



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**CALIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DE UN SECADOR ROTATORIO
CONTINUO, Y OPTIMIZACIÓN DEL SECADO CON PIEDRA PÓMEZ, PARA PRODUCCIÓN
DE AGROQUÍMICOS GRANULARES**

Luis Fernando Chen García

Asesorado por la Inga. Priscila Guadalupe Muñoz Monzón

Guatemala, marzo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DE UN SECADOR ROTATORIO
CONTINUO, Y OPTIMIZACIÓN DEL SECADO CON PIEDRA PÓMEZ, PARA PRODUCCIÓN
DE AGROQUÍMICOS GRANULARES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS FERNANDO CHEN GARCÍA

ASESORADO POR LA INGA. PRISCILA GUADALUPE MUÑOZ MONZÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Ernesto Martínez Lira
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CALIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DE UN SECADOR ROTATORIO CONTINUO, Y OPTIMIZACIÓN DEL SECADO CON PIEDRA PÓMEZ, PARA PRODUCCIÓN DE AGROQUÍMICOS GRANULARES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de septiembre de 2015.

Luis Fernando Chen García

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Alvaro Chen y Celina García. Gracias a su apoyo incondicional, cariño y comprensión he llegado a superar mis metas.

Mi hermana

Jessica Chen García, esperando ser un ejemplo a seguir.

Mis familiares

Por estar pendientes de mí, de una u otra forma.

Mis amigos

Por haberme acompañado durante los años de estudio, y compartir su amistad: Marlen Carrillo, Nayo López, Erik Castañeda, Santiago Chávez, Héctor Mendoza, Daniel Mendoza, Maria Sierra, Cristian Oliva, Pablo González, Akassia Hengstenberg.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios, en donde encontré un lugar para mi superación académica.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.
Mis amigos de la Facultad	Por brindarme su apoyo cada día de clases, y hacer del estudio una actividad amena.
Señor Mauricio Zamora	Por su amistad, y apoyo incondicional durante el desarrollo del proyecto.
Bayer CropScience	Por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación y brindarme conocimientos para mi formación como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Condiciones actuales del equipo y materia prima	2
1.1.1. Especificaciones del material inerte.....	2
1.1.2. Especificaciones del producto terminado	2
1.1.3. Especificaciones del equipo	3
1.1.4. Especificaciones generales	3
1.2. Justificación	3
1.3. Determinación del problema.....	4
1.3.1. Definición	4
1.3.2. Delimitación	5
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Secado de sólidos	7
2.2. Equipo para la desecación de sólidos	7
2.2.1. Secadores directos	8
2.2.2. Secadores indirectos	8
2.3. Secadores rotatorios	8
2.3.1. Secadores rotatorios de calor directo	9

2.4.	Piedra pómez	9
2.4.1.	Localización y características de los depósitos pumicíticos en Guatemala.....	10
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	11
3.1.	Diagrama del equipo	12
3.2.	Variables	14
3.3.	Delimitación de campo de estudio	15
3.4.	Recursos humanos disponibles	15
3.5.	Recursos materiales disponibles.....	16
3.6.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	17
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información.....	17
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	20
3.8.1.	Tabulación y ordenamiento de la información	20
3.9.	Análisis estadístico.....	23
3.9.1.	Promedio.....	23
3.10.	Plan de análisis de los resultados	23
3.10.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	23
3.10.2.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	23
4.	RESULTADOS.....	25
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	31
	CONCLUSIONES.....	35
	RECOMENDACIONES	37
	BIBLIOGRAFÍA.....	39

APÉNDICES	41
ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama del secador rotatorio	12
2.	Dimensiones del secador rotatorio	13
3.	Recolección de la información	17
4.	Hoja de registro de mediciones	19
5.	Eficiencia térmica	25
6.	Desempeño del secador	26
7.	Flujos óptimos del material de ingreso	27
8.	Calor irradiado.....	28
9.	Costo por radiación	29
10.	Rendimiento económico.....	30

TABLAS

I.	Identificación de variables	14
II.	Datos originales	20
III.	Identificación de curvas en figura 7	27
IV.	Identificación de figura 10	30

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q_{rad}	Calor perdido como radiación (J/s)
C_{pA}	Capacidad calorífica de la humedad líquida (kJ/kg K)
C_{pAir}	Capacidad calorífica del aire (kJ/kg K)
C_{pG}	Capacidad calorífica del gas (kJ/kg K)
C_{pk}	Capacidad calorífica del keroseno (kJ/kg K)
C_{pS}	Capacidad calorífica del sólido (kJ/kg K)
C_{pVs}	Capacidad calorífica del vapor en la salida (kJ/kg K)
η	Eficiencia térmica (%)
H'_{G_s}	Entalpía de gases de salida secos (kJ/kg)
H'_{S_e}, H'_{S_s}	Entalpía de piedra pómez de entrada y salida, respectivamente (kJ/kg)
H'_{P_D}, H'_{P_F}	Entalpía de polvo de desecho y polvo filtro, respectivamente (kJ/kg)
λ_0	Entalpía de vaporización del agua a 0°C (kJ/kg)
H'_G	Entalpía del gas (kJ/kg)
H'_S	Entalpía del sólido húmedo (kJ/kg)
V_S	Flujo de vapor total en la salida (kg/s)
F_{Air}	Flujo másico de entrada de aire (kg/s)
G_e, G_s	Flujo másico de gas de entrada húmedo y gas de salida seco, respectivamente (kg/s)
G_e	Flujo másico de gases de entrada (kg/s)
F_k	Flujo másico de keroseno (kg/s)

S_e, S_s	Flujo másico de piedra pómez de entrada y salida, respectivamente (kg/s)
P_D, P_F	Flujo másico de polvo de desecho y polvo filtro, respectivamente (kg/s)
Y_e	Humedad de gas de entrada (kg/s)
X_e, X_s	Humedad de piedra pómez de entrada y salida, respectivamente (%p/p base húmeda)
X_{P_D}, X_{P_F}	Humedad de polvo de desecho y polvo filtro, respectivamente (%p/p base húmeda)
X	Humedad del sólido (%p/p base húmeda)
PCS_k	Poder calorífico superior del keroseno (kJ/kg)
Q	Quetzales (unidades monetarias)
T_0	Temperatura de referencia 0°C (273.15 K)
T_{Air}	Temperatura del aire de entrada (K)
T_G	Temperatura del gas (K)
T_k	Temperatura del keroseno (K)
T_S	Temperatura del sólido (K)
T_{V_S}	Temperatura del vapor en la salida (K)

GLOSARIO

Combustión	Reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada de desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.
Higrómetro	Instrumento para medir la humedad del aire.
Humedad	Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire.
Inerte	Sustancia o materia que carece de la capacidad de provocar reacciones químicas.
Keroseno	Líquido inflamable, mezcla de hidrocarburos, que se obtiene de la destilación del petróleo natural, en la actualidad se emplea como combustible.
Quemador	Dispositivo para quemar combustible líquido, gaseoso o ambos y producir calor generalmente mediante una llama.
Vernier	Aparato destinado a la medida de pequeñas longitudes y espesores.

RESUMEN

En una industria de agroquímicos, se utiliza piedra pómez como material inerte para el transporte de ingrediente activo, la operación de secado consiste en la eliminación de humedad de la piedra utilizando un secador rotatorio. Es necesario optimizar el uso de recursos, y disminuir pérdidas económicas y contaminación para el proceso de secado. Actualmente, se desconoce si el equipo opera satisfactoriamente.

El secado de sólidos se refiere a la separación de un líquido de un sólido, por evaporación. El equipo de secado se clasifica según el medio de transferencia de calor, características de manejo y propiedades físicas del material por secar. Los secadores rotatorios de calor directo son equipos que ponen en contacto gases de combustión con el material para evaporar la humedad contenida. La piedra pómez es un material volcánico con alta porosidad y propiedades puzolánicas empleada en fabricación de cemento y usos agrícolas, entre otros.

El objetivo del proyecto consiste en calificar la operación y desempeño de un secador giratorio continuo y optimizar el secado con piedra pómez, en una industria de producción de agroquímicos en Guatemala.

Para lograrlo, se realizaron mediciones de humedad, temperatura y flujo en el secador. Con estos datos, posteriormente, se calculó el balance de masa y energía, así como la eficiencia térmica del equipo para calificar su rendimiento y operación encontrando flujos óptimos para mejorar el proceso.

La eficiencia térmica promedio del secador resultó ser del 71,26 % sobre el calor entregado por la combustión de keroseno. Se obtuvo un rendimiento entre 10 y 30 kg de piedra seca por kg de keroseno consumido. Se establecieron las condiciones normales, como flujo de keroseno de 0,0424 kg/s y humedad de entrada de 32 % p/p en base húmeda. Se encontró que el flujo óptimo de entrada es de 2,00 kg/s de piedra asumiendo un porcentaje de impurezas del 6,82 %.

Las pérdidas de calor por radiación están entre el 7 % y el 42 %, 19,9 % en promedio, calculando pérdidas desde 46 hasta 265 quetzales por hora de operación como costo de keroseno. Al utilizar los flujos óptimos según la humedad de entrada del material, se aumenta el rendimiento económico en un 42,7 %, con respecto al rendimiento actual. Esto es aumentar de 3,58 a 5,11 kg de piedra seca por quetzal en combustible.

Se recomienda, entonces, utilizar una piedra pómez en la alimentación con una humedad menor al 25 % p/p en base húmeda para aumentar el rendimiento, regular el flujo de piedra de ingreso según la humedad de ésta, pedir, al proveedor, material con menos del 5 % de impurezas y reemplazar el aislamiento térmico del secador, todo para mejorar el rendimiento y eficiencia del secado.

OBJETIVOS

General

Calificar la operación y desempeño de un secador giratorio continuo, y optimizar el secado con piedra pómez, en una industria de producción de agroquímicos en Guatemala.

Específicos

1. Calcular la eficiencia térmica del secador, según condiciones variantes de operación.
2. Calificar el desempeño del secador rotatorio, según la calidad del producto obtenido a condiciones normales y variantes de operación.
3. Determinar los flujos de material, que resulten óptimos para condiciones normales de operación.
4. Determinar el porcentaje de pérdida de calor por radiación del secador rotatorio y el costo en combustible que representan.
5. Mejorar el rendimiento económico, disminuyendo el costo del secado.

INTRODUCCIÓN

El secado, en la industria desempeña un papel fundamental cuando se trata de producción de sólidos para el comercio, como eliminar la humedad contenida en granos de café, material para elaboración de cemento, secado de sales, semillas, materiales inertes como la piedra pómez, entre otras.

Dicha operación se puede realizar usando equipos comerciales que fueron desarrollados de acuerdo con el tipo de producto por desecar y medio de transferencia de calor. Se han realizado estudios para trabajos de graduación, donde se analizaron procesos en secadores giratorios con materia prima para cemento y también para granos de café.

En una planta industrial de producción de agroquímicos se utiliza piedra pómez como material inerte y medio de transporte para un insecticida. Por esta razón, se procesa para eliminar la humedad contenida y pueda absorber el componente activo. Para esta operación se utiliza un secador rotatorio de calor directo, instalado desde hace unos 10 años. El quemador que usa data de, aproximadamente, 40 años. Este secador presenta modificaciones mecánicas y eléctricas y carece de evidencias de estudios previos para determinar si las condiciones a las que opera y su rendimiento son los adecuados.

A continuación, se presenta el desarrollo del proyecto de graduación de EPS, donde se destacan los antecedentes, marco teórico, diseño metodológico, resultados, interpretación de resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas durante la ejecución del proyecto, el cual se realizó en una planta de producción de agroquímicos en Guatemala.

1. ANTECEDENTES

El secado comprende una operación unitaria fundamental en la industria del procesamiento de sólidos. Puede llevarse a cabo mediante equipos comerciales ampliamente utilizados en todo el mundo, dependiendo de las características requeridas para el producto final.

En el trabajo de graduación titulado *Evaluación del secado de materias primas para cemento, utilizando gases de combustión de un horno rotatorio largo como recurso calorífico* presentado por Rolando Estuardo Arocha Girón, en 1994, expuso la necesidad de realizar cambios en las condiciones de operación de secadores rotatorios y molinos rotatorios de bolas. De esta manera, se podría cumplir con los requerimientos de materias primas para la elaboración de cemento como producto, por ejemplo, arena caliza. Determinó, también características necesarias para un secador rotatorio y el diseño de un nuevo equipo que cumpla con las demandas de producción de la empresa.

También durante el año de 1994, se publicó el trabajo del estudiante Nelson Enrique García Paredes titulado *Determinación de las características de un secador rotatorio directo para el secado de arena caliza mediante el uso de gases de combustión*. En él se presentó el diseño y descripción de un secador rotatorio propuesto para la obtención de arena caliza a la humedad deseada. Recomienda utilizar un secador con dimensiones más grandes que las del actual para cumplir con las demandas de la empresa.

En un estudio más reciente, durante el año 2013, el estudiante Nelson Enrique García Paredes realizó la investigación titulada *Determinación*

experimental de la eficiencia de un secador de túnel rotatorio en proceso discontinuo utilizando grano de café tipo arábigo en pergamino donde evaluó, de manera experimental, la eficiencia térmica de un secador rotatorio discontinuo para el secado de grano de café.

Para una industria de agroquímicos donde se utiliza la piedra pómez como medio de transporte para insecticidas, convino utilizar un secador rotatorio continuo de calor directo a contracorriente para el secado de la misma. Además, se le han realizado modificaciones mecánicas internas de mantenimiento y continúa operando sin ser evaluado para la determinación de su rendimiento o condiciones de operación que tienen influencia en la eficiencia del secado.

1.1. Condiciones actuales del equipo y materia prima

1.1.1. Especificaciones del material inerte

El secador utiliza la piedra pómez en bruto molida, como material inerte de alimentación, con las especificaciones siguientes:

- Humedad (Base húmeda): ≤ 40 %
- Tamaño de partícula: 3/8 – 3/4 pulgada
- Porcentaje de cuarzo: ≤ 15 %

1.1.2. Especificaciones del producto terminado

- Humedad (Base húmeda): ≤ 1 %
- Tamaño de partícula: 3/8 – 3/4 pulgada

1.1.3. Especificaciones del equipo

- Tipo: Secador rotatorio de calor directo a contracorriente.
- Dimensiones: 11 m largo, 1,8 m de diámetro.
- Revoluciones por minuto: 3,6 RPM.
- Inclinación: 0.76 °.
- Quemador OERTLI, con keroseno talleres Guerin, S.A. tipo AR-20. Tiempo de operación de 40 años aproximadamente.
- Tiempo desde su instalación (cilindro rotatorio): 10 años aproximadamente.

1.1.4. Especificaciones generales

Demanda aproximada de 13,000 kg diarios, en un día comprendido por 15 horas de operación.

Temperatura ambiente en día soleado de 25 °C.

Consumo promedio de combustible (keroseno) de 660 galones en 15 horas.

1.2. Justificación

El objetivo de toda industria de producción a gran escala es optimizar el manejo de recursos y hacer más eficientes los procesos que la conforman, para disminuir los costos de producción y obtener mayores ganancias. De esta manera, elimina pérdidas innecesarias de energía que pudiesen traducirse en formas de contaminación y gastos económicos.

Actualmente, no se tiene evidencia de algún estudio previo del desempeño del secador rotatorio instalado en la planta de producción de agroquímicos ni

alguna calificación de la operación. Por ello, es probable que se esté operando en condiciones no favorables a las especificaciones y demandas de producción.

Mediante la aplicación de los conocimientos adquiridos en la carrera, en especial transferencia de calor, masa y en el laboratorio de operaciones unitarias, complementando con una investigación completa se puede realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las variables involucradas para el proceso de secado. Además, se desarrollan cálculos de ingeniería aplicados a equipos de escala industrial, para optimizar y generar beneficio para la producción y por consiguiente al cliente, el agricultor en Guatemala.

Si se realiza un estudio de la eficiencia y las variables que influyen en la misma, se puede proponer mejoras en el control del proceso y en el equipo y plantear las condiciones de mayor eficiencia, según se puedan modificar durante el proceso.

1.3. Determinación del problema

1.3.1. Definición

El secador rotatorio instalado en la planta es un equipo que data desde, aproximadamente, 10 años desde su instalación. Incluye un quemador de 40 años de funcionamiento, que en conjunto es operado sin información de su desempeño actual. A este equipo se le han realizado ajustes o modificaciones mecánicas y eléctricas durante el tiempo que ha estado funcionando. De esta manera, se han reparado numerosas veces los daños internos en elevadores, sensores, componentes eléctricos y mecánicos del quemador. También, se han subsanado de esta manera, los daños por corrosión. Estos desperfectos, en conjunto, modifican el desempeño del equipo.

Se desconocen las condiciones de operación óptimas para el secado, así como su eficiencia bajo condiciones variantes de operación.

1.3.2. Delimitación

El estudio se limitará a la realización de mediciones para la calificación del rendimiento y operación del secador rotatorio, instalado en la planta de producción de agroquímicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Secado de sólidos

El desecado o secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido, por evaporación.

En general, el secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido para reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es, generalmente, la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia, el producto que se extrae de un secador está listo para ser empaquetado.

2.2. Equipo para la desecación de sólidos

Existen varias maneras de clasificar los equipos de desecación. Las clasificaciones más útiles se basan en:

- Método de transmisión de calor a los sólidos húmedos, o
- Las características de manejo y propiedades físicas del material mojado.

Según la clasificación basada en el método de transferencia de calor, existen:

2.2.1. Secadores directos

El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor. El líquido vaporizándose arrastra con el medio de desecación; es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

2.2.2. Secadores indirectos

El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Se llaman también secadores por conducción o de contacto.

2.3. Secadores rotatorios

Un secador rotatorio consiste en un cilindro que gira sobre cojinetes apropiados y, por lo común, tiene una leve inclinación en relación con la horizontal. La longitud del cilindro varía de 4 a más de 10 veces su diámetro, que oscila entre menos de 0,3 hasta más de 3 m. Los sólidos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro, y se descargan por el otro extremo como producto acabado.

Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad de movimiento de los sólidos según que la circulación del gas sea a contracorriente o siga una corriente paralela con la circulación de los sólidos

2.3.1 Secadores rotatorios de calor directo

El secador rotatorio de calor directo está equipado comúnmente con aspas en el interior, para levantar y dejar caer los sólidos a través de la corriente de gas a su paso por el cilindro. Estas aspas tienen, casi siempre, una ubicación alterna cada 0,6 a 2 m para asegurar una cortina de sólidos más continua y uniforme en el gas. La forma de las aspas depende de las características del manejo de los sólidos.

El flujo a contracorriente de gas y los sólidos genera mayor eficiencia de transferencia de calor, con una temperatura de gas de entrada determinada; pero el flujo en corrientes paralelas se utiliza con mayor frecuencia para desecar materiales sensibles al calor.

2.4. Piedra pómez

La piedra pómez, pumita o pumicita es una materia prima mineral de origen volcánico (piroclásticos), en cuya composición intervienen, mayoritariamente, la sílice y la alúmina, con porcentajes aproximados del orden de: 70 % de Si O₂ y 13 % de Al₂O₂. La piedra pómez es una roca con alta porosidad, ligera (densidades entre 0,4 a 0,9 g/cm³), eficaz aislante térmico y con propiedades puzolánicas. Por ser considerada una puzolana natural de bajo coste, la piedra pómez es un ingrediente importante en la elaboración del cemento Portland, aumentando su durabilidad química (resistencia frente al ataque por las aguas puras, carbónicas, agresivas o ligeramente ácidas). Aparte de este uso industrial, se emplea piedra pómez en la fabricación de filtros, abrasivos y en usos agrícolas.

2.4.1. Localización y características de los depósitos pumicíticos en Guatemala.

En general se puede decir que Guatemala es un país que tiene un potencial bastante grande de piedra pómez. Esto se explica fácilmente si se considera la gran cantidad de volcanes que se encuentran en la región.

Las minas más ricas en este mineral, están situadas a lo largo de la cadena volcánica que atraviesa el país. En estas regiones están Chimaltenango, Quetzaltenango, Huehuetenango, Sololá, el valle de Guatemala y sus alrededores, etc. En la región norte del país, se encuentran yacimientos importantes en El Progreso y Sanarate, sin embargo, Petén carece de ellos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Se representará en un diagrama de flujo, las entradas y salidas de masa y calor en el secador rotatorio.

Se realizaron mediciones de flujo másico de piedra pómez a la entrada y salida del secador, temperaturas de entrada y salida de aire y gases, humedad del sólido en la alimentación y descarga del equipo, flujo de entrada de gases.

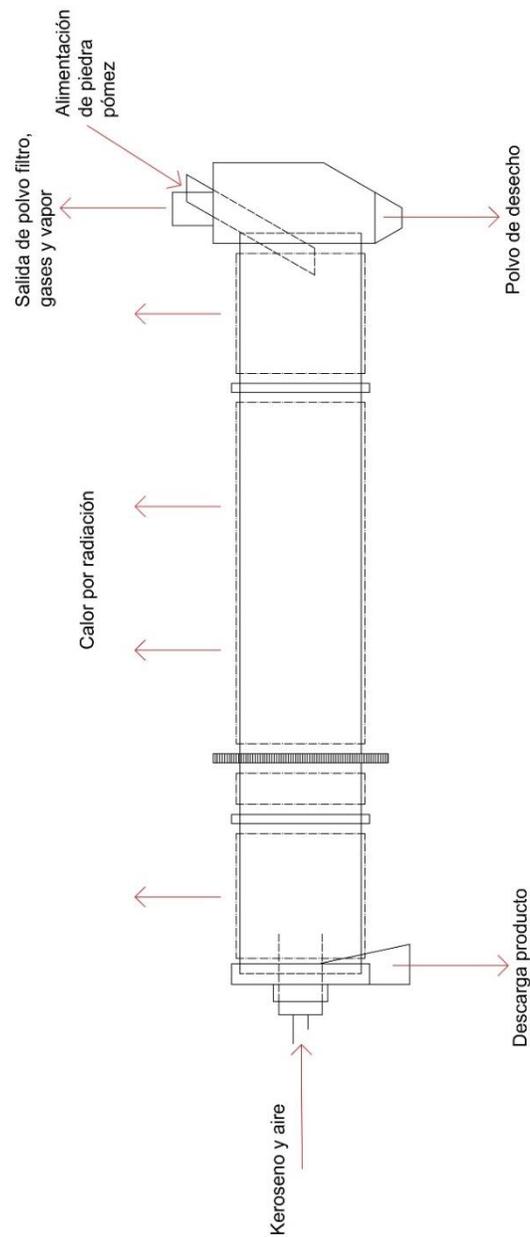
Dichas mediciones se realizaron periódicamente durante el turno diurno, para obtener datos representativos. Con ellos, se calculó la eficiencia térmica del equipo operando a las condiciones variantes obtenidas durante el turno.

Para obtener los flujos óptimos de operación, dependiendo de las condiciones de alimentación, se desarrollaron balances de masa y energía en el secador. A partir de estos cálculos se obtuvieron gráficos del flujo adecuado para lograr una mayor eficiencia y calidad en el producto obtenido.

Según el contenido de humedad de la piedra pómez obtenida por los proveedores, se determinaron las condiciones del secado necesarias para obtener el porcentaje de humedad de salida deseado.

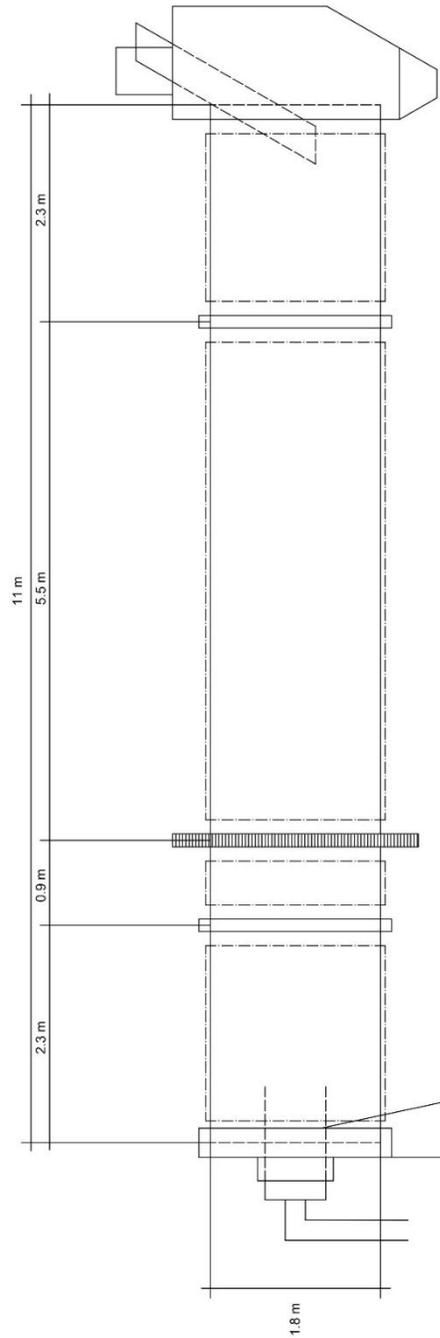
3.1. Diagrama del equipo

Figura 1. Diagrama del secador rotatorio



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 2. Dimensiones del secador rotatorio



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

3.2. Variables

Una variable se define como un parámetro cuantificable que, durante el proceso, puede controlarse, o no, para estudiar posteriormente el fenómeno.

Tabla I. Identificación de variables

	Variable	Independiente	Dependiente
Piedra pómez	Humedad de entrada	X	
	Humedad de salida		X
	Temperatura de entrada	X	
	Temperatura de salida		X
	Flujo másico de entrada	X	
	Flujo másico de salida		X
Gases de secado	Flujo másico de entrada	X	
	Flujo másico de salida		X
	Humedad de entrada	X	
	Humedad de salida		X
	Temperatura de entrada		X
	Temperatura de salida		X
Keroseno	Flujo másico de entrada	X	
Polvo	Flujo de salida	X	
	Temperatura de salida		X
	Humedad de salida		X

Fuente: elaboración propia.

3.3. Delimitación de campo de estudio

El procesamiento de la piedra pómez en la planta de agroquímicos comprende, desde la molienda, transporte en bandas, tamizado, secado, hasta la impregnación de aditivo para elaborar el producto final. El campo de estudio abarcará únicamente la operación de secado.

Se realizaron mediciones de los parámetros de entrada y salida del equipo esencialmente. A partir de ellas, y mediante la aplicación de cálculos de ingeniería se interpretó el fenómeno, se calificó la operación, el desempeño del equipo y se presentaron recomendaciones de las condiciones de operación óptimas para el proceso.

3.4. Recursos humanos disponibles

Se contó con la colaboración de los operarios capacitados para el manejo y control del secador rotatorio, personal de mantenimiento, personal de laboratorio de control de calidad y jefe de producción. Asimismo, participaron el investigador y el asesor:

- Jefe de producción: Inga. Ana Mercedes Donis
- Asesor técnico: Inga. Priscila Muñoz Monzón
- Asesor docente: Ing. Alejandro Recinos
- Investigador: Luis Fernando Chen García
- Operario 1: Mauricio Zamora
- Operario 2: Marvin Farfán
- Operario 3: Eddy Cosajay
- Operario 4: Rember Orellana
- Operario 5: Deygglin Orellana

3.5. Recursos materiales disponibles

Herramientas de medición

- Balanza medidora de humedad
- Cinta métrica
- Cronómetro digital
- Higrómetro
- Medidor vernier
- Termómetro infrarrojo
- Balanza electrónica

Equipo

- Secador rotatorio continuo

Insumos de oficina

- Computadora
- Impresora
- Hojas de papel
- Instrumentos de escritura
- Calculadora científica

Equipo de protección personal

- Overol
- Casco
- Botas con punta de acero

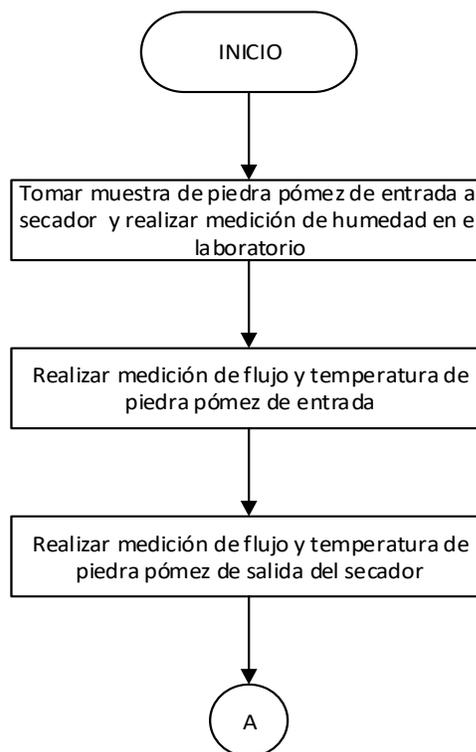
- Mascarilla contra polvo
- Lentes de seguridad
- Guantes térmicos
- Guantes anti-abrasivos
- Protectores auditivos

3.6. Técnica cualitativa o cuantitativa

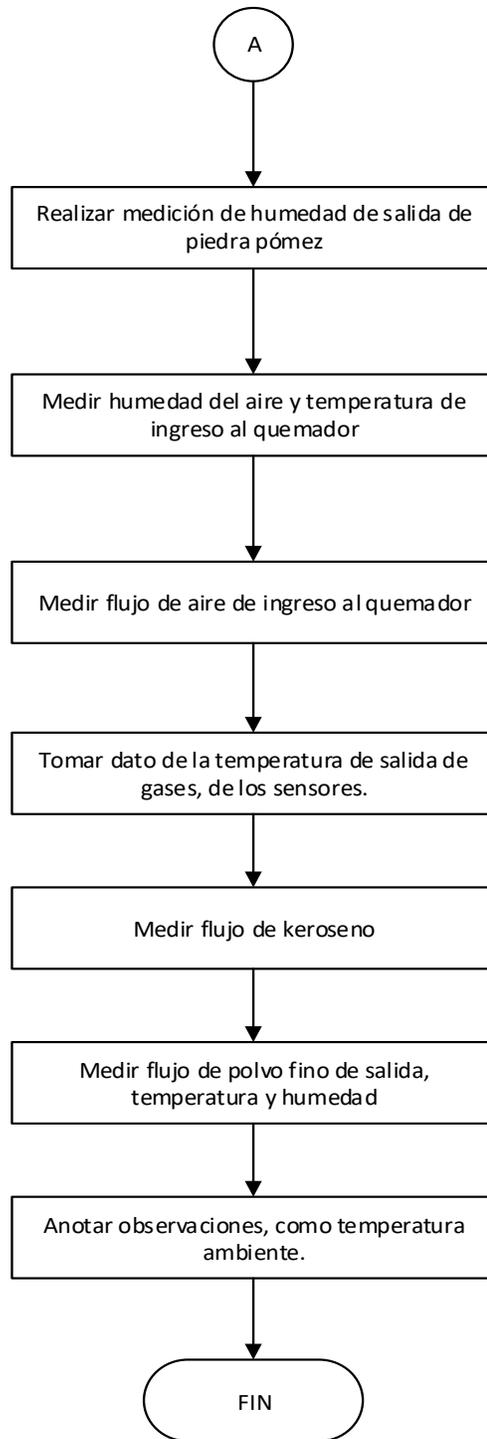
Ninguna técnica cualitativa o cuantitativa se utilizó, especialmente. Para recolectar datos se realizaron las mediciones durante la operación del equipo.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Figura 3. Recolección de la información



Continuación de figura 3.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Hoja de registro de mediciones

Hoja de registro de mediciones del secador			
Entrada		Salida	
Piedra Pómez			
Humedad (%p/p)	<input type="text"/>	Humedad (%p/p)	<input type="text"/>
Flujo (kg/m)	<input type="text"/>	Flujo (kg/s)	<input type="text"/>
Temperatura (°C)	<input type="text"/>	Temperatura (°C)	<input type="text"/>
Aire al quemador			
Humedad (%RH)	<input type="text"/>		
Temperatura (°C)	<input type="text"/>		
Flujo (kg / s)	<input type="text"/>		
Gases de combustión			
		Temperatura (°C)	<input type="text"/>
Keroseno		Flujo (gal/s)	<input type="text"/>
Polvo			
Polvo filtro		Temperatura (°C)	<input type="text"/>
		Humedad (%p/p)	<input type="text"/>
Polvo desecho		Flujo (kg/s)	<input type="text"/>
		Temperatura (°C)	<input type="text"/>
		Humedad (%p/p)	<input type="text"/>
Observaciones			

Fuente: elaboración propia.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

3.8.1. Tabulación y ordenamiento de la información

Tabla II. Datos originales

Corrida	Piedra pómez de entrada			Piedra pómez de salida		
	Humedad X_e (%p/p)	Flujo S_e (kg/m)	Temperatura T_{Se} (°C)	Humedad X_s (%p/p)	Flujo S_s (kg/s)	Temperatura T_{Ss} (°C)
1	0,2914	1,64	20,0	0,002	1,1170	228
2	0,3070	1,62	20,0	0,003	0,9665	190
3	0,3314	1,29	21,0	0,001	0,6086	325
4	0,3017	1,59	21,0	0,002	0,7649	255
5	0,3414	1,44	21,0	0,002	0,6932	330
6	0,3149	1,64	21,0	0,002	0,8852	273
7	0,3656	1,32	19,0	0,003	0,8170	254
8	0,2710	1,63	21,0	0,002	1,0560	250
9	0,2773	1,73	20,0	0,003	1,1569	161
10	0,2287	1,51	20,4	0,003	0,9040	151
11	0,3318	1,85	22,0	0,081	0,8318	77
12	0,2899	1,25	22,6	0,002	0,5454	186
13	0,2950	1,37	21,2	0,003	0,6875	230
14	0,1978	1,67	21,2	0,002	0,9902	178
15	0,2540	1,73	22,0	0,003	1,2440	131
16	0,3464	1,53	21,0	0,037	0,9811	98
17	0,2721	1,28	21,0	0,003	0,8735	230
18	0,2607	1,33	21,0	0,004	0,8187	245
19	0,2615	1,18	21,0	0,004	0,5833	215
20	0,3312	1,78	22,0	0,062	1,0920	101
21	0,3317	1,69	22,0	0,004	0,8824	170
22	0,3610	1,59	22,0	0,003	0,8228	229
23	0,3716	1,58	22,0	0,006	0,8605	175
24	0,3453	1,59	22,0	0,003	0,5892	214
25	0,3509	1,51	22,0	0,004	0,9249	176
26	0,3799	1,29	22,0	0,004	0,6465	194
27	0,3504	0,91	22,0	0,004	0,4667	219
28	0,3425	1,55	22,0	0,016	0,8683	150
29	0,3543	1,53	22,0	0,004	1,0010	150
30	0,3377	1,55	22,0	0,007	1,0220	154
31	0,3219	1,87	22,0	0,063	1,2397	106
32	0,3544	1,28	22,0	0,004	0,7010	191
33	0,3879	1,31	22,0	0,003	0,6746	250
34	0,3306	1,47	23,0	0,004	0,7115	205

Continuación de la tabla II.

Corrida	Aire			Gases de combustión
	Humedad	Temperatura	Flujo	Salida
	HR (%)	T _{air} (°C)	U, de Escala	T _G (K)
1	68,3	22	105	93,5
2	70,0	22	105	93,0
3	72,0	25	105	103,0
4	58,0	25	105	96,5
5	65,0	26	105	100,0
6	65,5	26	105	99,0
7	44,0	27	105	92,0
8	48,5	27	105	98,0
9	61,3	23	110	95,5
10	60,3	24	105	97,0
11	58,0	25	105	98,0
12	60,9	26	105	90,0
13	63,7	26	100	96,5
14	57,8	27	100	90,0
15	55,8	27	100	92,0
16	67,4	23	105	89,0
17	60,5	25	105	90,0
18	51,8	27	105	98,0
19	51,7	27	105	96,0
20	63,0	25	110	89,0
21	62,0	26	110	91,0
22	57,4	27	105	100,0
23	67,1	24	110	98,8
24	67,2	24	110	101,0
25	52,1	26	110	98,5
26	54,2	26	110	94,0
27	48,0	27	110	95,0
28	38,0	30	110	91,0
29	42,9	27	100	91,0
30	34,0	31	110	93,0
31	51,9	26	110	87,0
32	48,9	27	110	93,0
33	36,0	31	110	102,0
34	36,0	31	110	99,0

Continuación de la tabla II.

Corrida	Keroseno	Polvo fino				
	Entrada	Polvo filtro		Polvo desecho		
	F _k (gal/s)	T _{PF} (°C)	X _{PF} (p/p)	P _D (kg/s)	T _{PD} (°C)	X _{PD} (p/p)
1	0,01180	52,5	0,005	0,005580	30,8	0,007
2	0,01205	54,0	0,005	0,003013	29,5	0,012
3	0,01370	60,0	0,003	0,004824	48,0	0,002
4	0,01111	62,4	0,002	0,006256	42,0	0,003
5	0,01353	42,0	0,002	0,006216	45,0	0,004
6	0,01241	50,0	0,002	0,003294	38,0	0,008
7	0,01297	55,0	0,005	0,005815	35,0	0,011
8	0,01315	42,0	0,005	0,004702	39,0	0,006
9	0,01216	34,0	0,003	0,007877	26,0	0,010
10	0,01253	34,9	0,006	0,004885	28,0	0,007
11	0,01336	31,0	0,006	0,006676	36,3	0,007
12	0,01283	36,5	0,004	0,005980	31,3	0,008
13	0,01055	30,8	0,003	0,003485	26,0	0,010
14	0,01050	34,0	0,003	0,005839	29,6	0,003
15	0,01038	32,0	0,003	0,003573	29,0	0,016
16	0,01193	37,0	0,003	0,006633	33,0	0,004
17	0,01181	39,5	0,006	0,002815	34,5	0,011
18	0,01160	44,8	0,006	0,002465	32,0	0,010
19	0,01189	44,0	0,003	0,002812	36,0	0,006
20	0,01185	38,0	0,005	0,002936	28,4	0,023
21	0,01198	39,0	0,007	0,002031	34,0	0,015
22	0,01386	40,0	0,004	0,002615	35,5	0,014
23	0,01333	39,8	0,005	0,003071	39,0	0,009
24	0,01392	40,0	0,004	0,003033	32,0	0,012
25	0,01326	38,0	0,005	0,006290	42,4	0,016
26	0,01111	39,0	0,004	0,004934	30,0	0,015
27	0,01124	38,0	0,005	0,006804	40,0	0,010
28	0,01129	38,0	0,005	0,006453	33,0	0,014
29	0,01189	40,0	0,004	0,008141	34,0	0,027
30	0,01153	42,0	0,005	0,006417	34,0	0,009
31	0,01240	32,0	0,006	0,002744	27,0	0,020
32	0,01191	34,0	0,005	0,007734	35,0	0,010
33	0,01211	38,0	0,005	0,004758	38,0	0,010
34	0,01207	41,0	0,004	0,002314	28,6	0,034

Fuente: elaboración propia.

3.9. Análisis estadístico

3.9.1. Promedio

Se realizaron promedios de mediciones:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

Ejemplo: Calcular el rendimiento actual promedio, en kg de piedra seca por quetzal.

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{4,303 + 2,887 + 3,845 + 4,032 + 4,261 + 3,456 + 2,460 + 3,526 + 3,433}{9} \\ &= 3,578 \text{ kg piedra seca /quetzal}\end{aligned}$$

3.10. Plan de análisis de los resultados

3.10.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

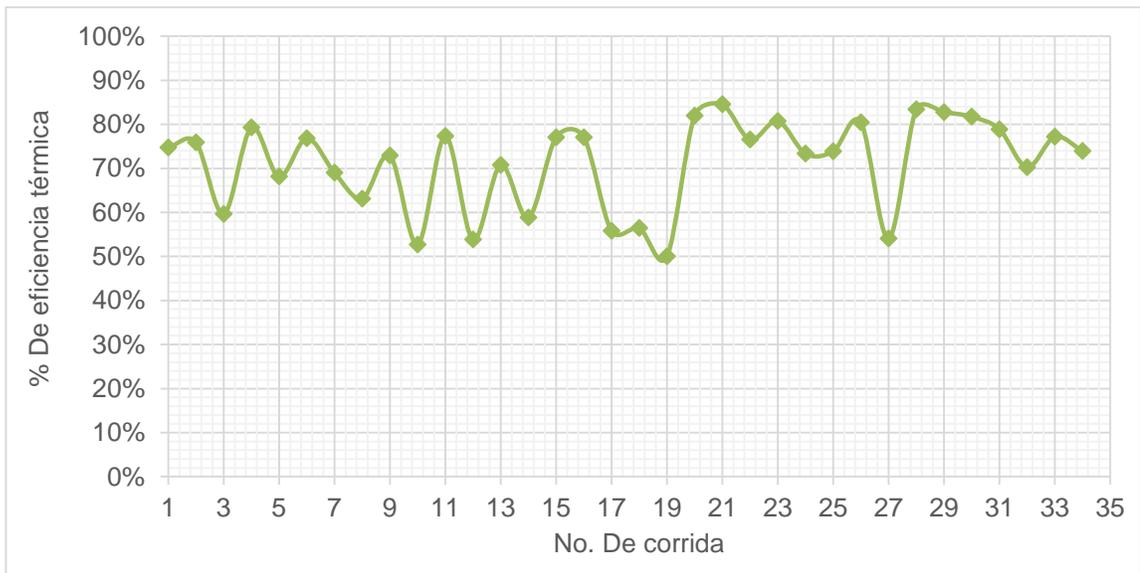
El método consiste en la realización del balance de masa y energía para obtener, teóricamente, los flujos óptimos de material para hacer más eficiente el proceso.

3.10.2. Programas a utilizar para análisis de datos

- Microsoft Word 2016
- Microsoft Excel 2016
- Microsoft Visio 2013
- AutoCAD 2016

4. RESULTADOS

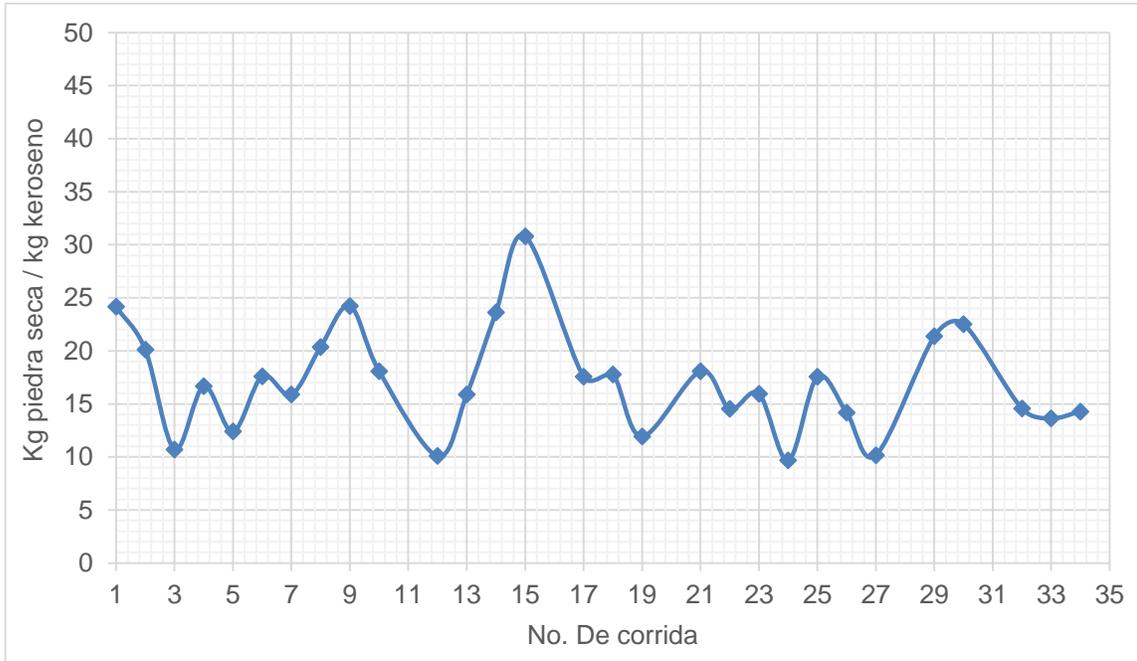
Figura 5. Eficiencia térmica



Fuente: datos calculados, tabla XV.

La eficiencia térmica promedio, obtenida para representar las condiciones normales de operación es del 71,26 %.

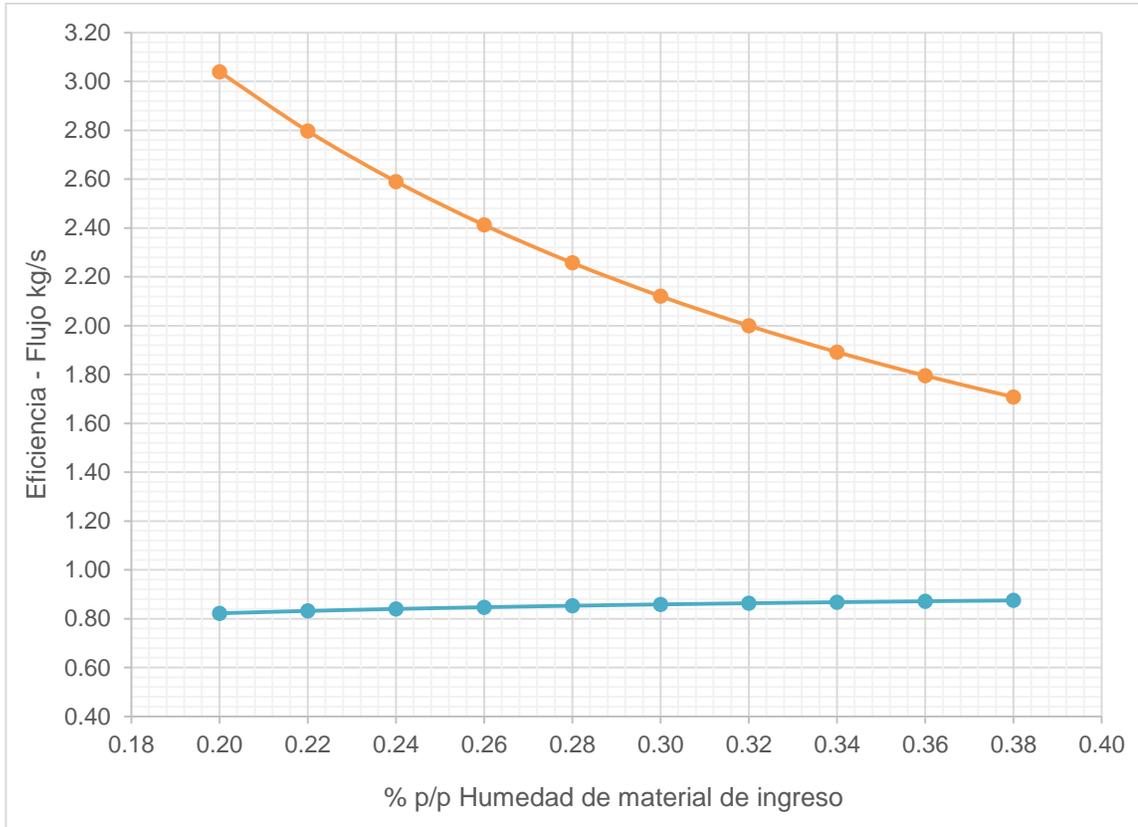
Figura 6. Desempeño del secador



Fuente: datos calculados, tabla XVI.

El desempeño para condiciones normales de operación fue calculado como el promedio del desempeño obtenido durante toda la evaluación del secador. El resultado fue 17,61 % kg piedra pómez seca / kg keroseno.

Figura 7. **Flujos óptimos del material de ingreso**



Fuente: datos calculados, tabla XVIII.

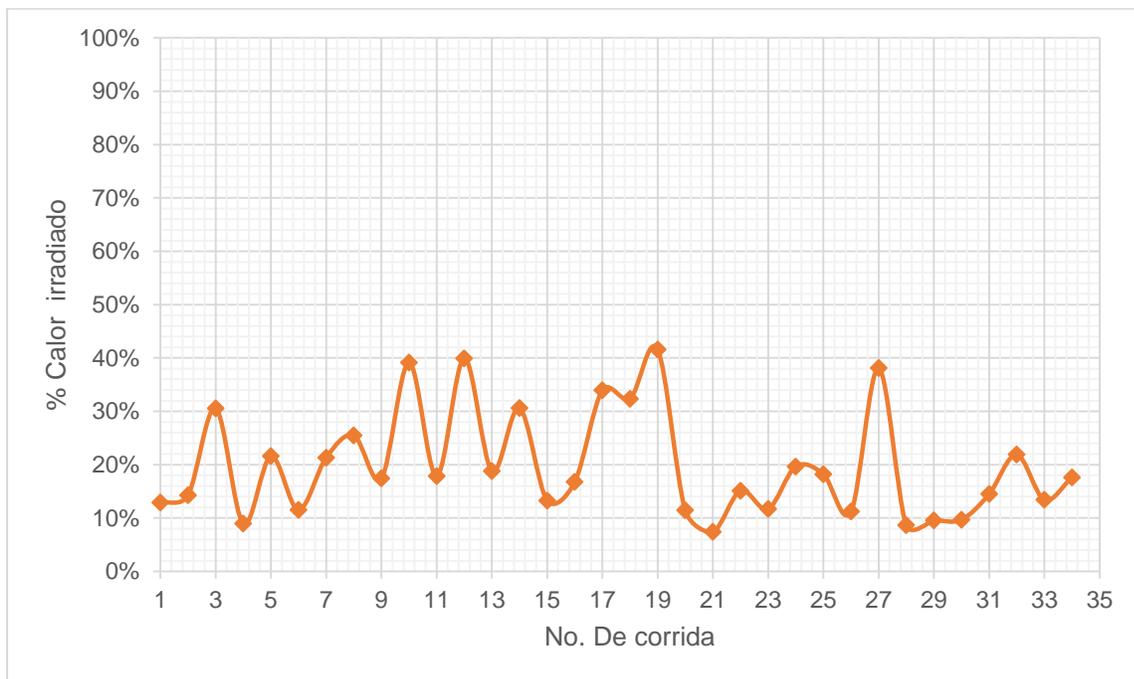
Tabla III. **Identificación de curvas en figura 7**

Color	Identificación	Unidades
	Flujo óptimo de entrada	kg/s
	Eficiencia térmica	kJ/kJ

Fuente: figura 6.

El calor irradiado fue calculado como el cociente entre la diferencia de energía de entrada y salida del secador, y el calor total suministrado por la combustión del keroseno.

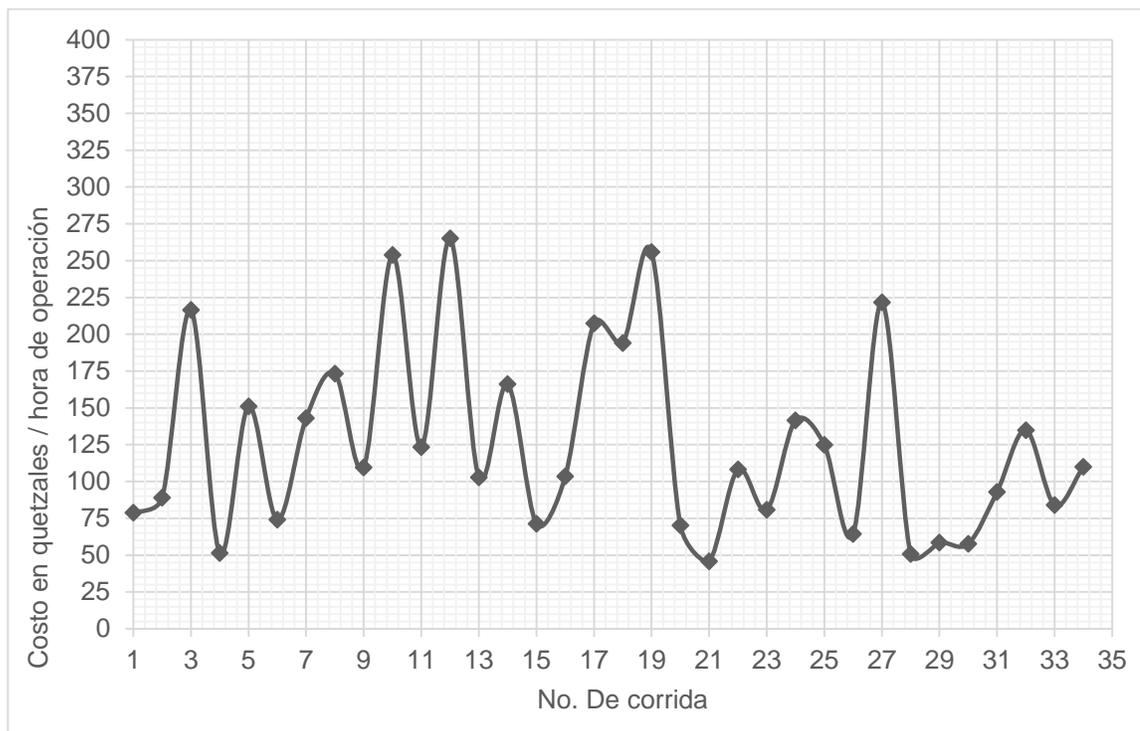
Figura 8. **Calor irradiado**



Fuente: datos calculados, tabla XV.

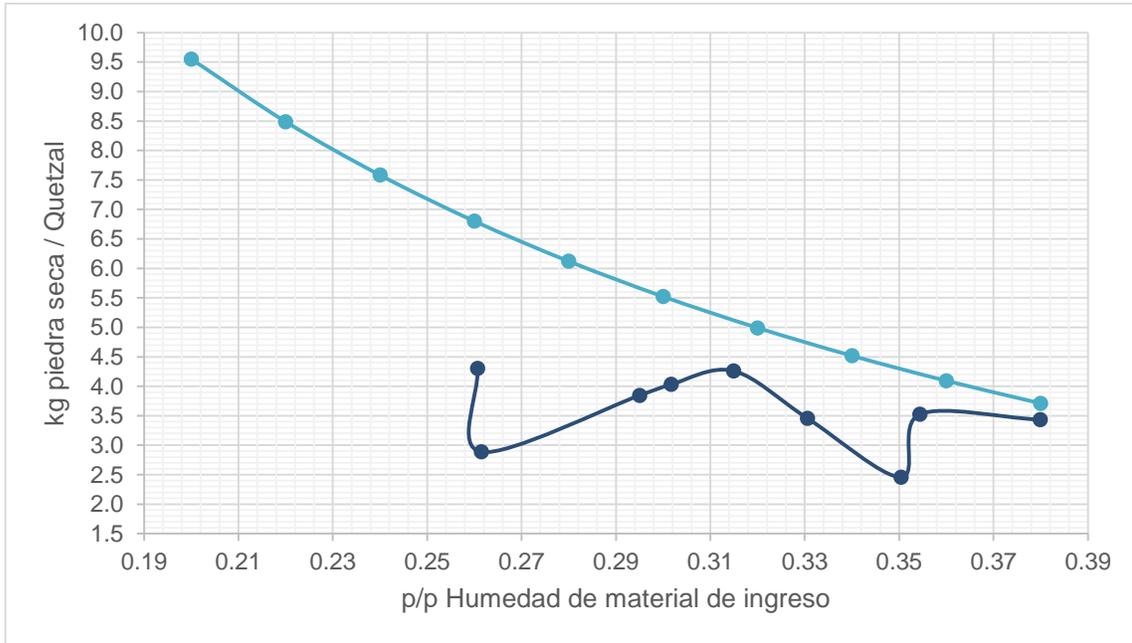
El costo por radiación se calculó, para cada corrida, como el costo keroseno que representa la energía perdida como radiación al ambiente, para una hora de operación continua.

Figura 9. **Costo por radiación**



Fuente: datos calculados, tabla XVII.

Figura 10. Rendimiento económico



Fuente: datos calculados tabla XVIII y XIX.

Tabla IV. Identificación de figura 10

Color	Identificación	Unidades
	Rendimiento optimizado	kg/quetzal
	Rendimiento normal	kg/quetzal

Fuente: figura 10.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron 34 corridas de mediciones que consisten en 16 datos individuales, de humedad, flujo y temperatura, de piedra pómez, gases, polvo y combustible presentados en la tabla I. Para cada conjunto de datos o corrida se calculó la eficiencia térmica del secador representada en la gráfica de la figura 5, donde son notables los puntos más bajos y altos de la eficiencia térmica durante el tiempo de mediciones en el secador rotatorio. Los resultados fueron de aproximadamente 50 % hasta un máximo de 86 %, con un promedio del 71,26 % de eficiencia.

Estos datos corresponden al aprovechamiento del calor entregado por la combustión del keroseno para evaporar el agua contenida en la piedra pómez. El aprovechamiento es bajo cuando se entrega más calor que el necesario, y se presentan pérdidas por radiación o calentamiento de sólidos en la salida. El aprovechamiento es más eficiente cuando se utiliza una cantidad de keroseno que proporciona el calor suficiente para el secado.

El desempeño del secador rotatorio se calculó como el flujo másico de piedra pómez de salida del secador con una humedad menor al 1 % en peso con base húmeda, obtenida por el consumo de 1 kg de keroseno. Dicha relación de flujo se representa en la gráfica de la figura 6, donde el mayor rendimiento obtenido tiene un valor de aproximadamente 30 kg de piedra / kg de keroseno y el valor más bajo es de 10 con las mismas unidades, cuyo promedio es de 17,62.

La humedad en el material de ingreso al secador es la causa principal de la variación en el desempeño. Se obtiene un mayor desempeño cuando la humedad

es más baja, debido a que contiene menor cantidad de agua que se deba evaporar para llegar a una humedad deseada, menor al 1 % p/p en base húmeda.

Los flujos óptimos se calcularon para una condición de alimentación de keroseno promedio de 0,0424 kg/s, variando la humedad de ingreso de material para determinar el flujo óptimo de alimentación en donde la humedad de salida del material del secador fuese menor al 1 % p/p. El rango de humedades se eligió con base en las humedades registradas de ingreso, que variaron desde aproximadamente 20 % p/p hasta un 39 % p/p. Dichos flujos de alimentación óptimos y la eficiencia térmica calculada para cada uno de los puntos están representados en la gráfica de la figura 7, donde se indica una eficiencia entre el 82 % y 87 %.

Estableciendo que la humedad promedio o normal de ingreso al secador es 32 % p/p y un consumo de keroseno de 0,0424 kg/s, el flujo óptimo de ingreso al secador según la gráfica de la figura 6 es de 2,00 kg/s, asumiendo que éste tiene impurezas del 6,82 % en peso.

En la gráfica de la figura 8 está representado el porcentaje de calor irradiado. Este se calculó como el cociente entre la diferencia de calor a la entrada y salida del secador, y el calor suministrado por la combustión del keroseno. Al determinar el punto más bajo como 7 % y el más alto como 42 %, dichos puntos corresponden también, al punto más eficiente térmicamente y el menor respectivamente; el promedio de pérdida por radiación fue del 19,9 %.

El costo o las pérdidas económicas por radiación representadas en la figura 9, tienen valores desde los 46 hasta los 265 quetzales, aproximadamente, por hora de operación. Este costo representaría la energía en consumo de keroseno.

La figura 10 contiene la gráfica del rendimiento económico. En ella, se representan dos curvas, una indica el rendimiento en kg de piedra seca por quetzal en combustible cuando se utilizan los flujos óptimos obtenidos representados en la figura 7 y, la otra, indica el rendimiento obtenido a las condiciones medidas utilizando las corridas, donde el consumo de keroseno fue, aproximadamente, el mismo que el consumido en el cálculo de los flujos óptimos.

El rendimiento promedio correspondiente a los valores de humedad de ingreso de material, mayores o iguales al 26 %, para flujos óptimos, corresponde al 5,108 kg de piedra seca por quetzal de combustible, mientras que el promedio del rendimiento actual es del 3,578. Con base en lo anterior, se mejora el rendimiento económico un 42,7 %, utilizando los flujos óptimos durante la operación del secador rotatorio.

CONCLUSIONES

1. La eficiencia térmica del secador se encuentra en un rango desde 50 % hasta un máximo de 86 %, con un promedio del 71,26 %, sobre el calor total entregado por los gases de secado que se aprovecha para evaporar la humedad de la piedra.
2. El rendimiento del secador rotatorio para secar la piedra pómez, hasta una humedad menor al 1 %, comprende un rango desde 10 hasta 30 kg de piedra por kg de keroseno consumido.
3. Para un consumo de keroseno de 0,0424 kg/s, y humedad de entrada de piedra pómez del 32 % p/p en base húmeda; el flujo óptimo de ingreso de piedra al secador es de 2,00 kg/s, asumiendo que este tiene impurezas del 6,82 % en peso.
4. La pérdida de calor por radiación va desde el 7 % hasta el 42 % sobre el calor proporcionado por la combustión del keroseno y se presentaron pérdidas económicas desde 46 hasta 265 quetzales por hora de operación.
5. Al utilizar los flujos óptimos indicados, se aumenta el rendimiento promedio desde 3,58 kg de piedra seca por quetzal de combustible, hasta 5,11 kg de piedra seca por quetzal o un 42,7 %.

RECOMENDACIONES

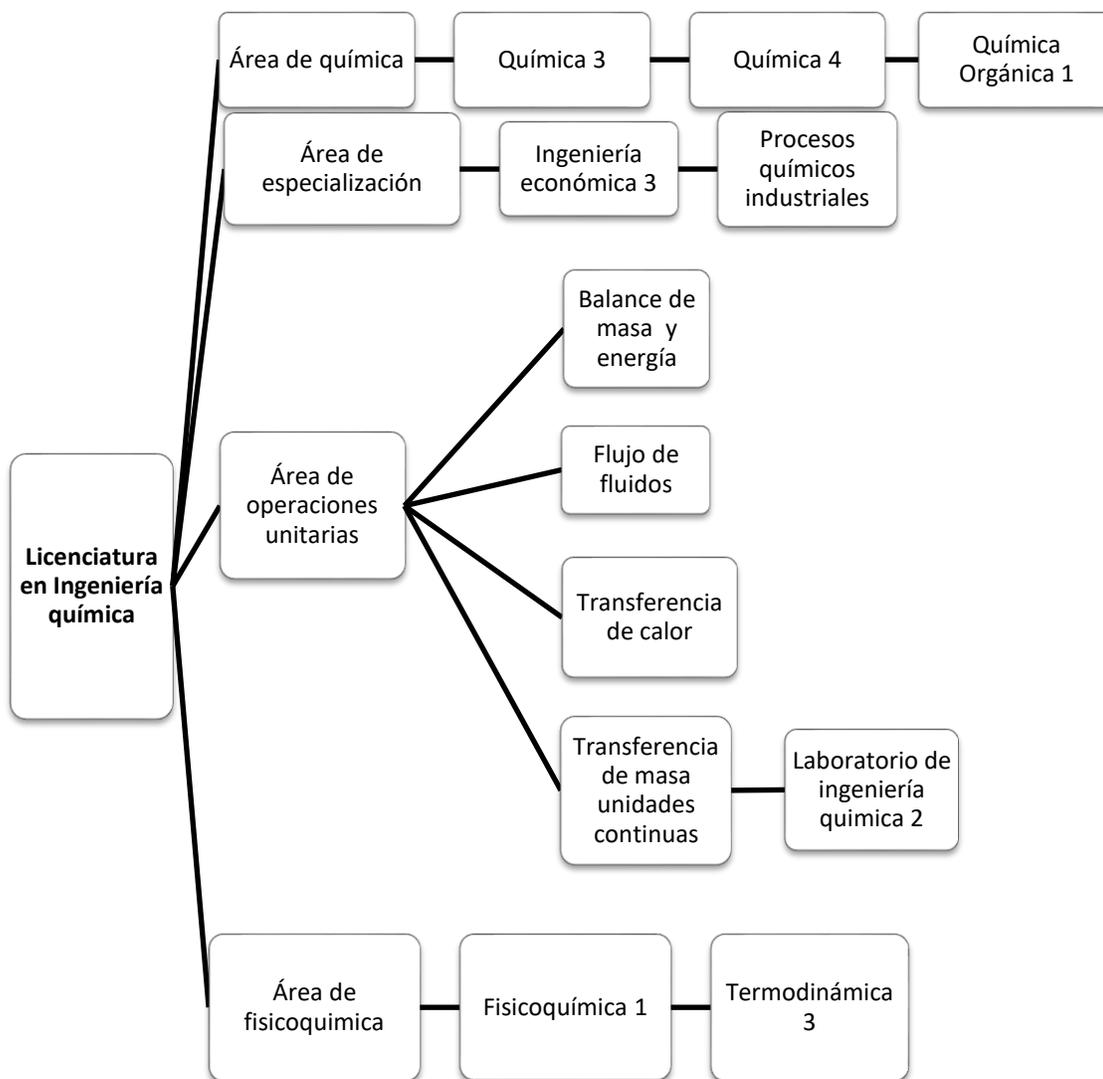
1. Utilizar piedra pómez de ingreso con la humedad debajo del 25 % p/p sobre base húmeda, para obtener un rendimiento mayor de sólido seco por kg de keroseno consumido.
2. Regular el flujo de entrada de piedra pómez al secador, según sea su humedad; utilizando los flujos óptimos de la gráfica de la figura 6, cuando se tiene un consumo promedio de keroseno de 0,0424 kg/s.
3. Pedir al proveedor de piedra pómez, de ser posible, que el porcentaje de impurezas en la piedra pómez sea menor al 5 %, para aumentar el rendimiento del secado.
4. Reemplazar el aislamiento térmico para reducir las pérdidas de calor por radiación a lo largo del secador rotatorio.

BIBLIOGRAFÍA

1. FELDER, Richard M. y ROSSEAU, Ronald W. *Principios elementales de los procesos químicos*. 3a ed. México: Limusa Wiley, 2004. 686 p. ISBN: 968-18-6169-8.
2. GEANKOPLIS. C. J., *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3a ed. México: Compañía editorial continental S.A. 1998.
3. INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. *Piedra pómez 2003*. [en línea]. <http://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2003_04/PPOMEZ03.pdf> [Consulta: 28 de octubre de 2012].
4. NONHEBEL, G., *El secado de sólidos en la industria química*. Edición en español. Reverté S.A., 1979. ISBN: 84-291-7966-6.
5. McCABE, Warren L. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. 4ª ed. México: McGraw-Hill, 1995. 1189 p. Capítulo 24. ISBN: 84-7615-700-2.
6. PERRY, Robert H. *Manual del ingeniero químico*. 6a ed. Japón: McGraw-Hill. 1984. Tomo V. Sección 20. ISBN: 96-8422-096-0.
7. PERRY, Robert H. *Manual del ingeniero químico*. 8a ed. en inglés McGraw-Hill. 2008. Sección 24. ISBN: 0-07-159313-6.

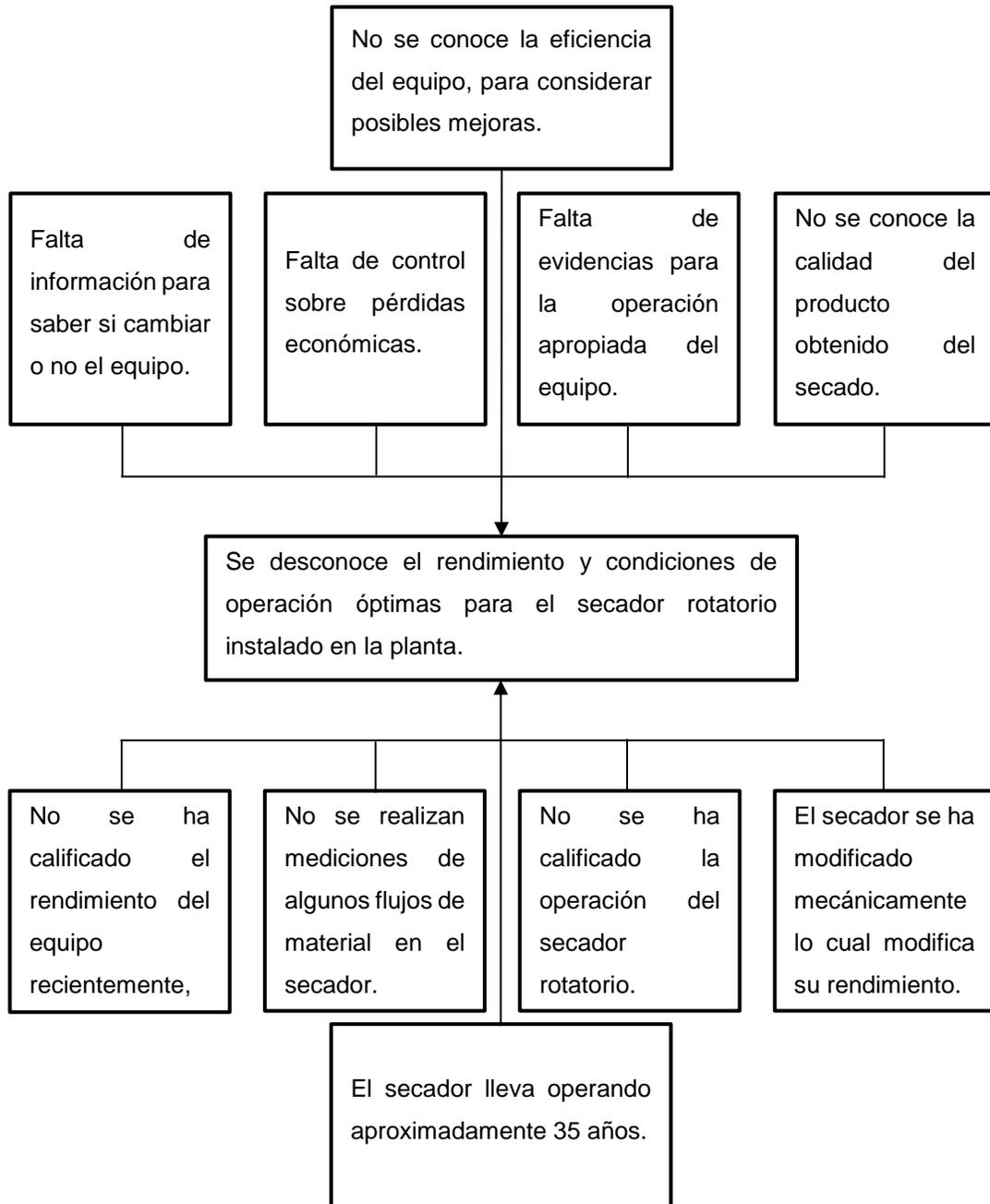
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Muestra de cálculo

Flujo de material de entrada

El flujo másico de material de entrada fue medido como kg de material, por 1 metro de faja alimentadora. Para obtener el flujo másico por unidad de tiempo se utilizó el siguiente modelo; preestablecido en la planta industrial:

$$S_e = 1,1159 x + 0,0021$$

[Ecuación 1]

En donde x , es el flujo medido en kg/m, y S_e , el flujo en kg/s.

Ejemplo: Conversión de flujo de alimentación, en corrida No. 34

$$S_e = 1,1159 (1.47) + 0,0021 = 1,64 \text{ kg/s}$$

Corrección de flujo de entrada

El flujo de sólido de entrada contiene un porcentaje que, en promedio, fue del 6,82 % p/p de piedra cuya humedad se consideró despreciable; por lo que este porcentaje no se consideró para el balance de humedad, pero sí para el balance de energía.

$$S_e \text{ sin impurezas} = S_e \text{ con impurezas} * 93.18 \%$$

[Ecuación 2]

Ejemplo: calcular el flujo de sólido de piedra pómez sin impurezas, al ingreso del secador usando el dato de la corrida 34.

$$S_e \text{ sin impurezas} = 1,642 \frac{kg}{s} * 93,18 \% = 1,530 \frac{kg}{s}$$

Flujo másico de aire

El flujo de aire se midió en unidades de escala en el quemador, las cuales indican el flujo volumétrico de aire, aplicando el siguiente modelo preestablecido también en la planta industrial; donde x es la unidad en la escala:

$$F_{air} = -(2 * 10^{-7}) * x^3 - (5 * 10^{-5}) * x^2 + 0,0205 * x + 0,0258$$

[Ecuación 3]

Ejemplo: Flujo de aire cuando la unidad en la escala es 110.

$$F_{air} = -(2 * 10^{-7}) * 110^3 - (5 * 10^{-5}) * 110^2 + 0,0205 * 110 + 0,0258$$
$$F_{air} = 1,4096 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para mayor simplicidad de cálculo, se asume que la densidad del aire se mantiene constante a $1,2 \text{ kg/m}^3$, y se realiza la conversión de flujo volumétrico a flujo másico:

$$F_{air} = 1,4096 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,692 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Humedad absoluta del aire

Para obtener la humedad absoluta del aire, a partir de la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco, se utiliza la carta psicométrica adjunta en el anexo.

Ejemplo: para la corrida 34, la humedad relativa del aire es 36, y la temperatura de bulbo seco 31 °C.

Según la lectura en la carta psicométrica, la relación de kg de vapor / kg de aire es de 0,010.

Combustión del keroseno

La cantidad de keroseno se midió en gal/s. Se asume que la densidad se mantiene constante a 0,79 g/cm³, para realizar la conversión a kg/s, se asume que la composición porcentual de los elementos químicos presentes en el keroseno es la indicada en la tabla IV.

Apéndice 3. Ejemplo de cálculo composición de keroseno

Flujo (gal/s)	Flujo (kg/s)	Componente	Composición %	PM (kg/Kmol)	kmol/s
0,0121	0,0420	Carbono	86,40	12,010	0,0030216
		Hidrógeno	13,60	1,010	0,0056556
		Oxígeno	0,01	16,000	0,0000003
		Nitrógeno	0,03	14,010	0,0000009
		Azufre	0,09	32,065	0,0000012

Fuente: elaboración propia basada en tabla 24-6 Perry 8^a. ed.

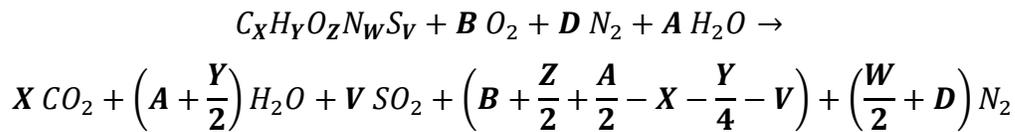
Se asume una composición porcentual del aire seco como 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno, mediante estequiometria y la ecuación balanceada

presentada a continuación, suponiendo combustión completa; se realiza el cálculo de la composición de los gases de salida.

Apéndice 4. **Ejemplo de cálculo oxígeno corrida 34**

Aire			
Flujo Total (kg/s)	Componente	Composición %	kmol/s
1,692			
Flujo Seco (kg/s)			
1,675	O ₂	21	0,01099
Flujo H ₂ O (kg/s)	N ₂	79	0,04723
0,0162			

Fuente: elaboración propia



[Ecuación 4]

Apéndice 5. **Ejemplo de cálculo, gases de salida corrida 34**

Gases de secado					
Componente	kmol/s	PM (kg/kmol)	Flujo (kg/s)	% Másico	Fracción Molar X
CO ₂	0,0030216	44,01	0,1329789	0,0767079	0,050662
H ₂ O	0,0028278	18,02	0,0672111	0,0387702	0,047414
SO ₂	0,0000012	64,065	0,0000755	0,0000436	0,000020
O ₂	0,0065574	32	0,2098376	0,1210432	0,109948
N ₂	0,0472331	28,02	1,3234726	0,7634351	0,791956
Total	0,05964		1,7335757	1,0000000	1,0000

Fuente: elaboración propia.

Balance de masa

Balance de sólidos secos

El balance de materia, con respecto al sólido seco, involucra la piedra pómez en la alimentación como única entrada de sólido, y las salidas consisten en: salida de piedra pómez seca, salida de polvo de desecho, y salida de polvo filtro como se indica en la figura:

$$S_e(1 - X_e) = S_s(1 - X_s) + P_D(1 - X_{P_D}) + P_F(1 - X_{P_F})$$

[Ecuación 5]

En donde:

S_e, S_s = Flujo másico de piedra pómez de entrada y salida respectivamente (kg/s)

X_e, X_s = Humedad de piedra pómez de entrada y salida respectivamente (p/p base húmeda)

P_D, P_F = Flujo másico de polvo de desecho y polvo filtro respectivamente (kg/s)

X_{P_D}, X_{P_F} = Humedad de polvo de desecho y polvo filtro respectivamente (p/p base húmeda)

Ejemplo: mediante el balance de sólidos secos encontrar el flujo de polvo filtro:

Despejando de la ecuación 5, el P_F :

$$\begin{aligned} P_F &= [S_e(1 - X_e) - S_s(1 - X_s) - P_D(1 - X_{P_D})] / (1 - X_{P_F}) \\ P_F &= \frac{\left[1,53 \frac{kg}{s} (1 - 0,33) - 0,60 \frac{kg}{s} (1 - 0,004) - 0,0023 \frac{kg}{s} (1 - 0,034) \right]}{(1 - 0,004)} \\ &= 0,43 \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

Balance de humedad

El balance de materia con respecto a la humedad queda como: humedad en el sólido de entrada más la humedad de los gases de entrada, es igual a la humedad en el sólido de salida, más la humedad de los polvos de salida y la humedad de los gases de salida o vapor en la salida.

$$S_e X_e + G_e Y_e = S_s X_s + P_D X_{P_D} + P_F X_{P_F} + V_S$$

[Ecuación 6]

En donde:

S_e, S_s = Flujo másico de piedra pómez de entrada y salida respectivamente (kg/s)

X_e, X_s = Humedad de piedra pómez de entrada y salida respectivamente (p/p base húmeda)

G_e = Flujo másico de gases de entrada (kg/s)

Y_e = Humedad de gas de entrada (kg/s)

P_D, P_F = Flujo másico de polvo de desecho y polvo filtro respectivamente (kg/s)

X_{P_D}, X_{P_F} = Humedad de polvo de desecho y polvo filtro respectivamente (p/p base húmeda)

V_S = Flujo de vapor total en la salida (kg/s)

Ejemplo: Encontrar el vapor total en la salida, usando datos de la corrida 34:

Despejando de la ecuación 5, el vapor V_S :

$$\begin{aligned} V_S &= S_e X_e + G_e Y_e - S_s X_s - P_D X_{P_D} - P_F X_{P_F} \\ V_S &= \left(1,53 \frac{kg}{s}\right) (0,33) + \left(1,69 \frac{kg}{s}\right) (0,0388) - \left(0,60 \frac{kg}{s}\right) (0,004) \\ &\quad - \left(0,0023 \frac{kg}{s}\right) (0,034) - \left(0,43 \frac{kg}{s}\right) (0,004) = 0,57 \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

Balance de energía

Entalpía del sólido húmedo

Para el balance de calor se selecciona un valor básico de T_0 en °C. Una temperatura conveniente es 0 °C. La entalpía del sólido húmedo está constituida por la entalpía del sólido seco más, la del líquido como humedad libre. En general, se desprecia el calor de humidificación.

La entalpía del sólido está dada por la siguiente ecuación:

$$H'_S = (C_{pS} - X(C_{pS} - C_{pA}))(T_S - T_0)$$

[Ecuación 7]

En donde:

H'_S = Entalpía del sólido húmedo (kJ/kg)

C_{pS} = Capacidad calorífica del sólido (kJ/kg K)

T_S = Temperatura del sólido (K)

X = Humedad del sólido (p/p base húmeda)

C_{pA} = Capacidad calorífica de la humedad líquida (kJ/kg K)

Ejemplo: encontrar la entalpía de sólido húmedo de entrada al secador, usando datos de la corrida 34.

$$H'_{Se} = \left(0,669 \frac{kJ}{kg K} - 0,33 \left(0,669 \frac{kJ}{kg K} - 4,18 \frac{kJ}{kg K} \right) \right) (296,15K - 273,15K)$$

$$H'_{Se} = 42,09 \frac{kJ}{kg}$$

Entalpía de los gases secos

La entalpía de gases se calcula como la capacidad calorífica de la mezcla de gases, por la temperatura de los mismos.

$$H'_G = C_{pG}(T_G - T_0)$$

[Ecuación 8]

En donde:

H'_G = Entalpía del gas (kJ/kg)

T_G = Temperatura del gas (K)

T_0 = Temperatura de referencia 0 °C (273.15 K)

C_{pG} = Capacidad calorífica del gas (kJ/kg K)

Ejemplo: Encontrar la entalpía de gases secos, usando los datos de la corrida 34:

$$H'_G = 0,82 \frac{kJ}{kg K} (372,15K - 273,15K) = 81,24 \frac{kJ}{kg K}$$

Balance de calor

El balance de calor quedaría como el total del calor de ingreso de la piedra, más el calor de ingreso de los gases, es igual a la suma del calor de salida de la piedra, más el calor de salida de los gases y vapor, el calor de salida del polvo y el calor de pérdida por radiación.

$$\begin{aligned} & S_e H'_{S_e} + F_k C_{pk}(T_k - T_0) + F_{Air} C_{pAir}(T_{Air} - T_0) + F_k PCS_k \\ & = S_s H'_{S_s} + P_D H'_{P_D} + P_F H'_{P_F} + G_s H'_G + (V_S - G_e Y_e)[C_{pV_S}(T_{V_S} - T_0) + \lambda_0] + Q_{rad} \end{aligned}$$

[Ecuación 9]

En donde:

- S_e, S_s = Flujo másico de piedra pómez de entrada y salida respectivamente (kg/s)
 H'_{S_e}, H'_{S_s} = Entalpía de piedra pómez de entrada y salida respectivamente (kJ/kg)
 G_e, G_s = Flujo másico de gas de entrada húmedo y gas de salida seco respectivamente (kg/s)
 Y_e = Humedad de gas de entrada (kg/s)
 H'_{G_s} = Entalpía de gases de salida secos (kJ/kg)
 F_k = Flujo másico de keroseno (kg/s)
 C_{pk} = Capacidad calorífica del keroseno (kJ/kg K)
 T_k, T_{Air}, T_{V_s} = Temperatura del keroseno, aire y vapor en la salida respectivamente (K)
 PCS_k = Poder calorífico superior del keroseno (kJ/kg)
 F_{Air} = Flujo másico de entrada de aire (kg/s)
 C_{pAir} = Capacidad calorífica del aire (kJ/kg K)
 P_D, P_F = Flujo másico de polvo de desecho y polvo filtro respectivamente (kg/s)
 H'_{P_D}, H'_{P_F} = Entalpía de polvo de desecho y polvo filtro respectivamente (kJ/kg)
 V_s = Flujo de vapor total en la salida (kg/s)
 C_{pV_s} = Capacidad calorífica del vapor en la salida (kJ/kg K)
 T_0 = Temperatura de referencia 0°C (273.15 K)
 λ_0 = Entalpía de vaporización del agua a 0°C (kJ/kg)
 Q_{rad} = Calor perdido como radiación (J/s)

Ejemplo: determinar la cantidad de calor por radiación, utilizando datos de la corrida 34.

Despejando el calor por radiación de la ecuación 8:

$$Q_{rad} = S_e H'_{S_e} + F_k C_{pk} (T_k - T_0) + F_{Air} C_{pAir} (T_{Air} - T_0) + F_k PCS_k - S_s H'_{S_s} - P_D H'_{P_D} - P_F H'_{P_F} - G_s H'_G - (V_s - G_e Y_e) [C_{pV_s} (T_{V_s} - T_0) + \lambda_0]$$

Sustituyendo los valores respectivos, quitando el porcentaje de impurezas que equivale a un 6,82 % sobre Se, y a la salida en Ss:

$$\begin{aligned}
 Q_{rad} &= \left(1,64 \frac{kg}{s}\right) \left(42,09 \frac{kJ}{kg}\right) + \left(0,042 \frac{kg}{s}\right) \left(1,97 \frac{kJ}{kg K}\right) (25 K) \\
 &+ \left(1,69 \frac{kg}{s}\right) \left(1,00 \frac{kJ}{kg K}\right) (31 K) + \left(0,042 \frac{kg}{s}\right) \left(46 400 \frac{kJ}{kg}\right) \\
 &- \left(0,71 \frac{kg}{s}\right) \left(138,27 \frac{kJ}{kg}\right) - \left(0,0023 \frac{kg}{s}\right) \left(22,56 \frac{kJ}{kg}\right) \\
 &- \left(0,43 \frac{kg}{s}\right) \left(28,02 \frac{kJ}{kg}\right) - \left(1,69 \frac{kg}{s}\right) \left(81,25 \frac{kJ}{kg}\right) \\
 &- \left(0,57 \frac{kg}{s} - 0,01\right) \left[1,89 \frac{kJ}{kg K} (99 K) + 2 501,7 \frac{kJ}{kg}\right] \\
 &= 343,01 \frac{kJ}{s}
 \end{aligned}$$

Eficiencia térmica

La eficiencia térmica es la medida de la relación entre el calor requerido para evaporar el agua del material y el calor total entregado por el gas de secado.

$$\eta = \frac{(V_S - G_e Y_e) [C_{pV_S} (T_{V_S} - T_0) + \lambda_0]}{F_k C_{pk} (T_k - T_0) + F_{Air} C_{pAir} (T_{Air} - T_0) + F_k PCS_K} * 100 \%$$

[Ecuación 10]

En donde:

- η = Eficiencia térmica (%)
- V_S = Flujo de vapor total en la salida (kg/s)
- G_e = Flujo másico de gas de entrada húmedo (kg/s)

- Y_e = Humedad de gas de entrada (kg/s)
 C_{pV_S} = Capacidad calorífica del vapor en la salida (kJ/kg K)
 λ_0 = Entalpía de vaporización del agua a 0°C (kJ/kg)
 F_k = Flujo másico de keroseno (kg/s)
 C_{pk} = Capacidad calorífica del keroseno (kJ/kg K)
 T_k, T_{Air}, T_{V_S} = Temperatura del keroseno, aire y vapor en la salida respectivamente (K)
 T_0 = Temperatura de referencia 0°C (273.15 K)
 PCS_k = Poder calorífico inferior del keroseno (kJ/kg)

Ejemplo: calcule la eficiencia térmica a las condiciones medidas en la corrida 34.

Sustituyendo valores en la ecuación 9:

$$\eta = \frac{\left(0,57 \frac{kg}{s} - 0,01\right) \left[1,89 \frac{kJ}{kg K} (99 K) + 2\,501,7 \frac{kJ}{kg}\right] * 100 \%}{\left(0,042 \frac{kg}{s}\right) \left(1,97 \frac{kJ}{kg K} (25 K)\right) + \left(1,69 \frac{kg}{s}\right) \left(1,00 \frac{kJ}{kg K}\right) (31 K) + \left(0,042 \frac{kg}{s}\right) \left(46\,400 \frac{kJ}{kg}\right)}$$

$$\eta = 73,96 \%$$

Costos por radiación

Se determinó el costo por radiación, en quetzales por hora, realizando la conversión de la energía perdida por radiación a costo en quetzales que implicaría esa energía como keroseno:

Ejemplo: para la corrida 34 determinar cuánto es el costo de la radiación en quetzales por hora:

$$\text{Costo rad} = \frac{\text{Calor por radiación}}{\text{Energía por kg de keroseno}} * \text{costo del keroseno} * \frac{3\,600\text{ s}}{1\text{ h}}$$

[Ecuación 11]

$$\begin{aligned} &= \frac{343,01 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{46\,400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} * \text{costo del keroseno} \frac{Q}{\text{kg}} * \frac{3\,600\text{ s}}{1\text{ h}} = 0,00739 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,13 \frac{Q}{\text{kg}} * \frac{3\,600\text{ s}}{1\text{ h}} \\ &= 109,91 \frac{Q}{\text{h}} \end{aligned}$$

Optimización

Para el cálculo de flujos óptimos se realizó un sistema de ecuaciones, utilizando las ecuaciones 4, 5 y 8; dejando como incógnitas el flujo de ingreso del material, el flujo de salida del material y el vapor en la salida. Siempre se debe tener en cuenta la corrección para el material de entrada y salida, aplicándola cuando se realiza el balance de sólidos y de humedad, y usando el flujo completo para el balance de calor.

Los flujos de polvo se consideraron como un porcentaje de la cantidad de sólido sin impurezas en la alimentación. Este porcentaje se calculó como el porcentaje promedio que estos flujos representaron de las 34 corridas. Estableciendo que el flujo de polvo de desecho $P_D = 0,003064 \text{ Se} = \%_1$, y el polvo filtro $P_F = 0.2146 \text{ Se} = \%_2$; así también el porcentaje de radiación se asumió como 16,51 % del calor como poder calorífico del keroseno y las demás condiciones se asumieron como el promedio de los datos de las corridas.

El sistema de ecuaciones simplificado queda así:

$$S_e[(1 - X_e) - \%_1 P_D(1 - X_{P_D}) - \%_2 P_F(1 - X_{P_F})] - S_s(1 - X_s) = 0$$

[Ecuación 12]

$$S_e[X_e - \%_1 X_{P_D} - \%_2 X_{P_F}] - V_s(1 - X_s) = -G_e Y_e$$

[Ecuación 13]

$$\begin{aligned} 1,07319 S_e[H'_{S_e} - \%_1 H'_{S_e} - \%_2 H'_{P_F} - 0,07319 H'_{S_s}] - S_s H'_{S_s} - V_s \\ = F_k P C S_k (\%_{rad} - 1) - F_k C_{pk} (T_k - T_0) - F_{Air} C_{pAir} (T_{Air} - T_0) \\ - G_e Y_e [C_{pV_s} (T_{V_s} - T_0) + \lambda_0] \end{aligned}$$

[Ecuación 14]

Ejemplo: determinar el flujo óptimo de entrada S_e , flujo de salida S_s y vapor generado V_s , por el secado asumiendo una humedad de entrada de 0,3 p/p en base húmeda.

Sustituyendo y simplificando los valores en el sistema de ecuaciones:

$$0,483 S_e - 0,991 S_s = 0$$

$$0,299 S_e - V_s = -0,070$$

$$25,56 S_e - 102,09 S_s - 2 680,89 V_s = -1 824,83$$

Resolviendo:

$$S_e = 1,981 \text{ kg/s}$$

$$S_s = 0,966 \text{ kg/s}$$

$$V_s = 0,663 \text{ kg/s}$$

Rendimiento económico

El rendimiento económico fue calculado como la cantidad de sólido seco obtenido por quetzal de keroseno consumido.

$$\text{Rendimiento económico} = \frac{\text{kg piedra seca}}{\text{kg keroseno}} * \frac{1 \text{ kg keroseno}}{\text{costo 1 kg keroseno}}$$

[Ecuación 15]

Ejemplo: Calcular el rendimiento económico teórico para una humedad de ingreso de 0,3 p/p base húmeda y flujos óptimos de material.

$$\text{Rendimiento económico} = \frac{0,966 \text{ kg/s}}{0,0424 \text{ kg/s}} * \frac{\text{kg keroseno}}{4,13 \text{ Q}} = 5,52 \text{ kg piedra seca/Q}$$

Datos calculados

Apéndice 6. Datos de piedra de ingreso

	Piedra pómez sin impurezas					
	Entrada			Salida		
	Humedad	Flujo	Temperatura	Humedad	Flujo	Temperatura
Corrida	X_e (p/p)	S_e (kg/s)	T_{Se} (K)	X_s (p/p)	S_s (kg/s)	T_{Ss} (K)
1	0,291	1,707	293,150	0,002	0,992	501,150
2	0,307	1,686	293,150	0,003	0,843	463,150
3	0,331	1,343	294,150	0,001	0,510	598,150
4	0,302	1,655	294,150	0,002	0,644	528,150
5	0,341	1,499	294,150	0,002	0,583	603,150
6	0,315	1,707	294,150	0,002	0,760	546,150
7	0,366	1,374	292,150	0,003	0,716	527,150
8	0,271	1,697	294,150	0,002	0,932	523,150
9	0,277	1,801	293,150	0,003	1,025	434,150
10	0,229	1,572	293,550	0,003	0,789	424,150
11	0,332	1,926	295,150	0,081	0,691	350,150
12	0,290	1,302	295,750	0,002	0,450	459,150
13	0,295	1,426	294,350	0,003	0,583	503,150
14	0,198	1,738	294,350	0,002	0,863	451,150
15	0,254	1,801	295,150	0,003	1,112	404,150
16	0,346	1,593	294,150	0,037	0,865	371,150
17	0,272	1,333	294,150	0,003	0,776	503,150
18	0,261	1,385	294,150	0,004	0,717	518,150
19	0,262	1,229	294,150	0,004	0,493	488,150
20	0,331	1,853	295,150	0,062	0,956	374,150
21	0,332	1,759	295,150	0,004	0,754	443,150
22	0,361	1,655	295,150	0,003	0,702	502,150
23	0,372	1,645	295,150	0,006	0,740	448,150
24	0,345	1,655	295,150	0,003	0,468	487,150
25	0,351	1,572	295,150	0,004	0,810	449,150
26	0,380	1,343	295,150	0,004	0,548	467,150
27	0,350	0,948	295,150	0,004	0,397	492,150
28	0,343	1,614	295,150	0,016	0,750	423,150
29	0,354	1,593	295,150	0,004	0,884	423,150
30	0,338	1,614	295,150	0,007	0,904	427,150
31	0,322	1,946	295,150	0,063	1,097	379,150
32	0,354	1,333	295,150	0,004	0,603	464,150
33	0,388	1,364	295,150	0,003	0,575	523,150
34	0,331	1,530	296,150	0,004	0,599	478,150
Promedio:	0,317	1,565	294,574	0,010	0,739	469,944

Fuente: elaboración propia basada en tabla II y ecuación 1.

Apéndice 7. Datos del aire, keroseno y salida de gases

	Aire			Gases de combustión	Keroseno
	Entrada			Salida	Entrada
	Temperatura	Humedad	Flujo	Temperatura	Flujo
Corrida	T_{air} (K)	X_{air} (p/p)	F_{air} (kg/s)	T_G (K)	F_k (kg/s)
1	22,000	0,040	1,675	366,650	0,041
2	22,000	0,041	1,675	366,150	0,042
3	25,000	0,047	1,675	376,150	0,048
4	25,000	0,038	1,675	369,650	0,039
5	26,000	0,046	1,675	373,150	0,047
6	26,000	0,043	1,675	372,150	0,043
7	27,000	0,041	1,675	365,150	0,045
8	27,000	0,042	1,675	371,150	0,046
9	23,000	0,040	1,692	368,650	0,042
10	24,000	0,041	1,675	370,150	0,044
11	25,000	0,044	1,675	371,150	0,046
12	26,000	0,044	1,675	363,150	0,045
13	26,000	0,039	1,651	369,650	0,037
14	27,000	0,038	1,651	363,150	0,037
15	27,000	0,038	1,651	365,150	0,036
16	23,000	0,041	1,675	362,150	0,042
17	25,000	0,040	1,675	363,150	0,041
18	27,000	0,039	1,675	371,150	0,040
19	27,000	0,040	1,675	369,150	0,041
20	25,000	0,041	1,692	362,150	0,041
21	26,000	0,041	1,692	364,150	0,042
22	27,000	0,046	1,675	373,150	0,048
23	24,000	0,044	1,692	371,950	0,046
24	24,000	0,046	1,692	374,150	0,048
25	26,000	0,042	1,692	371,650	0,046
26	26,000	0,038	1,692	367,150	0,039
27	27,000	0,037	1,692	368,150	0,039
28	30,000	0,037	1,692	364,150	0,039
29	27,000	0,039	1,651	364,150	0,041
30	31,000	0,037	1,692	366,150	0,040
31	26,000	0,040	1,692	360,150	0,043
32	27,000	0,039	1,692	366,150	0,041
33	31,000	0,039	1,692	375,150	0,042
34	31,000	0,039	1,692	372,150	0,042
Promedio:	26,118	0,041	1,679	368,159	0,042

Fuente: elaboración propia basada en tabla II y anexo 1.

Apéndice 8. Datos de polvo fino

Corrida	Polvo fino				
	Polvo filtro		Polvo desecho		
	Temperatura	Humedad	Temperatura	Flujo	Humedad
	T_{PF} (K)	X_{PF} (p/p)	T_{PD} (K)	P_D (kg/s)	X_{PD} (p/p)
1	325,650	0,005	303,950	0,006	0,007
2	327,150	0,005	302,650	0,003	0,012
3	333,150	0,003	321,150	0,005	0,002
4	335,550	0,002	315,150	0,006	0,003
5	315,150	0,002	318,150	0,006	0,004
6	323,150	0,002	311,150	0,003	0,008
7	328,150	0,005	308,150	0,006	0,011
8	315,150	0,005	312,150	0,005	0,006
9	307,150	0,003	299,150	0,008	0,010
10	308,050	0,006	301,150	0,005	0,007
11	304,150	0,006	309,450	0,007	0,007
12	309,650	0,004	304,450	0,006	0,008
13	303,950	0,003	299,150	0,003	0,010
14	307,150	0,003	302,750	0,006	0,003
15	305,150	0,003	302,150	0,004	0,016
16	310,150	0,003	306,150	0,007	0,004
17	312,650	0,006	307,650	0,003	0,011
18	317,950	0,006	305,150	0,002	0,010
19	317,150	0,003	309,150	0,003	0,006
20	311,150	0,005	301,550	0,003	0,023
21	312,150	0,007	307,150	0,002	0,015
22	313,150	0,004	308,650	0,003	0,014
23	312,950	0,005	312,150	0,003	0,009
24	313,150	0,004	305,150	0,003	0,012
25	311,150	0,005	315,550	0,006	0,016
26	312,150	0,004	303,150	0,005	0,015
27	311,150	0,005	313,150	0,007	0,010
28	311,150	0,005	306,150	0,006	0,014
29	313,150	0,004	307,150	0,008	0,027
30	315,150	0,005	307,150	0,006	0,009
31	305,150	0,006	300,150	0,003	0,020
32	307,150	0,005	308,150	0,008	0,010
33	311,150	0,005	311,150	0,005	0,010
34	314,150	0,004	301,750	0,002	0,034
Promedio:	314,126	0,004	307,265	0,005	0,011

Fuente: elaboración propia basada en tabla II.

Apéndice 9. **Datos de flujo de piedra con impurezas**

	Piedra pómez con impurezas	
	Entrada	Salida
	Flujo	Flujo
Corrida	S_e (kg/s)	S_s (kg/s)
1	1,832	1,117
2	1,810	0,967
3	1,442	0,609
4	1,776	0,765
5	1,609	0,693
6	1,832	0,885
7	1,475	0,817
8	1,821	1,056
9	1,933	1,157
10	1,687	0,904
11	2,0665	0,8318
12	1,397	0,545
13	1,531	0,688
14	1,866	0,990
15	1,933	1,244
16	1,709	0,981
17	1,430	0,874
18	1,486	0,819
19	1,319	0,583
20	1,988	1,092
21	1,888	0,882
22	1,776	0,823
23	1,765	0,861
24	1,776	0,589
25	1,687	0,925
26	1,442	0,647
27	1,018	0,467
28	1,732	0,868
29	1,709	1,001
30	1,732	1,022
31	2,089	1,240
32	1,430	0,701
33	1,464	0,675
34	1,642	0,712
Promedio:	1,679	0,854

Fuente: elaboración propia basada en tabla II.

Apéndice 10. **Polvo filtro y flujo de vapor de salida**

	Polvo filtro	Flujo vapor
Corrida	P_F (kg/s)	V_s (kg/s)
1	0,215	0,561
2	0,327	0,582
3	0,385	0,522
4	0,508	0,561
5	0,400	0,587
6	0,408	0,608
7	0,153	0,568
8	0,304	0,527
9	0,272	0,563
10	0,424	0,424
11	0,649	0,652
12	0,471	0,447
13	0,422	0,482
14	0,529	0,404
15	0,232	0,515
16	0,203	0,587
17	0,195	0,427
18	0,309	0,422
19	0,415	0,385
20	0,341	0,621
21	0,426	0,648
22	0,357	0,671
23	0,296	0,680
24	0,617	0,645
25	0,209	0,619
26	0,283	0,571
27	0,215	0,393
28	0,318	0,601
29	0,140	0,624
30	0,166	0,600
31	0,291	0,624
32	0,253	0,535
33	0,259	0,592
34	0,427	0,567
Promedio:	0,336	0,553

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 5 y 6,

Apéndice 11. Entalpías

Corrida	Entalpías				
	H _{Se} (kJ/s)	H _{Ss} (kJ/kg)	H _{PD} (kJ/kg)	H _{PF} (kJ/kg)	H _G (kJ/kg)
1	33,848	153,269	21,320	36,065	76,689
2	34,943	127,907	20,990	37,095	76,259
3	38,489	217,993	32,468	40,796	84,458
4	36,300	171,229	28,557	42,209	79,219
5	39,226	221,793	30,755	28,410	81,977
6	37,273	183,464	26,504	33,821	81,214
7	37,105	171,020	24,781	37,782	75,378
8	34,036	168,000	26,928	28,852	80,342
9	32,858	108,377	18,317	23,118	78,334
10	30,034	101,643	19,431	24,097	79,549
11	40,353	59,093	25,191	21,404	80,329
12	38,129	124,978	21,831	24,946	73,727
13	36,147	154,851	18,317	20,942	79,242
14	28,912	119,601	20,126	23,118	73,853
15	34,344	88,176	21,042	21,758	75,519
16	39,595	70,020	22,554	25,157	72,951
17	34,117	154,851	24,427	27,273	73,787
18	33,277	165,274	22,544	30,933	80,435
19	33,336	145,021	24,857	29,917	78,757
20	40,306	75,249	21,304	26,104	72,962
21	40,345	114,651	24,550	27,065	74,612
22	42,608	154,177	25,508	27,338	81,958
23	43,427	118,464	27,339	27,341	81,002
24	41,395	144,072	22,769	27,338	82,793
25	41,828	118,699	30,764	26,104	80,758
26	44,068	130,847	21,662	26,654	77,151
27	41,789	147,721	28,180	26,104	77,973
28	41,179	103,394	23,712	26,104	74,653
29	42,091	101,156	25,982	27,338	74,602
30	40,808	104,430	23,834	28,852	76,298
31	39,588	79,118	19,970	22,095	71,277
32	42,098	128,822	24,658	23,356	76,275
33	44,686	168,325	26,771	26,104	83,735
34	42,090	138,271	22,559	28,021	81,245
Promedio:	38,254	133,352	24,132	28,047	77,921

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 7 y 8.

Apéndice 12. Calor de ingreso al secador

Corrida	Calor (kJ/kg)			
	PP entrada	Keroseno	Aire	PCS
1	62,015	2,020	36,881	1905,094
2	63,242	2,063	36,881	1945,621
3	55,486	2,345	41,914	2211,711
4	64,482	1,902	41,914	1793,847
5	63,115	2,316	43,592	2184,586
6	68,290	2,125	43,592	2004,232
7	54,733	2,220	45,271	2093,682
8	61,981	2,250	45,271	2122,584
9	63,501	2,082	38,948	1963,705
10	50,671	2,146	40,237	2023,769
11	83,390	2,287	41,914	2157,137
12	53,265	2,196	43,592	2071,562
13	55,336	1,806	42,976	1703,589
14	53,941	1,797	44,631	1695,032
15	66,374	1,776	44,631	1675,172
16	67,685	2,042	38,559	1926,246
17	48,803	2,022	41,914	1906,870
18	49,458	1,986	45,271	1872,963
19	43,965	2,035	45,271	1919,787
20	80,145	2,029	42,337	1913,329
21	76,170	2,051	44,032	1934,319
22	75,688	2,373	45,271	2237,868
23	76,658	2,282	40,642	2152,293
24	73,534	2,383	40,642	2247,556
25	70,568	2,270	44,032	2140,991
26	63,528	1,902	44,032	1793,847
27	42,524	1,924	45,727	1814,837
28	71,312	1,933	50,813	1822,910
29	71,951	2,035	44,631	1919,787
30	70,670	1,974	52,509	1861,661
31	82,693	2,123	44,032	2002,133
32	60,220	2,039	45,727	1923,017
33	65,416	2,073	52,509	1955,309
34	69,132	2,066	52,509	1948,851
Promedio:	64,116	2,084	43,903	1966,056

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 7, 8 y 9.

Apéndice 13. **Calor total de salida del secador**

Corrida	Calor (kJ/kg)				
	PP Salida	PP Desecho	PP filtro	Gas salida	Vapor
1	171,201	0,119	7,769	128,425	1452,462
2	123,622	0,063	12,123	127,706	1506,373
3	132,670	0,157	15,694	141,436	1345,691
4	130,973	0,179	21,438	132,662	1456,607
5	153,747	0,191	11,356	137,281	1519,643
6	162,398	0,087	13,815	136,004	1574,897
7	139,723	0,144	5,771	126,231	1477,810
8	177,408	0,127	8,768	134,544	1370,170
9	125,381	0,144	6,298	132,503	1461,745
10	91,885	0,095	10,209	133,215	1089,180
11	49,153	0,168	13,892	134,521	1701,691
12	68,163	0,131	11,751	123,466	1139,972
13	106,460	0,064	8,840	130,825	1236,876
14	118,429	0,118	12,231	121,928	1024,288
15	109,691	0,075	5,042	124,679	1326,206
16	68,697	0,150	5,096	122,167	1515,715
17	135,262	0,069	5,318	123,565	1088,148
18	135,310	0,056	9,552	134,698	1084,540
19	84,591	0,070	12,404	131,889	983,696
20	82,171	0,063	8,899	123,417	1604,091
21	101,168	0,050	11,531	126,207	1674,362
22	126,857	0,067	9,759	137,249	1749,565
23	101,938	0,084	8,103	137,016	1772,866
24	84,887	0,069	16,854	140,046	1680,643
25	109,785	0,194	5,447	136,604	1615,989
26	84,592	0,107	7,550	130,502	1479,747
27	68,941	0,192	5,601	131,893	1006,662
28	89,777	0,153	8,301	126,277	1564,357
29	101,257	0,212	3,834	123,165	1626,972
30	106,727	0,153	4,778	129,059	1565,818
31	98,082	0,055	6,425	120,566	1615,883
32	90,304	0,191	5,911	129,021	1384,769
33	113,552	0,127	6,748	141,640	1550,767
34	98,380	0,052	11,962	137,428	1481,722
Promedio:	110,094	0,117	9,384	130,819	1433,233

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 7, 8 y 9.

Apéndice 14. Calor total, radiación y eficiencia térmica

Corrida	Calor total (kJ/kg)		Radiación		Eficiencia Térmica
	Entrada	Salida	Q_{rad} (kJ/s)	Q_{rad} (%)	η (%)
1	2006,010	1759,976	246,035	12,91%	74,72%
2	2047,807	1769,888	277,920	14,28%	75,90%
3	2311,457	1635,647	675,810	30,56%	59,65%
4	1902,145	1741,858	160,287	8,94%	79,26%
5	2293,609	1822,218	471,391	21,58%	68,13%
6	2118,240	1887,201	231,039	11,53%	76,83%
7	2195,905	1749,679	446,226	21,31%	69,02%
8	2232,086	1691,016	541,070	25,49%	63,14%
9	2068,236	1726,072	342,164	17,42%	72,91%
10	2116,823	1324,583	792,239	39,15%	52,72%
11	2284,728	1899,426	385,303	17,86%	77,30%
12	2170,616	1343,483	827,133	39,93%	53,84%
13	1803,708	1483,066	320,642	18,82%	70,74%
14	1795,400	1276,994	518,406	30,58%	58,82%
15	1787,952	1565,692	222,260	13,27%	77,03%
16	2034,532	1711,823	322,708	16,75%	77,06%
17	1999,610	1352,362	647,248	33,94%	55,78%
18	1969,677	1364,156	605,521	32,33%	56,48%
19	2011,059	1212,650	798,408	41,59%	50,01%
20	2037,840	1818,641	219,199	11,46%	81,94%
21	2056,572	1913,317	143,255	7,41%	84,55%
22	2361,199	2023,496	337,703	15,09%	76,55%
23	2271,875	2020,008	251,867	11,70%	80,76%
24	2364,115	1922,499	441,616	19,65%	73,37%
25	2257,861	1868,019	389,842	18,21%	73,88%
26	1903,309	1702,498	200,811	11,19%	80,43%
27	1905,012	1213,289	691,723	38,11%	54,05%
28	1946,968	1788,865	158,103	8,67%	83,40%
29	2038,404	1855,441	182,963	9,53%	82,74%
30	1986,814	1806,536	180,277	9,68%	81,72%
31	2130,981	1841,010	289,971	14,48%	78,89%
32	2031,002	1610,196	420,807	21,88%	70,26%
33	2075,308	1812,835	262,473	13,42%	77,16%
34	2072,558	1729,543	343,015	17,60%	73,96%
Promedio:	2076,159	1683,647	392,513	19,90%	71,26%

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 9 y 10.

Apéndice 15. Rendimiento

Corrida	kg Ss / kg keroseno
1	24,16
2	20,11
3	10,71
4	16,65
5	12,39
6	17,60
7	15,88
8	20,37
9	24,22
10	18,09
11	14,86
12	10,08
13	15,88
14	23,62
15	30,81
16	20,82
17	18,88
18	17,77
19	11,92
20	23,19
21	18,08
22	14,55
23	15,96
24	9,66
25	17,55
26	14,18
27	10,16
28	19,10
29	21,38
30	22,53
31	25,43
32	14,56
33	13,64
34	14,27
Promedio:	17,62

Fuente: elaboración propia basada en tablas II, VII y VIII.

Apéndice 16. **Costos por radiación de calor**

Corrida	Qrad / PCS (kg/s)	Costo (Q/s)	Costo (Q/h)
1	0,00530	0,0219	78,84
2	0,00599	0,0247	89,05
3	0,01456	0,0602	216,55
4	0,00345	0,0143	51,36
5	0,01016	0,0420	151,05
6	0,00498	0,0206	74,03
7	0,00962	0,0397	142,98
8	0,01166	0,0482	173,38
9	0,00737	0,0305	109,64
10	0,01707	0,0705	253,86
11	0,00830	0,0343	123,46
12	0,01783	0,0736	265,04
13	0,00691	0,0285	102,74
14	0,01117	0,0461	166,11
15	0,00479	0,0198	71,22
16	0,00695	0,0287	103,41
17	0,01395	0,0576	207,40
18	0,01305	0,0539	194,03
19	0,01721	0,0711	255,83
20	0,00472	0,0195	70,24
21	0,00309	0,0128	45,90
22	0,00728	0,0301	108,21
23	0,00543	0,0224	80,71
24	0,00952	0,0393	141,51
25	0,00840	0,0347	124,92
26	0,00433	0,0179	64,35
27	0,01491	0,0616	221,65
28	0,00341	0,0141	50,66
29	0,00394	0,0163	58,63
30	0,00389	0,0160	57,77
31	0,00625	0,0258	92,92
32	0,00907	0,0375	134,84
33	0,00566	0,0234	84,10
34	0,00739	0,0305	109,91
Promedio:	0,00846	0,0349	125,77

Fuente: elaboración propia basada en ecuación 11.

Apéndice 17. **Flujos óptimos y rendimiento económico**

Humedad p/p	Flujo Óptimo	Eficiencia	kg Ss / kg keroseno	kg Ss / Q
0,200	3,039	0,822	39,451	9,552
0,220	2,797	0,832	35,060	8,489
0,240	2,590	0,840	31,318	7,583
0,260	2,412	0,847	28,090	6,801
0,280	2,257	0,853	25,278	6,121
0,300	2,121	0,858	22,806	5,522
0,320	2,000	0,863	20,615	4,992
0,340	1,892	0,867	18,661	4,519
0,360	1,795	0,871	16,907	4,094
0,380	1,708	0,875	15,324	3,710
Promedio para humedad $\geq 0,26$:				5,108

Fuente: elaboración propia basada en las ecuaciones 12, 13, 14 y 15.

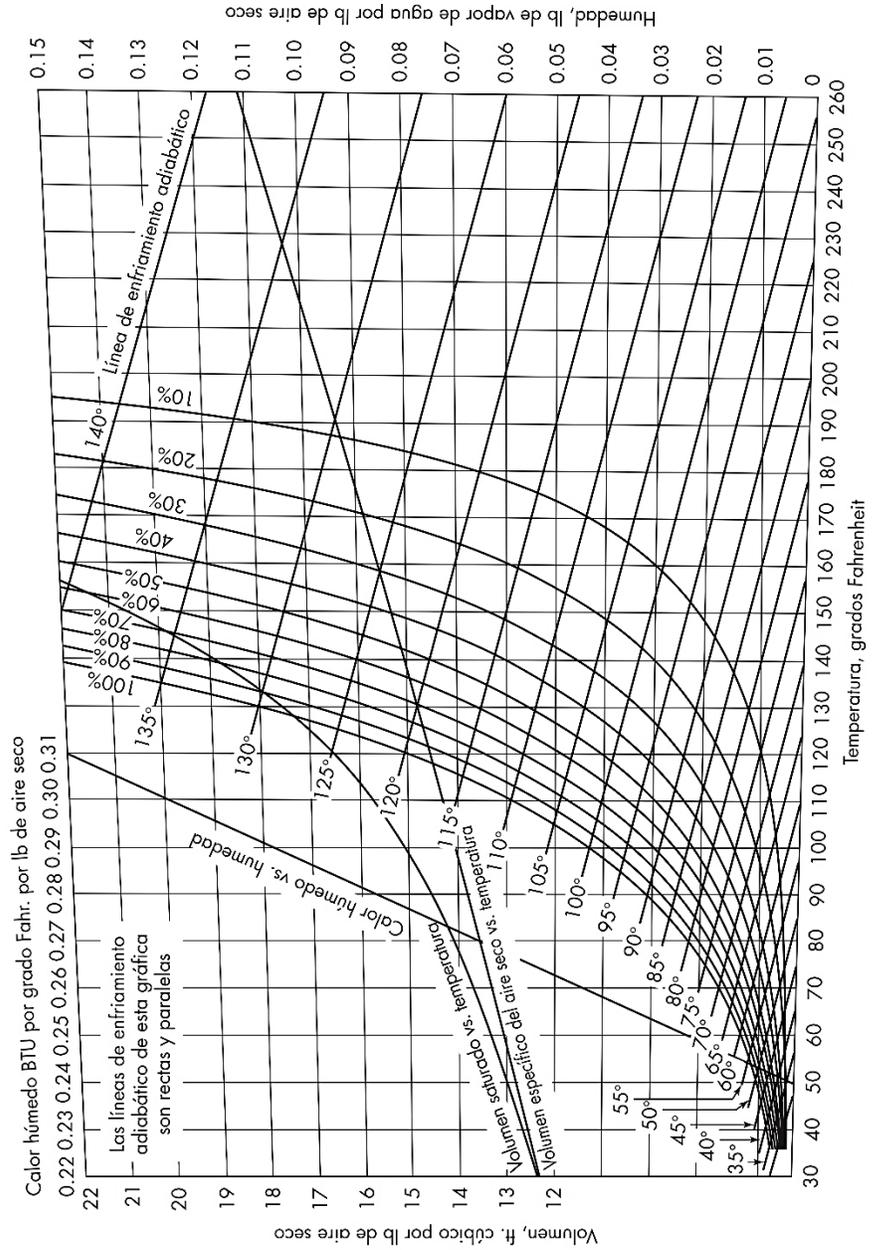
Apéndice 18. **Rendimiento económico actual**

Corrida	Humedad p/p	kg Ss / Q
18	0,261	4,303
19	0,262	2,887
13	0,295	3,845
4	0,302	4,032
6	0,315	4,261
34	0,331	3,456
27	0,350	2,460
32	0,354	3,526
26	0,380	3,433
Promedio:		3,578

Fuente: elaboración propia basada en apéndices 6, 7 y ecuación 15.

ANEXOS

Anexo 1. Carta psicrométrica



Fuente: MCCABE 7 Ed., Operaciones unitarias en ingeniería química, Figura 19.2.

