\pm 0,01080$	$\pm 2,00\%$
Humedad final del almidón (X_f)	0,1464	kg w/kg d.s.	$\pm 0,00586$	$\pm 4,00\%$
Tasa de secado (m_w)	0,0069	kg w/s	$\pm 0,00035$	$\pm 5,1\%$

Para ilustrar los requerimientos de precisión en el control de la tasa de alimentación, la Figura 18 muestra la incertidumbre general en la tasa de secado como función de la precisión en el control de la tasa de alimentación. Se puede observar que el control de la alimentación de almidón tiene un efecto marcado en la precisión total. Por tal motivo, se debe hacer un esfuerzo especial en la calibración y control del sistema de alimentación para asegurar una variabilidad menor a $\pm 4\%$ o menos si es posible.

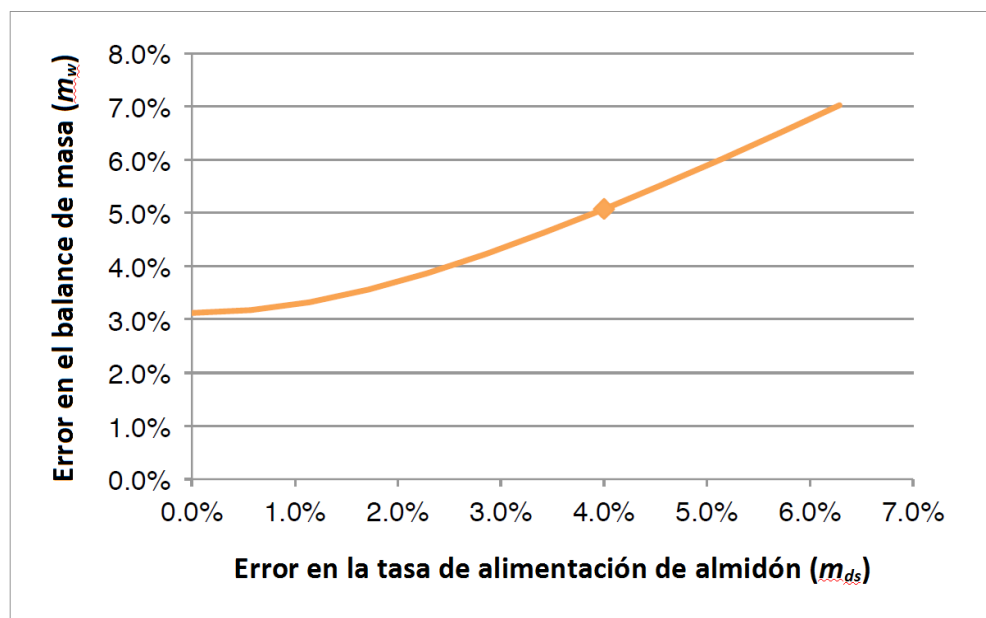


Figura 18. Variación del error relativo en la determinación de la tasa de secado (m_w) como función del error en el control de la tasa de alimentación de almidón (m_{ds}). Todas las demás precisiones son fijadas en los valores por defecto (Tabla 13).

El cálculo realizado para dimensionar el tornillo alimentador solo entrega un estimado de la tasa de alimentación. Una vez construido, se deben hacer ensayos para determinar las curvas de calibración con el flujo de almidón entregado como función de la velocidad angular del tornillo. Sería útil elaborar diferentes curvas según el contenido de humedad. También se debe estudiar la variabilidad de la tasa de alimentación de acuerdo al nivel de almidón en la tolva.

4.5 SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO A LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES EXPERIMENTALES

Otra restricción con respecto al control de las variables experimentales es asegurar la estabilidad de operación del proceso. La variabilidad de los resultados debe ser tan baja como sea posible, idealmente menor a la incertidumbre esperada en las mediciones. Este aspecto se investigó usando el modelo para analizar la sensibilidad de los resultados del proceso a las variaciones de las

variables experimentales. Los efectos de las variaciones en la alimentación de almidón, el contenido de humedad inicial y la temperatura del aire a la entrada se presentan en las figuras 19, 20 y 21 respectivamente. Las variaciones de las variables del proceso son expresadas en términos de la desviación relativa del valor de referencia $((x - x(\text{ref}))/x(\text{ref}))$.

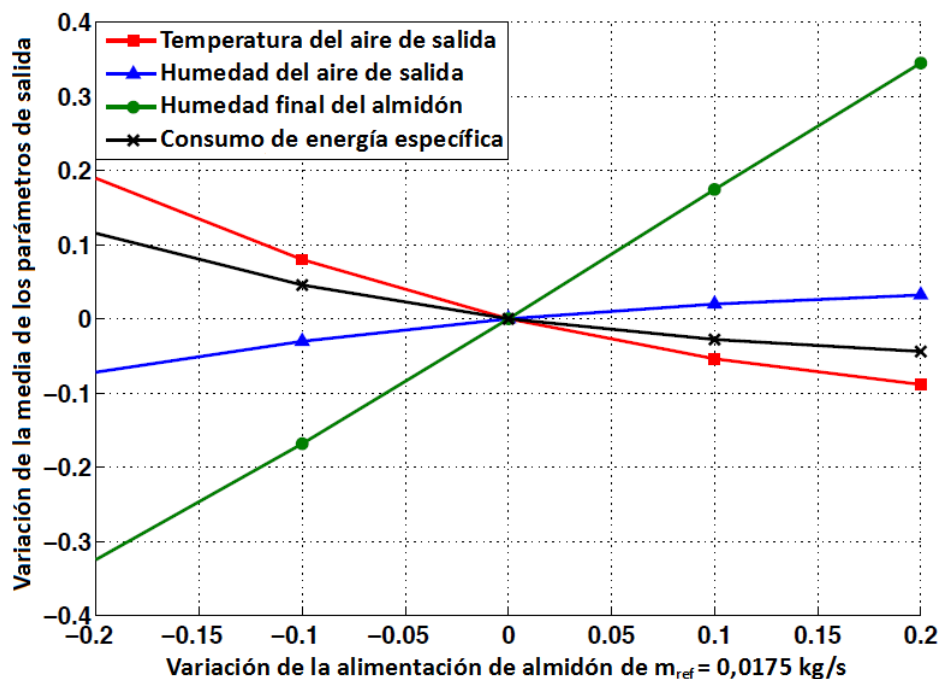


Figura 19. Sensibilidad a las variaciones en la tasa de alimentación de almidón (en términos de la variación relativa a la media)

El análisis de propagación del error en las ecuaciones de balance de masa ya destacó la importancia de la exactitud en el control de la alimentación de almidón y del contenido de humedad para asegurar una precisión razonable en el cálculo de la tasa de secado. Las figuras 19 y 20 tienen una influencia considerable en los resultados del proceso, especialmente en el contenido de humedad final del almidón. Para mantener la variabilidad de la humedad final del almidón por debajo del error de las mediciones requerido ($\pm 4\%$ como sugiere el cálculo de propagación del error), la tasa de alimentación de almidón debe ser controlada con una precisión de $\pm 2,5\%$.

Por último, la figura 21 muestra la sensibilidad extrema de la humedad final del almidón a las variaciones en la temperatura de entrada. Para mantener la humedad final por debajo del error de medición, la temperatura del aire a la entrada se debe controlar con una precisión de $\pm 2\%$.

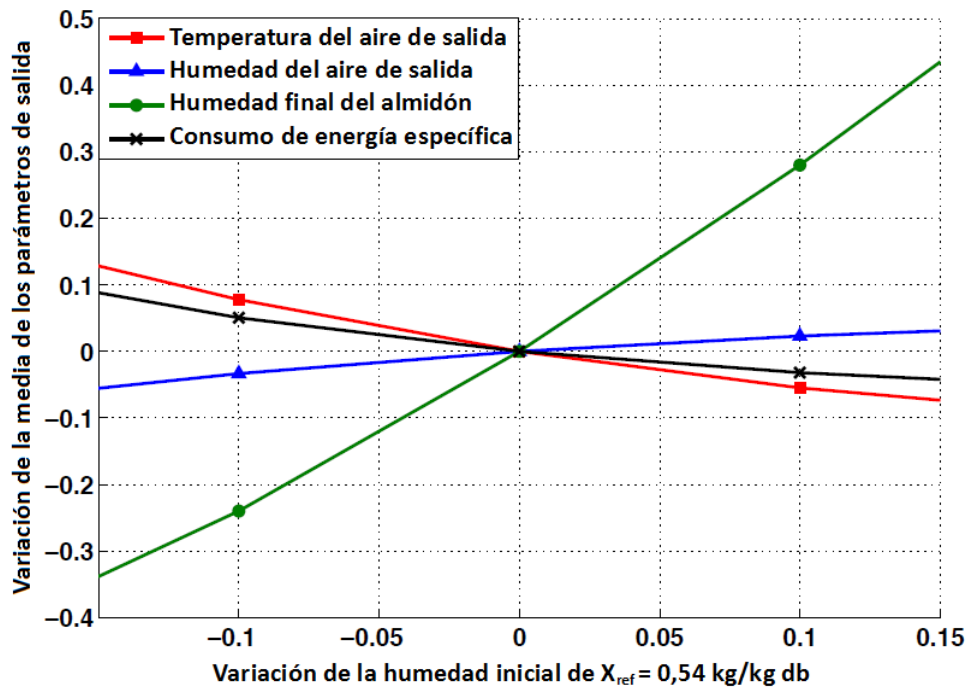


Figura 20. Sensibilidad a la variación de la humedad inicial del almidón

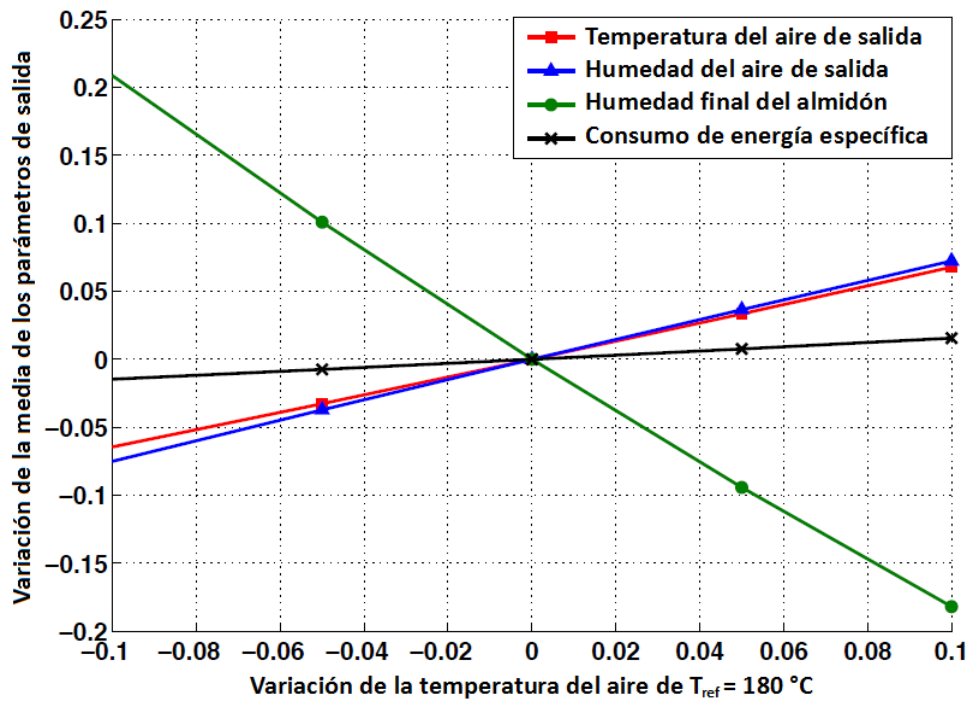


Figura 21. Sensibilidad a la variación de la temperatura inicial del aire

CONCLUSIONES

Gracias al modelo numérico de secado previamente desarrollado, fue posible definir la mejor geometría y las condiciones de operación para un secador flash piloto de pequeña escala. El secador flash piloto, bajo condiciones nominales de operación, tendrá la capacidad de secar 100 kg/h de almidón con 35% de humedad, hasta 12,5% con un consumo de energía específica de 3240 kJ/kg de agua evaporada. El ducto de subida tiene un diámetro de 15 cm en la sección de subida y 18 cm en la sección de bajada, con una longitud de 25 m desde el punto de alimentación hasta el ciclón. La velocidad promedio de entrada es 12 m/s y la temperatura nominal 180°C.

Como es un equipo experimental, el secador permitirá investigar los efectos de las condiciones de operación en el rendimiento del secado. Con este propósito, las variables del proceso se ajustan a rangos relativamente amplios, incluyendo la humedad y la tasa de alimentación del almidón y la velocidad y temperatura del aire. Las dimensiones y características principales de los equipos que componen el secador se definieron de acuerdo a los rangos de operación deseados. Esto incluye el calentador, el sistema de alimentación, el ciclón y el ventilador.

El control del proceso y el registro de las variables se debe hacer desde un computador central, conectado al sistema por medio de un PLC. Las mediciones permiten calcular el balance de masa del agua tanto usando las propiedades del agua como las del almidón, haciendo posible comparar estos resultados para comprobar su consistencia. Se definieron la ubicación y características de los sensores y controladores y se recomendó una lista específica de instrumentos. Finalmente, se estimó la propagación del error de las mediciones en el cálculo de la tasa de secado para verificar que se cumple el nivel de precisión deseado.

Este trabajo entrega todos los datos requeridos para la construcción de un secador flash piloto. Además, los análisis experimentales llevados a cabo en este equipo, gracias a la vasta instrumentación, permitirán validar y perfeccionar el modelo numérico actual. También, constituye una base sólida para preparar el desarrollo de una versión comercial. Esto ayudará especialmente a realizar elecciones estratégicas para reducir costos de construcción manteniendo un nivel de rendimiento satisfactorio. Lo que se puede lograr simplificando el diseño y sobre todo la instrumentación, al mínimo requerido para el control apropiado del proceso.

RECOMENDACIONES

Después de construir el secador con las recomendaciones aquí descritas se desea realizar ensayos, para corroborar las predicciones hechas en el modelo y verificar experimentalmente las correlaciones entre los parámetros de operación y diseño y los valores de salida. Sin embargo, antes de llegar a este punto algunas partes del secador deben ser probadas por separado hasta verificar que cumplen con las condiciones de funcionamiento para las cuales fueron diseñadas. Además, para que los resultados obtenidos con los análisis experimentales tengan validez, la instrumentación se debe ajustar estrictamente a las características propuestas en el capítulo 4.

En este orden de ideas, se recomienda realizar ensayos experimentales con el ciclón y evaluar las pérdidas reales, ya que los resultados entregados por el método de diseño solo son estimaciones. Los 3 motores del sistema de alimentación requerirán ensayos específicos para ajustar las velocidades angulares y la sincronización de las palas de la tolva con el tornillo alimentador. Además, será necesario realizar curvas de calibración para el tornillo alimentador (flujo de almidón vs velocidad). Es muy recomendable revisar el efecto del nivel de llenado de la tolva en el flujo entregado, ya que este afecta la densidad aparente del almidón y la carga que debe soportar el motor.

Una implementación comercial del equipo secador flash que aquí se describe, se puede obtener simplificando el diseño y sobre todo la instrumentación al mínimo requerido para el control apropiado del proceso. Después de efectuados los experimentos será más fácil definir las acciones encaminadas a lograr esto. Se puede anticipar que será necesario seleccionar una alternativa diferente como sistema para calentar el aire del proceso, ya que un calentador eléctrico puede ser la peor opción para un equipo de producción en cuanto a costo e impacto ambiental.

REFERENCIAS

- Al-Mutaseb, A.H., McMin, W.A.M., Magee, T.R.A., 2004. Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: mathematical description of experimental data. *J. Food Eng.* 61, 297–307.
- Chapuis, A., Precoppe, M., Méot, J. M., Sriroth, K., Tran, T., 2016. Pneumating Drying of Cassava Starch: Numerical Analysis and Guidelines for the Design of Efficient Small-Scale Dryers. *Drying Technology*.
- Conde, M., 2007. Thermophysical Properties of Humid Air: Models and Background. M Conde Eng. Zurich.
- Couper, J.R. (Ed.), 2010. Chemical process equipment: selection and design, Rev. 2 ed. Elsevier, Amsterdam; Boston.
- Echeverri Londoño, C.A., 2006. Diseño óptimo de ciclones. *Revista de Ingeniería Universidad de Medellín* 5, 123–139.
- Gevaudan, A., Chuzel, G., Didier, S., Andrieu, J., 1989. Physical properties of cassava mash. *Int. J. Food Sci. Technol.* 24, 637–645.
- Green, D., Perry, R., 2007. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition. ed. McGraw Hill Professional.
- Karathanos, V.T., Vagenas, G.K., Saravacos, G.D., 1991. Water diffusivity in starches at high temperatures and pressures. *Biotechnol. Prog.* 7, 178–184.
- Kreith, F., Timmerhaus, K., Lior, N., Shaw, H., Shah, R.K., Bell, K.J., et al., 2000. Applications, in: *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Lipták, B.G. (Ed.), 2003. Instrument engineers' handbook, 4th ed. ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Mujumdar, A.S., 2014. Handbook of industrial drying. CRC Press.
- Van den Berg, C., 1981. Vapour sorption equilibria and other water-starch interactions: a physico-chemical approach (PhD Thesis). Wageningen University.

APÉNDICE A. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE Y DEL ALMIDÓN

1. PROPIEDADES DEL AIRE HÚMEDO

1.1 TEORÍA DE GASES

La ley de gases ideales se usa para describir el comportamiento del aire húmedo. Entonces, la densidad se calcula usando la ecuación A.1, y la presión de vapor es entregada por la ecuación A.2.

$$\rho_a = \frac{P \cdot (1 + Y)}{461,24 \cdot (0,622 + Y) \cdot T_a} \quad (\text{A.1})$$

$$p_v = \frac{Y \cdot P}{Y + 0,622} \quad (\text{A.2})$$

1.2 PRESIÓN DE SATURACIÓN

La presión de saturación se estima con la temperatura usando la correlación recomendada por (Green and Perry, 2007), expresada en la ecuación A.3.

$$\ln(p_{sat}) = -6096,9385 \cdot T^{-1} + 21,2409642 - 2,711193 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,433502 \cdot \ln(T) \quad (\text{A.3})$$

1.3 CALOR LATENTE

El calor latente de vaporización del agua se calcula como función de la temperatura siguiendo la ecuación A.4, como recomienda (Green and Perry, 2007).

$$L_v(T) = \frac{5,2053 \cdot 10^7}{18,015} \cdot (1 - T_r)^{(0,3199 - 0,212 \cdot T_r + 0,25795 \cdot T_r^2)} \quad (\text{A.4})$$

Donde T_r es la temperatura reducida, T/T_c , con $T_c = 647,13$ K.

1.4 CAPACIDAD CALORÍFICA

La capacidad calorífica del aire húmedo se calcula de las propiedades del vapor de agua y del aire seco siguiendo la ecuación A.5.

$$C_a = \frac{C_{da} + Y \cdot C_p^v}{1 + Y} \quad (\text{A.5})$$

Tanto para el vapor de agua como para el aire seco, la capacidad calorífica se calcula usando la ecuación polinomial de cuarto orden A.6. Los valores de los coeficientes se dan en la Tabla A1 (Kreith et al., 2000).

$$C = R \cdot (C_1 + C_2 \cdot T + C_3 \cdot T^2 + C_4 \cdot T^3 + C_5 \cdot T^4) \cdot 10^3 \quad (\text{A.6})$$

Tabla A1. Coeficientes para el cálculo de la capacidad calorífica del vapor de agua y el aire seco.

	Constante de gas kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	C ₁ -	C ₂ K ⁻¹	C ₃ K ⁻²	C ₄ K ⁻³	C ₅ K ⁻⁴
Aire	0,287	3,721	-1,874.10 ⁻³	4,719.10 ⁻⁶	-34,45.10 ⁻¹⁰	8,531.10 ⁻¹³
Agua	0,462	4,132	-1,559.10 ⁻³	5,315.10 ⁻⁶	-42,09.10 ⁻¹⁰	12,84.10 ⁻¹³

1.5 PROPIEDADES DE TRANSPORTE: VISCOSIDAD Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (VALIDO DE 193 A 573 K)

Las propiedades de transporte de aire húmedo se calcularon de acuerdo a (Conde, 2007). la viscosidad dinámica y la conductividad térmica del aire seco y el vapor de agua se calcularon usando el polinomio de temperatura de segundo orden, presentado en la ecuación A.7.

$$R = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 \quad (\text{A.7})$$

Donde R es la propiedad a calcular a_{0-2} son los coeficientes del modelo dados en la Tabla A2.

Tabla A2. Coeficientes para calcular la viscosidad y la conductividad calorífica del vapor de agua y el aire seco

	Vapor de agua		Aire seco	
	λ	μ	λ	μ
a ₀	-0,3537.10 ⁻²	-0,97494.10 ⁻⁶	0,669881.10 ⁻³	0,143387.10 ⁻⁵
a ₁	0,654755.10 ⁻⁴	0,359061.10 ⁻⁷	0,942482.10 ⁻⁴	0,656244.10 ⁻⁷
a ₂	0,174460.10 ⁻⁷	0,241612.10 ⁻¹²	-0,327450.10 ⁻⁷	-0,29905.10 ⁻¹⁰

Entonces las propiedades del aire húmedo son evaluadas usando la ecuación A.8.

$$r_a = \frac{r_{da}}{1 + G_{da,v} \cdot \frac{M_v}{M_{da}}} + \frac{r_v}{1 + G_{v,da} \cdot \frac{M_{da}}{M_v}} \quad (\text{A.8})$$

Donde r_a es la propiedad del aire húmedo a evaluar, r_{da} es correspondiente propiedad del aire seco, r_v es la correspondiente propiedad del vapor de agua, $G_{da,v}$ y $G_{v,da}$ son coeficientes en función de la viscosidad del vapor y el aire seco, M_{da} y M_v son la fracción molar del aire y el vapor de agua respectivamente.

La concentración molar se calcula con el contenido de humedad usando la ecuación A.9.

$$M_{da} = \frac{1}{1 + 1,607793 \cdot Y} \quad (\text{A.9})$$

$$M_v = \frac{Y}{Y + 0,62197058}$$

Los coeficientes se calculan con la ecuación A.10.

$$G_{v,da} = 0,277609 \cdot \left(1 + 1,12605 \cdot \left(\frac{\mu_v}{\mu_{da}} \right)^{0,5} \right)^2 \quad (\text{10})$$

$$G_{da,v} = 0,2189366 \cdot \left(1 + 0,8880603 \cdot \left(\frac{\mu_{da}}{\mu_v} \right)^{0,5} \right)^2$$

2. PROPIEDADES DEL ALMIDÓN

2.1 DIFUSIVIDAD DEL AGUA EN EL ALMIDÓN

La difusividad del agua en el almidón se estima con base en la ecuación propuesta por (Karathanos et al., 1991):

$$\ln(D_{ws}) = \left(10,882 - \frac{2851}{T} - 0,3122 \cdot \ln\left(\frac{P}{101325}\right) - 1,5111 \cdot X \right) \quad (\text{A.11})$$

Donde D_{ws} [$10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] es la difusividad del agua en el almidón, T [K] es la temperatura, P [Pa] es la presión.

2.2 CAPACIDAD CALORÍFICA DEL ALMIDÓN

La capacidad calorífica del almidón seco es 1500 J.kg⁻¹.K⁻¹ (Gevaudan et al., 1989). La capacidad calorífica de las partículas de almidón húmedo se calcula como el promedio de la fracción de masa de las capacidades caloríficas del almidón puro y el agua pura, ecuación A.12.

$$C_p^p = \frac{C_p^{ds} + X \cdot C_p^w}{1 + X} \quad (A.12)$$

La capacidad calorífica del agua líquida es función de la temperatura y se calculó usando la correlación propuesta en (Green and Perry, 2007), ecuación A.13.

$$C_p^w = \frac{1}{18,015} \cdot (2,7637 \cdot 10^{-5} - 2,0901 \cdot 10^3 \cdot T + 8,1250 \cdot T^2 - 1,4116 \cdot 10^{-2} \cdot T^3 + 9,3701 \cdot 10^{-6} \cdot T^4) \quad (A.13)$$

2.3 SORCIÓN ISOTÉRMICA DE AGUA

El equilibrio de sorción del almidón se calculó usando el modelo GAB de la ecuación A.14, como propuso (Van den Berg, 1981). Se usaron datos de desorción a 25 °C, en ausencia de datos para otras temperaturas. Esta aproximación conduce a una ligera subestimación de la tasa de secado, porque la capacidad de sorción del almidón decrece con el incremento de la temperatura.

$$X = \frac{X_0 \cdot C_{GAB} \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + C_{GAB} \cdot k \cdot a_w)} \quad (A.14)$$

Los parámetros de desorción para almidón nativo de yuca, dados por Van den Berg son: $X_0 = 0,1288$; $C_{GAB} = 21,1$; $k = 0,584$

2.4 CALOR DE SORCIÓN

El mecanismo de adsorción de agua en un material higroscópico involucra una disminución de la energía interna del agua, debido a un cambio en la presión de vapor, lo cual refleja la energía de unión del agua con el material. En consecuencia, el secado de materiales higroscópicos requiere una suficiente cantidad de energía para evaporar y desorber el agua líquida: esta cantidad se llama calor isostérico de sorción.

En la literatura se han reportado pocos datos acerca del calor de sorción de almidones. En ausencia de valores para almidón de yuca granular, se usó el calor

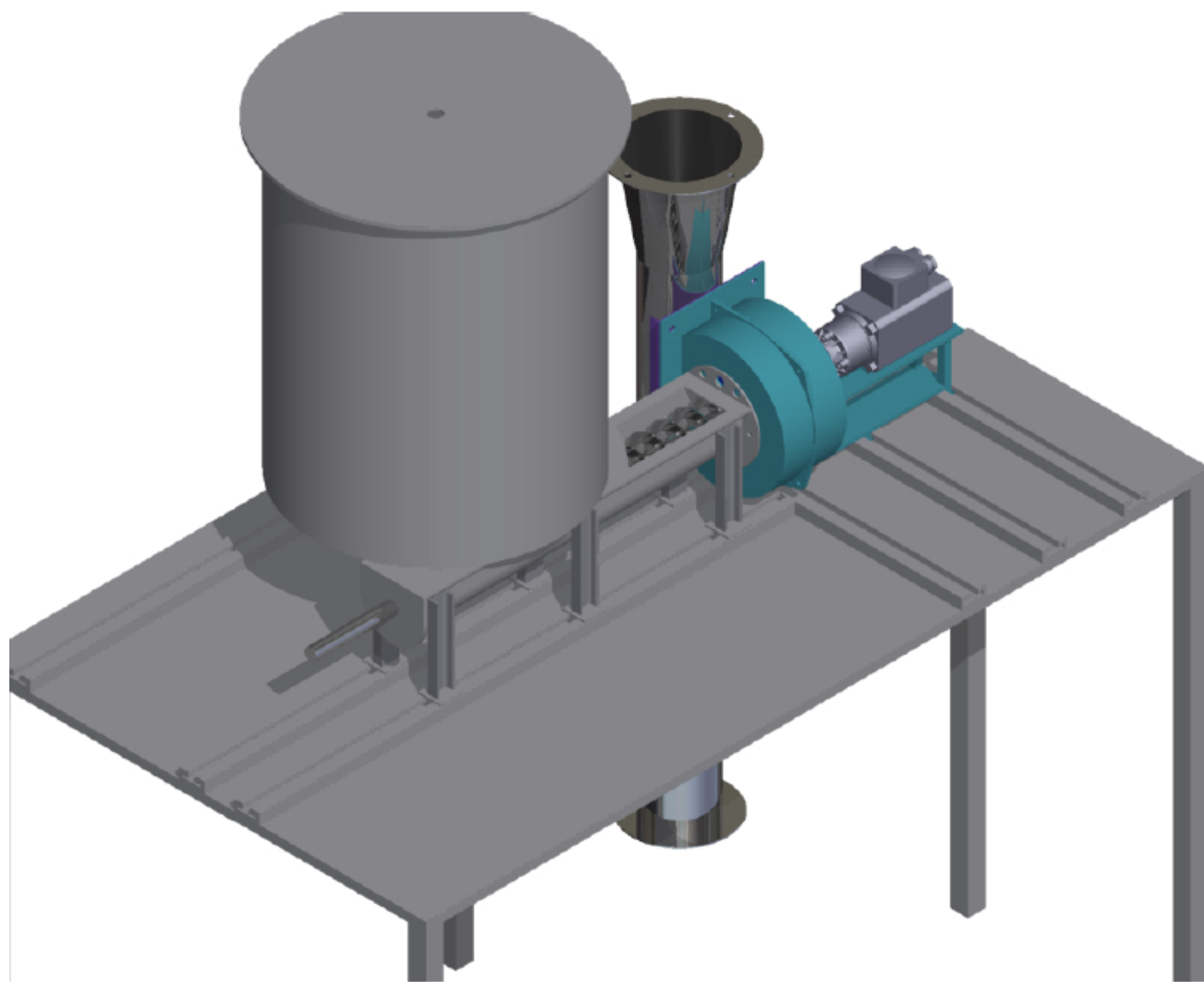
de sorción de almidón con alta amilopectina y alta amilosa, según lo dispuesto por (Al-Muhtaseb et al., 2004) y presentado en la ecuación A.15. Se estableció para la desorción del agua a temperaturas entre 30 °C y 60 °C y contenido de humedad de 0,02 a 0,2 kg.kg⁻¹.

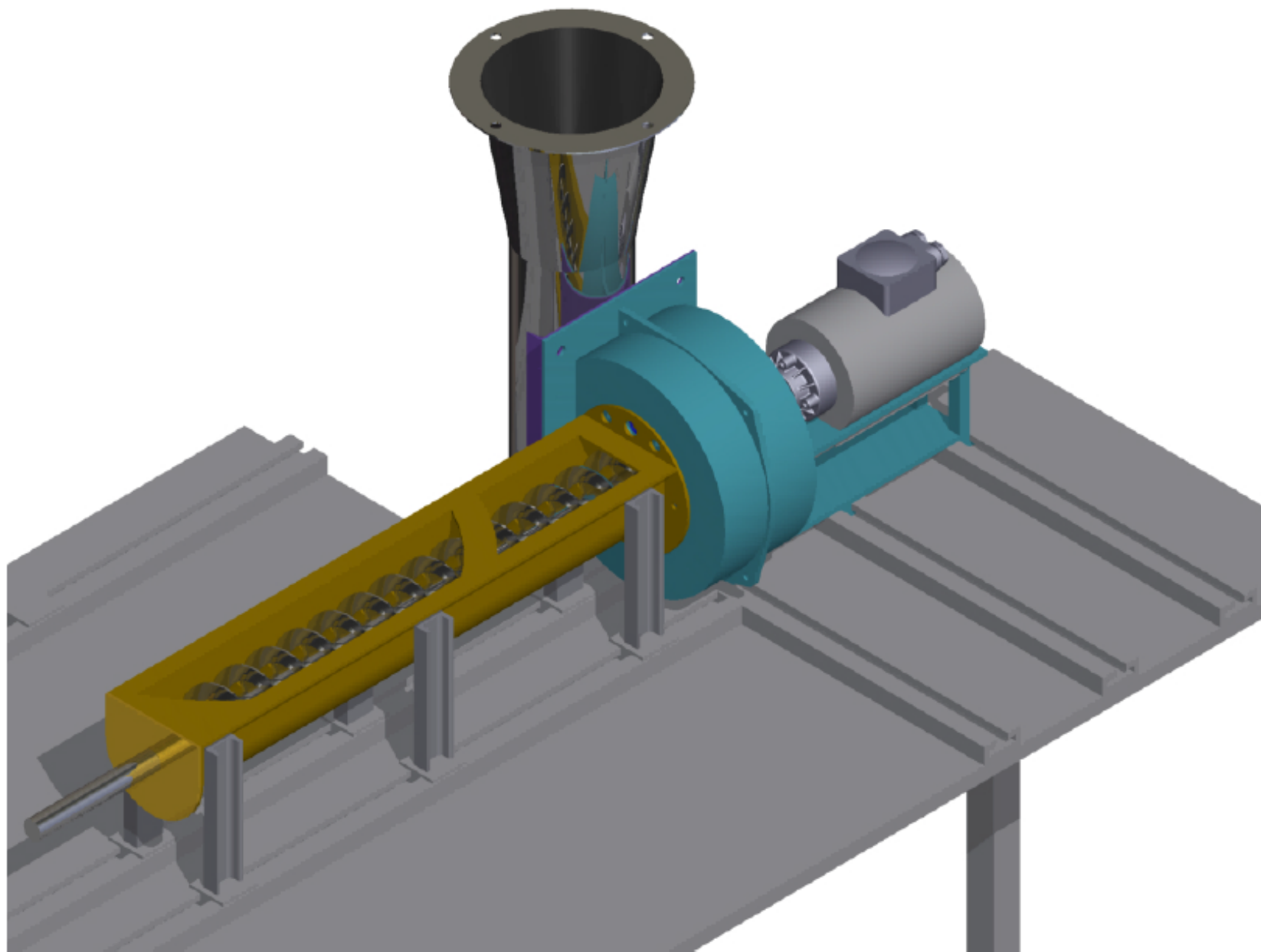
$$L_s = (1,923 \cdot \exp(-27,53 \cdot X) + 2,476) \cdot 10^6 \quad (\text{A.15})$$

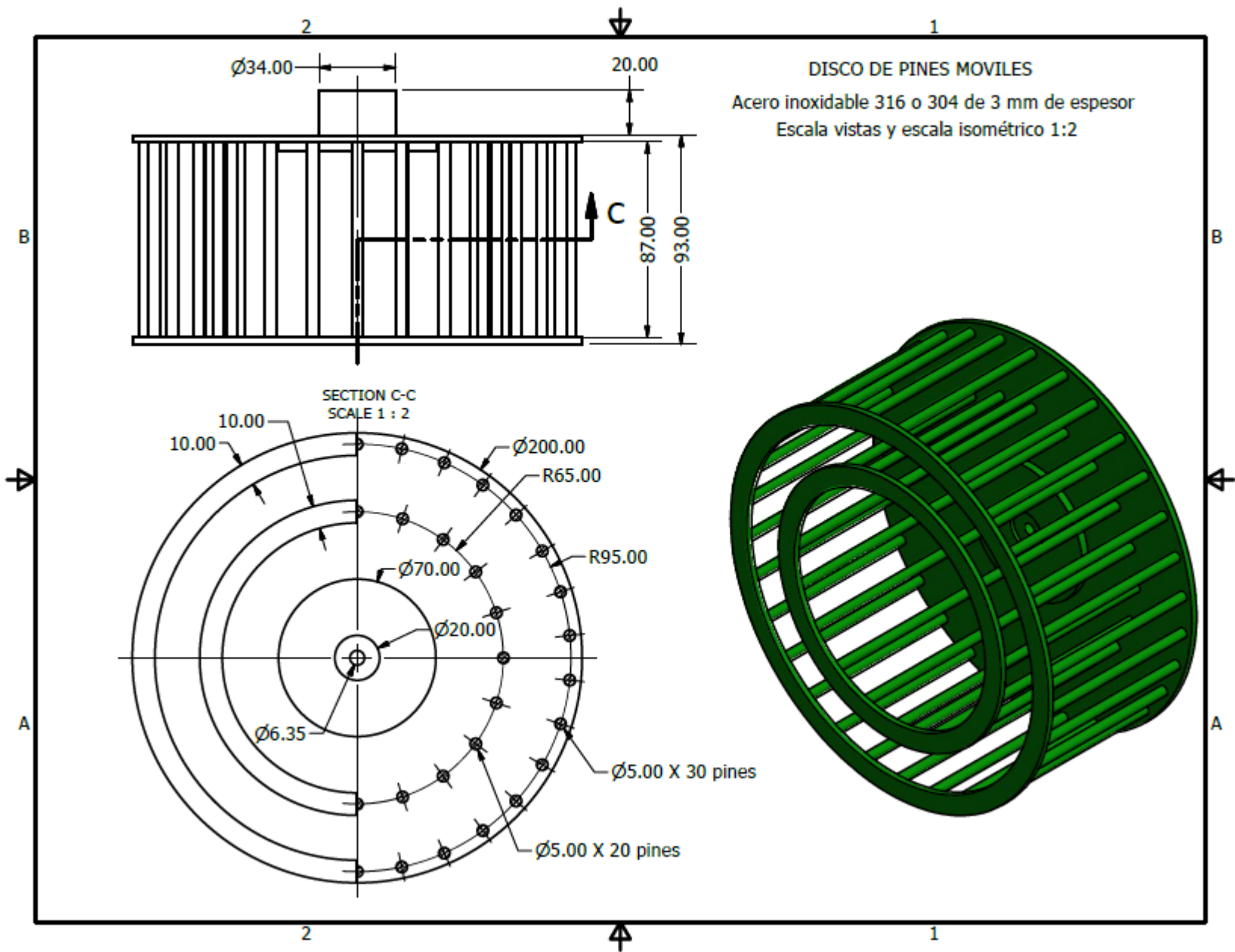
Se puede observar que la constante de la ecuación es cercana al valor del calor latente de vaporización del agua libre en este rango de temperatura (2394 kJ.kg⁻¹ a 45 °C).

APÉNDICE B. IMAGENES Y DIBUJOS DEL SECADOR FLASH Y SUS PARTES









2

1

A 3D CAD model of a mechanical assembly, possibly a pump or motor housing. It features a blue frame with a central circular opening and a large, curved, semi-circular component attached to the right side. The assembly is shown from an isometric perspective.

