



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

**ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA OPTIMIZAR
EL PROCESO DE SECADO DE BAGAZO EN INGENIO CONCEPCIÓN S. A.**

Byron Alejandro Gálvez Campos

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, noviembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA OPTIMIZAR
EL PROCESO DE SECADO DE BAGAZO EN INGENIO CONCEPCIÓN S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

BYRON ALEJANDRO GÁLVEZ CAMPOS

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE BAGAZO DE CAÑA EN INGENIO CONCEPCIÓN S. A.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha octubre de 2012.


Byron Alejandro Gálvez Campos



Guatemala, 28 de agosto de 2013
REF.EPS.DOC.946.08.13.

Ing. Juan Merck Cos
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Merck Cos.


Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Byron Alejandro Gálvez Campòs** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 200818926, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE BAGAZO EN INGENIO CONCEPCIÓN S.A.**

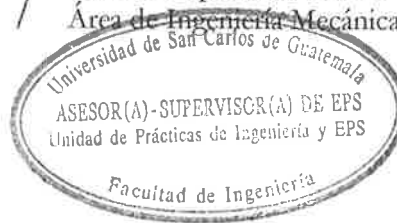
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo
CACC/ra



Guatemala, 28 de agosto de 2013
REF.EPS.D.603.08.13

Ing. Julio César Campos Paiz
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Campos Paiz:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE BAGAZO EN INGENIO CONCEPCIÓN S.A.**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Byron Alejandro Gálvez Campos** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Carlos Anibal Chicojaj Coloma.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"



JMC/ra



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación de la Directora del Ejercicio Profesional Supervisado, E.P.S., al Trabajo de Graduación, **ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE BAGAZO EN INGENIO CONCEPCIÓN S.A.** del estudiante **Byron Alejandro Gálvez Campos**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR




Guatemala, octubre de 2013

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE SECADO DE BAGAZO EN INGENIO CONCEPCIÓN S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Byron Alejandro Gálvez Campos**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, noviembre de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darle sentido a mi vida y profesión.
Mis padres	Luis Gálvez y Brenda Campos, por su apoyo incondicional y ejemplo.
Mi abuela	Zoila del Carmen Moreira, por siempre motivarme con su ejemplo a ser mejor persona cada día.
Mis hermanos	Fernando y Daniel Gálvez, por ser una inspiración para mí, por dame su ejemplo y brindarme su hermandad incondicional.
Mi familia	Por su apoyo a lo largo de esta etapa.
Mis amigos	Por ser hermanos, consejeros, ejemplares y aceptarme tal como soy.
Mis catedráticos	Por compartir su conocimiento en esta etapa de formación.
Mi país	A la gente que a diario tributa con la esperanza de un mejor país.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por concederme el privilegio de acceder a la educación superior y ser una casa de formación.
Facultad de Ingeniería	Darme las herramientas necesarias para poder brindar un aporte, como profesional, a mi país.
Grupo evangélico universitario	Por ser un sitio donde encontré familia y formación como profesional con valores del reino de Dios.
Grupo Pantaleón S. A.	Por darme la oportunidad de realizar mi ejercicio profesional supervisado y desarrollar mis conocimientos.
Ing. Aldo Bryan Buechsel Batún	Por apoyarme en la etapa final de mi carrera dándome su ejemplo como profesional y amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. GENERALIDADES DEL BAGAZO DE CAÑA	1
1.1. Definición	1
1.2. Características generales	1
1.2.1. Almacenamiento	2
1.2.2. Utilización	2
1.2.3. Poder calorífico del bagazo	3
1.2.4. Alimentación de bagazo a las calderas.....	4
1.2.5. Desección del bagazo.....	5
1.2.6. Combustión del bagazo	5
1.3. Análisis del bagazo.....	6
1.3.1. Dificultades en el muestreo.....	6
1.3.2. Preparación de las muestras	7
1.3.3. Determinación de la humedad	7
1.3.4. Determinación de la sacarosa (POL)	8
1.3.5. Determinación de la fibra	8
1.4. Ingenio Concepción S. A.	8
1.4.1. Descripción general	9
1.4.2. Historia.....	9

1.4.3.	Organización	11
1.4.3.1.	Proceso agrícola	12
1.4.3.2.	Proceso industrial.....	12
1.4.3.3.	Comercialización	13
1.4.4.	Valores	13
1.4.5.	Sistema de gestión.....	14
1.4.5.1.	Gestión de la calidad.....	14
1.4.5.2.	Gestión ambiental	15
1.4.5.3.	Planeación estratégica	15
1.4.6.	Productos	16
1.5.	Descripción de la operación industrial del Ingenio Concepción, S. A.	16
1.5.1.	Descripción general del proceso	17
1.5.2.	Obtención de azúcar blanco.....	21
1.5.2.1.	Transporte de la caña	22
1.5.2.2.	Pesado y determinación de la calidad.....	22
1.5.2.3.	Preparación de la caña	22
1.5.2.4.	Extracción de jugo.....	23
1.5.2.5.	Sulfitación.....	24
1.5.2.6.	Alcalización	25
1.5.2.7.	Calentamiento	25
1.5.2.8.	Clarificación.....	25
1.5.2.9.	Sedimentación.....	26
1.5.2.10.	Filtrado de cachaza	26
1.5.2.11.	Evaporación en múltiple efecto	26
1.5.2.12.	Cristalización	27
1.5.2.13.	Centrifugación	28
1.5.2.14.	Secado	28

	1.5.2.15.	Envasado.....	28
1.5.3.		Generación de vapor	29
1.5.4.		Generación eléctrica.....	29
1.6.		Descripción general de equipos utilizados por procesos del Ingenio Concepción S. A.	29
1.6.1.		Extracción de jugo	30
	1.6.1.1.	Grúas.....	30
	1.6.1.2.	Mesas de caña.....	31
	1.6.1.3.	Conductores de caña.....	32
	1.6.1.4.	Picadoras de caña	33
	1.6.1.5.	Molinos de caña.....	34
	1.6.1.6.	Conductores intermedios.....	36
	1.6.1.7.	Niveladores de caña	36
1.6.2.		Tratamiento de jugo.....	37
	1.6.2.1.	Torre de sulfitación	37
	1.6.2.2.	Calentadores de jugo.....	38
	1.6.2.3.	Tanque <i>flash</i>	39
	1.6.2.4.	Clarificadores de jugo	40
	1.6.2.5.	Filtros de jugo	41
	1.6.2.6.	Evaporadores	41
	1.6.2.7.	Calentadores de meladura.....	42
	1.6.2.8.	Clarificadores de meladura	43
1.6.3.		Recuperación de azúcar	44
	1.6.3.1.	Tachos	44
	1.6.3.2.	Centrífugas	45
	1.6.3.3.	Sin fines	46
	1.6.3.4.	Elevadores de azúcar	47
	1.6.3.5.	Secadora	47
	1.6.3.6.	Enfriadora	48

1.6.4.	Generación de energía.....	49
1.6.4.1.	Calderas	49
1.6.4.2.	Conductores de bagazo	50
1.6.4.3.	Turbogeneradores.....	51
1.6.4.4.	Subestación eléctrica	52
1.7.	Otros equipo utilizados.....	53
1.7.1.	Bombas	53
1.7.1.1.	Centrífugas.....	53
1.7.1.2.	Desplazamiento positivo.....	53
1.7.1.3.	De vacío	54
1.7.2.	Reductores	54
1.7.3.	Motores eléctricos	55
1.7.4.	Planta eléctrica.....	55
2.	SECADO (FASE DE INVESTIGACIÓN)	57
2.1.	Generalidades.....	57
2.1.1.	Objetivos del secado	57
2.1.2.	Métodos generales de secado	58
2.1.2.1.	Secado por conducción.....	58
2.1.2.2.	Secado por convección	58
2.1.2.3.	Secado por radiación	59
2.2.	Principios fundamentales	59
2.2.1.	Presión de vapor del agua.....	59
2.2.2.	Humedad relativa	61
2.2.3.	Humedad específica.....	61
2.2.4.	Temperatura de rocío ácido	62
2.2.5.	Entalpía de vaporización	62
2.3.	Equipo para secado	62
2.3.1.	Secado en bandejas.....	62

2.3.2.	Secadores indirectos al vacío con anaqueles.....	64
2.3.3.	Secadores continuos de túnel.....	64
2.3.4.	Secadores rotatorios.....	65
2.3.5.	Secador de tambor	66
2.3.6.	Secadores por aspersion	67
2.4.	Contenido de humedad de equilibrio de los materiales	68
2.4.1.	Datos experimentales para el contenido de humedad de equilibrio de materiales inorgánicos y biológicos	68
2.4.1.1.	Materiales alimenticios típicos	70
2.4.1.2.	Efecto de la temperatura.....	71
2.4.1.3.	Humedad libre y en equilibrio en una sustancia.....	72
2.5.	Curvas de secado.....	73
2.5.1.	Métodos experimentales.....	73
2.5.2.	Secado durante el período de velocidad constante	75
2.5.3.	Secado durante el período de velocidad decreciente	75
2.5.4.	Movimientos de humedad en los sólidos durante el secado en el período de velocidad decreciente.	75
2.5.4.1.	Teoría de la difusión del líquido	76
2.5.4.2.	Movimiento capilar en los sólidos porosos.....	76
2.5.4.3.	Efecto de la contracción.....	76
2.6.	Métodos para calcular el período de secado de velocidad constante	77
2.6.1.	Método de curvas experimentales de secado.....	77

2.6.1.1.	Método de curva de secado	77
2.6.1.2.	Método de curva de velocidad de secado para el período de velocidad constante.....	78
2.6.2.	Método que emplea predicciones de coeficientes de transferencia para el periodo de velocidad constante.....	78
2.6.3.	Efecto de las variables del proceso sobre el período de velocidad constante.....	80
2.6.3.1.	Efecto de la velocidad del aire.....	80
2.6.3.2.	Efecto de la humedad del gas	80
2.6.3.3.	Efecto de la temperatura del gas.....	81
2.6.3.4.	Efecto del espesor del lecho sólido que se está secando.	81
2.6.4.	Métodos para calcular el período de velocidad decreciente.....	81
2.6.4.1.	Método de integración gráfica	82
2.7.	Ahorro energético.....	82
3.	SECADO DE BAGAZO (FASE TÉCNICO-PROFESIONAL).....	83
3.1.	Situación actual.....	83
3.1.1.	Descripción del Departamento de Energía.....	85
3.1.1.1.	Organigrama del Departamento de Energía.....	85
3.1.2.	Determinación de la capacidad de secado del secadero existente	86
3.1.2.1.	Determinación de la concentración de gases en base húmeda.	87

3.1.2.2.	Determinación del calor generado por los gases	94
3.1.2.3.	Determinación del calor necesario para el proceso de secado.....	104
3.1.2.4.	Determinación de la capacidad del secador	107
3.1.2.5.	Determinación de los parámetros de operación del secador.....	107
3.1.3.	Ventajas del actual proceso de secado	115
3.1.3.1.	Determinación del consumo energético	115
3.1.3.2.	Influencia en el poder calorífico del bagazo	116
3.1.3.3.	Factibilidad del proceso	117
3.1.3.4.	Modificaciones	127
3.2.	Análisis experimental.....	131
3.2.1.	Análisis previo a modificaciones	131
3.2.2.	Análisis posteriores a modificaciones	133
3.2.2.1.	Análisis estadístico	136
3.3.	Propuesta	139
3.3.1.	Propuesta para mejorar el rendimiento del secador actual.....	139
3.3.2.	Utilización del calor generado por gases de combustión de calderas, para reducir la humedad del bagazo de toda la demanda empleando el modelo existente.	140
3.3.2.1.	Descripción	140
3.3.2.2.	Ventajas.....	141
3.3.2.3.	Factibilidad.....	141

4.	CAPACIDAD AL PERSONAL (FASE DE DOCENCIA).....	143
4.1.	Capacitación al personal del Departamento de Energía	143
4.1.1.	Contenido del programa de capacitación	144
4.1.1.1.	Parámetros de operación	144
4.1.1.2.	Variables de operación.....	144
4.1.1.3.	Registros de control de operación.....	145
4.1.1.4.	Capacidad del secador.....	145
4.1.1.5.	Problemas por mala operación.....	145
	CONCLUSIONES.....	147
	RECOMENDACIONES	149
	BIBLIOGRAFÍA.....	151
	APÉNDICES.....	153
	ANEXOS.....	159

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Configuración de pilas de bagazo de caña.....	2
2.	Organización del Ingenio Concepción S. A.	11
3.	Diagrama descriptivo del proceso de elaboración de azúcar de caña.	21
4.	Machetes para preparación de extracción de jugo.....	23
5.	Grúa para descarga de caña.....	31
6.	Mesa de caña.....	32
7.	Conductor de cadenas para caña	33
8.	Picadora para caña	34
9.	Tándem de masas.....	35
10.	Niveladores de caña.....	36
11.	Hornos de combustión de azufre y oxígeno	38
12.	Calentadores tipo concha y tubo	39
13.	Tanque <i>flash</i>	40
14.	Filtros de jugo.....	41
15.	Evaporadores	42
16.	Clarificador de meladura tipo Talho.....	44
17.	Tacho o cristalizador	45
18.	Centrífugas.....	46
19.	Secadora	48
20.	Conductores de banda para bagazo	50
21.	Turbogenerador de extracción	51
22.	Subestación eléctrica	52

23.	Gráfica de presión versus temperatura de las fases del agua pura	60
24.	Secador de anaqueles o bandejas.....	63
25.	Secador de anaqueles al vacío.....	64
26.	Secador para sólidos granulares con banda transportadora perforada	65
27.	Secador rotatorio	66
28.	Secador de doble tambor.....	67
29.	Secador por aspersion.....	68
30.	Contenidos de humedad en equilibrio para algunos sólidos a 25 °C.....	70
31.	Contenido típicos de humedad de equilibrio para algunos materiales alimenticios a 25 °C. 1). Macarrones, 2) Harina, 3) Pan, 4) Galletas, 5) Albúmina de huevo.....	71
32.	Carta psicrométrica.....	72
33.	Velocidad de secado respecto al tiempo	74
34.	Organigrama de la fábrica del Ingenio Concepción S. A.	84
35.	Organigrama del Departamento de Energía	86
36.	Correlación entre la temperatura y el calor específico para el vapor de agua.....	100
37.	Correlación entre la temperatura y el calor específico para el oxígeno.....	101
38.	Correlación entre la temperatura y el calor específico para el nitrógeno.....	101
39.	Correlación entre la temperatura y el calor específico para el dióxido de carbono.....	102
40.	Flujo másico versus frecuencia en alimentador de secador de bagazo.....	112
41.	Poder calorífico del bagazo de caña respecto a la humedad contenida.....	117

TABLAS

I.	Eficiencia de calderas respecto a la humedad del bagazo.....	5
II.	Fracción porcentual molar de gases de combustión del bagazo al 50 % de humead	94
III.	Gasto energético diario por operación del secador de bagazo	116
IV.	Análisis previo a modificaciones.....	131
V.	Análisis posteriores a modificaciones.....	134
VI.	Propiedades de materiales aislantes.....	139

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H ₂ O	Agua
Q	Calor
C _p	Calor específico
λ	Calor latente de vaporización
C	Carbono
m	Caudal másico
ρ	Densidad
S _x	Desviación estándar de la muestra
σ	Desviación estándar poblacional
CO ₂	Dióxido de carbono
X ²	Distribución chi cuadrado
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
H ₂	Hidrógeno
H	Hora
W	Humedad en base húmeda
X	Humedad en base seca
Ø	Humedad relativa
IP	Indicador de presión
IT	Indicador de temperatura
kg	Kilogramo
lb	Libra
Min	Minuto

CO	Monóxido de carbono
N₂	Nitrógeno
α	Nivel de significancia (Alfa, por el alfabeto grieg
n	Número de muestras
O₂	Oxígeno
Ps	Peso del sólido seco
PCI	Poder calorífico inferior
%Z	Porcentaje de cenizas
%Brix	Porcentaje de sólidos contenido en una sustancia
PH	Potencial de hidrógeno
S	Segundo
T_{pr}	Temperatura de rocío
Ton	Toneladas
q	Transferencia de calor
BTU	Unidad de medida de calor
Hp	Unidad de medida de potencia
PSI	Unidad de medida de presión
S_x²	Varianza de la muestra
σ²	Varianza poblacional

GLOSARIO

Ácido sulfúrico	Gas altamente corrosivo, producido por la reacción entre el dióxido de azufre y el agua.
Alimentador de bagazo	Dispositivo mecánico que permite ingresar determinada cantidad de bagazo a una aplicación (caldera o secador, por ejemplo).
Aire teórico	Aire estequiométrico necesario para que se dé la combustión completa de un determinado combustible.
Bagazo	Material sólido y fibroso residuo de la molienda de la caña de azúcar.
Biomasa	Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.
Calor latente	Energía necesaria para el cambio de fase de un elemento o compuesto.
Calor sensible	Energía necesaria para elevar la temperatura de una sustancia, sin que ésta cambie de fase.

Calor latente de vaporización	Calor necesario para realizar el cambio de fase del estado líquido a gaseoso de una determinada sustancia.
Cachaza	Material retenido y descargado por los filtros que se encargan de filtrar los lodos del clarificador.
Calandria	Intercambiador de calor de tubos o placas encontrado en los evaporadores.
Calor específico	Cantidad de energía necesaria para elevar en un punto la temperatura por unidad de peso de una determinada sustancia.
Caldera	Dispositivo generador de vapor.
Combustión	Reacción química en la que el carbono y el hidrógeno, reaccionan con el oxígeno, liberando energía térmica.
Condensado	Líquido que se forma cuando el vapor se enfría hasta su temperatura de rocío.
Corrosión	Desgaste de un material, disminuyendo su resistencia mecánica.
Densidad	Cantidad másica por unidad de volumen de una sustancia.

Dióxido de azufre	Gas resultante de la reacción de combustión entre el azufre y el oxígeno.
Etapa de secado a velocidad constante	Etapa en la que se elimina la humedad exterior o superficial, de un material.
Etapa de secado a velocidad variable	Etapa en la que la velocidad de secado viene dada por la difusión de la humedad contenida en un sólido, desde su interior hacia su superficie y su final arrastre.
Exceso de aire	En la práctica el aire necesario para que se dé la combustión completa de un determinado combustible resulta ser mayor que la teórica, debido a esto se inyecta aire en exceso.
Entalpía	Cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.
Humedad crítica	Humedad contenida en un material hasta llegar al punto de velocidad de secado constante.
Humedad de equilibrio	Humedad a la cual todo el contenido de humedad libre ha sido liberada en un material.
Humedad libre	Humedad que se le es posible remover a un sólido antes de llegar a la humedad de equilibrio.
Humedad relativa	Porcentaje de humedad de saturación.

Imbibición	Proceso de añadir agua en la planta de extracción para aumentar la extracción.
Ingenio	Planta agroindustrial donde se procesa la caña para producir azúcar y sus derivados.
Intercambiador de calor	Dispositivo que facilita el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí o bien por contacto directo (mezclados).
Material higroscópico	Material poroso que tiene valores elevados de humedad en equilibrio.
Material no higroscópico	Material básicamente impermeable, que tiene valores bajos de humedad en equilibrio.
Maceración	Proceso en el cual el bagazo es sumergido en un exceso de jugo, generalmente a elevada temperatura para hacer permeables las células que no han sido rotas y promover la extracción de la sacarosa.
Presión manométrica	Diferencia entre presión absoluta y atmosférica.
Poder calorífico inferior	Energía producida por la combustión de un combustible, sin tomar en cuenta el aprovechamiento del calor latente de los gases (producto de la reacción).

Poder calorífico superior	Energía producida por la combustión de un combustible, tomando en cuenta el aprovechamiento del calor latente de los gases (producto de la reacción).
Secador	Dispositivo mediante el cual se elimina el agua contenido en una sustancia.
Sulfatación	Introducción de dióxido de azufre en el jugo.
Sacarosa	El compuesto químico puro que es conocido como azúcar blanco, generalmente medido mediante polarización en caso de soluciones puras.
Secado por convección	Método de secado directo. Calor es suplido por el calentamiento de aire o gas que pasa sobre la superficie del sólido a secar. Calor para evaporación es entregado por convección a la superficie expuesta del material y la humedad evaporada es retirada por la corriente de gas.
Secado por conducción	Método de secado indirecto. Calor para evaporación es suplido a través de superficies previamente calentadas (estacionarias o en movimiento). La humedad evaporada es retirada mediante vacío.
Secado por radiación	Método de secado indirecto. Calor para evaporación es suplido mediante ondas electromagnéticas en un rango del espectro solar entre: 0,2m-0,2µm. La

radiación solar penetra la superficie del material, el cual absorbe sólo una parte de ésta, dependiendo de la magnitud de la onda.

Secado Operación de eliminación de humedad de una sustancia.

Secador de faja transportadora Emplea una banda transportadora que conduce el sólido a través de la superficie expuesta a la transferencia de calor generada entre el gas secante y sólido húmedo.

Tandem de molinos Configuración de masas o rodillos que se encargan de la extracción de jugo y bagazo, de la caña.

Templa Mezcal de miel y azúcar, obtenida en tachos.

Tachos Evapocristalizadores en donde se forma el grano de azúcar.

Temperatura de bulbo húmedo Temperatura de en estado estacionario y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de líquido con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas.

Transferencia de calor Forma de energía que puede ser transferida de un sistema a otro como resultado de un gradiente de temperatura.

- Transferencia de masa** Proceso por el cual un primer cuerpo, cede materia a un segundo cuerpo.
- Temperatura de rocío** Temperatura a la cual el vapor contenido por un gas, se precipita.
- Zafra** Nombre que se le asigna al período de duración de la producción de azúcar y sus derivados.

RESUMEN

Como primera parte del Ejercicio Profesional Supervisado, se realizó un reconocimiento de los equipos en el área de molienda, energía y secado de bagazo (específicamente, ya que de estos depende el proceso de secado).

A continuación se realizó un trabajo en conjunto con el Departamento de Mantenimiento Industrial, para verificar que los equipos de secado (instrumentos, motores, variadores, transmisiones, entre otros) se encontraran en buen estado y seguidamente ponerlos a funcionar. Posteriormente, se midieron en los gases de combustión de la caldera, mediante un sensor indicador de concentraciones y temperatura, los respectivos datos. Finalmente, se analizaron los resultados después de varias corridas.

Luego, se procedió a realizar los cálculos de transferencia de calor y masa para determinar el tiempo de retención del bagazo dentro del secador respecto a su capacidad (también calculada). De esta forma, seguidamente, se realizó un análisis dinámico de los equipos en el secador que intervienen como variables del tiempo de retención, para establecer los parámetros de funcionamiento del secadero.

Por último, se supervisó la operación del secadero, junto con el personal analista de laboratorio y de operación en el área de calderas; y se analizaron los resultados obtenidos.

Por otra parte, se realizó una propuesta para ampliar el proceso de secado de bagazo en la fábrica del Ingenio Concepción, S. A.

OBJETIVOS

General

Analizar el proceso actual y proponer una mejora para aumentar la capacidad del proceso de secado en el Ingenio Concepción S. A.

Específicos

1. Determinar la capacidad máxima de secado del actual proceso.
2. Definir el tiempo de retención de secado.
3. Establecer los parámetros de operación de los equipos del secador y ajustarlos mediante el control de operación del mismo.
4. Demostrar la factibilidad del actual proceso.
5. Estudiar diversas fuentes de energía que no se aprovechan en la fábrica y analizar su factibilidad para expandir la capacidad de secado.

INTRODUCCIÓN

El bagazo es un biocombustible obtenido luego del proceso de molienda de caña en los ingenios azucareros. En esta fase se da la separación del jugo (sacarosa, la cual se utiliza para obtener azúcar), de la parte fibrosa. La parte fibrosa (bagazo), se utiliza como combustible en las calderas que generan vapor. Posteriormente, el fluido generado en las calderas es conducido a través de tuberías hacia turbinas, las cuales aprovechan la energía cinética de este flujo para generar un movimiento mecánico que, por último, se aprovecha en generadores de energía eléctrica. Parte de la energía eléctrica generada se utiliza para procesos internos del ingenio y otra, para la venta.

El rendimiento de la utilización de biomasa como combustible está directamente relacionado con su contenido de humedad. Regularmente, en muchos ingenios alrededor del mundo, el contenido de humedad con el que sale el bagazo del proceso de molienda fluctúa entre 48 y 55 por ciento. Esto ha llamado la atención a los estudios de secado de bagazo en la mayoría de ingenios que producen azúcar con base en caña, con el objeto de mejorar su utilidad.

Se han realizado estudios en ingenios azucareros en el mundo que demuestran la factibilidad de este proceso. Los resultados indican que con una reducción del 10 por ciento de humedad en el bagazo de alimentación a una caldera, equivale a un aumento en el rendimiento de la misma en 20 puntos en escala porcentual. Estos valores presentan un ahorro significativo en combustible debido al aumento del poder calórico del mismo.

Tomando en cuenta lo anterior, el Departamento de Energía de la fábrica de Ingenio Concepción S. A., busca dar los primeros pasos en cuanto a la reducción de concentración de humedad contenida en el bazo mediante un secadero por convección (directo), que emplea los gases de combustión (como medio secante) de una caldera bagacera, para así obtener un mayor poder calorífico en el combustible y disminuir la demanda de alimentación de bagazo a calderas.

1. GENERALIDADES DEL BAGAZO DE CAÑA

1.1. Definición

El bagazo o megazo es un subproducto del proceso de azúcar de caña. Es la parte fibrosa que contiene la caña en donde se encuentra el jugo que, dicho sea de paso, tiene la sacarosa que se utiliza para la formación del grano.

En la práctica, la mitad es jugo y la otra mitad es fibra. Esto depende de las variaciones en el proceso de molienda y la calidad de la caña. La tercera parte, aproximadamente, de caña molida en el mundo, se utiliza como combustible para generar vapor a través de la energía producto de la combustión en calderas diseñadas específicamente quemar este tipo de biomasa.

En cuanto a su uso como combustible, a medida que el bagazo está más húmedo, debido a las variaciones del proceso de molienda, éste es menos eficiente. Esto ha sido el centro de atención para los ingenios azucareros que producen bagazo para utilizarlo como combustible. Generalmente el valor de humedad oscila entre 50 – 52 por ciento.

1.2. Características generales

Las características generales del bagazo de caña se presentan a continuación:

1.2.1. Almacenamiento

El almacenamiento del bagazo producido durante la zafra es necesario cuando se utiliza como materia prima para otras operaciones que se realizan continuamente a lo largo del año. Un bagazo fresco y no degradado da los mejores resultados para la producción de pulpa. A continuación se presentan algunas configuraciones para la preservación del bagazo para su eficiente uso:

Figura 1. Configuración de pilas de bagazo de caña



Fuente: Chen C.P. James. Manual de azúcar de caña. 1991. p. 250.

1.2.2. Utilización

El uso principal del bagazo es como combustible en las calderas. Esto permite a los ingenios ser autosuficientes en términos de todas sus necesidades energéticas, lo que representa un gran beneficio a la economía del proceso del azúcar crudo. En muchos casos el ingenio puede configurarse para producir un excedente de bagazo, el que puede utilizarse para suministrar vapor para otras actividades de elaboración de subproductos o para proporcionar insumos para otras actividades.

La generación y venta de excedentes de energía eléctrica puede considerarse como un subproducto de la elaboración del azúcar crudo.

Varias fábricas grandes de pulpa y papel están basadas en bagazo como su materia prima principal. Los productos elaborados por dichas empresas incluyen cartón para cajas, papel absorbente, papel periódico y papel de alta calidad para impresión y escritura.

1.2.3. Poder calorífico del bagazo

A medida que cualquier combustible es más puro, su poder calorífico también. Esto depende de variables tales como: humedad, cenizas y brix (cantidad de sólidos contenidos en una determinada sustancia). La ecuación propuesta por Peter Rein ^[1] para determinar el valor del poder calorífico superior viene dado por la siguiente expresión:

$$PCS = [19\ 605 - 196,05(\%H) - 196,05(\%Z) - 31,14(\%Brix)] \text{ kJ/kg}$$

Donde:

PCS = poder calorífico superior

%H = porcentaje de humedad

%Z = porcentaje de cenizas

% Brix = porcentaje de sólidos contenidos en el bagazo (materia extraña)

Regularmente el valor del poder calorífico superior no es utilizado ya que éste hace salvedad a la energía que se obtiene en el proceso de combustión, tomando en cuenta que se utilizará el calor latente producto de esta reacción, es decir, que se dé la condensación del vapor contenido en los gases de combustión. Por lo tanto, la ecuación para efectuar el cálculo de la energía generada sin tomar en cuenta que se utiliza el calor latente, es:

¹ Rein Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. Berlín: Bartens KG, 2012. p. 710-712.

$$\text{PCI} = [18\,309 - 207,6 (\%H) - 196,05 (\%Z) - 31,14 (\%Brix)] \text{ kJ/kg}$$

Donde:

PCI = poder Calorífico Inferior

1.2.4. Alimentación de bagazo a las calderas

Esta es una variable crítica en la actualidad ya que para mantener una adecuada relación aire/combustible, para llevar a cabo una combustión eficiente dentro de una caldera, se requiere medir este parámetro con el menor porcentaje de error posible.

Como se sabe, el bagazo se lleva directamente de los molinos a las calderas por medio de conductores (banda o tablillas) que lo arrastran y éstos alimentan mecánicamente a los hogares de las respectivas calderas. El dispositivo mecánico más simple consiste en una tolva dotada de una puerta balanceada. Los alimentadores rotativos están constituidos por tambores movidos mecánicamente que sellan la abertura todo el tiempo mientras giran y entregan el bagazo a los hornos.

Los dispositivos automáticos (variadores, por ejemplo) que regulan la cantidad de bagazo alimentado a las calderas se han vuelto muy comunes. Los transportadores de velocidad variable operando en forma conjunta con un equipo automático de control de la combustión mantienen una alimentación uniforme, una adecuada relación aire/combustible y una buena eficiencia de la caldera.

1.2.5. Desecación del bagazo

El remanente de humedad que queda en el bagazo, debido al proceso de extracción de jugo, es inversamente proporcional al poder calorífico o energía liberada por combustión por unidad de masa. Cuando el megazo contiene un nivel de humedad del 54 por ciento, su valor calórico se reduce, al igual que la eficiencia de la caldera. En las condiciones existentes en Luisiana, Bailliet se calculó la eficiencia de la caldera con respecto a la humedad del bagazo.

Tabla I. **Eficiencia de calderas respecto a la humedad del bagazo**

Humedad del bagazo (%)	Eficiencia de caldera (%)	
	Teórica	Práctica
52	60,9	53,9
40	66,4	59,4
32	69,2	62,2

Fuente: Chen C.P. James. Manual de caña, 1991. p. 142.

Este alto grado de humedad en el bagazo crea la necesidad de utilizar combustibles suplementarios, tales como el gas natural o aceite combustible.

1.2.6. Combustión del bagazo

El estudio de la combustión del bagazo ha sido muy complejo debido a los procesos que se dan para llevarse a cabo. Como sabemos, en promedio, la mayoría de ingenios produce bagazo al 50 por ciento de humedad. Los procesos de la combustión son los siguientes:

- Transferencia de calor para realizar el secado: durante esta etapa el bagazo húmedo es calentado hasta llegar a la temperatura de vaporización del agua. Básicamente es la adición de calor sensible.
- Secado: durante esta etapa se da el secado del bagazo que es la evaporación de la humedad que este contiene.
- Transferencia de calor para realizar el proceso de combustión: adición de calor sensible hasta llegar a la temperatura de auto-ignición del combustible (*flash point*).
- Combustión del bagazo: aproximadamente, 60 por ciento del bagazo hace combustión en suspensión y el resto, cuando cae a la parrilla. Idealmente se quiere que este haga combustión en suspensión totalmente, pero debido a los procesos descritos anteriormente y la cantidad partículas volátiles que el combustible tenga dependerá.

1.3. Análisis del bagazo

A continuación se presentan los análisis que se realizan en laboratorio para determinar la calidad del bagazo. Esto sirve en fábrica como indicador para un proceso y, por lo tanto, ayuda a controlar. En este estudio se efectuaron para determinar parámetros de operación y demostrar la factibilidad de este proyecto.

1.3.1. Dificultades en el muestreo

El resultado de los análisis que se le hacen al bagazo pueden ser muy variables de muestra a muestra, por lo que se requiere de realizar muchas

corridas para validar dicho valor. Esto es un problema en los laboratorios de los ingenios de hoy en día ya que el análisis del bagazo no es el único indicador en el proceso de la azúcar de caña.

El análisis del megazo presenta algunos problemas que no se encuentran al analizar otros productos para el control de fábrica, tales como el jugo, el azúcar y las melazas. La gran cantidad de materia insoluble comparada con la de los constituyentes solubles, así como la falta de homogeneidad en el tamaño de las partículas, hace que obtener una muestra representativa sea muy difícil.

1.3.2. Preparación de las muestras

Después de que la muestra ha sido tomada y conservada, debe mezclarse completa, rápidamente y tomar submuestras. Para lograr una mezcla más homogénea, deben tomarse con un desintegrador, tomando precauciones para evitar la pérdida de humedad.

1.3.3. Determinación de la humedad

Debido a la falta de uniformidad en la distribución de la humedad, es muy importante el secado de una muestra grande. Para el trabajo de control, las muestras de 100 gramos dan resultados satisfactorios.

Generalmente se acepta como práctica confiable calentar el bagazo a 130 grados Celsius. Las determinaciones de humedad en las muestras mantenidas dentro de recipientes herméticos deben hacerse cada 4 a 6 horas. El mezclado de las muestras para determinar la humedad debe ser extremadamente rápido para evitar pérdida de ésta.

1.3.4. Determinación de la sacarosa (POL)

La determinación de sacarosa (POL) en el bagazo, generalmente se hace por métodos de digestión simple. El cálculo requiere el uso del porcentaje de fibra en el bagazo. Recientemente se ha encontrado que la desintegración en agua fría resulta un método sencillo y efectivo.

1.3.5. Determinación de la fibra

Se prepara una muestra con un desintegrador húmedo y se coloca en un tambor que se hace enrollando una pieza de malla de bronce de 30,5 centímetros de ancho x 30,5 centímetros de largo hasta formar un cilindro. Las perforaciones del tambor consisten en orificios circulares de 3,18 milímetros de diámetro y una distancia entre centros de 6,36 milímetros. A continuación, el tambor se sumerge en agua hasta la mitad en un separador y se hace girar durante 5 minutos a 18 revoluciones por minuto (usando motor eléctrico de 0,25 caballos de fuerza). El parénquima se colecta de la parte acuosa, se seca y se pesa. La fibra dura se saca del interior del tambor, se seca y se pesa. La relación o el porcentaje de cada componente se calculan a partir de los pesos obtenidos.

1.4. Ingenio Concepción S. A.

Para tener un panorama global de la estructura organizacional, historia y procesos; la descripción general del Ingenio Concepción S. A., se presenta a continuación:

1.4.1. Descripción general

Organización agroindustrial dedicada a producir y comercializar caña de azúcar, sus derivados y energía eléctrica al más bajo costo a nivel mundial, satisfaciendo los requerimientos de calidad de sus clientes a través de procesos eficientes y la práctica de valores, con un equipo humano dispuesto al cambio, con compromiso y responsabilidad hacia la mejora, para propiciar la permanencia de la empresa en el largo plazo.

Está orientada a ser de clase mundial, proyectándose a la satisfacción del cliente a través del aseguramiento de la calidad. Manteniendo un liderazgo que fortalezca una estructura organizacional que responda a las necesidades de la globalización la preservación del ecosistema y que estimule un ambiente agradable de trabajo que le permita tener colaboradores con sentido de pertenecía, responsabilidad, compromiso y que mejora continuamente sus capacidades, habilidades y desarrollo integral para lograr los resultados esperados.

En los últimos años se han colocado entre los ingenios de mayor importancia, aportando más de dos millones y medio de quintales de azúcar a la producción nacional. Además son pioneros en proyectos de cogeneración eléctrica, mediante el aprovechamiento del bagazo de la caña de azúcar. Se encuentra entre los cuatro únicos ingenios del país que producen el azúcar refino, la cual se caracteriza por su calidad, pureza y su color blanco cristalino.

1.4.2. Historia

El 20 de agosto de 1849, don Manuel María Herrera, adquirió la finca Pantaleón. A base de grandes esfuerzos y una gran visión, Pantaleón se

diversificó, transformándose de una hacienda ganadera, a una finca de caña y productora de panela y finalmente convirtiéndose en un ingenio azucarero. En 1883 muere don Manuel María Herrera y sus herederos fundan Herrera y Compañía y en 1973 cambian el nombre de la empresa a Pantaleón, Sociedad Anónima.

El Ingenio Pantaleón alcanzó el liderazgo de la industria azucarera de Guatemala en 1976, convirtiéndose en el ingenio de mayor volumen de producción del área centroamericana. En 1984 asumió la administración y el control de las operaciones del Ingenio Concepción, ocupando un importante lugar en cuanto al volumen de producción en el país. En junio de 1998, continuando con la estrategia de crecimiento y diversificación geográfica, la organización adquirió el ingenio Monte Rosa, localizado en la zona occidental de la República de Nicaragua. A finales del 2000 se integran los tres ingenios y deciden participar como subsidiarias de la organización conocida como Pantaleón.

En 2006 se asume otro gran reto en la estrategia de crecimiento al incursionar en Brasil, en una alianza estratégica con el grupo brasileño UNIALCO y el grupo MANUELITA de Colombia, para la construcción y operación del ingenio sucro-alcoholero *Vale do Paraná*, localizado en Suzanápolis oeste del estado de *São Paulo*, Brasil.

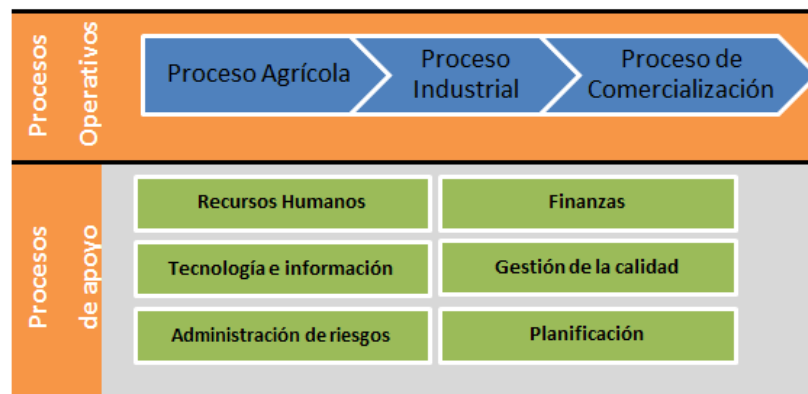
En agosto de 2008, Pantaleón obtiene la administración del Ingenio La Grecia, ubicado en Choluteca, Honduras. Esta nueva alianza contribuirá a afianzar el liderazgo en la industria azucarera en América Latina, cumplir con la visión a largo plazo de la organización y permitir combinar fortalezas y cooperar con el desarrollo sustentable de la industria en Honduras.

En los últimos 36 años, Pantaleón ha mantenido un desarrollo acelerado, construyendo modernas plantas y realizando inversiones productivas en el agro y la industria, con tecnología de punta y procesos innovadores que le han permitido ser reconocido como uno de los principales productores eficientes de bajo costo en el mundo.

1.4.3. Organización

Las operaciones se desarrollan a través de tres procesos operativos principales: agrícola, industrial y comercialización. Estos son apoyados por otros procesos que incluyen: recursos humanos, finanzas, tecnología e información, gestión de la calidad, administración de riesgos y planificación.

Figura 2. Organización del Ingenio Concepción S. A.



Fuente: folleto informativo del Ingenio CSA.

1.4.3.1. Proceso agrícola

Tiene a su cargo la producción y provisión de caña de azúcar de la mejor calidad para su industrialización, mediante el manejo de los recursos, generación y aplicación de tecnología para el manejo eficiente del campo, ejecutar las labores agrícolas mecanizadas y habilitación de tierras en el cultivo de caña de azúcar. También tiene bajo su responsabilidad el brindar un servicio eficiente en las actividades de transporte de personal, transporte de caña, azúcar, miel y productos varios. Todo esto con el apoyo de programas de mantenimiento preventivo y correctivo llevados a cabo por Administración de Maquinaria. Para el corte de caña se contrata personal en forma directa sin intermediarios, trabajo para el cual no se admiten niños ni mujeres.

1.4.3.2. Proceso industrial

Tiene como misión principal procesar la caña de azúcar con el fin de producir azúcar de distintas especificaciones y energía eléctrica. Esta operación está dividida en varios procesos productivos: pesado y determinación de la calidad de la materia prima, limpieza y preparación de la caña, extracción del jugo, purificación del jugo, evaporación, cristalización, refinación de azúcar, manejo de azúcar, generación de energía y mantenimiento.

La división industrial consta de cuatro procesos operativos:

- Extracción de jugo
- Tratamiento de jugo
- Recuperación de azúcar
- Generación de energía

1.4.3.3. Comercialización

El proceso de comercialización es responsable de la venta local de más de 20 000 toneladas métricas en Guatemala y Nicaragua, y de la exportación de más de 500 000 toneladas métricas.

Dentro de los clientes locales se encuentran principalmente las industrias de los diferentes sectores como lácteos, jugos, embotelladores, panificadores, empacadores, dulceros y otros. Los clientes industriales se caracterizan por sus estrictos requerimientos en sus especificaciones, para lo cual realizan auditorias periódicas a los ingenios de la corporación PSHC, en las cuales se ha destacado por la calidad de los productos así como el cumplimiento de los compromisos.

El azúcar se vende en diferentes tipos de envase, como sacos de polipropileno de 50 kilogramos, jumbo de 1 250 kilogramos y 1 100 kilogramos.

1.4.4. Valores

Promover el desarrollo transformando recursos. En Concepción S. A., existen fuertes valores morales encaminados a un mutuo desarrollo y crecimiento como comunidad, como familia y como seres humanos. Estos son:

- Integridad y honestidad
- Mejora y cambio permanente con visión a largo plazo
- Respeto por las personas relacionadas y compromiso por su éxito

1.4.5. Sistema de gestión

En Concepción S. A., se han implantado una serie de sistemas los cuales permiten optimizar la gestión del negocio agroindustrial. Actualmente estos sistemas cubren las siguientes áreas:

- Gestión de la calidad
- Gestión ambiental
- Manejo de productos alimenticios
- Administración de riesgos
- Planeación estratégica
- Seguridad industrial y ocupacional

Estos sistemas se han implementado siguiendo las normas internacionales más modernas y reconocidas a nivel mundial como ISO, HACCP y OSHA. Ya que Concepción S. A., siempre busca seguir mejorando su eficiencia y productividad mediante las mejores prácticas y herramientas administrativas posibles.

1.4.5.1. Gestión de la calidad

El ingenio es reconocido por sus altos niveles de productividad, calidad y servicio, lo que ha permitido certificar con la norma ISO 9001:2000 el Sistema de Gestión de Calidad y en el 2008 fue auditado para una nueva recertificación con la norma ISO 9001:2008, habiendo obtenido resultados satisfactorios y demostrado que mantienen altos niveles de productividad, calidad y servicio en sus operaciones.

Adicionalmente se certificó en el 2008 con la norma HACCP y en marzo del 2010 ratificó nuevamente su certificación. Como parte de la mejora del sistema se implementó un programa diario de inspecciones de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y HACCP a los procesos de diversas áreas del ingenio y bodegas externas, lo cual ha venido a fortalecer los programas de calidad e inocuidad de los productos.

1.4.5.2. Gestión ambiental

La responsabilidad del cuidado y preservación del medio ambiente forma parte de la filosofía de esta organización. Se han implementado programas para evitar la contaminación por partículas de hollín y ceniza en la atmósfera, a través de la instalación de trampas ciclónicas húmedas en las calderas y el manejo responsable de la cachaza o lodos de sedimentación para ser utilizado como abono orgánico natural en los campos, evitando de esta manera la contaminación de afluentes o ríos.

Desde el 2008 se ha trabajado en la implementación del sistema OSHA 18000. Existe un programa de cultivos forestales utilizando diferentes especies de árboles en una extensión de 3 000 hectáreas, de los cuales 1 560 corresponden a bosques energéticos, las cuales fueron plantadas durante los últimos siete años.

1.4.5.3. Planeación estratégica

Dentro del proceso de desarrollo e implementación de planes para alcanzar propósitos u objetivos, de parte de planeación estratégica, se han establecido metas para el 2011. Estas se enfocan en las siguientes variables:

- Crecimiento
- Disposición geográfica
- Rentabilidad

1.4.6. Productos

Entre las opciones elegibles, viables y repetibles que esta oferta pone a disposición de la demanda, para satisfacer una necesidad o atender un deseo a través de su uso o consumo; se encuentra:

- Azúcar blanco estándar
- Azúcar blanco especial exportación
- Azúcar crudo
- Azúcar refino
- Melaza
- Energía eléctrica para el sistema nacional

El azúcar se envasa en sacos de 50 kilogramos y en jumbos de hasta 1 250 kilogramos.

1.5. Descripción de la operación industrial del Ingenio Concepción S. A.

En esta sección se hace una descripción general del proceso de fabricación del azúcar blanco observado y estudiado en las visitas realizadas a la fábrica del Ingenio.

1.5.1. Descripción general del proceso

El proceso de de fábrica empieza en el área de extracción de jugo. En ésta, primeramente, la caña es preparada para separar la parte fibrosa del jugo. Esto inicia con la descarga de góndolas a un conductor que hace pasar la caña a través de agua que se dispara a presión, con el objetivo de lavar la materia prima. Luego de esto, la caña cae sobre otro conductor que la hace pasar a través de una serie picadoras para desmenuzar o abrir la fibra, para facilitar la extracción de jugo.

A su vez, la caña se hace pasar por niveladores que permiten que se forme un lecho uniforme a través del recorrido, esto permite una alimentación equitativa a los molinos. El clímax de este proceso se da en los molinos. En esta etapa, regularmente, la caña ya preparada, se hace pasar por una serie de molinos.

Estos están conformados, por lo general, por cuatro masas o rodillos que por efecto de fuerzas de presión, maceración e imbibición, extraen el jugo, quedando únicamente una parte fibrosa (bagazo) con muy bajo porcentaje de sacarosa, pero alto de humedad. De acá en adelante el proceso se divide en dos: generación de energía y tratamiento de jugo. Para efectos de continuar con una misma línea de producción de azúcar, se explicará más adelante el proceso de generación de energía.

Dado que el jugo de caña extraído en el proceso previo, viene con muchas impurezas (agua, sólidos solubles, insolubles y coloidales), es necesario eliminar éstas. En la primera etapa de este proceso el jugo se bombea hacia la torre de sulfitación, donde se realiza una reacción química entre dióxido de azufre y el jugo de caña, con el objeto de decoloración.

Posteriormente, debido a que, por una parte, el jugo que sale del proceso de sulfitación tiene alto grado de acidez (bajo potencial de hidrógeno), es necesario neutralizar y esto realiza mediante una mezcla de carbonato de calcio (cal), meladura, agua y jugo. A esta mezcla se le denomina sacarato.

El sacarato tiene otra función específica que es, aglomerar los sólidos presentes en el jugo para facilitar el proceso de clarificación. Para hacer más efectivo el proceso de clarificación, la mezcla de jugo y sacarato se hace pasar a través de una serie de intercambiadores de calor de concha y tubo, y de placas; donde el ésta alcanza una temperatura de 220 grados Fahrenheit. Luego debido a que fue necesario aumentar la velocidad del flujo de la mezcla obtenida y para el proceso de sedimentación (clarificación) es necesario que por gravedad se dé una separación meramente física, la mezcla se hace pasar por un tanque denominado *flash*.

Este tanque cuenta con una mampara en la cual se da el impacto de jugo para reducir su velocidad y cambia de régimen turbulento a laminar. Posteriormente, la mezcla entra a los clarificadores donde, por efecto de la gravedad y ayuda de un coagulante de alta densidad (reactivo químico) los sólidos se separan del jugo por decantación. Finalmente, el jugo clarificado es entregado a los evaporadores donde, por medio de intercambio de calor entre el vapor, procedente de una extracción de una turbina, y el jugo, a bajas presiones (hasta alcanzar el vacío), el jugo se purifica eliminando gran parte del agua que contiene.

El objetivo de esta etapa se ha cumplido, el jugo entregado al proceso de recuperación de azúcar (meladura) contiene un alto porcentaje de pureza (alto porcentaje de sacarosa).

El proceso de recuperación de azúcar inicia con la alimentación de meladura a clarificadores que contribuyen con obtener una mayor pureza. Al igual que en el proceso de clarificación de jugo, el proceso de clarificación de meladura lleva a cabo un proceso químico mediante la reacción de un coagulante (de baja densidad). Esto permite que los sólidos presentes en la meladura se separen por un efecto de burbujeo, producto de la aireación. Burbujas, que llevan dentro de sí impurezas (sólidos), flotan por diferencia de densidad, separándose así de la meladura, para obtener una alta pureza.

Ésta meladura de mayor pureza es entregada a tachos, en los cuales se mezcla el grano base con la meladura y, bajo el efecto de vacío, se realiza un intercambio de calor mediante vapor de agua por contacto indirecto (mediante una calandria). Esto permite, primeramente, una mayor pureza por la evaporación del agua presente en el jugo y finalmente la formación de grano mediante la cristalización por agotación de miel (extracción de sacarosa). Acá el grano no sale completamente limpio, es una mezcla entre grano y miel, es decir, es necesario realizar un proceso físico para efectuar dicha separación. Este proceso se realiza en maquinaria que utiliza la fuerza centrífuga y coladores, para separar la miel del grano.

La miel residual es agotada inversamente al crecimiento del grano, esto quiere decir que, a medida que le grano va creciendo, la miel se va agotando. Parte del azúcar obtenido en este proceso se va para el proceso final (embasado) y el otro, a refinación de azúcar, para obtener una mejor calidad final.

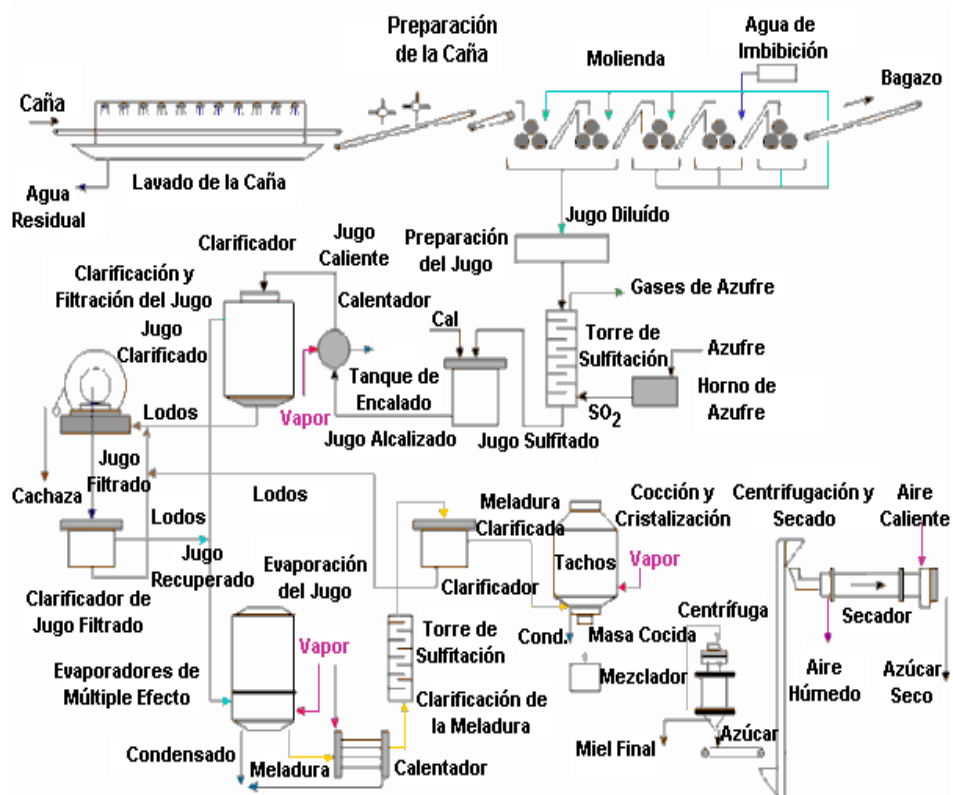
Por otra parte, regresando al proceso de generación de energía eléctrica, en éste se genera tanto la energía que sirve para efectuar los procesos internos de fábrica, como la venta de energía eléctrica. Inicia donde

finaliza el proceso de extracción de jugo, con la recepción del bagazo. Esta biomasa es transportada mediante una serie de conductores hasta llegar a su destino final, la alimentación y posterior combustión en calderas. Estas calderas de alta presión utilizan el calor generado por la combustión del bagazo de caña, para generar energía cinética y de presión, debido al cambio de fase del agua a vapor a altas presiones.

El vapor obtenido es un sobrecalentado, esto aparte de ser un resultado requerido para la alta eficiencia energética, también es necesario para asegurarse que el vapor entregado a turbinas no se condensará ya que esto provocaría fuertes golpes de ariete en los álabes. Las turbinas, posteriormente, aprovechan la energía cinética y presión del vapor sobrecalentado, para generar un movimiento mecánico que a través de un eje es transmitido hacia un generador de energía eléctrica que aprovecha el movimiento mecánico para generar corriente mediante la creación de un campo eléctrico.

Como ya se ha comentado previamente, parte de la energía producida se utiliza para los procesos internos de fábrica y el excedente, se vende a las compañías que se encargan de transportar la energía eléctrica mediante el tendido alrededor del país.

Figura 3. Diagrama descriptivo del proceso de elaboración de azúcar de caña



Fuente: http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/311801/311801_ee.htm. Consulta: 24 de octubre de 2012.

1.5.2. Obtención de azúcar blanco

En esta sección se describe el detalle de los principios de funcionamiento de cada proceso para obtener el azúcar blanco y bagazo. Este panorama global permitió conocer las variaciones de los procesos previos al secado de bagazo.

1.5.2.1. Transporte de la caña

El transporte de la caña se realiza mediante camiones que remolcan góndolas que varían en su capacidad, entre 20-40 toneladas. Éstos utilizan motores que disponen de 250 a 350 caballos de fuerza.

Dependiendo del tipo de corte que se le dé a la caña, puede ser:

- A granel corte manual
- A granel corte mecanizado

1.5.2.2. Pesado y determinación de la calidad

Al recibir la caña en el ingenio es pesada en una báscula anexa a la fábrica, luego se toma una muestra de cada góndola en el *CoreSampler* (muestreador) para analizarla en el laboratorio y determinar las características de calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas.

1.5.2.3. Preparación de la caña

La preparación de la caña es parte del proceso de extracción de jugo. En esta etapa la caña es pasada a través de una serie de machetes (figura 3), que tienen como finalidad abrir la fibra de la caña para facilitar la extracción del jugo. Éstos están diseñados de tal forma que casi no se pierde jugo en este proceso.

Figura 4. **Machetes para preparación de extracción de jugo**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

Cuando se tiene algún inconveniente (por falta de mantenimiento, mala operación), debido a que la parte exterior de la caña es impermeable, se da una ineficiente extracción en molinos. Estos resultados se ven reflejados en los análisis de laboratorios. El bagazo analizado presenta un alto porcentaje de sacarosa (POL), lo cual representa una pérdida en la cantidad de azúcar producida.

1.5.2.4. Extracción de jugo

El guarapo que contiene la caña es extraído mediante grandes rodillos de acero que ejercen una presión entre la carga y ellos mismos.

Por otra parte, conforme el jugo se va extrayendo en cada tándem (juego de masas), el jugo, exceptuando el primer tándem, se reutiliza, retornándolo a

las masas anteriores, para extraer la máxima cantidad de sacarosa presente en la caña. El guarapo del primer tándem se va directamente al siguiente proceso y en el último tándem no se le aplica guarapo, sino agua caliente. Éste principio es similar a cuando, posteriormente a lavar un automóvil, queda jabón en la esponja que se utilizó. Para eliminar este residuo de detergente, continuamente, se aplica agua y se exprime hasta lograr el menor porcentaje de jabón en la esponja.

De igual forma funciona el principio de maceración e imbibición en la molienda, solamente que en este caso se refiere a la extracción de sacarosa en vez de jabón (recordando la analogía de la esponja).

1.5.2.5. Sulfitación

La sulfitación tiene como fin la decoloración del guarapo, para poder producir azúcar blanca. El primer paso de esta etapa es la fabricación de dióxido de azufre (agente decolorante). Para esto se requiere de hornos en donde se realiza la reacción de combustión entre azufre y oxígeno (aire, en la práctica). Posteriormente este gas se pone en contacto con el jugo a contracorriente para que se dé la decoloración.

Generalmente por cada 1 500 galones por hora de jugo producido en el proceso de extracción, se debe producir y poner en contacto con 120 libras por hora de dióxido de azufre.

Un factor crítico de esta etapa es el enfriamiento gradual del dióxido de azufre, ya que, si su enfriamiento fuese instantáneo, al momento de ponerse en contacto con el agua, presente en el jugo, podría reaccionar para formar ácido sulfúrico (compuesto altamente corrosivo).

1.5.2.6. Alcalización

Este proceso se da inmediatamente después de la sulfitación y tiene como fin, estabilizar el bajo pH (concentración de iones de hidrógeno), que se alcanzó. Otro objetivo primordial de esta etapa es ayudar al proceso posterior (clarificación) a sedimentar los sólidos presentes en el jugo.

El compuesto que se genera para reaccionar con el jugo en esta etapa es llamado, sacarato y éste se compone de los siguientes: agua, cal, baume, jugo y meladura.

Generalmente un pH entre 7 y 7,5 es el objetivo primordial de este proceso.

1.5.2.7. Calentamiento

El calentamiento sirve para ayudar a la mezcla de sacarato y jugo, a reaccionar para hacer eficiente el proceso de clarificación. La transferencia de calor se da en intercambiadores tipo de concha y tubo y placas. Generalmente el fluido caliente es el condensado generado en los evaporadores. En esta etapa se alcanzan temperaturas de 125 grados Celsius.

1.5.2.8. Clarificación

La clarificación tiene como fin separar la máxima cantidad sólidos (en suspensión, coloidales e insolubles) contenidos en el jugo, mediante la gravedad, es decir, por la propia diferencia de pesos entre el jugo y los sólidos. Para esto, se emplea de un floculante que ayuda aglomerar los sólidos para que estos pesen más.

1.5.2.9. Sedimentación

Una vez que se ha desinfectado el jugo se procede a separar la tierra, arena y demás impurezas sólidas presentes en el jugo. Esto se realiza mediante sedimentación.

1.5.2.10. Filtrado de cachaza

Estos filtros funcionan mediante el principio de presión de vacío. La presión es ejercida desde la parte externa hacia la parte interna del filtro, mediante bombas. Básicamente el objetivo del filtro es exprimir y, por consiguiente, extraer la máxima cantidad de jugo presente en la cachaza o sedimentos (provenientes de la clarificación).

El jugo recuperado en este proceso es bombeado nuevamente al proceso de fabricación de azúcar y el remanente de cachaza, es utilizado como abono para fertilizar el campo de ciega.

1.5.2.11. Evaporación en múltiple efecto

Esta etapa tiene como finalidad aumentar la pureza del jugo por la eliminación del agua presente en él, aumentando de esta forma tanto el porcentaje de brix, como de sacarosa.

La separación se da por evaporación y el calor utilizado para realizar este proceso, generalmente, se obtiene del vapor de las extracciones de las turbinas que generan, en conjunto con generadores, energía eléctrica. Este vapor, por contacto indirecto, cede calor al jugo para realizar la operación de evaporación.

Un factor muy importante de este proceso es la presión de vacío que se le aplica a los evaporadores ya que a medida que este valor aumenta, disminuye el calor necesario para realizar el cambio de fase (líquido a vapor). Esto es importante debido a que el jugo no debe ponerse en contacto con altas temperaturas ya que esto produciría el proceso inverso de la fabricación de azúcar (caramelización).

El motivo por el cual los evaporadores están entrelazados en serie es debido a que el vacío es mayor a medida que se avanza en cada evaporador, por consiguiente el calor para efectuar la evaporación es menor.

En este proceso, en la práctica, se logra obtener un contenido de sólidos en jugo del orden de 65 puntos porcentuales.

1.5.2.12. Cristalización

La primera etapa de este proceso es continuar con la evaporación del agua presente en el jugo bajo el mismo principio que en los evaporadores. Finalmente, la meladura se pone en contacto con un grano base, que determina el tamaño del grano formado, y la sacarosa presente empieza a precipitarse para formar el grano de azúcar.

Similar al proceso de evaporación, los tachos –intercambiadores de calor en donde se realiza la cristalización- están dispuestos en serie. Esto es debido a que a medida que la miel se agota, el grano crece.

1.5.2.13. Centrifugación

La templa o producto entregado por tachos, es una mezcla entre grano y miel. El objetivo de la centrifugación es la separación de ambos componentes. Esta operación se realiza bajo el principio de la fuerza centrífuga, la templa es direccionada hacia las orillas de la máquina en donde una lámina perforada micrométricamente efectúa la separación quedando el azúcar en la parte de en medio y la miel en la parte periférica.

La miel en este punto es bombeada hacia el siguiente tacho y así sucesivamente hasta agotar o extraer el máximo contenido de sacarosa en la miel para formar el grano.

Por otra parte, el azúcar puede ser enviado directamente a secado o a un proceso de refinación.

1.5.2.14. Secado

La operación de secado tiene como fin, eliminar la mayor cantidad de humedad posible presente en el azúcar. Para este proceso el azúcar es puesto en contacto directo con aire.

1.5.2.15. Envasado

Los azúcares crudos generalmente no se desecan, pero es común la aplicación de vapor en las centrífugas. El secado con aire caliente en desecadores verticales de bandejas rotatorias también sirve para enfriar el azúcar.

Es usual llevar el azúcar crudo hasta la tova por medio de un elevador, al final del cual el azúcar cae en un esparcidor o ventilador que lo lanza al aire y hace que tenga lugar algún enfriamiento y evaporación. Este arreglo es especialmente importante si el azúcar será puesto en sacos, una práctica que está cediendo terreno rápidamente ante el manejo y almacenamiento a granel.

1.5.3. Generación de vapor

La generación de vapor, se da por la utilización de la energía producida por la combustión del bagazo u otro combustible, para evaporar agua en calderas. Este vapor se utiliza para alimentar a turbogeneradores u otros equipos de proceso de fabricación de azúcar.

1.5.4. Generación eléctrica

La generación de energía eléctrica, se da por el aprovechamiento de la energía mecánica producida por las turbinas por efecto de la energía cinética y de presión del vapor generador en calderas.

1.6. Descripción general de equipos utilizados por procesos del Ingenio Concepción, S. A.

A continuación se presenta la descripción general de los equipos utilizados para la operación de cada etapa de los procesos de obtención de azúcar y bagazo, en el Ingenio Concepción S. A.:

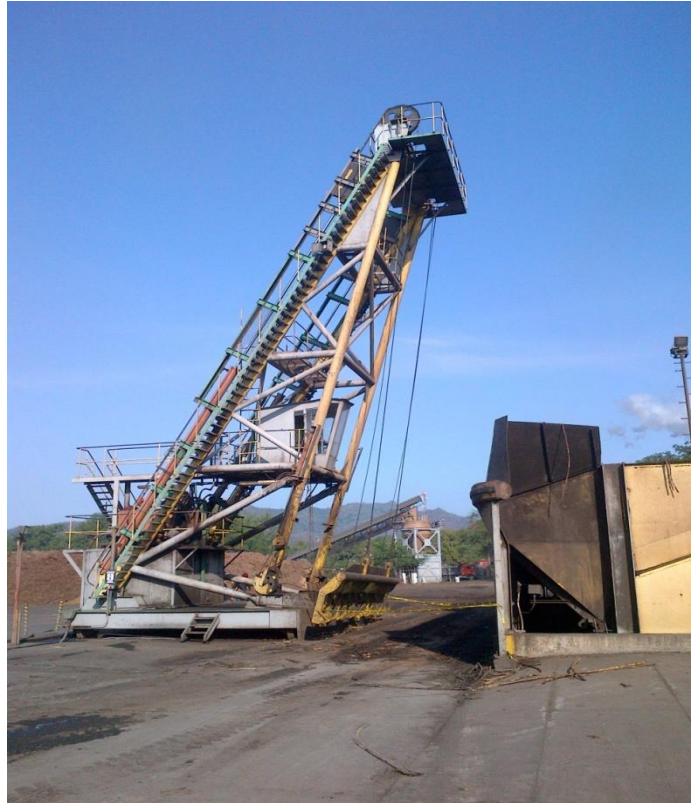
1.6.1. Extracción de jugo

Por medio de diversos procesos físicos, en esta etapa, se da la separación de materia sólida (bagazo) y materia líquida (jugo); contenida en la caña. En el proceso de extracción de jugo, los equipos utilizados son el siguientes:

1.6.1.1. Grúas

Estas grúas emplean la presión hidráulica para manipular o descargar las góndolas donde los camiones que llevan la caña que se entrega al primer proceso de fabricación de azúcar (extracción de jugo). Éstas pueden realizar movimientos en dos planos, por acción de cilindros hidráulicos. Otro factor muy importante en esta maquinaria es el contrapeso que llevan en la parte posterior, ya que esto permite un balance entre la carga que se está levantando y el peso de la propia grúa, para que no vuelque.

Figura 5. **Grúa para descarga de caña**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.1.2. Mesas de caña

Éstas están conformadas por una lámina de una pulgada que es donde cae la caña que se alimenta de las góndolas. El movimiento que en éstas se efectúa, se realiza mediante cadenas que están soldadas a la propia cama que transmiten la velocidad y potencia generada por un moto-reductor.

Figura 6. **Mesa de caña**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.1.3. Conductores de caña

Estos tienen como finalidad, transportar la caña de un punto a otro. Pueden ser de banda o de cadenas. Los de cadenas son similares a la meza de caña. Los de banda a diferencia, tienen una faja de hule constituida por materiales que resisten grandes esfuerzos de tensión (generalmente caucho con metales acerados). La potencia y el movimiento vienen dados por un motor-reductor que hacen girar al rodillo motriz, que es el que mueve la banda. A lo largo de la banda a fin de soportar y mantener el peso de la carga en todo su recorrido, se instalan rodillos de diámetro menor pero que cubren el ancho total de la banda.

Al final del recorrido de la carga, se encuentra el rodillo conducido o de cola, este sirve para fijar la banda y para transmitir la potencia y movimiento a

través de ella. Los componentes más importantes de este conjunto son los rodillos tensores, ya que estos permiten que la banda se mantenga tensionada entre el rodillo motriz y cola o conducido. Una característica importante de los rodillos es su acabado superficial, esto permite que las fuerzas de fricción entre la banda y el propio rodillo sean tales que no ocurra deslizamiento.

Figura 7. **Conductor de cadenas para caña**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.1.4. Picadoras de caña

Las estaciones de picadoras para tallos enteros de caña, generalmente consisten de una o dos picadoras que se encuentran precedidas por un nivelador. Normalmente las máquinas picadoras utilizan cuchillas rectas y con menor frecuencia cuchillas curvadas al estilo azadón.

Figura 8. **Picadora para caña**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.1.5. Molinos de caña

Grandes rodillos de acero exprimen la caña, picada previamente para facilitar esta etapa para extraer el guarapo (jugo). Normalmente cada tándem de masas, que ejercen presión sobre la caña, consta de 4 rodillos y cada uno tiene una función específica. El nombre de cada una, de acuerdo a su función es: direccional (cuarta masa), cañera, bagacera y superior (flotante). La masa direccional o cuarta masa, sirve para direccionar la carga de caña hacia el rodillo superior y cañero. Entre el rodillo superior y el cañero se ejerce la presión para extraer el jugo. El espaciamiento entre el rodillo superior y el cañero es variable y es controlado mediante presión hidráulica.

En la actualidad, también se cuenta con un sensor de nivel colocado en el chifle que recibe la carga de caña en cada tándem y éstos están interconectados mediante un lazo de control con la presión hidráulica, ejercida

por un pistón, que controla el nivel de la masa superior o flotante. Entre más carga haya el rodillo superior tenderá a subir. Entre la masa cañera y bagacera hay un peine que no permite que el bagazo caiga junto con el jugo al momento que se efectúa la extracción. Por último entre la masa bagacera y superior terminan de extraer el jugo presente en el bagazo. Este último rodillo también tiene como fin trasladar el bagazo hacia el siguiente tándem. Regularmente, en este proceso se cuenta con cuatro componentes de masas.

La masa motriz es la superior, está entrega energía dinámica a las otras masas mediante una serie de engranes (figura 8).

Figura 9. **Tándem de masas**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.1.6. Conductores intermedios

Estos conductores están constituidos por hembras de metal, que van ensambladas a lo largo entre las cadenas y tienen por objetivo arrastrar la carga que sale de cada tándem para conducirla hacia el próximo. Al igual que los conductores antes descritos su movimiento es generado por motores reductores.

1.6.1.7. Niveladores de caña

Éstas se emplean para mantener un nivel constante a lo largo y ancho entre el conductor y la cama de caña formada, para lograr que las picadoras o desfibradoras sean eficientes. El espesor de lecho de caña que se obtiene está entre 500 a 1 500 milímetros.

Figura 10. **Niveladores de caña**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. noviembre de 2012.

1.6.2. Tratamiento de jugo

En esta etapa se inicia la purificación del jugo de caña. Éste, debido a las impurezas (sólidos en suspensión, coloidales), arrastra muchas partículas que no son útiles para obtener el azúcar. En el proceso de tratamiento de jugo, el equipo utilizado es el siguiente:

1.6.2.1. Torre de sulfitación

Consiste en un tanque rectangular dividido en dos compartimientos desiguales y conectados. El jugo que se va a sulfitar, es transferido al compartimiento más pequeño. De aquí es recogido por una bomba que lo lleva al aspirador de dióxido de azufre. Este se diseña con forma de tobera, basado en el usual principio de los eyectores. Se produce entonces aspiración de los gases de azufre y la sulfitación ocurre por contacto y mezclado en la columna vertical descendente que retorna el jugo al tanque.

Estas están fabricadas de aceros inoxidable por el bajo potencial de hidrógeno (entre 3,8 y 4,5) producido por la reacción entre el jugo y el dióxido de azufre.

Figura 11. **Hornos de combustión de azufre y oxígeno**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre 2012.

1.6.2.2. Calentadores de jugo

Son del tipo de concha y tubo. Estos están constituidos por tubos de acero inoxidable y una carcasa de acero al carbono. En la parte exterior de los tubos pasa el fluido que es la fuente de calor para efectuar la transferencia hacía el jugo de caña [dentro de los tubos].

Figura 12. **Calentadores tipo concha y tubo**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. noviembre 2012.

1.6.2.3. Tanque *flash*

Está basado en tener una piscina de líquido en el cuerpo de tanque y un diámetro suficientemente grande, para que la velocidad de descenso del jugo sea suficientemente baja para permitir que incluso las burbujas de aire más finas puedan escapar hacia arriba en contra del flujo de líquido. Un tubo vertical de alimentación inyecta el jugo hacia abajo sobre una placa de salpique central. El nivel del líquido se mantiene justo por debajo de la placa de salpique. El tanque flash se posiciona adyacente y a la misma elevación del clarificador, de manera que sea posible mantener un nivel de líquido constante en el tanque y no pueda ocurrir reincorporación del aire en el jugo.

Figura 13. **Tanque flash**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

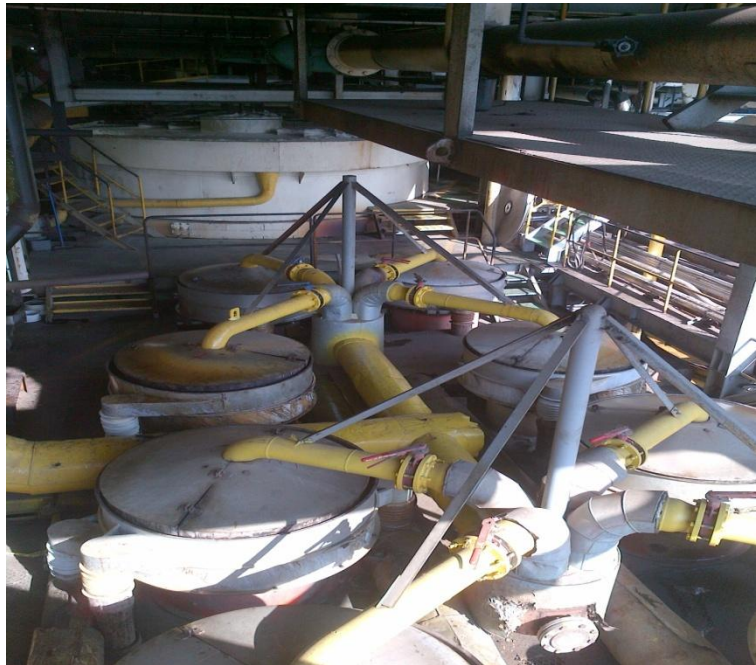
1.6.2.4. Clarificadores de jugo

El diseño del clarificador *RapiDorr*, desarrollado desde 1955, tiene 4 compartimientos y consiste realmente en dos clarificadores superpuestos de 2 bandejas cada uno. En este clarificador se considera importante el área provista para el espesamiento de los lodos.

1.6.2.5. Filtros de jugo

Son tamices que, por medio de vibración, filtran los sólidos que quedaron luego del proceso de clarificación de jugo mediante vibraciones y membranas micrométricas.

Figura 14. **Filtros de jugo**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.2.6. Evaporadores

Los evaporadores son intercambiadores de calor, que contienen un conjunto de tubos de acero inoxidable por donde circula el jugo que absorbe el calor para evaporar por contacto indirecto el agua contenida en él. El vapor circula entre la carcasa y el exterior de los tubos. Estos también cuentan con

equipos externos como las bombas de vacío y piernas barométricas para que la evaporación se realice a temperaturas bajas.

Figura 15. **Evaporadores**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre 2012.

1.6.2.7. Calentadores de meladura

Son intercambiadores con las mismas características que los calentadores de jugo. (Sección 1.6.2.2). Éstos, de igual forma, se componen de tubos, dentro de los cuales circula jugo de caña, y de una carcasa. Entre el espacio existente fluye la sustancia que transmite calor al jugo.

1.6.2.8. Clarificadores de meladura

El esquema de un clarificador de meladura utilizado en los ingenios en la actualidad se muestra en la fig. 15. El diseño básicamente es un cilindro. El tubo de alimentación central tiene un diámetro que incrementa progresivamente, reduciendo la velocidad de entrada hasta por debajo de 1,2 metros por minutos (20 milímetros por segundos). El rastrillo rotativo se encarga de raspar la espuma empujándola sobre una canal colectora alrededor de la periferia del clarificador, luego de lo cual la espuma es retornada sobre el tanque de jugo crudo.

La meladura clarificada se remueve desde el fondo del clarificador y pasa a través de una caja de derrames que cuenta con una esclusa o manga ajustable. El nivel de la espuma en el clarificador se controla, regulando la altura de la esclusa en la caja de derrames, donde se pueden utilizar esclusas planas o mangas cilíndricas. El desbordamiento sobre la esclusa debe ser suficientemente anchos para asegurar que cambios del flujo no alteren considerablemente el nivel del líquido del clarificador.

Figura 16. **Clarificador de meladura tipo Talho**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre 2012.

1.6.3. Recuperación de azúcar

En esta etapa se da la forma última del grano de azúcar. Por otro lado, también se obtiene el azúcar refino. En el proceso de recuperación de azúcar, el equipo utilizado es el siguiente:

1.6.3.1. Tachos

La característica más distintiva de los tachos es la calandria. El diseño más común incorpora una calandria con placas de tubos horizontales. Normalmente se utiliza un único conducto de descenso o tubo central rodeado por tubos verticales, lo que constituye un diseño efectivo de construcción simple y baja demanda de mantenimiento. El diámetro de conducto de

descenso es de 30 a 50 por ciento del diámetro de la calandria, usualmente alrededor de 40 por ciento en tachos de circulación natural, mientras que tubos de descenso más pequeños pueden ser utilizados en tachos con circulación forzada.

Figura 17. **Tacho o cristalizador**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.3.2. Centrífugas

Se componen de un motor acoplado directamente a un eje de acero SAE 1045 o indirectamente mediante poleas y fajas. El eje situado en el centro lleva ensamblado una canasta de acero inoxidable con orificios micrométricos por donde se filtra la miel. Cuenta con compuertas de alimentación de templeas (mezcla de miel con azúcar precedente de tachos) accionadas mecánica o electro-neumáticamente.

El tiempo de lavado de la centrífuga es, muy importante para determinar el color del grano. Este es un factor crítico en el proceso, ya que aumentarle mucho el tiempo de lavado daría como resultado mucha dilución de azúcar, es decir, pérdidas. Por otra parte, hay estándares que la empresa debe cumplir en cuanto al color, entonces, el tiempo de lavado no puede ser muy poco por motivos de prevenir la dilución.

Figura 18. **Centrífugas**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.3.3. Sin fines

Están constituidos por un eje sobre el cual lleva soldado lámina en forma helicoidal. Son accionados por motores eléctricos. El material de estos es de acero inoxidable debido, principalmente, a las normas de inocuidad.

Históricamente, fueron unas de las primeras bombas, inventadas por un matemático llamado Arquímedes (siglo III A.C). Hay hipótesis que muestran la posibilidad que se hayan utilizado en el antiguo Egipto.

1.6.3.4. Elevadores de azúcar

Este consiste en un conductor o canal rectangular en posición vertical que tiene una cadena o una correa que lleva cangilones y que corre en una polea de retorno en la parte inferior, movida por una polea similar en la parte superior. Su objetivo es transportar el azúcar del área de centrifugación a la secadora y enfriadora.

La distancia entre cangilones de la correa, es de 30 a 40 centímetro. La velocidad de la correa debe mantenerse entre 20 y 30 metros por minuto.

1.6.3.5. Secadora

Cuenta con un cilindro que gira sobre su propio eje con cierto grado de inclinación, accionado por un motor eléctrico, y un ventilador que aspira gas para efectuar la operación de secado.

Hay 2 posibilidades de circulación de gas:

- A contracorriente
- En paralelo

Figura 19. **Secadora**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.3.6. Enfriadora

Es muy similar a la secadora con la diferencia que permite el ingreso de aire frío en contracorriente que hace contacto con el azúcar para el acondicionamiento térmico de los cristales, de modo que la temperatura de salida de la enfriadora sea muy cercana a la temperatura ambiente evitando con esto el aterronamiento del azúcar.

Las enfriadoras disminuyen la temperatura del azúcar hasta aproximadamente 40-45 grados Celsius para luego conducirla al área de envasado.

1.6.4. Generación de energía

Esta etapa es una de las más importantes dentro de una planta cogeneradora, debido a que la energía generada aquí, es la fuente de sustento para toda la fábrica. Para el proceso de generación de energía, el equipo utilizado es el siguiente:

1.6.4.1. Calderas

Regularmente en los ingenios se utiliza calderas acuotubulares debido a la cantidad de vapor que se necesita producir a una alta presión. Éstas están conformadas, en su interior, por una configuración de tubos (banco de convección) por donde circula el agua que es evaporada. Los equipos internos que ayudan a incrementar la eficiencia de la energía producida son, por ejemplo: economizadores, pre-calentadores, super-calentadores, entre otros. Éstos equipos no son más que intercambiadores de calor que ayudan a calentar el agua de entrada a la caldera, el aire de ingreso para lograr la combustión y adherir calor al vapor saturado para llevarlo a un estado de sobrecalentamiento.

La energía que hace posible el cambio de fase del agua dentro de la caldera, se consigue por combustión. Generalmente, en ingenios en donde se produce azúcar en base a caña, el combustible utilizado para generar energía es el bagazo.

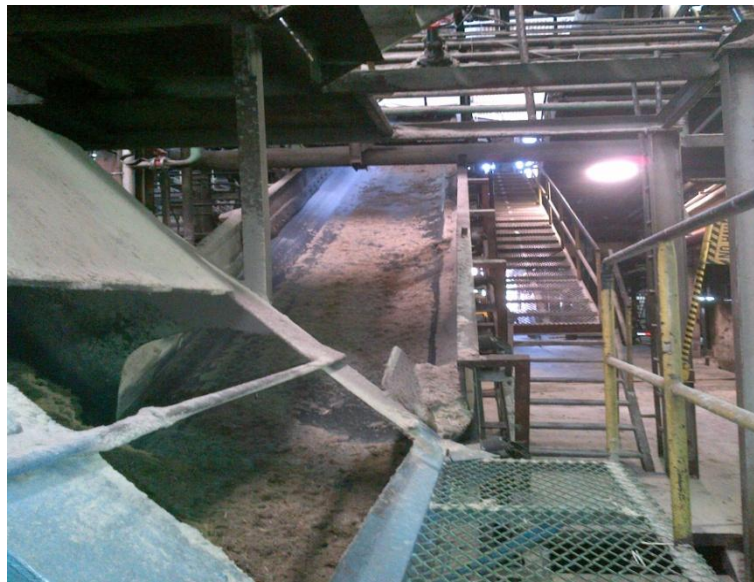
Las condiciones para que se dé una buena combustión dentro de una caldera son: exceso de aire entre 20 y 50 por ciento para calderas bagaceras, combustible con bajo porcentaje de humedad y una buena ignición (calor).

1.6.4.2. Conductores de bagazo

Estos conductores pueden ser de banda o de tablillas. Para los conductores de banda, una restricción debido a las fuerzas de fricción que actúan sobre la banda para detener la carga ya sea estáticamente o dinámicamente es el ángulo de elevación. Éste no puede ser mayor a 25 grados. Dicho sea de paso, este valor, para el de tablillas corresponde a 60 grados.

Estructuralmente son iguales a los que se utilizan para transportar la caña.

Figura 20. **Conductores de banda para bagazo**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012

1.6.4.3. Turbogeneradores

Los turbogeneradores de vapor toman vapor a presiones y temperaturas relativamente altas y entregan vapor de escape ya sea al proceso o en algunos casos, a condensadores que operan al vacío.

Para un flujo constante de vapor (sin extracciones) la diferencia en el calor total por unidad de masa en la entrada del vapor y en la salida de la turbina, representa la energía extraída del vapor en forma de trabajo mecánico, utilizada para rotar un generador de corriente alterna.

Figura 21. Turbogenerador de extracción



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.6.4.4. Subestación eléctrica

Instalación destinada a modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica para facilitar el transporte y distribución de la energía eléctrica. Su equipo principal es el transformador.

Como norma general, se puede hablar de subestaciones elevadoras situadas en medio de las centrales generadoras de energía eléctrica, cuya función es elevar el nivel de tensión antes de entregar la energía a la red de transporte. Y las subestaciones eléctricas reductoras que reducen el nivel de tensión antes de entregar la energía.

Figura 22. **Subestación eléctrica**



Fuente: Ingenio Concepción S. A. Noviembre de 2012.

1.7. Otros equipo utilizados

Estos son equipos de uso general, es decir no están determinados para un proceso en específico. Se les considera equipos auxiliares, ya que no son el foco central que interviene en los diversos procesos, pero que son totalmente imprescindibles.

1.7.1. Bombas

Son dispositivos mecánicos, accionados por un motor eléctrico, combustión interna u otro; que transforman la energía mecánica generada, en energía cinética y de presión.

1.7.1.1. Centrífugas

La bomba centrífuga depende de la fuerza centrífuga y la rotación de un impulsor. El tipo de bomba utilizado depende del tipo de servicio al cual es sometido y varía con la capacidad requerida, las variaciones en succión y descarga, el tipo de líquido a bombear y el tipo de eje utilizado.

Utiliza energía cinética para mover un fluido por medio de la rotación de un impulsor y la carcasa circular de la propia bomba. El impulsor brinda velocidad al líquido, y la carcasa obliga al líquido para descargarse de la bomba, convirtiendo la velocidad en presión.

1.7.1.2. Desplazamiento positivo

El principio de las bombas de desplazamiento positivo consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una

cámara. En la máquina de desplazamiento positivo, el elemento que origina el intercambio de energía, puede tener movimiento alternativo o movimiento rotatorio.

En las bombas de desplazamiento positivo tanto reciprocantes como rotatorias, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión) y disminuye de volumen (impulsión) por lo que también se le llama máquinas volumétricas.

1.7.1.3. De vacío

Estos dispositivos mecánicos generan presión de vacío succionando aire básicamente. Esta presión permite que, regularmente, en evaporadores o condensadores, sea menor la cantidad de calor necesaria para que se dé el cambio de estado de la sustancia a la que se desea adicionar o sustraer calor latente. Esto es muy importante en la industria azucarera, ya que cambios bruscos de temperatura podrían provocar una inversión del proceso de la fabricación de azúcar, es decir, lo que se conoce como caramelización.

Esencialmente existen dos tipos de bomba de vacío que se pueden emplear, las reciprocantes y las de anillo líquido. Las bombas reciprocantes ofrecen mayor eficiencia, requiriendo solamente 0,4 kilovatios por kilogramo de aire a 10 kilo pascales por minuto, en comparación bajo condiciones similares para los de anillo líquido (3, 7 kilovatios y los eyectores tipo jet (5,8 kilovatios).

1.7.2. Reductores

Son componentes mecánicos que reducen la velocidad y aumentan el torque proveniente de un motor eléctrico u otra fuente de energía mecánica.

Esto se efectúa bajo el principio del tren de engranes. Si se transmite velocidad a un engrane de menor diámetro aumentará la velocidad angular, al momento que el torque disminuye.

1.7.3. Motores eléctricos

Casi todos los motores en una fábrica de azúcar moderna son de corriente alterna del tipo jaula de ardilla o de rotor devanado. Los motores de jaula de ardilla son los motores más sencillos y los menos caros. Un motor de jaula de ardilla no tiene conexiones que transporten corriente hacia el rotor. A su vez, contiene barras conductoras incorporadas paralelamente al eje del rotor y conectadas individualmente a través de anillos en corto circuito en cada extremo, o sea que el arreglo es similar a una jaula de ardilla.

Los motores de rotor devanado tienen devanados que concluyen en unos anillos montados en el eje del rotor, a través de los cuales es posible alterar en línea las características del mismo insertando resistencias en el circuito del devanado.

1.7.4. Planta eléctrica

Una planta eléctrica que genera energía en base a vapor, convierte el potencial de la energía química de un combustible en energía eléctrica. En su más simple forma, consiste en una caldera que supe vapor a una turbina, y la turbina hace girar un generador eléctrico.

2. SECADO (FASE DE INVESTIGACIÓN)

2.1. Generalidades

En este apartado se explican los fundamentos generales que se llevan a cabo en la operación de secado, bajo los cuales se debe analizar cada parte de este proceso.

2.1.1. Objetivos del secado

Existen básicamente dos objetivos cruciales en la operación de secado, éstos dependerán de la utilidad que se le quiera dar al producto a secar. Por un lado se tiene que un sólido seco pesa menos que uno húmedo y por lo tanto, el costo por transporte, almacenamiento, entre otros; disminuye.

Por otra parte, en muchas plantas generadoras de energía eléctrica utilizan biomasa como combustible. En el caso de Ingenio Concepción S. A., utiliza la parte fibrosa restante de la extracción de jugo de la caña. Por ser el proceso de extracción un proceso donde se utiliza agua de imbibición para extraer la mayor cantidad de jugo de la parte fibrosa [bagazo], el producto sale de molienda con un alto porcentaje de humedad (regularmente 50 por ciento).

Hay una variable que se ve afectada directamente por la humedad en la utilización del bagazo como combustible, acá se hace referencia al poder calorífico. Por tal razón el objetivo de esta operación es aumentar el poder calorífico para obtener mayor energía en el proceso de combustión, que se da en las calderas generadoras de vapor.

2.1.2. Métodos generales de secado

Los métodos científicos por medio de los cuales se puede analizar el proceso de secado de bagazo, en términos generales son: por conducción, por convección y por radiación.

A continuación se presenta una descripción sintetizada de cada uno.

2.1.2.1. Secado por conducción

Método de secado indirecto. Se calienta una superficie por medio de una fuente de energía calórica y esta provoca un gradiente de temperatura entre la propia superficie y el cuerpo a secar. La humedad en forma de vapor de agua, se extrae por medio de vacío. Regularmente los equipos que funcionan bajo este método son de secado por lotes, es decir, no hay un secado continuo.

2.1.2.2. Secado por convección

Método de secado directo. Este proceso consta básicamente de tres etapas. La primera transferir calor sensible al cuerpo a secar hasta alcanzar la temperatura de vaporización de agua a la presión atmosférica local. La segunda consiste en la evaporación del agua, para lo cual se requiere de calor latente. Finalmente, la tercera etapa consiste en la transferencia de masa. El líquido que se está evaporando es arrastrado por la corriente de gas, más adelante entraremos en detalle.

2.1.2.3. Secado por radiación

Método de secado indirecto. Varias fuentes de radiación electromagnética con ondas aproximadamente entre el espectro solar a microondas (0,2m – 0, 2 micrómetros) efectúan la transferencia de calor. La radiación solar apenas penetra a través del material, el cual absorbe solamente una parte de la radiación emitida, dependiendo del tamaño de onda. Esta energía absorbida sirve para evaporar el líquido presente en el sólido y posteriormente este se retira por medio de vacío.

2.2. Principios fundamentales

Por regla general, todo científico debe conocer lo se denomina como ciencia formal, es decir, toda la teoría correspondiente al tema a tratar.

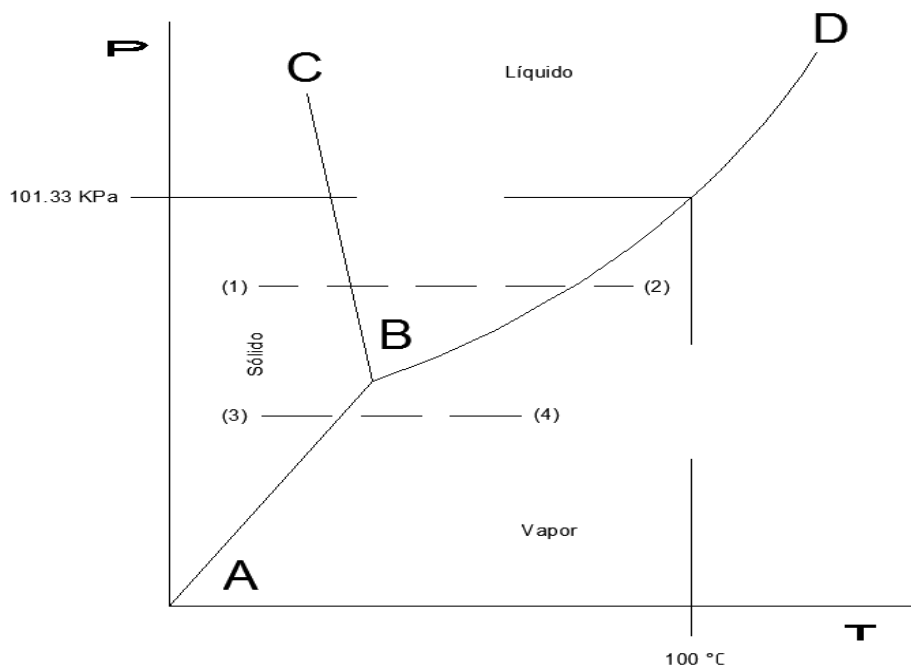
A continuación se desarrolla una explicación básica de los principios fundamentales bajo los cuales se puede analizar el proceso de secado por convección:

2.2.1. Presión de vapor del agua

El agua tiene tres diferentes estados físicos: sólido, líquido y vapor. Su estado físico depende de la presión y de la temperatura. En la figura 22 se puede ver claramente las tres fases. Sobre la curva D coexisten tanto el vapor como el líquido (curva de vapor saturado). En la línea 1 – 2 se puede observar el cambio de fase desde el estado sólido hasta el gaseoso. En la línea 3 – 4 se indica el proceso de sublimación, el hielo se evapora sin pasar por el estado líquido.

Se muestra también un ejemplo con datos reales, a una temperatura de 100 grados Celsius la presión parcial de vapor de agua es de 101.33 kilo pascales. La ebullición se presenta cuando la presión de vapor del agua es igual a la presión total por encima de su superficie. Por lo tanto, a nivel del mar (101.33 kilo pascales), la temperatura de evaporación es de 100 grados centígrados. Éste dato variará dependiendo de la altitud local.

Figura 23. **Gráfica de presión versus temperatura de las fases del agua pura**



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

2.2.2. Humedad relativa

Este valor indica qué tan saturada está una mezcla de gas y vapor. El cálculo se realiza mediante la relación de presión de vapor de agua a una temperatura dada y la presión de saturación.

$$\phi = P_a / P_{as}$$

Donde:

P_v = Presión de vapor [KPa]

P_{vs} = Presión de saturación [KPa]

ϕ = Humedad relativa

2.2.3. Humedad específica

La humedad se define como la cantidad de vapor de una sustancia contenida en un gas. Sus dimensionales pueden ser, kilogramos de vapor por kilogramos del gas seco. Ésta depende de la presión parcial de vapor en el gas y la presión total. Se puede realizar el cálculo mediante la siguiente expresión:

$$W = P_v / (P - P_v) * (PM_v / PM_{gas})$$

Donde:

W = Humedad específica [Kg de vapor de la sustancia/ Kg de gas seco]

P_v = Presión de vapor de la sustancia [KPa]

P = Presión total [KPa]

PM_v = Peso molecular de vapor de la sustancia [g/mol]

PM_{gas} = Peso molecular del gas seco [g/mol]

2.2.4. Temperatura de rocío ácido

Temperatura a la cual el vapor ácido sulfúrico de la sustancia contenido en un gas, se condensa o precipita. Este dato es de suma importancia ya que los gases de combustión contienen dióxido de azufre y, éste, al reaccionar con el agua, forma ácido sulfúrico; que es sumamente peligroso por sus propiedades corrosivas debido al bajo potencial de hidrógeno (PH).

2.2.5. Entalpía de vaporización

La entalpía de vaporización es el calor latente necesario para efectuar el cambio de estado líquido a gaseoso a una determinada presión y temperatura. Por ejemplo: si tenemos un sistema donde existe una presión absoluta de 101,33 kilopascales, la temperatura de ebullición del agua sería de 100 grados Celsius y la energía necesaria para efectuar el cambio de estado de líquido a vapor sería 2 257 kiloJoules por kilogramo (figura 47, anexos).

2.3. Equipo para secado

Existen modelos base que se han establecido y analizado; de los cuales es posible partir, ya sea para evaluar otros o para diseñar. Los equipos básicos utilizados para el secado, se presentan a continuación.

2.3.1. Secado en bandejas

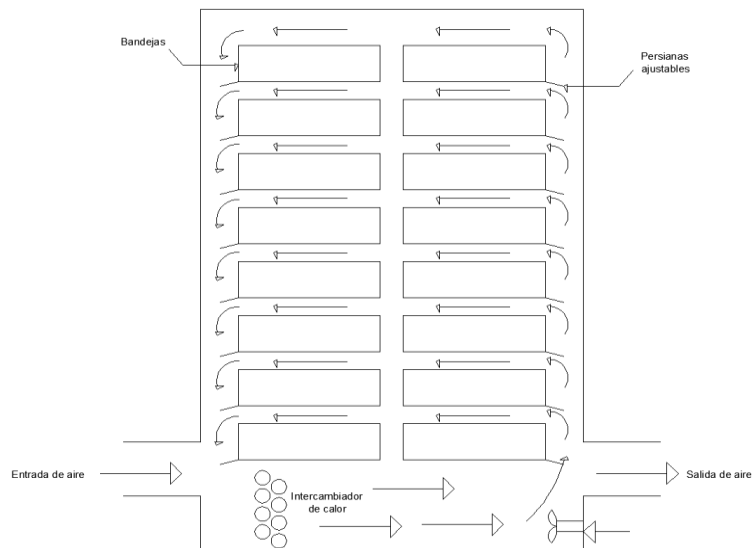
El secador de bandejas o anaqueles tiene bandejas que se cargan y se descargan de un gabinete. Está diseñado especialmente para secar materiales en forma de terrones o pasta. El producto a secar se vierte sobre las bandejas

de metal de 10 a 100 milímetros de profundidad. Este proceso es por lotes, es decir, cada cierto tiempo se carga y se descarga las bandejas.

Un ventilador circula aire calentado por medio de un intercambiador de calor que contiene vapor. También puede utilizarse una fuente de calor eléctrica, cuando el calor necesario para elevar la temperatura del aire es menor. Aproximadamente del 10 al 20 por ciento del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, el resto es recirculado.

En el caso de materiales granulares, el material se podría colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, la circulación del flujo sería cruzada. El gas pasaría a través de un lecho permeable y se obtendrían tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al gas.

Figura 24. **Secador de anaqueles o bandejas**

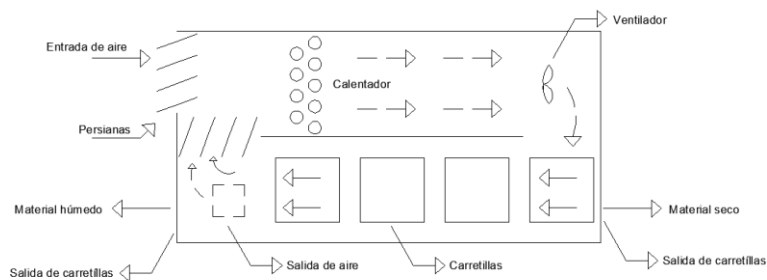


Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

2.3.2. Secadores indirectos al vacío con anaqueles

Los secadores al vacío con anaqueles funcionan bajo el principio de transferencia de calor por conducción y radiación; en donde la fuente de calor es una superficie calentada indirectamente. Esta clase de secador es totalmente hermético, de tal manera que se puede operar al vacío. Las bandejas huecas se colocan en paralelo con la fuente de calor (Intercambiador de calor). El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Éstos se utilizan para secar materiales costosos o sensibles a la temperatura, o bien que se oxiden fácilmente.

Figura 25. Secador de anaqueles al vacío



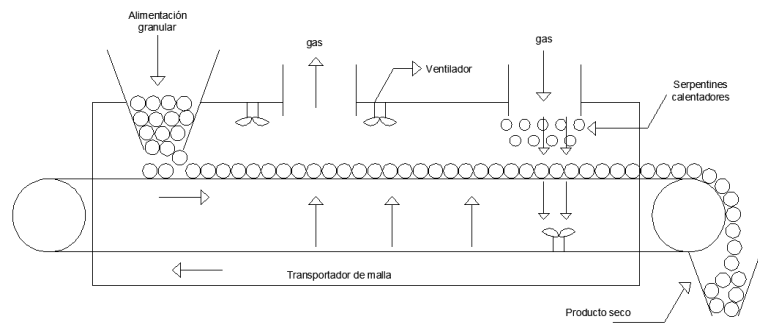
Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

2.3.3. Secadores continuos de túnel

Regularmente son de bandejas o carretillas. Éstos son para producción en serie. Los sólidos se colocan sobre bandejas o carretillas que atraviesan el túnel continuamente en contacto con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire puede ser en párelo, contracorriente o una combinación de ambos. La mayoría de alimentos se seca bajo este procedimiento.

Cuando se desea secar partículas sólidas granulares, pueden utilizarse transportadores perforados, como el de la figura 25. Los sólidos deben tener una capa sobre el conductor entre 25 y 150 milímetros de altura², a través de la cual circula gas en flujo cruzado.

Figura 26. **Secador para sólidos granulares con banda transportadora perforada**



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

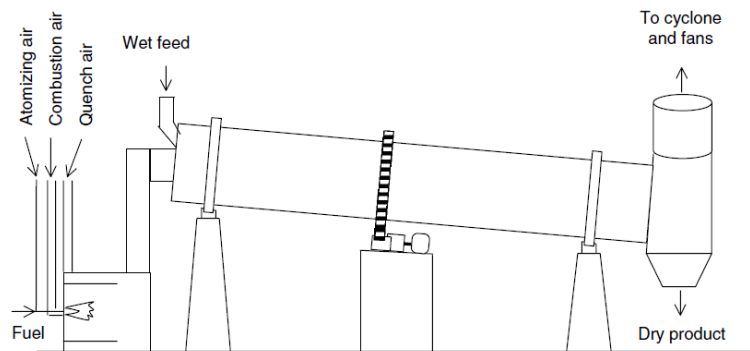
2.3.4. Secadores rotatorios

Consiste de un cilindro que rota sobre cojinetes y usualmente un poco inclinado respecto a la horizontal. La carga húmeda se introduce en la parte superior del secador y la alimentación progresa a través de él por virtud de la rotación. La dirección del flujo de gas a través del cilindro es relativa a las propiedades de los sólidos en el proceso. Se utiliza corriente en paralelo para calentar materiales, debido al rápido enfriamiento del gas durante la evaporación inicial de la superficie húmeda. Para otros materiales se utiliza gas

² Geankoplis Christie J. Transport processes and separation process principles. Editorial: Prentice Hall S. A. 2003. p. 581.

a contracorriente para tomar ventaja de la alta eficiencia térmica que se puede alcanzar en esta dirección. En el primer caso, el flujo de gases incrementa la velocidad de flujo de sólidos. Por el contrario, en el segundo, lo retarda.

Figura 27. **Secador rotatorio**

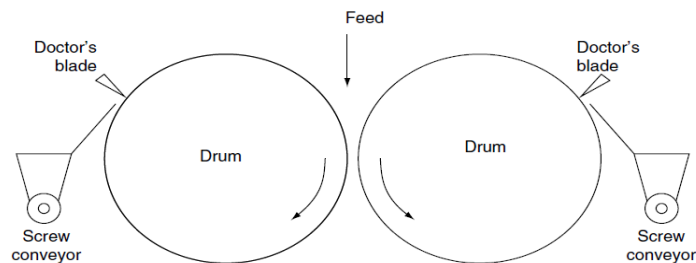


Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

2.3.5. **Secador de tambor**

El secador de tambor es comúnmente utilizado para secar materiales viscosos, soluciones concentradas o pastas. Puede secar materiales que se conviertan en más viscosos o pastosos debido a la evaporación de la humedad o irreversibles formaciones termoquímicas de su contenido, que ocurren en el primer contacto con la superficie caliente de los tambores. La delgada capa adherida de pasta es rápidamente secada conductivamente por el gran flujo de calor que proporciona el vapor condensado dentro de los tambores.

Figura 28. **Secador de doble tambor**



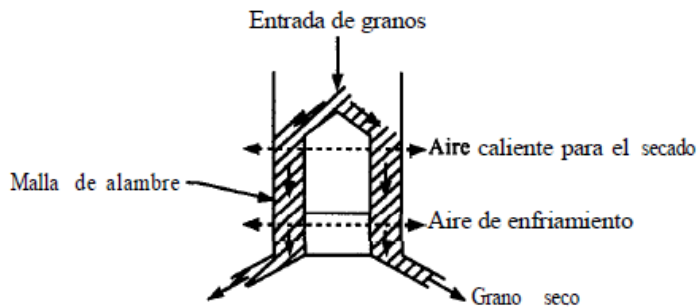
Fuente: Mujumdar Arun S. Handbook of industrial drying. Taylor & Francis Group, LLC, 2006. p. 230.

2.3.6. **Secadores por aspersión**

Un líquido se atomiza o rolea en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez y se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. El flujo de gas y de líquido de la cámara de aspersión, puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos.

Las gotas finas se forman al introducir el líquido en toberas de atomización o discos rotatorios de rociado de alta velocidad en el interior de la cámara cilíndrica (figura 28). Es necesario asegurarse que las gotas o partículas húmedas del sólido, no choquen ni se adhieran a las superficies sólidas antes de que hayan secado. Por lo tanto, se emplean cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo. Los gases de escape fluyen hacia un separador ciclón para filtrar las partículas muy finas. Las partículas que se obtienen son muy ligeras y bastante porosas.

Figura 29. **Secador por aspersión**



Fuente: Geankoplis Christine J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. p.584.

2.4. Contenido de humedad de equilibrio de los materiales

Todos los materiales tienen un distinto valor de humedad de equilibrio manteniendo condiciones constantes. Esto va a depender de la presión que el agua pura ejerce sobre la microestructura del material, ya que el proceso de secado depende tanto de la transferencia de calor que el gas le emite al material y la transferencia de masa que el material le emite al gas. Cuando la presión parcial de vapor de agua contenida en el gas se iguala a la presión de agua pura contenida en el material, el material ya no puede secarse más.

2.4.1. Datos experimentales para el contenido de humedad de equilibrio de materiales inorgánicos y biológicos

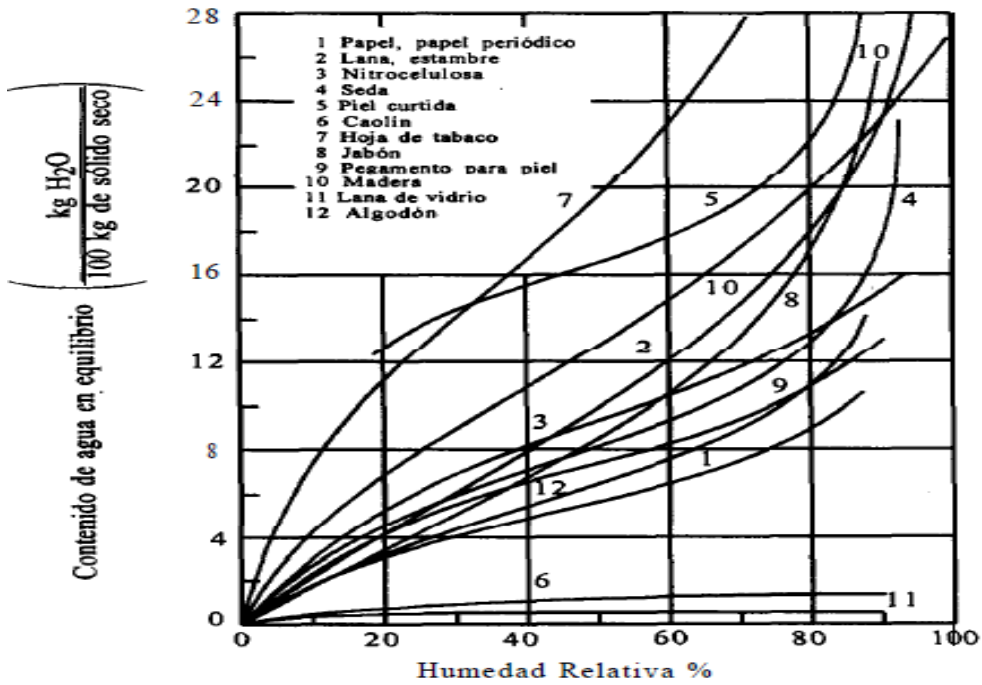
Si la presión que ejerce el agua pura dentro del material es mayor a la presión parcial de vapor de agua contenida en el gas a una determinada

temperatura y humedad, el material se secará hasta el equilibrio de presiones. Por el contrario, si la presión parcial de vapor de agua contenida en los gases es mayor que la presión que ejerce el agua pura sobre la microestructura del material, este absorberá agua hasta alcanzar el equilibrio. Cuando un gas tiene 0 por ciento de humedad, el valor de la humedad de equilibrio de cualquier material es cero.

A temperatura ambiente (constante), el contenido de humedad varia respecto al porcentaje de humedad relativa, debido a que mientras más alejado se esté del punto de saturación, menor será la presión parcial de vapor de agua contenida en un gas. Por tal razón, se puede decir que a valores menores de humedad relativa el gas absorberá vapor de agua en mayores cantidades.

Cada material tiene una distinta humedad de equilibrio debido a la diferencia entre microestructuras. Por esta razón, los sólidos insolubles no porosos tienen contenidos de humedad de equilibrio bastante bajos, tal como se puede observar en la figura 29. Para el caso de la lana de vidrio y el caolín. Por otro lado, los materiales esponjosos de tipo celular, de origen orgánico y biológico, presentan valores altos de contenido de humedad de equilibrio. Se puede comparar este valor para distintos materiales a temperatura ambiente.

Figura 30. **Contenidos de humedad en equilibrio para algunos sólidos a 25 °C**

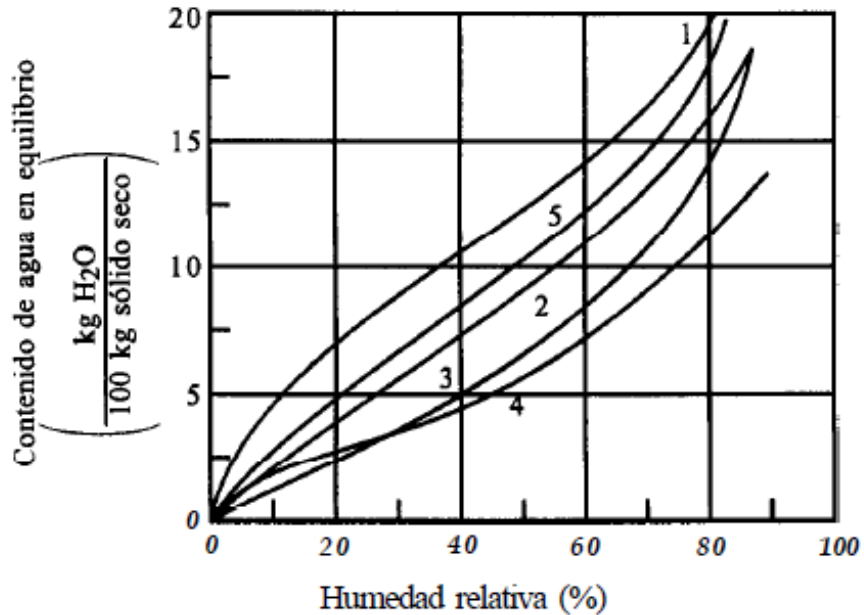


Fuente: Geankoplis Christine J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. p.594.

2.4.1.1. Materiales alimenticios típicos

Estudios de secado específico de algunos materiales alimenticios típicos, se presentan en la siguiente figura. Esta gráfica presenta la cantidad de agua en equilibrio respecto a la humedad relativa del aire en condiciones estándar.

Figura 31. Contenido típicos de humedad de equilibrio para algunos materiales alimenticios a 25 °C. 1) Macarrones, 2) Harina, 3) Pan, 4) Galletas, 5) Albúmina de huevo

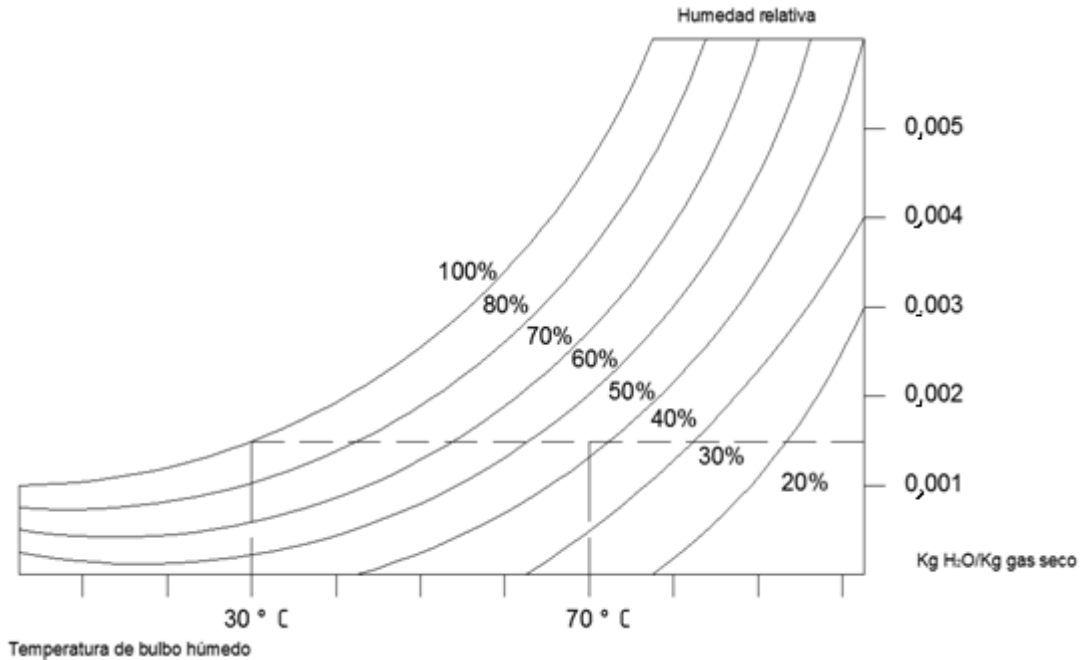


Fuente: Geankoplis Christine J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. p.595.

2.4.1.2. Efecto de la temperatura

La temperatura es una variable muy importante en la operación de secado por convección. En la carta psicrométrica de la figura 31 se puede observar que a medida que la temperatura de bulbo seco aumenta, la humedad relativa disminuye. Esto quiere decir que, mientras mayor sea el valor de la temperatura, más alejado del punto de saturación se estará. Por lo tanto, un gas tiene mayor capacidad de arrastre o absorción de humedad a medida que la temperatura aumenta y simultáneamente la humedad relativa disminuye.

Figura 32. Carta psicrométrica



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

2.4.1.3. Humedad libre y en equilibrio en una sustancia

La humedad libre se refiere a la cantidad de humedad que se le es posible reducir a una sustancia hasta llegar al equilibrio. El equilibrio se obtiene cuando la presión parcial de vapor de agua en la corriente de gases y la presión de agua pura, ejercida por el agua dentro de la microestructura del material, se igualan. Este punto determina hasta qué porcentaje de humedad es posible reducir a una sustancia.

2.5. Curvas de secado

Las variables del gas, empleado para secar, que intervienen en el proceso de secado por convección son: temperatura, caudal y humedad. Por otro lado, la variable en el material a secar es el tipo de microestructura. Por tal razón, debido a la gran cantidad de variables, no hay una expresión matemática para realizar un cálculo de velocidad de secado en general. Debido a esto, es necesario obtener estos datos mediante experimentos en laboratorios para cada condición específica.

2.5.1. Métodos experimentales

Estos métodos básicamente analizan la variación de la humedad a través del tiempo para un gas a determinadas condiciones. Estos experimentos han servido para diseñar secadores a escala real.

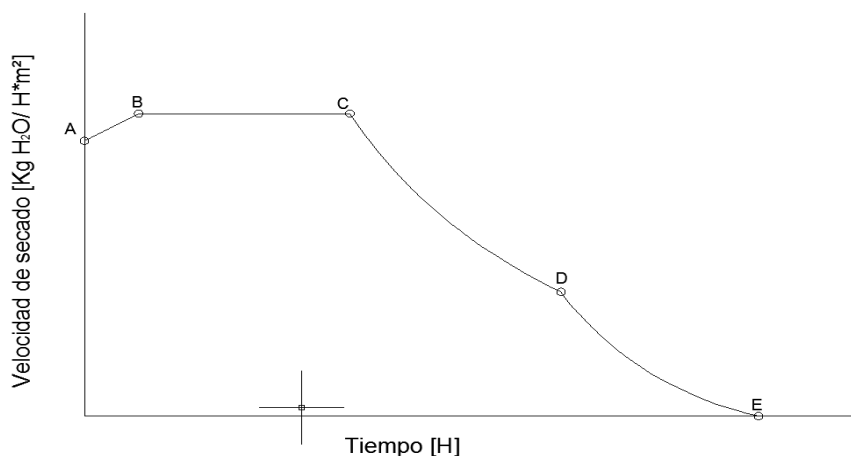
Para esto, primeramente, se define qué tipo de material es el que se va a secar, para seleccionar un secador de acuerdo a estas condiciones. Luego se realiza un modelo a pequeña escala, manteniendo las mismas condiciones que a escala real, para realizar un modelo matemático.

La definición de las constantes que el proceso de secado involucra de un modelo a pequeña escala a uno a real escala, ayudarán a que los datos obtenidos para el diseño sean confiables. Estas constantes son: velocidad de flujo de gas, área de contacto que ocupa el sólido respecto a su peso $[\text{Kg}/\text{m}^2]$, espesor o capa de material sobre recipiente dentro de secador (banda, cazoleta), tipo de secador, dirección del flujo de gas, temperatura y humedad de gas.

Básicamente, el proceso de secado consta de cuatro etapas (figura 32). Durante la primera etapa (A-B), el sólido que entra al secador es calentado hasta alcanzar la temperatura de evaporación del líquido. Luego, empieza la evaporación del agua ubicada en la superficie del sólido, es decir, el agua que está por fuera de la microestructura. Durante esta etapa (B-C), la velocidad de secado permanece constante y es posible analizarla teóricamente mediante transferencia de calor, ya que puede ser tratado como si únicamente se estuviera evaporando agua. En la tercera etapa (C-D), el líquido que se evaporaba en la superficie del sólido ha desaparecido parcialmente.

En este período la velocidad de secado no es constante debido a que, por momentos, la superficie del sólido queda seca, esperando que por difusión o movimiento capilar (dependiendo de la microestructura del sólido) salga agua desde el centro del material hacia su superficie. Y finalmente, en la cuarta etapa (D-E), la velocidad de secado decrece más debido a que es mayor el tiempo que tarda el líquido en salir desde el interior del sólido.

Figura 33. **Velocidad de secado respecto al tiempo**



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

2.5.2. Secado durante el período de velocidad constante

Como previamente fue indicado, el período de secado a velocidad constante puede ser analizado mediante métodos de transferencia de calor debido a que el agua que se está evaporando es la que se encuentra en la superficie del sólido. Esto puede tratarse simplemente como la evaporación de agua.

2.5.3. Secado durante el período de velocidad decreciente

Durante esta etapa, el sólido queda eventualmente seco en su superficie y la velocidad de secado depende tanto de la evaporación del agua en la superficie como de la difusión de agua que se da desde el centro del sólido hacía su parte exterior.

Debido a que no existen coeficientes definidos de transferencia de masa ya que son muchas las variables que se manejan en este tipo de operación, hay que realizar las curvas de secado características para evaluar correctamente tanto la capacidad de un secador como su diseño.

2.5.4. Movimientos de humedad en los sólidos durante el secado en el período de velocidad decreciente

Los movimientos de humedad en los sólidos durante el secado en el período de velocidad decreciente pueden ser: por difusión del líquido, sólidos porosos o por efecto de contracción.

2.5.4.1. Teoría de la difusión del líquido

Esto se da cuando hay una diferencia de concentraciones de humedad entre el interior y exterior del sólido. Esto regularmente se da en materiales no porosos en los que prácticamente cuentan con la mayoría de su humedad en la superficie. Por ejemplo: pasta, jabón, gelatina, harinas, madera, cuero, papel, almidones, textiles y pegamento.

En general, el secado de la mayoría de materiales alimenticios, durante el período de velocidad decreciente se da por difusión.

2.5.4.2. Movimiento capilar en los sólidos porosos

Se da, por lo general, en sólidos granulares y porosos como arena, tierra, pigmentos para pinturas y minerales, la humedad sin combinar (humedad libre) se traslada a través de capilares y espacios vacíos por acción capilar, no por difusión.

2.5.4.3. Efecto de la contracción

Esto sucede cuando la operación de secado se da a altas temperaturas. Las moléculas del sólido se unen (contraen) formando una capa superficial impermeable. Esto afecta directamente a la velocidad de secado. Los materiales que más tienden a contraerse son los materiales coloidales y fibrosos, como vegetales y otros productos alimenticios. Los materiales rígidos, en general, no se contraen de manera apreciable.

Por otro lado, otro efecto que sufre un material por su contracción es la deformación y cambio de su estructura. Esto sucede, regularmente, en el secado de madera.

2.6. Métodos para calcular el período de secado de velocidad constante

Como se ha podido observar, la operación de secado implica muchas variables que impiden del todo, que haya modelos teóricos establecidos para partir de algo genérico a algo específico. Sin embargo, se han podido determinar modelos, bajo condiciones, que ayudan a orientar el diseño y/o evaluación.

A continuación se presentan los métodos para calcular la operación en la etapa de secado a velocidad constante.

2.6.1. Método de curvas experimentales de secado

Los métodos de cálculo de secado para la etapa a velocidad constante y decreciente; a partir de las curvas experimentales y modelos matemáticos, se presentan a continuación.

2.6.1.1. Método de curva de secado

Este es el mejor método para estimar el tiempo de secado de un lote de material determinado y consiste en obtener datos experimentales reales bajo condiciones de alimentación, área superficial relativa expuesta, espesor de cama de material a seca, velocidad del gas, temperatura y humedad. Estas constantes, en efecto, deben ser las mismas que en el modelo a escala real.

2.6.1.2. Método de curva de velocidad de secado para el período de velocidad constante

Para esto, en vez de utilizar un valor directo de la curva de velocidad de secado, se puede realizar el cálculo mediante la siguiente expresión, que depende de las variables a continuación mostradas:

$$T = P_s / (A \cdot R_c) \cdot (X_1 - X_2) \text{ [s]}$$

Donde:

T = tiempo de secado [s]

P_s = peso del sólido seco [kg]

A = área superficial relativa expuesta [m²]

R_c = velocidad de secado durante el período de velocidad constante
[kg/(m²*s)]

X₁ = humedad en base seca a la entrada del secador [kg de agua/ kg sólido seco]

X₂ = humedad en base seca a la salida del secador [kg de agua/ kg sólido seco]

2.6.2. Método que emplea predicciones de coeficientes de transferencia para el período de velocidad constante

Durante este período, como ya se ha dicho con anterioridad, se puede analizar bajo los principios de transferencia de calor. Básicamente, la energía que necesita en esta etapa es el calor latente de vaporización del agua a evaporar. Este cálculo se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$Q = (X_1 - X_2) * P_s * \lambda \text{ [kJ]}$$

Donde:

Q = calor necesario para realizar la evaporación del agua en la parte superficial del sólido [kJ]

X₁ = humedad en base seca a la entrada del secador [kg agua/ kg sólido]

X₂ = humedad en base seca a la salida del secador [kg agua/ kg sólido]

P_s = peso del sólido seco [kg]

λ = calor latente de vaporización [kJ/kg] (figura 47, anexos)

Y el calor que produce el gas con el que se está secando se calcula mediante:

$$q = \dot{m} * C_p * \Delta t \text{ [kJ/s]}$$

Donde:

q = transferencia de calor producida por el gas [kJ/s]

ṁ = flujo másico de gas [kg/s]

C_p = calor específico del gas [kJ/ (Kg*°C)]

Δt = gradiente de temperatura [°C]

Por lo tanto, el tiempo de retención se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$T = \frac{(X_1 - X_2) * P_s * \lambda}{\dot{m} * C_p * \Delta t} = \frac{q}{Q} \text{ [s]}$$

2.6.3. Efecto de las variables del proceso sobre el período de velocidad constante

Al referirse al período de velocidad constante, en la operación de secado, se refiere a que únicamente se está extrayendo la humedad sobre la superficie del sólido.

El efecto de las variables del proceso de secado sobre el período de velocidad constante se describe a continuación:

2.6.3.1. Efecto de la velocidad del aire

Como se sabe que el caudal de aire es proporcional a la velocidad y el caudal, a su vez, es directamente proporcional a la transferencia de calor, los tiempos de retención o de secado serán menores a medida que estos valores aumenten.

Por otra parte, no es recomendable que el valor de velocidad esté por encima de los 2 metros por segundo debido a que esto provocaría un arrastre de material. Esto se da, mayormente, cuando el flujo es a contracorriente o en paralelo.

2.6.3.2. Efecto de la humedad del gas

Si se reduce la humedad del gas a temperatura constante, el gas tendrá un valor menor de temperatura de bulbo húmedo. Entonces, la transferencia de calor se aprovechará más debido a la tendencia al valor de temperatura de bulbo seco. De igual forma, la capacidad de arrastre de humedad aumentará,

esto quiere decir que, la humedad de equilibrio tendrá un valor más bajo a medida que esto suceda.

2.6.3.3. Efecto de la temperatura del gas

Al aumentar la temperatura del gas, la humedad relativa disminuye o, dicho de otra forma, el valor de humedad específica estará más alejado del punto de saturación. Esto influye directamente a la humedad de equilibrio, el gas posee mejor capacidad de arrastre de humedad a medida que la temperatura aumenta.

2.6.3.4. Efecto del espesor del lecho sólido que se está secando

A medida que el espesor de lecho sólido aumente, también lo hará el tiempo de secado de dicho material. Ya que para un valor de área superficial relativa constante el peso aumentará. Es recomendable que este espesor se encuentre dentro este rango de valores: 25 – 150 milímetros, para realizar un secado uniforme.

2.6.4. Métodos para calcular el período de velocidad decreciente

Durante este período, ya se ha removido la humedad que yace en la superficie del sólido. La humedad existente en esta fase se encuentra en el interior del sólido.

Los métodos para calcular el período de velocidad decreciente se describen a continuación.

2.6.4.1. Método de integración gráfica

Durante el período de velocidad decreciente, la velocidad de secado no es constante. Por lo tanto mediante la curva de secado característica se puede analizar el tiempo necesario para dicha operación. Se puede emplear la siguiente expresión:

$$T = \frac{P_s}{A} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{R}$$

2.7. Ahorro energético

El poder calorífico de cualquier combustible está directamente afectado por su contenido de humedad. A medida que este valor aumente, su eficiencia energética también lo hará.

Específicamente el cálculo del poder calorífico inferior para el bagazo se puede obtener bajo la siguiente expresión:

$$PCI = [18\,309 - 207,6 (\%W) - 196,05 (\%Z) - 31,14 (\%Brix)] \text{ kJ/kg (ec.8)}$$

Donde:

PCI = poder calorífico inferior [kJ/kg]

W = humedad en base húmeda [kg de bagazo seco/ kg de bagazo húmedo]

%Z = Valor porcentual de cantidad de cenizas presentes en una muestra de bagazo

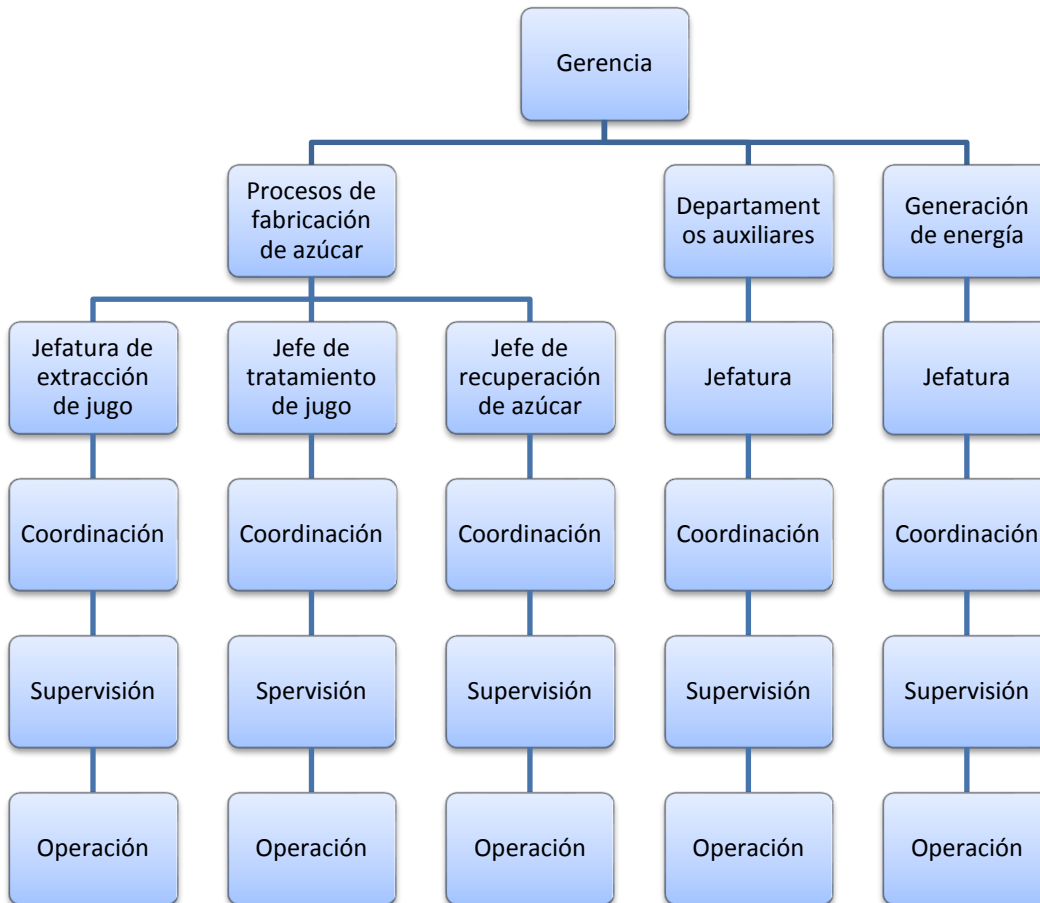
3. SECADO DE BAGAZO (FASE TÉCNICO-PROFESIONAL)

3.1. Situación actual

El conocimiento de las condiciones en las cuales se encontraba la empresa concedió la objetividad con la que se debía enfrentar el proyecto asignado.

A continuación se describe la situación actual del Departamento de Energía del Ingenio Concepción S. A.

Figura 34. Organigrama de la fábrica del Ingenio Concepción S. A.



Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Descripción del Departamento de Energía

El Departamento de Energía se encarga de la generación de energía eléctrica. Este proceso empieza desde el bagazo que entrega el Departamento de extracción hasta la red de tendido eléctrico.

Actualmente, se cuenta con cinco calderas diseñadas para quemar bagazo, chip y palma africana. Solamente una de las cinco está diseñada para quemar bunker. Cada una consume un promedio de 20 toneladas por hora de biomasa, exceptuando a una (30 toneladas por hora). Éstas producen un promedio de 120 000 libras por hora de vapor sobrecalentado a 400, 600 y 800 PSI.

Por otra parte, el vapor generado se entrega a turbinas de reacción, acción y *condensing*. Actualmente se cuenta con 5 turbo-generadores que generan un total de 24 megavatios por hora de venta de energía eléctrica.

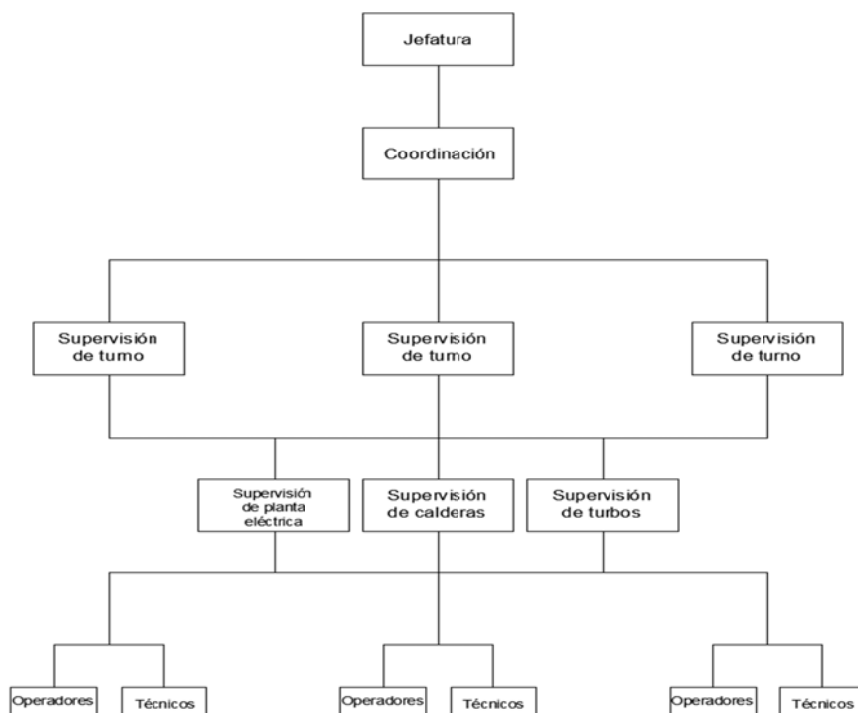
Específicamente, la caldera que genera vapor a 800 PSI se encuentra dentro de un ciclo de Rankine junto a un turbo-generador de 25 megavatios por hora de diseño. En este ciclo se tiene proyectado analizar la eficiencia antes y después de la instalación del secador de bagazo.

3.1.1.1. Organigrama del Departamento de Energía

El departamento de energía se compone, desde su nivel jerárquico más alto hasta el más bajo, de: jefatura, coordinación, supervisión, operadores y técnicos.

A continuación se presenta el organigrama del Departamento de Energía.

Figura 35. **Organigrama del Departamento de Energía**



Fuente: elaboración propia.

3.1.2. **Determinación de la capacidad de secado del secadero existente**

La cantidad de bagazo, que era posible alimentar al secador era imprescindible saberla para obtener los resultados esperados. De este dato partía todo el desarrollo para encontrar las variables que debían ser asignadas a cada equipo.

A continuación se presenta el desarrollo para determinar la capacidad de secado del secadero existente.

3.1.2.1. Determinación de la concentración de gases en base húmeda

La base para poder determinar el calor generado por los gases de combustión, era obtener la fracción molar porcentual de cada sustancia que conformaba a dicha mezcla.

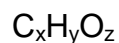
La concentración molar porcentual de gases de combustión se presenta a continuación.

- Ecuación de combustión de bagazo del bagazo balanceada

Dado que la composición química del bagazo, según Hugot³, es la siguiente:

Carbono =	45,43%
Oxígeno =	6,228%
Hidrógeno =	42,53%

Entonces, se realiza el siguiente redondeo de datos para estimar la fórmula del bagazo:



³ Hugot, E. handbook of cane sugar engineering, 3a ed. New York: Elsevier. 1986. p. 875.

$$X = 45,43/12,011$$

$$X = 3,782$$

$$Y = 6,228/1,0079$$

$$Y = 6,233$$

$$Z = 42,53/16,0000$$

$$Z = 2,658$$

Dividiendo el cada resultado dentro del menor para redondear la ecuación.

$$X = 3,782/2,658$$

$$X = 1,4229$$

$$Y = 6,233/2,658$$

$$Y = 2,3449$$

$$Z = 2,658/2,658$$

$$Z = 1$$

Multiplicando por un número de tal forma que el resultado de cada valor se aproxime a un entero.

$$X = 1,4229 * 12 = 17,07$$

$$X = 17$$

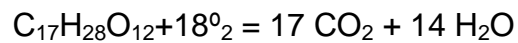
$$Y = 2,3449 * 12 = 28,14$$

$$Y = 28$$

$$Z = 1 \quad * \quad 12 = 12$$

$$Z = 12$$

Entonces, la fórmula química promedio del bagazo es:



- Condiciones del aire estequiométrico de entrada a caldera (según dato promedio anual del 2011 de INSIVUMEH).
 - Humedad relativa $\emptyset = 75\%$ (figura 51, anexos)
 - Temperatura mínima promedio = 20 °C (figura 52, anexos)
 - Altitud = 347 metros sobre el nivel del mar
 - Presión atmosférica = 97,2301 KPA (figura 50, anexos)
 - Presión de saturación de vapor a 20 °C = 2,339 KPA (figura 47, anexos)
- Presión parcial de vapor

Dado que, de acuerdo a la ley de Dalton:

$$P_i = \emptyset P_v^4$$

Donde:

P_i = presión parcial de vapor

\emptyset = humedad relativa

P_v = presión de vapor de saturación (figura 47, anexos)

⁴ Sienko Michael J. Problemas de química. Barcelona: Reverté. 1972. p. 9

Entonces:

$$P_i = 0,75 (2,339) = 1,75425 \text{ KPA}$$

- Humedad de saturación

$$W_s = 0,621945 * (P_v / (P_a - P_v))$$

Donde:

W_s = humedad de saturación

P_v = presión de vapor de saturación

P_a = Presión de aire (97,2301 KPa)

Entonces:

$$W_s = ((0,621945(2,339))/(97,2301-2,339)) = 1,5331 \times 10^{-2} \text{ g agua/ g aire seco}$$

- Humedad específica

Dado que:

$$W = W_s * \phi$$

Entonces:

$$W = (1,5331 \times 10^{-2}) * 0,75 = 1,1498 \times 10^{-2} \text{ g agua/ g aire seco}$$

- Aire teórico necesario

Dado que:

Porcentaje de oxígeno en aire = 21%

Entonces:

$$100 \text{ l Aire} / 21 \text{ mol oxígeno} = 4,76 \text{ mol Aire/mol O}_2$$

$$4,76 \text{ mol Aire/mol O}_2 * 18 \text{ mol O}_2 = 85,68 \text{ mol Aire}$$

- Aire alimentado (según exceso de aire promedio con analizador de gases de combustión)

Dado que:

$$\% \text{Exceso de aire} = ((AA-AT) / (AT))^5$$

Donde:

AA = Aire alimentado

AT = Aire teórico

Entonces:

$$65\% = ((A.A - 85,68) / 85,68) * 100\%$$

⁵ Rousseau Felder, Principios elementales de los procesos químicos, editorial Limusa S.A, 2003.

Resolviendo para A.A:

$$A.A = 141,372 \text{ mol Aire}$$

Oxígeno alimentado:

$$141,372 \text{ mol Aire} / (4,76 \text{ mol Aire/mol Oxígeno}) = 29,7 \text{ mol de Oxígeno}$$

Dado que:

$$\text{Oxígeno teórico} = 18 \text{ mol}$$

Entonces,

$$\text{Oxígeno sin reaccionar} = \text{Oxígeno alimentado} - \text{Oxígeno teórico}$$

$$\text{Oxígeno sin reaccionar} = 29,7 - 18$$

$$\text{Oxígeno sin reaccionar} = 11,7$$

- Moles de agua en el aire

Dado que:

$$W = 0,1150 \text{ g agua/ g aire seco, entonces:}$$

Convirtiendo g a moles:

$$W = 0,01150 \text{ g agua/ g aire seco} * 28,97 \text{ g aire/mol de aire} * 1 \text{ mol agua/18 g agua.}$$

$$W = 0,018509 \text{ mol H}_2\text{O} / \text{mol Aire}$$

Entonces:

$$0,018509 \text{ mol H}_2\text{O} / \text{mol Aire} * 141,372 \text{ mol Aire} = 2,62 \text{ mol H}_2\text{O}$$

- Humedad en bagazo

Dado que:

Humedad en base húmeda = 50%

Entonces:

50% H₂O y 50% C₁₇H₂₈O₁₂

$$50 \text{ g H}_2\text{O} * 1 \text{ mol H}_2\text{O} / 18 \text{ g H}_2\text{O} = 2,777 \text{ mol H}_2\text{O}$$

$$50 \text{ g C}_{17}\text{H}_{28}\text{O}_{12} * 1 \text{ mol C}_{17}\text{H}_{28}\text{O}_{12} / 424,224 \text{ g C}_{17}\text{H}_{28}\text{O}_{12} = 0,118 \text{ mol C}_{17}\text{H}_{28}\text{O}_{12}$$

$$2,777 \text{ mol H}_2\text{O} / 0,118 \text{ mol C}_{17}\text{H}_{28}\text{O}_{12} * 1 \text{ mol C}_{17}\text{H}_{28}\text{O}_{12} = 23,56 \text{ mol H}_2\text{O}$$

- Nitrógeno en aire alimentado

Dado que:

Porcentaje de nitrógeno en aire = 79%

Entonces:

$$79 \text{ mol N}_2/21 \text{ mol O}_2 = 3,7619 \text{ mol de N}_2/ \text{mol O}_2$$

$$3,7619 \text{ N}_2/ \text{mol O}_2 * 29,7 \text{ mol O}_2 = 111,729 \text{ mol N}_2$$

- Resumen de concentración de gases en base húmeda

Tabla II. **Fracción porcentual molar de gases de combustión del bagazo al 50 % de humedad**

Combustión (asumiendo que el 100% del bagazo combustiona para formar CO₂ y H₂O)						
Compuesto	Entran (mol)	Reaccionan (mol)	Se forman (mol)	Salen (mol)	Total (mol)	Porcentaje (%)
C₁₇H₂₈O₁₂	1	1	--	--	--	--
O₂	29.7	18	--	11.7	11.7	6.48
CO₂	--	--	17	17	17	9.41
H₂O	23.56+2.62	--	14	40.17	40.17	22.24
N₂	111.73	--	--	111.73	111.73	61.87
Suma					180.60	100

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2. Determinación del calor generado por los gases

Para definir directamente el tiempo de retención del bagazo dentro del secadero, se necesitó determinar la energía calórica generada por los gases de combustión. Ésta, se presenta a continuación:

- Relación de aire combustible para un 65 % de exceso de aire (según dato promedio de zafra 2012/2013)

Dado que:

$$\text{Relación} = \text{Mol}_{AA} * M_{AA} / (M_{C_{17}H_{28}O_{12}} * \text{Mol}_{C_{17}H_{28}O_{12}})$$

Donde:

Mol_{AA} = moles de aire alimentado

M_{AA} = peso molecular de aire

$M_{C_{17}H_{28}O_{12}}$ = peso molecular del bagazo

$\text{Mol}_{C_{17}H_{28}O_{12}}$ = moles de bagazo

Entonces:

$$\text{Relación aire/combustible} = (141,372 * 28,97) / (17 * 12 + 28 * 1,008 + 12 * 16)$$

$$\text{Relación aire/combustible} = 9,65 \text{ Ton Aire/ Ton combustible}$$

- Caudal de gases de combustión

Dado que:

1,9 Toneladas de vapor producido / Toneladas de bagazo (según eficiencia, caldera 4) y vapor promedio producido (según archivo zafra 2012/2013) = 44 022,18 kg/H

Entonces:

$$\begin{aligned}\text{Consumo} &= (44,02218 \text{ Ton vapor/Hrs}) / (1,9 \text{ Ton vapor producido / Ton bagazo}) \\ &= 23,1696 \text{ Toneladas de bagazo por hora.}\end{aligned}$$

Dado que:

$$\begin{aligned}\text{Relación aire combustible} &= 9,65 \text{ Ton Aire/ Ton combustible y humedad en} \\ &\text{bagazo} = 50 \%\end{aligned}$$

Entonces:

Debido a que el analizador de gases de combustión (Bacharach) mide la concentración de gases en base seca, se toma como referencia el combustible en base seca.

$$\begin{aligned}\text{Consumo} &= (0,50 \text{ Ton bagazo seco/Ton bagazo húmedo}) * (23,1696 \text{ Ton bagazo} \\ &\text{húmedo/ hora}) * 9,65 \text{ Ton aire/ Ton combustible.}\end{aligned}$$

$$\text{Consumo} = 111,793 \text{ Ton Aire / h}$$

- Balance de masa

Dado que:

$$\dot{m}_{\text{aire}} + \dot{m}_{\text{bagazo}} + \dot{m}_{\text{humedad en bagazo}} = \dot{m}_{\text{gases}}$$

Donde:

$$\dot{m}_{\text{aire}} = \text{caudal másico de aire}$$

$\dot{m}_{\text{bagazo}} = \text{caudal másico de bagazo}$

$\dot{m}_{\text{humedad en bagazo}} = \text{caudal másico de vapor de agua por humedad}$

$\dot{m}_{\text{gases}} = \text{caudal de gases de combustión}$

Entonces :

$$\dot{m}_{\text{gases}} = 1\,117,793 \text{ Ton/h} + 23,1696 \text{ Ton/h} * 0,5 + 23,1696 \text{ Ton/h} * 0,5 \quad \dot{m}_{\text{gases}} = 134,963 \text{ Ton gases/h}$$

- Metodología para el cálculo del calor generado

A continuación se presenta una metodología empleada para calcular la cantidad de calor que los gases de combustión generan.

- Velocidad de gases derivados

Debido a que el caudal que entra al secador de bagazo es derivado, es decir, no es la totalidad, es una parte; se calcula a través de un instrumento que mide el diferencial de presión generado por un tubo Pitot. Con este dato, mediante el principio de la conservación de la energía de Bernoulli⁶, se calcula la velocidad como se presenta a continuación:

$$V = \frac{\sqrt{2g\Delta P}}{\rho} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

⁶ McCabe Warren L. Operaciones básicas de ingeniería química. Barcelona: Reverté. 1980. p. 240.

ρ = densidad [kg/m^3]

g = gravedad [m/s^2]

ΔP = diferencial de presión [kg/m^2]

V = velocidad [m/s]

- Caudal másico de gases derivados

Dado que se conoce el diámetro (38 pulgadas) de la tubería por donde pasan los gases, solamente queda calcular la densidad para obtener el caudal másico.

Entonces, para calcular la densidad se requiere de la temperatura de gases que ingresan al secador. De la medición de este termómetro (figura 44, apéndices) se obtiene la temperatura de entrada.

A partir de la ecuación de gases ideales⁷ se obtiene la densidad del gas. Para realizar este cálculo se debe multiplicar la constante (figura 46, anexos) de cada compuesto-elemento que constituye al gas por su respectiva fracción molar. La suma de estos resultados parciales representa la constante del gas.

R Dióxido de carbono = 0,1889 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

R Nitrógeno = 0,2968 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

R Oxígeno = 0,2598 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

R Vapor de agua = 0,4215 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

Multiplicando cada constante por su respectiva fracción molar, obtenemos:

⁷ Moran Michael J. Fundamentos de termodinámica técnica, 2ª ed. Barcelona: Reverté. 2004 p. 122.

$$0,1889 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}\cdot 0,0941 = 0,01777549 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}$$

$$0,2968 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}\cdot 0,6187 = 0,183630 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}$$

$$0,2598 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}\cdot 0,0648 = 0,016835 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}$$

$$0,4215 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}\cdot 0,2224 = 0,1026376 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}$$

$$\text{Constante del gas} \quad \underline{\quad 0,32087809 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]} \quad}$$

+

Ecuación para gases ideales:

$$PV = mRT$$

Donde:

P = presión [kPA]

V = volumen [m³]

R = constante de gases ideales [kJ/(kg·K)]

T = temperatura [K]

Debido a que la densidad está relacionada con el peso y volumen, se puede escribir la ecuación de la siguiente manera:

$$P = \rho RT$$

Donde:

ρ = Densidad [m³/kg]

Entonces, conociendo la presión atmosférica local (97,2301KPA) y la constante del gas; se define la siguiente expresión:

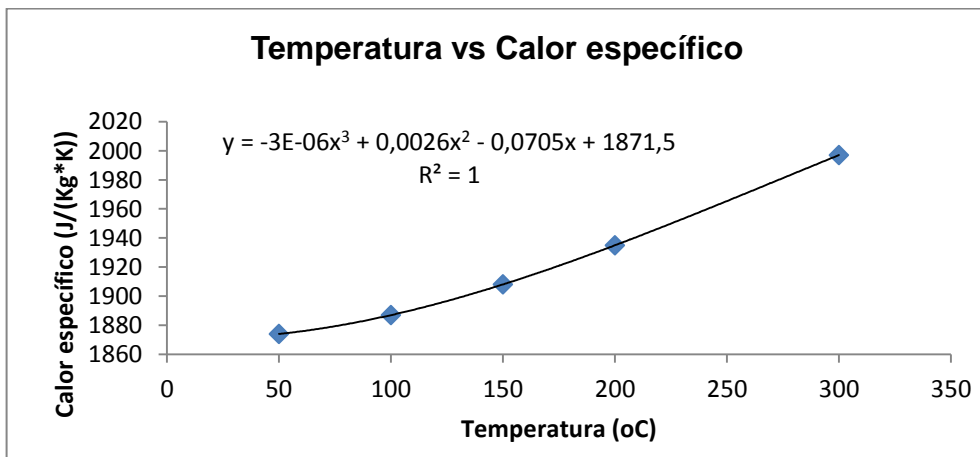
$$\rho = 97,2301/(0,328709\cdot T)$$

$$\rho = 303,0125/T \quad (\text{Ec.2})$$

- Calor específico de los gases de combustión

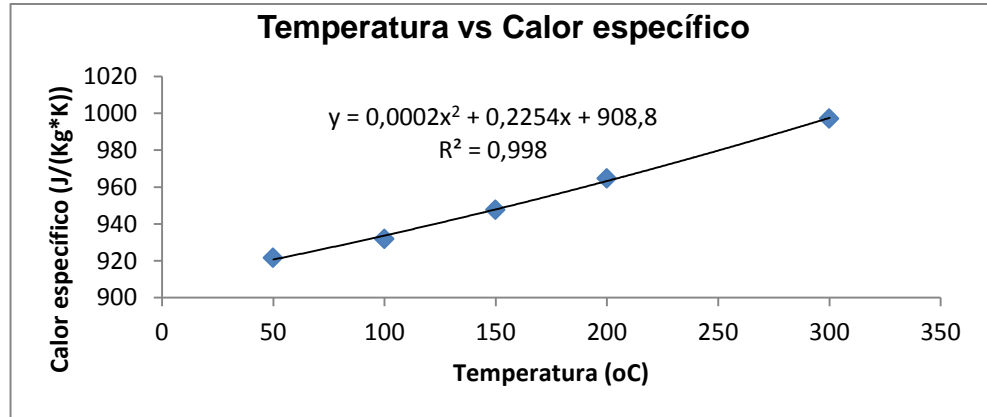
De las tablas de anexos (figuras 48 y 49) se saca una correlación entre la temperatura y el calor específico de cada compuesto-elemento que constituyen a los gases de combustión; para obtener un modelo matemático.

Figura 36. **Correlación entre la temperatura y el calor específico para el vapor de agua**



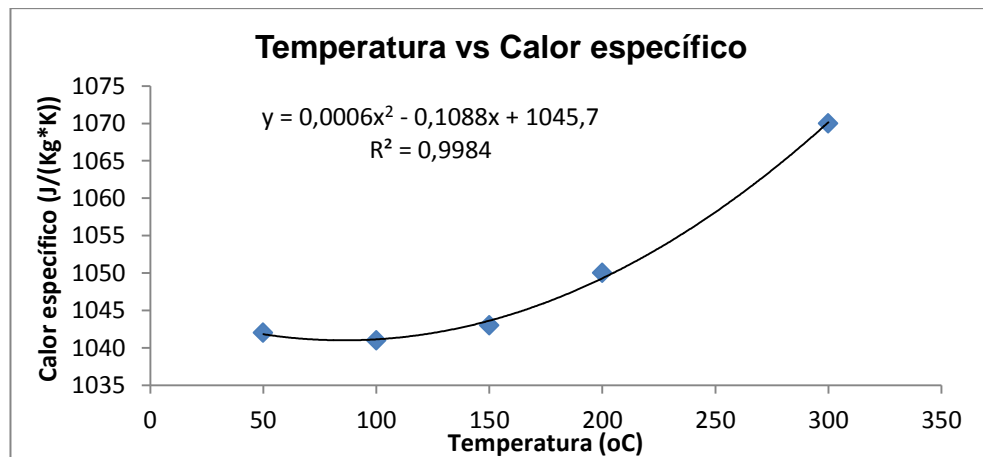
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Correlación entre la temperatura y el calor específico para el Oxígeno**



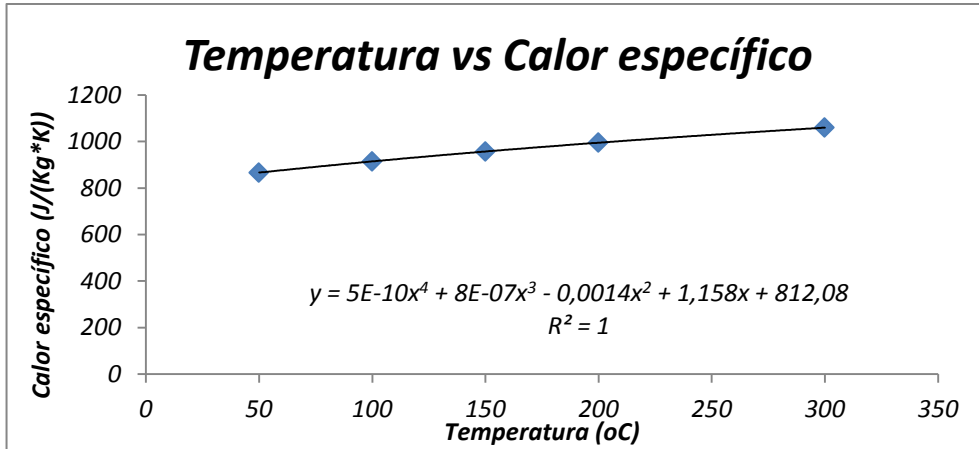
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Correlación entre la temperatura y el calor específico para el nitrógeno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Correlación entre la temperatura y el calor específico para el dióxido de carbono**



Fuente: elaboración propia.

Se multiplica cada expresión por su respectiva fracción molar y luego, se suma para obtener una expresión simplificada.

- Vapor de agua

$$C_p = 0,2224 * (-3E-06t^3 + 0,0026t^2 - 0,0705t + 1871,5) / 1000$$

$$C_p = -6,672 \times 10^{-10} t^3 + 5,7824 \times 10^{-7} t^2 - 1,5679 \times 10^{-5} t + 0,41622$$

- Oxígeno

$$C_p = 0,0648 * (0,0002t^2 + 0,2254t + 908,8) / 1000$$

$$C_p = 1,296 \times 10^{-8} t^2 + 1,4606 \times 10^{-5} t + 0,05889$$

- Nitrógeno

$$C_p = 0,6187 \cdot (0,0006t^2 - 0,1088t + 1045,7) / 1000$$

$$C_p = 3,7122 \times 10^{-7} t^2 - 6,7315 \times 10^{-5} t + 0,64697$$

- Dióxido de carbono

$$C_p = 0,0941 \cdot (5^E - 10t^4 + 8^E - 07t^3 - 0,0014t^2 + 1,158t + 812,08) / 1000$$

$$C_p = 4,705 \times 10^{-14} t^4 + 7,528 \times 10^{-11} t^3 - 1,3174 \times 10^{-7} t^2 + 1,0897 \times 10^{-4} t + 7,6417 \times 10^{-2}$$

Sumando términos semejantes para obtener una expresión simplificada, se obtiene:

$$C_p = 4,705 \times 10^{-14} t^4 - 5,9192 \times 10^{-10} t^3 + 8,3068 \times 10^{-7} t^2 + 4,0582 \times 10^{-5} t + 1,1985$$

(Ec.3)

Donde:

C_p = Calor específico de los gases de combustión [kJ/(kg*°C)]

t = Temperatura de gases de combustión [°C]

- Calor generado

Dado que:

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (\text{Ec.4})^8$$

Donde:

q = Transferencia de calor [kJ/s]

⁸ Cengel Yunus A., Introduction to thermodynamics and heat transfer, McGRAW-HILL, 1997.

C_p = Calor específico de gases de combustión [kJ/(kg*°C)]

Δt = Gradiente de temperatura [°C]

\dot{m} = Caudal másico de gases de combustión [kg/s]

Como se sabe que:

$$H = C_p * t$$

Donde H es la entalpía. Entonces, se puede escribir la ecuación de transferencia de calor de la siguiente manera:

$$q = \dot{m} * (H_2 - H_1)$$

3.1.2.3. Determinación del calor necesario para el proceso de secado

El proceso de secado por convección, necesita de una fuente de energía (y de un fluido que transporte la humedad extraída), que sea el medio para poder elevar la temperatura del agua contenida en el sólido para llevarla a su punto de ebullición.

La determinación del calor necesario para el proceso de secado se presenta a continuación.

- Presión atmosférica local

Dado que:

Altitud de Escuintla = 347 msn

Entonces, de la figura 50 de la sección de anexos se interpolan para obtener la presión atmosférica a dicha altitud.

Presión atmosférica en Escuintla = 97,2301 KPA

- Calor latente de vaporización

Dado que el calor latente de vaporización está en función de la presión, con la presión atmosférica obtenida en el inciso anterior se interpola en la tabla de la figura 47 del apartado de anexos, para obtener dicho valor.

$$\Lambda = 2260,18 \text{ kJ/kg}$$

- Ecuación para determinar el calor necesario para el cambio de estado

La siguiente ecuación sirve para determinar el calor necesario para efectuar el cambio de estado, es decir, de líquido a vapor.

$$Q = (X_2 - X_1) \cdot P_s \cdot \lambda$$

Donde:

Q = calor necesario para efectuar el cambio de estado [kJ]

X_1 = humedad de entrada al secador en base seca [kg de agua/ kg de bagazo seco]

X_2 = humedad de salida del secador en base seca [kg de agua/ kg de bagazo seco]

P_s = peso del bagazo a secar en seco [kg]

λ = calor latente de vaporización [kJ/ kg]

- Calor sensible necesario para efectuar el proceso de secado

La energía calórica necesaria para elevar la temperatura de la humedad contenida en el bagazo a la saturación se determina a continuación.

- Determinación de la temperatura de vaporización

Como se sabe que la temperatura de vaporización depende de la presión que se ejerce sobre el líquido, utilizando la tabla de la figura 47 del apartado de anexos, se interpolan para encontrar dicho valor.

$$T = 98,78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Determinación del calor sensible necesario para efectuar el proceso de secado

Temperatura del bagazo a la entrada del secador = 46,67 °C

Temperatura de vaporización = 98,78 °C

La expresión para determinar el calor sensible es,

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

Q = calor sensible necesario para efectuar el proceso de secado [kJ]

m = masa de agua a evaporar [kg]

Cp = calor específico del agua [kJ/(kg*°C)]

Δt = gradiente de temperatura [°C]

3.1.2.4. Determinación de la capacidad del secador

Ya que se conoce el calor sensible y latente para realizar la operación de secado; se prosigue a realizar el siguiente cálculo:

$$\dot{m}_{\text{agua}} = q_{\text{gases}} / (\lambda + \Delta H_{\text{agua}})$$

Donde:

\dot{m}_{agua} = caudal másico de agua evaporada [kg/h]

q_{gases} = transferencia de calor de los gases de combustión [kJ/h]

λ = calor latente de vaporización [kJ/kg]

ΔH_{agua} = calor sensible para alcanzar la temperatura de vaporización [kJ/kg]

3.1.2.5. Determinación de los parámetros de operación del secador

A continuación se presenta la determinación de los parámetros de operación del secador para cada equipo (velocidad de alimentadores y velocidad de conductor).

- Determinación de la capacidad del alimentador de acuerdo a la velocidad de rotación del motor eléctrico

De la figura 45 en el apartado de apéndices, a continuación, se realiza un análisis geométrico para determinar el caudal másico de bagazo que permite ingresar los alimentadores de acuerdo a su velocidad de rotación.

- Área figura 1 (triángulo)

Como se sabe que,

$$\text{Área triángulo} = \text{base} * \text{altura} / 2$$

Entonces:

$$A = 4,06 * 1,91 / 2 = 4,39 \text{ pulg}^2$$

- Área figura 2 (sección circular)

Como se sabe que,

$$\text{Área sección circular} = \text{ángulo} * \text{radio}^2$$

Entonces:

$$A = \pi/16 * (2,51)^2 = 1,24 \text{ pulg}^2$$

- Área figura 3 (triángulo)

$$A = 0,84 * 0,35 / 2 = 0,14 \text{ pulg}^2$$

- Área figura 4 (triángulo)

$$A = 0,14 * 0,35 / 2 = 2,49 * 10^{-2} \text{ pulg}^2$$

- Área figura 5 (sección circular)

$$A = \pi/16 * (1,53)^2 = 0,46 \text{ pulg}^2$$

- Área figura 6

Dado que:

$$A \text{ figura 6} = A \text{ figura 2} - A \text{ figura 5} - A \text{ figura 4} - A \text{ figura 3}$$

Entonces:

$$A = 1,24 - 0,46 - 2,49 * 10^{-2} - 0,14 = 0,61 \text{ plg}^2$$

- Área figura 7 (rectángulo)

Dado que:

$$\text{Área rectángulo} = \text{base} * \text{altura}$$

Entonces:

$$A_1 = 0,38 * 3,33 = 1,25 \text{ pulg}^2$$

$$\text{Área figura 7} = A_1 - \text{Área figura.6}$$

$$\text{Área figura 7} = 1,25 - 0,61 = 0,64 \text{ pulg}^2$$

- Área entre paletas de alimentador

$$\text{Área entre cuchillas} = \text{Área figura 1} + A_{\text{rectángulo}} - \text{Área figura 2} - \text{Área figura 7}$$

Dado que:

$$A_{\text{rectángulo}} = \text{base} * \text{altura}$$

Entonces:

$$A_{\text{rectángulo}} = 0,90 * 1,91 = 1,72 \text{ pulg}^2$$

$$\text{Área entre paletas} = (4,39 + 1,72 - 1,24 - 0,64) * 4 = 16,96 \text{ pulg}^2$$

- Volumen (longitud de tambores = 53,5 pulg)

$$V = 16,96 * 53,5 = 907,36 \text{ pulg}^3 \text{ o } 0,5254 \text{ p}^3$$

- Ecuación para determinar el flujo másico de bagazo en secador

$$\dot{m} = VnpN \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

\dot{m} = caudal másico de bagazo alimentado a secador (lbm/min)

V = volumen de espacio entre cuchillas (m^3)

n = cantidad de espacios entre cuchillas en una revolución (8, cada 45°)

ρ = densidad del bagazo (13,09 lbm/p³)

N = Velocidad angular (RPM)

Entonces, en una revolución se tiene:

$$\dot{m} = 0,5257 p^3 * 13,09 \text{ lbm/p}^3 * 8 = 55,05 \text{ lbm/min}$$

En 20 revoluciones por minuto (capacidad máxima de reductor, con motor de 1740 RPM nominales).

$$\dot{m} = 0,5257 p^3 * 13,09 \text{ lbm/p}^3 * 8 * 20,58 = 1\ 132,96 \text{ lbm/min}$$

Convirtiendo a toneladas métricas por horas

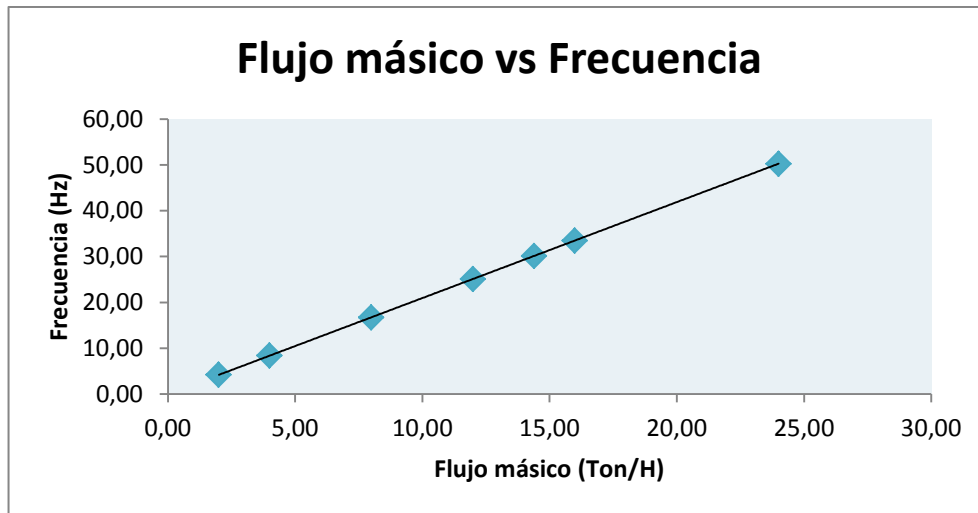
$$1\ 132,96 \text{ lbm/min} * 60 \text{ min/1 h} * 1 \text{ Ton/ 2,204 lbm} = 30,84 \text{ Ton/ H}$$

La capacidad máxima de alimentación de bagazo a secador es de 30,84Ton/ H.

Si se despeja de la ecuación no.6 la velocidad de giro, se obtiene:

$$N = \dot{m} / V n \rho \quad (\text{Ec.7})$$

Figura 40. **Flujo másico versus frecuencia en alimentador de secador de bagazo**



Fuente: elaboración propia.

3.1.2.6. **Determinación de la temperatura de rocío**

Es importante saber el valor al cuál ocurre la condensación del vapor de agua contenido por el gas de combustión, debido a que una vez éste se aproxima, definitivamente, ya no es posible extraer humedad del sólido. A esta cantidad de se le llama: temperatura de rocío.

Dado que del análisis estequiométrico de la combustión resultó la siguiente composición porcentual molar:

$$O_2 = 6,48 \%, CO_2 = 9,41 \%, H_2O = 22,24 \% \text{ y } N_2 = 61,87 \%$$

Entonces, para calcular la temperatura de rocío se requiere la composición porcentual volumétrica, que se calcula a partir de estos datos.

A continuación se multiplica los moles de cada compuesto-elemento contenido en los gases por su respectivo peso molecular, para obtener su peso en kilogramos:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{O}_2: & 11,7 \text{ mol} * 16 \text{ g/mol} & = 0,1872 \text{ kg} \\
 \text{CO}_2: & 17 \text{ mol} * 28 \text{ g/mol} & = 0,476 \text{ kg} \\
 \text{H}_2\text{O}: & 40,17 \text{ mol} * 18 \text{ g/mol} & = 0,72306 \text{ kg} \\
 \text{N}_2: & 111,729 \text{ mol} * 28 \text{ g/mol} & = 3,128412 \text{ kg}
 \end{array}$$

Como la temperatura de los gases de combustión es independiente de la temperatura de rocío, entonces se divide el peso dentro de la densidad de los gases (figuras 48 y 49, anexos) para obtener su composición porcentual volumétrica.

La temperatura referente para realizar los cálculos es: 300 grados Celsius.

$$\begin{array}{rcl}
 \text{O}_2: & 0,1872 \text{ kg} / 0,6804 \text{ (kg/m}^3\text{)} & = 0,2751 \text{ m}^3 \\
 \text{CO}_2: & 0,476 \text{ kg} / 0,9358 \text{ (kg/ m}^3\text{)} & = 0,5086 \text{ m}^3 \\
 \text{H}_2\text{O}: & 0,72306 \text{ kg} / 0,3831 \text{ (kg/ m}^3\text{)} & = 1,8874 \text{ m}^3 \\
 \text{N}_2: & 3,128412 \text{ kg} / 0,5956 \text{ (kg/ m}^3\text{)} & = 5,2525 \text{ m}^3 \\
 & \text{Total} & = 7,9236 \text{ m}^3
 \end{array}$$

Fracción volumétrica de gases de combustión:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{O}_2: & 0,2751 \text{ m}^3 & / 7,9236 \text{ m}^3 & = 3,47 \% \\
 \text{CO}_2: & 0,5086 \text{ m}^3 & / 7,9236 \text{ m}^3 & = 6,42 \%
 \end{array}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} : & \quad 1,8874 \text{ m}^3 / 7,9236 \text{ m}^3 & = & \quad 23,82 \% \\ \text{N}_2 : & \quad 5,2525 \text{ m}^3 / 7,9236 \text{ m}^3 & = & \quad 66,29 \% \end{aligned}$$

Dado que:

Presión atmosférica en Escuintla = 97,2301 KPA

Y,

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{Atm}} * X_{\text{H}_2\text{O}}$$

Donde:

P_{Atm} = Presión atmosférica

$X_{\text{H}_2\text{O}}$ = Fracción volumétrica de vapor de agua (23,82%)

$P_{\text{H}_2\text{O}}$ = Presión parcial de vapor de agua

Entonces:

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 97,2301 \text{ KPA} * 0,2382 = 23,16 \text{ KPA}$$

Con este resultado vamos a la tabla de la figura 47 del apartado de anexos, para obtener la temperatura de punto de rocío. Dado que el resultado no es posible encontrarlo directamente, se interpola para obtenerlo.

Temperatura (°C)	Presión (KPA)
60	19,94
T	23,16
65	25,03

La temperatura de rocío es igual a 63,16 grados Celsius o 145,69 grados Fahrenheit. Este dato define la temperatura a la cual el vapor de agua contenido en los gases de combustión se precipita.

3.1.3. Ventajas del actual proceso de secado

A continuación se demuestran las ventajas del proceso de secado actual. Aquí se analiza y se compara los aspectos favorables que tiene este proceso (con y sin modificaciones), frente a su inexistencia.

3.1.3.1. Determinación del consumo energético

Al aumentar la calidad del combustible por el proceso de secado, también se produce un consumo energético por la operación de los equipos de dicho proceso.

A continuación se muestra un resumen del consumo energético de cada equipo.

Tabla III. **Gasto energético diario por operación del secador de bagazo**

Marca	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Horas de trabajo	Consumo energético (KWH/día)	Consumo energético (BTU/h)	Consumo energético (kJ/h)
Marathon	60	44,7	24	1 072,8	152 530,81	160 897,48
Westinghouse	5	3,725	24	89,4	12 710,90	13 408,12
Westinghouse	5	3,725	24	89,4	12 710,90	13 480,12
Weg	7,5	5,5875	24	134,1	19 066,35	20 112,18
Weg	5	3,725	24	89,4	12 710,90	13 408,12
Weg	5	3,725	24	89,4	12 710,90	13 408,12
Total	87,5	65,19	24	1 564,5	222 440,76	234 642,15

Fuente: elaboración propia.

3.1.3.2. Influencia en el poder calorífico del bagazo

Para realizar el siguiente cálculo se utiliza el valor de poder calorífico inferior debido a que no se aprovecha el calor latente de los gases que se escapan por la chimenea. Don et al. (1977) demostraron que el poder calorífico inferior (PCI) del bagazo se puede calcular a partir de:

$$PCI = [18\,260 - 207,01 (\%W) - 182,60 (\%Z) - 31,14 (\%Brix)] \text{ kJ/kg} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde:

PCI = poder calorífico inferior (kJ/kg)

W = humedad en base húmeda (kg de bagazo seco/ kg de bagazo húmedo)

%Z = valor porcentual de cantidad de cenizas presentes en una muestra de bagazo

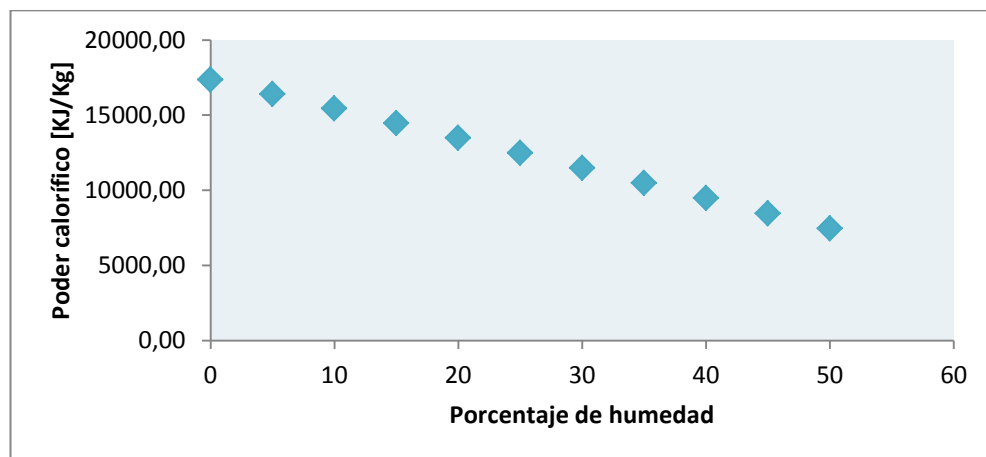
El bagazo analizado en fábrica, en promedio, presenta los siguientes resultados:

%W = 50%

%Z = 2%

%Brix = 2,74

Figura 41. **Poder calorífico del bagazo de caña respecto a la humedad contenida**



Fuente: elaboración propia.

3.1.3.3. Factibilidad del proceso

Para realizar la prueba de factibilidad, se alimentó el secador con una carga de 14,10 toneladas por hora y se estimó una reducción de 10 por ciento de humedad.

El primer paso para realizar esta prueba fue medir el diferencial de presión en el tubo Pitot, para realizar el cálculo del caudal de gases. Como

resultado se obtuvo 0,5960 pulgadas de agua. Con este resultado, se calculó la velocidad (ecuación 1) y la densidad para obtener el caudal másico.

Para la densidad de gases (ecuación 2), en la tubería de entrada, se obtuvo una temperatura de 203 grados Celsius (476,15 K).

$$\rho = \frac{303,0125}{476,15}$$

$$\rho = 0,6364 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A continuación, se calcula la velocidad:

$$V = \sqrt{\frac{2 \frac{9,81\text{m}}{\text{s}} 15,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{0,6364 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$V = 21,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Como se conoce el diámetro de la tubería, el cual es: 38" (0,9654 m) entonces, se procede a realizar el cálculo del caudal volumétrico y, posteriormente, másico.

$$\omega_v = \frac{\pi 0,9654\text{m}^2 * 21,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4}$$

$$\omega_v = 15,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = 15,85 \text{ m}^3/\text{s} * 0,6364 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\dot{m} = 10,09 \text{ kg}/\text{s} \text{ o } 36 \text{ 310,94 kg}/\text{H}$$

El segundo paso fue calcular el calor generado por los gases de combustión. Como se sabe que la transferencia de calor depende de un gradiente de temperatura, siendo la temperatura de entrada una variable que depende de la operación de la caldera, es decir, por ejemplo, cuando existen variaciones en el proceso de molienda puede ser que se entregue bagazo con mayor cantidad de humedad y, por lo tanto, mayor calor se perderá en el proceso de combustión en el hogar, por consiguiente, la temperatura de los gases de entrada al secador será proporcional a esta variación. Dado este valor discontinuo, se tomó como valor de temperatura 203 grados Celsius (valor promedio).

Por otra parte, como se sabe que la temperatura de rocío es una restricción para la temperatura de salida de gases, entonces, este valor se tomó de 75 grados Celsius, para evitar la condensación del ácido sulfúrico contenido en los gases de combustión.

A continuación, se calcula el valor de calor específico (ecuación 3) para cada temperatura dada.

- Para $t = 203 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$C_p = 4,705 \times 10^{-14} (203^{\circ}\text{C})^4 - 5,9192 \times 10^{-10} (203^{\circ}\text{C})^3 + 8,3068 \times 10^{-7} (203^{\circ}\text{C})^2 + 4,0582 \times 10^{-5} (203^{\circ}\text{C}) + 1,1985$$

$$C_p = 1,2364 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

- Para $t = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_p = 4,705 \times 10^{-14} (75 \text{ }^\circ\text{C})^4 - 5,9192 \times 10^{-10} (75 \text{ }^\circ\text{C})^3 + 8,3068 \times 10^{-7} (75 \text{ }^\circ\text{C})^2 + 4,0582 \times 10^{-5} (75 \text{ }^\circ\text{C}) + 1,1985$$

$$C_p = 1,2060 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$$

Con estos resultados se calcula la entalpía, respectivamente.

$$H_1 = 1,2361 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}} * 203 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_1 = 250,93 \text{ kJ/kg}$$

$$H_2 = 1,2060 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}} * 75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_2 = 90.45 \text{ kJ/kg}$$

Con estos datos, se calcula la transferencia de calor efectuada por los gases de combustión (ecuación 4).

$$q = 36\,310,94 \text{ kg/h} * (250,93 \text{ kJ/kg} - 90,45 \text{ kJ/kg})$$

$$q = 5\,832\,239,36 \text{ kJ/h}$$

El tercer paso fue calcular el calor necesario para efectuar la operación de secado. El peso del bagazo seco se obtuvo de la cantidad máxima de bagazo húmedo que es posible ingresar al conductor, considerando que el conductor se encuentra totalmente lleno. Las medidas del secador se pueden observar en la tabla de la figura 47 del apartado de anexos.

Primero, se calculó el volumen total, sabiendo que la altura es un valor crítico en el proceso de secado (10 cm máx.) para mantener un espesor de

lecho de bagazo dentro del secador de tal manera que el secado sea uniforme. Conociendo el volumen se multiplicó por la densidad (13,09 lb/p³), para obtener el peso másico. Luego, al peso másico se le multiplicó el porcentaje de humedad a la entrada del secador (50%), con eso se obtuvo el valor del peso seco de bagazo en el secador, el cual es: 125,76 kilogramos. Entonces, el calor necesario para realizar la operación de secado es:

Calor latente:

$$Q = \left(1 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de bagazo seco}} - 0,67 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de bagazo seco}}\right) * 125,76 \text{ kg} * 2260,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q = 94\,747,03 \text{ kJ}$$

Para el calor sensible se tomó en cuenta la cantidad de agua que se iba a evaporar, es decir, la reducción 50 por ciento a 40 por ciento de humedad en el bagazo. Cantidad de agua evaporada.

$$\dot{m}_{\text{agua}} = P_s (X_2 - X_1)$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = 125,76 \text{ kg} * \left(1 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de bagazo seco}} - 0,67 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de bagazo seco}}\right)$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = 41,50 \text{ kg}$$

Entonces, el calor necesario para elevar la temperatura a la cual ingresa el secador (46,67 °C), proveniente de molienda, a la temperatura de evaporación (98,78 °C, figura 47 de anexos), es:

$$Q = 41,50 \text{ kg} * \left(4,22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} * 98,72 \text{ }^\circ\text{C} - 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} * 46,67 \text{ }^\circ\text{C}\right)$$

$$Q = 9\,281,01 \text{ kJ}$$

El cuarto paso fue calcular el tiempo de retención:

$$T = \frac{(X_1 - X_2) * P_s * \lambda}{\dot{m} * C_p * \Delta t} = \frac{q}{Q}$$

$$T = \frac{9\,281,01 \text{ kJ} + 94\,747,03 \text{ kJ}}{5\,832\,349,36 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}$$

$$T = 0,01784 \text{ horas o } 1,07 \text{ minutos}$$

Teniendo ya el valor del tiempo de retención, se puede proceder a realizar el análisis dinámico de los equipos mecánico-eléctricos del secador para determinar los parámetros de funcionamiento. Éstos serán analizados más adelante.

El quinto paso fue calcular la capacidad del secador para poder realizar el balance de masa y comprobar el aumento energético con el incremento del poder calorífico por el proceso de secado.

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{q_{\text{gases}}}{(\lambda + \Delta H_{\text{agua}})}$$

$$\dot{m} = \frac{5\,832\,239,26 \text{ kJ/h}}{2\,260,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{416,60 - 195,08 \text{ kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\dot{m} = 2\,350,09 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m} = 2,35 \text{ Ton /h}$$

La capacidad es de 2,35 toneladas por hora (agua removida por unidad de tiempo).

Como la frecuencia del alimentador se programó a 27,06 Hertz, entonces, con la relación de la tabla VII del apartado de apéndices de ratio entre motor y conductor; y con la ecuación no.6, se calcula la cantidad de bagazo alimentado en toneladas por hora.

De la tabla VII de apéndices, se tiene:

Velocidad de giro del motor = 1 765 RPM

Ratio = 84,6

Velocidad de giro del reductor = 20,86 RPM

Como se sabe que 60 Hz = 1 765 RPM, entonces:

$$27,06 \text{ Hz} = 796,015 \text{ RPM}$$

Por lo tanto, la velocidad del reductor es:

$$N = 796,015 \text{ RPM} / 84,6 = 9,41 \text{ RPM}$$

Con esta velocidad se calcula el valor de la carga con la ecuación no.6, entonces:

$$\dot{m} = 0,5257 \rho^3 * 13,09 \text{ lbm}/\rho^3 * 8 * 9,41 \text{ RPM} = 518.032 \text{ lbm}/\text{min}$$

Convirtiendo de libras por minuto a toneladas por hora:

$$518,032 \text{ lbm}/\text{min} * 60 \text{ min}/1 \text{ h} * 1 \text{ Ton}/ 2,204 \text{ lbm} = 14,10 \text{ Ton}/ \text{H}$$

Para ajustar el valor de alimentación se realizaron varias corridas aforando los alimentadores únicamente. Con este valor medio, se ajustó el valor de la densidad quedando este dentro del rango.

El sexto paso fue realizar el balance de masa del secador. Para esto se definen las siguientes variables:

$\dot{m}_{\text{bagazo entrada}}$: bagazo que se alimenta al secador [Ton/h]
 $\dot{m}_{\text{bagazo salida}}$: bagazo seco, en la salida del secador [Ton/h]
 $\dot{m}_{\text{bagazo arrastrado}}$: bagazo arrastrado a caja húmeda [Ton/h]
 $\dot{m}_{\text{bagazo agua evaporada}}$: agua evaporada por la reducción de humedad [2,35 Ton/h].

La variable de bagazo arrastrado se da debido a que el gas en contacto con el bagazo está configurado en corriente cruzada, es decir, el gas de combustión forma un ángulo de 90 grados respecto al lecho de bagazo en el conductor. Por tanto, parte del bagazo se cuela por las orillas del conductor y la propia cama, por ser mallada.

Este bagazo es arrastrado a través de la tubería de salida de gas del secador, la cual descarga en la caja húmeda o lavado de gases; previo a la salida, por la chimenea.

Este resultado fue obtenido de la media de una serie de corridas que se efectuaron (0,3 Ton/h). Entonces, el balance queda de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{\text{bagazo entrada}} = \dot{m}_{\text{bagazo salida}} + \dot{m}_{\text{bagazo arrastrado}} + \dot{m}_{\text{bagazo agua evaporada}}$$

Sustituyendo los valores para encontrar $\dot{m}_{\text{bagazo entrada}}$, se obtiene:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{bagazo entrada}} &= 11,45 \text{ Ton/h} + 0,3 \text{ Ton/h} + 2,35 \text{ Ton/h} \\ \dot{m}_{\text{bagazo entrada}} &= 14,10 \text{ Ton/h}\end{aligned}$$

Como se puede observar el valor es igual al valor medio obtenido por el aforo de los alimentadores.

El séptimo paso fue realizar un análisis energético, para encontrar el aumento de energía producido por la operación de secado.

De la ecuación no.8 se obtiene el poder calorífico del combustible a una determinada humedad, brix y cenizas. Según los datos promedio de análisis en laboratorio de humedad y cenizas, sus respectivos valores son: 50 por ciento, 2.74 por ciento y 2 por ciento. Entonces, el valor del poder calorífico es:

$$\text{PCI} = 18\,260 - 207,01 (50) - 182,60 (2) - 31,14 (2,74) \text{ kJ/kg}$$
$$\text{PCI} = 7\,458,98 \text{ kJ/kg}$$

Y, para los valores del bagazo a 40 por ciento de humedad los valores medios de ceniza y brix fueron: 2,22 por ciento y 3,044 por ciento, respectivamente. Por lo tanto, el poder calorífico es:

$$\text{PCI} = 18\,260 - 207,01 (40) - 182,60 (2,22) - 31,14 (3,044) \text{ kJ/kg}$$
$$\text{PCI} = 9\,479,44 \text{ kJ/kg}$$

Con estos valores de poder calorífico, se saca la energía producida por el proceso de secado:

$$E_{\text{bagazo entrada}} = 7\,458,98 \text{ kJ/kg} * 14,10 \text{ Ton/h}$$
$$E_{\text{bagazo entrada}} = 105\,171\,618.00 \text{ kJ/h}$$

$$E_{\text{bagazo salida}} = 9\,479,44 \text{ kJ/kg} * 11,45 \text{ Ton/h}$$
$$E_{\text{bagazo salida}} = 108\,539\,588.00 \text{ kJ/h}$$

$$E_{\text{bagazo arrastrado}} = 9\,479,44 \text{ kJ/kg} * 0,3 \text{ Ton/h}$$
$$E_{\text{bagazo arrastrado}} = 2\,843\,832,00 \text{ kJ/h}$$

Como previamente se calculó el valor del consumo energético para operar el secador (tabla no.III), se resta esta cantidad de lo producido por el aumento del poder calorífico del bagazo por el proceso de secado.

$$\Delta E = 108\,539\,588 \text{ kJ/h} + 2\,843\,832 \text{ kJ/h} - 105\,171\,618 \text{ kJ/h} - 234\,642,15 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta E = 5\,977\,159,85 \text{ kJ/h}$$

Como se sabe, este valor es ideal y para que esto se dé, es necesario instalar un ciclón para recuperar el bagazo arrastrado.

Por otra parte estos cálculos se realizaron sin considerar ninguna pérdida energética causada por falta de aislamiento. Por lo tanto el análisis de las corridas que se realizaron se presentará más adelante (Sección 3.2). Esto fue solamente para demostrar que realmente este diseño, con las modificaciones explícitas más adelante, es factible.

Para saber cuánto combustible al 50 por ciento de humedad es necesario para igualar el aumento energético producido por la operación de secado, se despeja de la siguiente ecuación el flujo másico de bagazo y se calcula dicho valor:

$$E = \text{PCI} * \dot{m}_{\text{ahorro}}$$

Entonces:

$$\dot{m}_{\text{ahorro}} = \Delta E / \text{PCI}$$

$$\dot{m}_{\text{ahorro}} = 5\,977\,159,85 \text{ kJ/h} / 7\,458,98 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{\text{ahorro}} = 0,8013 \text{ Ton/h o } 19,23 \text{ Ton/día}$$

3.1.3.4. Modificaciones

Previo al análisis de factibilidad se realizaron unas modificaciones al secador de bagazo. Uno de los problemas que se estaba dando era que el lecho de bagazo formado encima del conductor del secador era muy alto. Esto se debía a que el conductor iba muy lento con respecto a la velocidad de alimentación. Por tanto, se realizó el análisis teórico de esta relación para saber la cantidad de dientes del *Sprocket* (figura 42, apéndices) debía tener para que el espesor del lecho en el conductor formara menos de 10 centímetros de altura. A continuación se presenta dicho análisis:

Este análisis se realizó para una carga de 14,10 toneladas por hora, la misma que la demanda de la prueba de factibilidad.

- Velocidad de alimentadores:

Para una carga de 14,10 toneladas por hora, la velocidad angular de los alimentadores es de 9,41 revoluciones por minuto o 0,985 radianes por segundo.

- Velocidad tangencial en tambores alimentadores

$$V = 0,985 \text{ rad/s} * 3\text{pulg}$$

$$V = 2,956 \text{ pulg/s}$$

- Perímetro entre cuchillas (figura 45, apéndices)

Como se sabe que cada cuchilla está a cada 45 grados de los tambores alimentadores, entonces:

$$P = \pi/4 * 3 \text{ pulg}$$

$$P = 2,356 \text{ pulg}$$

- Tiempo para desplazarse 45 grados

Como se tiene el perímetro del sector circular a 45 grados y la velocidad tangencial, se calcula el tiempo en que tarda para efectuar dicho desplazamiento:

$$T = 2,356 \text{ pulg} / (2,956 \text{ pulg/s})$$

$$T = 0,797 \text{ s}$$

- Velocidad relativa de alimentación

Como se sabe que la distancia entre tambores es de 6 pulgadas, entonces, la frecuencia con que estas 6 pulgadas de ancho caen al conductor es dada de la siguiente manera:

$$V = 6 \text{ pulg} / 0,79708\text{s}$$

$$V = 7,527 \text{ pulg/s}$$

- Velocidad del conductor a 60 Hertz, siendo la relación entre Sprocket de dientes 11:38, respectivamente, según la figura 42 de apéndices, es:

Dado que velocidad angular de motor de conductor (tabla VIII, apéndices)
= 1765 Rpm o 184,83 rad/s

Ratio del reductor = 291,7

Velocidad angular de reductor = 184,83 / 291,7 = 0,6336 rad/s

Velocidad angular de Sprocket que está directamente ensamblado al conductor es:

$$\text{Velocidad angular} = 0,6336 \text{ rad/s} * (11/38) = 0,1834 \text{ rad/s}$$

Por lo tanto, como el radio del Sprocket que está directamente ensamblado al conductor es de 0,3937 metros (15,50 pulg.), entonces la velocidad del conductor es:

$$V = 0,1834 \text{ rad/s} * 15,50 \text{ pulg} = 2,84 \text{ pulg/s}$$

- Relación

Como se tiene la velocidad del conductor y la velocidad relativa de alimentación, entonces se calcula dicha relación:

$$\text{Ratio} = (7,527 \text{ pulg/s}) / (2,84 \text{ pulg/s})$$

$$\text{Ratio} = 2,65$$

- Altura máxima entre cuchillas (figura 45, apéndices)

$$h = 3 \frac{13}{16} = 3,8125$$

- Altura de cama

$$H = \text{Ratio} * h$$

$$H = 2,65 * 3,8125 \text{ pulg}$$

$$H = 10,10 \text{ pulg o } 25,66 \text{ cm}$$

Como se puede observar esta altura de lecho excede la que por fundamento se debe mantener⁵. Esto estaba provocando que no se diera un secado uniforme a través del lecho, es decir, solamente la parte superior se estaba secando adecuadamente.

Por lo tanto, a continuación se realizan los cálculos que definieron la cantidad de dientes que debía tener el Sprocket no.2 de la figura 42 de apéndices.

$$H = 10 \text{ cm o } 3,95 \text{ pulg}$$

$$\text{Ratio} = 3,95 \text{ pulg} / 3,8125 \text{ pulg}$$

$$\text{Ratio} = 1,04$$

- Velocidad del conductor

$$V = (7,527 \text{ pulg/s})/1,04$$

$$V = 7,2375 \text{ pulg/s}$$

- Velocidad angular del conductor

$$\text{Velocidad angular} = (7,2375 \text{ pulg/s})/ 15,50 \text{ pulg}$$

$$\text{Velocidad angular} = 0,47 \text{ rad/s o } 4,46 \text{ Rpm}$$

- Cantidad de dientes del Sprocket no.2

$$0,6336 \text{ rad/s} * (11/D) = 0,47 \text{ rad/s}$$

$$D = 14.83 = 15$$

La cantidad de dientes que debía tener el Sprocket no.2 fue de 15. Con esto se logró mantener lecho de bagazo en el conductor menor o igual 10 centímetros.

3.2. Análisis experimental

En esta fase de la investigación se analizó el secador experimentalmente para calcular su eficiencia y, así, proponer las modificaciones para mejorar su desempeño. Esto se dividió en dos fases: análisis previo a modificaciones y análisis posteriores a modificaciones.

3.2.1. Análisis previo a modificaciones

Este análisis se realizó para evaluar las condiciones en las que se encontraba el proceso de secado. De estos resultados partieron, utilizando también los cálculos teóricos iniciales, las decisiones para su optimización.

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos por las primeras corridas:

Tabla IV. **Análisis previo a modificaciones**

Ensayo	Frecuencia de alimentación (Hz)	Alimentación (Ton/h)	Humedad de entrada (%)	Humedad de salida (%)	Gradiente de humedad (%)
1.	15	3,97	51,9	31,81	21,82
2.	17	5,09	52,29	40	13,8
3.	21	5,6	53,3	42,62	9,87

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, en las primeras corridas se alimentó poco bagazo al secador. Esto se debía a que la relación de velocidad entre el conductor (o cama) y los alimentadores, no permitía una demanda mayor por el crecimiento del espesor del lecho de bagazo que se estaba formando.

Para cada ensayo se calcula la energía necesaria para obtener los gradientes humedad y la energía que teóricamente se tendría que producir. Para esto se emplea la metodología ya descrita previamente, por lo tanto en este apartado no se detendrá a detallar cálculos. Esto se realizó para verificar cuánta energía se estaba aprovechando.

- Ensayo no.1:

$$q_{\text{generado}} = 2\,738\,312,51 \text{ kJ/h}$$

$$q_{\text{teórico}} = 6\,466\,482,64 \text{ kJ/h}$$

Entonces, con este resultado se calcula la eficiencia del secador como intercambiador de calor:

$$\eta * 6\,466\,482,64 = 2\,738\,312,51$$

$$\eta = 0,4235$$

$$\eta = 42,35 \%$$

- Ensayo no.2:

$$q_{\text{generado}} = 2\,738\,312,51 \text{ kJ/h}$$

$$q_{\text{teórico}} = 6\,466\,482,64 \text{ kJ/h}$$

$$\eta * 6\,466\,482,64 = 2\,738\,312,51$$

$$\eta = 0,4235$$
$$\eta = 42,35 \%$$

- Ensayo no.3:

$$q_{\text{generado}} = 2\,320\,798,18 \text{ kJ/h}$$

$$q_{\text{teórico}} = 6\,466\,482,64 \text{ kJ/h}$$

$$\eta * 6\,466\,482,64 = 2\,320\,798,18$$

$$\eta = 0,3589$$

$$\eta = 35,89 \%$$

Como se puede observar, hay baja eficiencia. Esto se debe a que el secador no cuenta con ningún tipo de aislante térmico.

3.2.2. Análisis posteriores a modificaciones

Estos ensayos fueron realizados posteriormente al análisis dinámico que se hizo a los equipos del secador en los cuales se encontró que modificando la cantidad de dientes en un Sprocket (sección 3.1.4.4.), se lograba reducir el espesor de lecho de bagazo formado en el conductor (o cama) alimentado una mayor demanda de biomasa.

Tabla V. **Análisis posteriores a modificaciones**

Ensayo	Frecuencia de alimentación (Hz)	Alimentación (Ton/h)	Humedad de entrada (%)	Humedad de salida (%)	Gradiente de humedad (%)
1.	45 Hertz	15,62	50,64	43,07	7,57
2.		15,64	51,28	44,35	6,93
3.		15,49	50,11	42,92	7,19
4.		15,69	50,29	44,72	5,57
5.		15,4	50,25	43,54	6,71
6.		16,32	49,58	46,97	2,61
7.		16,4	50,72	47,95	2,77
8.		16,16	49,01	46,89	2,12
9.		16,39	50,16	46,82	3,34
10.		16,3	49,01	46,89	2,12
11.		14,58	50,1	48,02	2,08
Promedio		15,82	50,10	45,65	4,46
12.	30 Hertz	12,88	49,96	41,60	8,36
13.		12,85	49,91	38,44	11,47
14.		12,59	50,30	41,04	9,26
15.		12,31	50,75	40,59	10,16
16.		13,17	51,23	46,38	4,85
17.		12,70	52,47	43,91	8,56
18.		12,69	51,48	47,58	3,90
19.		12,62	50,94	47,42	3,52
20.		12,71	50,50	46,50	4,00
Promedio		12,72	50,84	43,72	7,12

Fuente: elaboración propia.

De igual forma en esta fase se realizó el análisis energético para verificar cuánta energía se estaba generando y cuánta se debería, teóricamente, generar. Para esto se tomó en cuenta solamente los promedios de los ensayos.

- Ensayos a 45 Hertz (frecuencia de alimentación):

$$q_{\text{generado}} = 3\,199\,993,49 \text{ kJ/h}$$

$$q_{\text{teórico}} = 6\,466\,482,64 \text{ kJ/h}$$

$$\eta * 6\,466\,482,64 = 3\,199\,993,49$$

$$\eta = 0,4949$$

$$\eta = 49,49 \%$$

- Ensayos a 30 Hertz (frecuencia de alimentación):

$$q_{\text{generado}} = 3\,952\,059,34 \text{ kJ/h}$$

$$q_{\text{teórico}} = 6\,466\,482,64 \text{ kJ/h}$$

$$\eta * 6\,466\,482,64 = 3\,952\,059,34$$

$$\eta = 0,6112$$

$$\eta = 61,12 \%$$

Como se puede observar el valor de la eficiencia incrementó. Esto se debió a que por reparaciones que demandaron los equipos conforme se fueron realizando los ensayos, presentaron éstos fallas mecánicas y específicamente se encontró que la válvula de compuerta -que permite la entrada de gases de combustión al secador- estaba torcida en su eje de rotación y, por esa razón, no permitía la apertura total. También, se realizaron otros ajustes a los equipos como: balanceado y alineado del ventilador, limpieza de tuberías (sucias por hollín), mantenimiento en general de los equipos y reemplazo de piezas dañadas.

Aún así se puede observar que la eficiencia estuvo baja. La razón sigue siendo, la falta de aislamiento térmico.

3.2.2.1. Análisis estadístico

Debido a que fueron pocas las corridas llevadas a cabo, a continuación, se realiza una estimación del intervalo de confianza para la varianza al 95 por ciento de confiabilidad. Para esto, la variable que se tomó en cuenta fue el gradiente de humedad.

$$\frac{n-1 S^2}{X^2 \alpha/2} \leq \sigma \leq \frac{n-1 S^2}{X^2 1-\alpha/2}$$

Donde:

n = número de ensayos

S² = Varianza muestral

S = desviación estándar muestral

α = Nivel de significancia

NC = Nivel de confianza

X² = Distribución Chi cuadrada

V = Grado de libertad

Entonces:

- Para ensayos a 45 Hz (frecuencia de alimentación), se obtienen los siguientes resultados:

$$n = 11$$

$$\begin{aligned}
S^2 &= 5,38 \\
S &= 2,32 \\
\alpha &= 0,05 \\
NC &= 0,95 \\
\alpha/2 &= 0,025 \\
X_{\alpha/2} &= 20,48 \text{ (anexos, tabla VIII)} \\
1-\alpha/2 &= 0,975 \\
X_{1-\alpha/2} &= 3,25 \text{ (anexos, tabla IX)} \\
V &= 11-1 = 10
\end{aligned}$$

Sabiendo la fórmula para determinar el intervalo de confianza para la varianza, calculamos dicho valor:

$$\frac{11-1 \cdot 5,38}{20,48} \leq \sigma \leq \frac{11-1 \cdot 5,38}{3,25}$$

$$1,62 \leq \sigma \leq 4,07$$

$$2,62 \leq \sigma^2 \leq 16,56$$

Con un nivel de confiabilidad del 95 por ciento la estimación del intervalo de confianza para la varianza poblacional resulta: $2.62 \leq \sigma^2 \leq 16.56$. Esto demuestra que la variación, entre el resultado del gradiente de humedad entre muestras, es significativa.

Estas variaciones pueden haberse dado debido a las diferentes condiciones climáticas entre las corridas.

- Para ensayos a 30 Hz (frecuencia de alimentación), se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}
n &= 9 \\
S^2 &= 9,30 \\
S &= 3,05 \\
\alpha &= 0,05 \\
NC &= 0,95 \\
\alpha/2 &= 0,025 \\
X_{\alpha/2} &= 17,53 \text{ (anexos, tabla VIII)} \\
1-\alpha/2 &= 0,975 \\
X_{1-\alpha/2} &= 2,18 \text{ (anexos, tabla IX)} \\
V &= 9-1 = 8
\end{aligned}$$

Sabiendo la fórmula para determinar el intervalo de confianza para la varianza, calculamos dicho valor:

$$\frac{9-1 \cdot 9,30}{17,53} \leq \sigma \leq \frac{9-1 \cdot 9,30}{2,18}$$

$$2,06 \leq \sigma \leq 5,84$$

$$4,24 \leq \sigma^2 \leq 34,13$$

Con un nivel de confiabilidad del 95 por ciento la estimación del intervalo de confianza para la varianza poblacional resulta: $4,24 \leq \sigma^2 \leq 34,13$. Esto demuestra que la variación, entre el resultado del gradiente de humedad entre muestras, es significativa.

Estas variaciones pueden haberse dado debido a las diferentes condiciones climáticas entre las corridas.

3.3. Propuesta

En esta fase se presentan las propuestas para mejorar el diseño del secador actual y así, aumentar la capacidad de secado. El punto de partida para esto, son las modificaciones últimas que se le hicieron al secadero; las cuales permitieron que se alimentara mayor cantidad de combustible.

3.3.1. Propuesta para mejorar el rendimiento del secador actual

Básicamente esta propuesta se define en la aplicación de un aislante térmico apropiado.

El material que se empleó para la construcción del secador y tubería (distribución de gases de combustión) fue el acero A – 36. En la figura 53 de los anexos, se puede observar el valor del coeficiente de conductividad térmica para un acero al carbono ($434 \text{ J/Kg}^*\text{K}$).

Tabla VI. Propiedades de materiales aislantes

Material	Calor específico $\text{kJ/kg}^*\text{K}$
Fibra mineral (Procesada de roca, escoria o vidrio)	0,71 – 0,96
Fibra de vidrio	0,96
Fibra mineral con resina	0,71
Aserrín o virutas	1,38
Corcho	1,80
Espuma de poliuretano	1,045

Fuente: Cengel Yanus. *Heat Transfer*. 2nd edition. p. 850.

Como se puede observar, el valor del calor específico del acero A – 36 es casi cuatro veces más que cualquiera de los materiales aislantes de la tabla VI. Por lo tanto, se ve la necesidad de aplicar un material aislante para reducir las pérdidas de calor que se están presentando.

3.3.2. Utilización del calor generado por gases de combustión de calderas para reducir la humedad del bagazo de toda la demanda empleando el modelo existente

Como se ha demostrado la factibilidad de la utilización del actual modelo de secador, con las modificaciones respectivas realizadas, a continuación se proyecta el empleo del mismo en las demás calderas.

3.3.2.1. Descripción

Actualmente, debido a la capacidad de secado solamente se está reduciendo el porcentaje de humedad al 15 por ciento de la demanda de bagazo que sale de molienda.

Dado que el resultado del actual prototipo que utiliza gases de combustión de la caldera no.4 ha sido positivo, dando éste un aumento energético, y el flujo de gases que se utiliza representa el 27 por ciento del total; esto abre la posibilidad de expandir la capacidad de secado del actual prototipo ampliando sus dimensiones y adicionando más flujo de gases por el secador.

Por otra parte, cabe la posibilidad de expandir la capacidad de secado mediante la instalación de equipos similares en las demás calderas.

Utilizando secadores similares en las demás calderas, aproximadamente, se podría reducir al 40 por ciento de humedad la demanda total de bagazo que sale de molienda.

3.3.2.2. Ventajas

Empleando el mismo modelo de secador existente en las demás calderas, se estima que se podrá reducir, aproximadamente, el 100 por ciento de la demanda de bagazo generado en fábrica.

Las ventajas que esta propuesta provee son las siguientes:

- Menores pérdidas de calor en hogar de caldera.
- Mayor eficiencia de calderas debido al aprovechamiento del calor de los gases de combustión antes de llegar a chimeneas.
- Ahorro de combustible debido al incremento del poder calorífico.
- Aumento de capacidad de las calderas para producir vapor sobre calentado.
- Mayor eficiencia de combustión.
- Reducción de contaminación ambiental debido a una combustión más completa.

3.3.2.3. Factibilidad

Dado que el resultado respecto a un ahorro de combustible producido por el actual prototipo fue del orden de 0,8013 toneladas por hora (19,23 Ton/día), si se instalan prototipos similares en las 4 calderas restantes se podría obtener un ahorro total de 4 toneladas por hora (96 Ton/día o 17 280 Ton/zafra).

Por otra parte, si el objetivo fuese aumentar la demanda de flujo de vapor sobrecalentado producido, en vez de obtener un ahorro de combustible, para producir más energía en los turbogeneradores, el resultado sería, de acuerdo al actual proceso (5 977 159,85 kJ/h): 29 885 799,25 kilojoules por hora.

Estos resultados se pueden estimar de esta manera debido a que, en promedio, todas las calderas tienen la misma temperatura de gases a la salida por sus respectivas chimeneas.

4. CAPACIDAD AL PERSONAL (FASE DE DOCENCIA)

4.1. Capacitación al personal del Departamento de Energía

La ampliación de los conocimientos de los trabajadores por medio de una capacitación brinda beneficios tanto a ellos, como a la empresa. Esto ayuda a mejorar sus competencias y a la empresa le permite obtener calidad e innovación en el desarrollo de sus procesos.

Su finalidad es dar a conocer las variables en la operación del secador de bagazo y su fundamento, para tener conocimiento amplio y ser capaces de controlar el proceso. Para esto se ha creado un pequeño programa en Microsoft Excel 2007, mediante el cual se puede ingresar los datos variables en el proceso y éste calculará los parámetros de funcionamiento para los motores instalados para dicho proceso.

A continuación se describen de manera detallada los objetivos de la capacitación:

- General

Al final de la capacitación el personal deberá ser capaz de controlar variables del proceso de secado mediante el programa creado en Microsoft Excel 2007.

- Específicos
 - Programar la velocidad del alimentador de bagazo según sea la carga requerida.
 - Programar la velocidad del conductor según sea el espesor de lecho de bagazo que se requiera.

4.1.1. Contenido del programa de capacitación

En este apartado se especifica el contenido del programa de capacitación para que se dé un uso correcto y orientado del mismo. Básicamente cuenta con 5 puntos: parámetros de operación, variables de operación, registros de control de operación, capacidad del secador y problemas por mala operación.

4.1.1.1. Parámetros de operación

En esta sección se describen los equipos instalados en el proceso y su función. La finalidad de este apartado es, esencialmente, saber modificar los parámetros de los variadores de los motores eléctricos de cada aplicación (ventilador, conductor y alimentadores), de acuerdo las variaciones que se explicarán el próximo apartado.

4.1.1.2. Variables de operación

En este apartado se definen las variables que se presentan en el proceso, específicamente: temperatura y caudal de gases (calor generado por los gases en general). De acuerdo con esto, se permitirá realizar los ajustes en los parámetros de cada equipo.

Estás variables se podrán ingresar al programa creado en Microsoft Excel 2007 y este desplegará (automáticamente) los parámetros que son requeridos, según sea la cantidad de humedad que se quiera remover en el bagazo.

4.1.1.3. Registros de control de operación

Aquí se define cómo se deben llenar los registros de operación del secador de bagazo, para generar reportes diarios, semanales, mensuales y anuales. Esto permitirá establecer rangos de operación para incrementar la eficiencia operativa.

4.1.1.4. Capacidad del secador

En esta sección se informará al personal cómo saber la capacidad del secador. Esto permitirá no forzar los equipos, para obtener los resultados deseados en el proceso y no provocar daños.

4.1.1.5. Problemas por mala operación

En este apartado se definen los problemas específicos a los que se deben enfrentar los operadores para saber qué hacer ante tales diversas situaciones, para conservar una alta eficiencia operativa.

CONCLUSIONES

1. Del análisis de transferencia de calor, se encontró una baja eficiencia en el secador debido a la falta de aislamiento.
2. En el análisis dinámico de los equipos en operación (motores, reductores, sprockets y engranes) se halló que era posible realizar modificaciones para mantener un espesor de lecho de bagazo menor a 10 centímetros, con el fin de que se diera un secado uniforme a través todo el lecho de bagazo alimentando.
3. La observación realizada durante la operación evidenció que algunos equipos estaban en mal estado y por lo tanto necesitaban mantenimiento para poder obtener mejores resultados.
4. La determinación de la capacidad de secado permitió definir la carga de alimentación máxima que era posible ingresar al secador para mantener las condiciones deseadas.
5. La definición del tiempo de retención necesario para reducir el porcentaje de humedad en el bagazo, a un valor deseado, permitió establecer los parámetros de operación de los equipos.
6. En condiciones teóricas ideales (sin problemas de aislamiento térmico) se demostró que alimentando bagazo al secador a una carga de 14,10 toneladas por hora, se llegaría a obtener un ahorro de 19,23 toneladas por día o un aumento energético de 5 977 159,85 kilojoules por hora.

7. El ahorro proyectado de combustible, debido al incremento energético, reduciría costos para generar energía eléctrica.
8. De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de factibilidad se interpreta que utilizando secadores idénticos en las demás calderas, se lograría reducir la humedad en 10 puntos porcentuales a aproximadamente el 100 por ciento de la producción de bagazo.
9. El ahorro por la instalación de secadores en las demás calderas es del orden de 96 toneladas por día de combustible.
10. Existe una pérdida de combustible del orden de 0,3 toneladas por hora debido al arrastre de bagazo a través del conductor del secador hacia la chimenea de la caldera.
11. Todos los análisis realizados se efectuaron asumiendo que la etapa de secado se encontraba en su fase de secado a velocidad constante.

RECOMENDACIONES

1. De acuerdo al impacto que pueda generar el incremento de cenizas en el hogar de la caldera, habrá que diseñar un plan estratégico de limpieza diferente al actual para que esto no cause atoros en la parrilla o problemas por erosión en tuberías y otros equipos internos.
2. Debido a la temperatura de fusión de los componentes que constituyen a las cenizas (potasio, sodio, azufre y cloro) presentes en el combustible alimentado, habrá que monitorear los equipos internos en la caldera para cerciorarse que no hayan sido dañados a causa de la corrosión producto de las elevadas temperaturas que se pueden obtener por el bagazo con menor porcentaje de humedad.
3. Debido a que la temperatura de rocío ácido se encuentra entre 65 y 75 grados centígrados (9), mediante el programa creado en Microsoft Excel 2007 será necesario restringir la temperatura de equilibrio por encima de dicho rango, para evitar la corrosión ácida en tuberías, restringiendo la alimentación de bagazo según el programa indique.
4. Para poder aprovechar los resultados obtenidos en el análisis de factibilidad, donde se demostró que 0,3 toneladas por hora de bagazo (aproximadamente) están siendo arrastrados hacia la chimenea, se debe instalar un separador de partículas (ciclón), para recuperar el combustible perdido.

5. Debido a que la reacción de nitrógeno con oxígeno es proporcional a la temperatura de combustión y con el bagazo seco habrá un incremento, será muy importante monitorear la emisión de gases NO_x .
6. Como a temperaturas entre 925 y 950 grados Celsius se encuentra el valor ideal de combustión del bagazo (alta eficiencia), habrá que monitorear este valor para verificar que no se salga de este rango o esté lo más próximo. Esto es inversamente proporcional a la generación de monóxido de carbono por lo que, paralelo a esto, habrá que realizar un estudio de impacto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

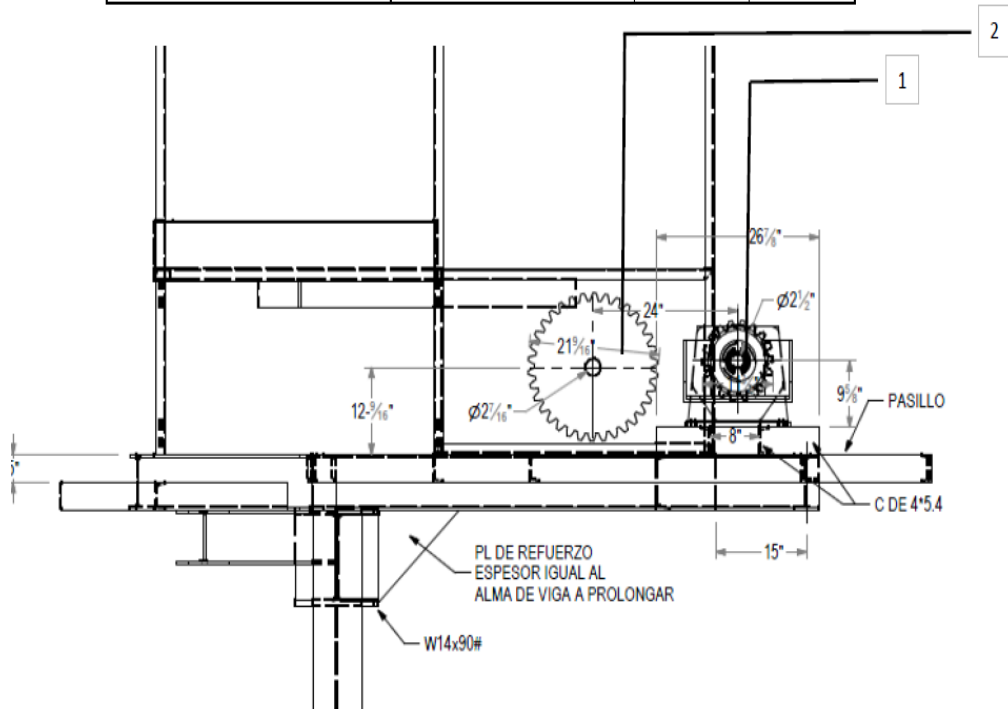
1. CENGEL YANUS, A., *Introduction to thermodynamics and heat transfer*. 2a ed. Nevada: McGraw-Hill, 1997. 528 p.
2. CHEN C.P., James. *Manual del azúcar de caña*. 2a ed. Nueva York: Limusa. 1991. 970 p.
3. D'ANGELO, Juan, PAZ Dora, CÁRDENAS Gerónimo J., *Posibilidades de secado de bagazo en la industria azucarera de México*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Distrito Federal México. 2002. 41 p.
4. FRANCK COLOMBRES, Federico J., GOLATO MARCOS, A., MORALES, Walter D., ASO, Gustavo; PAZ Dora, *Monitoreo de un sistema de secado de bagazo acoplado a una caldera en un ingenio de México*, Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán, 2005. 33 p.
5. GEANKOPLIS, Christie J., *Transport processes and separation process principles*. 3a ed. México: CECSA. 1998. 579 p.
6. HUGOT, E. *handbook of cane sugar engineering*. 3a ed. New York: Elsevier. 1986. 911 p.
7. MCCABE WARREN, L. *Operaciones básicas de ingeniería química*. 3a ed. Barcelona: Reverté. 1980. 140 p.

8. MORAN MICHAEL, J. *Fundamentos de termodinámica técnica*, 2a ed. Barcelona: Reverté. 2004. 54 p.
9. MUJUMBAR, Arun S., *Handbook of industrial drying*, 3a ed. Montreal: Taylor & Francis Group, LLC. 2006. 437 p.
10. ROUSSEAU, Felder, *Principios elementales de los procesos químicos*. 3a ed. México: Limusa Wiley. 2004. 116 p.
11. REIN, Peter, *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlin: Bartens KG, 2012. 720 p.
12. SIENKO, Michael J. *Problemas de química*. Barcelona: Reverté. 1972. 373 p.
13. TREYBAL, Robert E., *Operaciones de transferencia de masa*. 2a ed. México: McGraw-Hill. 1997. 723 p.

APÉNDICES

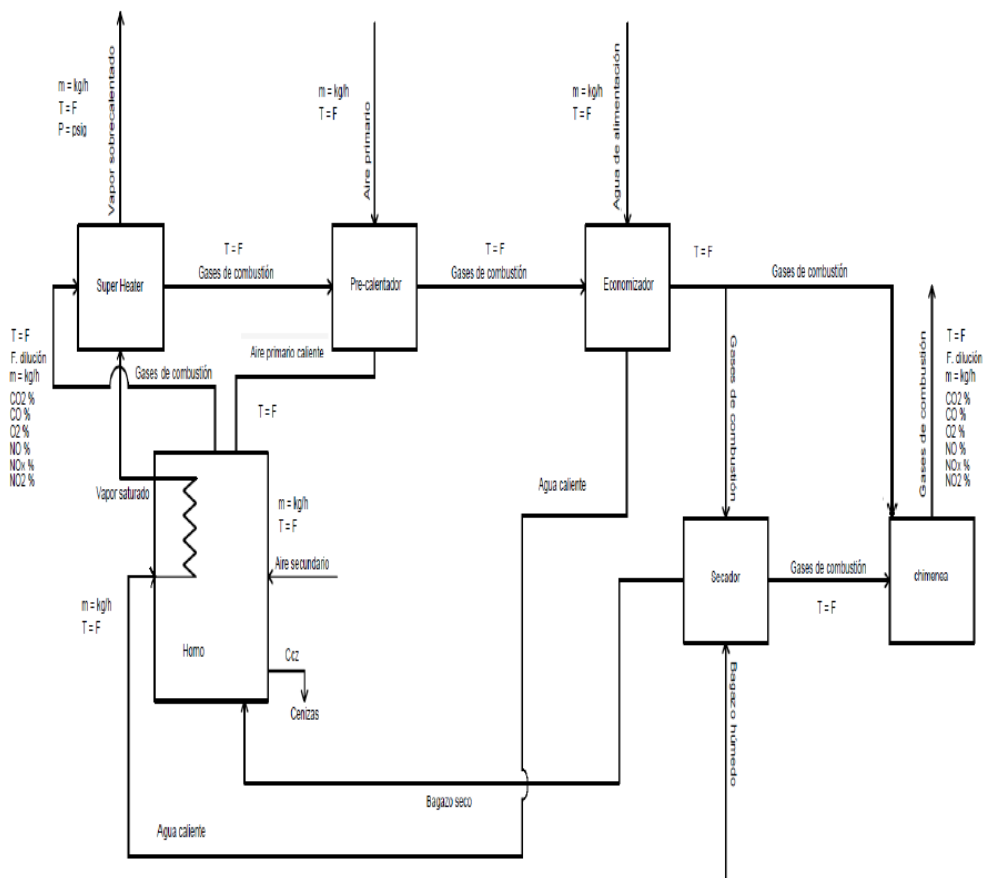
Figura 42. **Medidas del secador de bagazo**

Medidas del secador de bagazo (área de contacto de secado)			
Medida	Cantidad (plg)	Cantidad (m)	Radio (m)
Longitud	345	8.76	-
Ancho	54.5	1.38	-
Sprocket 1 de polea de conductor	7.2	0.18	0.09144
Sprocket 2 de polea de conductor	20.5	0.52	0.26035
Sprocket 3 de polea de conductor	31	0.79	0.3937
Área de contacto	18802.5	12.13	-



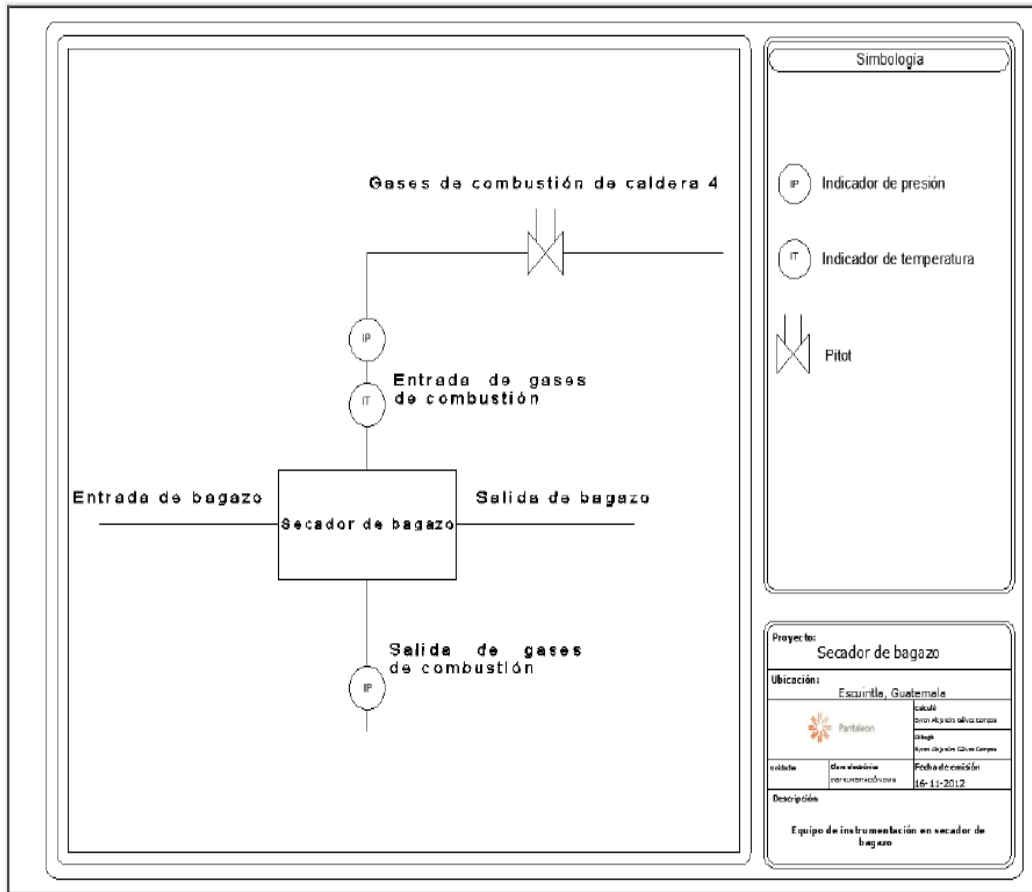
Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

Figura 43. **Configuración de caldera no.4 Ingenio Concepción S.A**



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

Figura 44. Equipo de instrumentación en secador de bagazo



Fuente: elaboración propia, con programa de diseño AutoCAD 2013.

Tabla VII. **Resumen de velocidades de equipos en secador**

Características de equipos en secador de bagazo			
Descripción	RPM motor	RPM reductor	Ratio
Alimentador	1765	20,86	84,6
Conductor	1740	5,97	291,7
Nivelador 1	1730	33,92	51
Nivelador 2	1730	33,92	51
Nivelador 3	1730	33,92	51
Aire Forzado	1775	---	---

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Figura 46. **Masa molecular, constante de gases y calores específicos gases ideales de algunas sustancias**

TABLE A-1					
Molar mass, gas constant, and ideal-gas specific heats of some substances					
Substance	Molar Mass <i>M</i> , kg/kmol	Gas Constant <i>R</i> , kJ/kg · K*	Specific Heat Data at 25°C		
			<i>c_p</i> , kJ/kg · K	<i>c_v</i> , kJ/kg · K	<i>k</i> = <i>c_p</i> / <i>c_v</i>
Air	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Ammonia, NH ₃	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argon, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromine, Br ₂	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
Isobutane, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
<i>n</i> -Butane, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Carbon dioxide, CO ₂	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Carbon monoxide, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Chlorine, Cl ₂	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Chlorodifluoromethane (R-22), CHClF ₂	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Ethane, C ₂ H ₆	30.070	0.2765	1.744	1.468	1.188
Ethylene, C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Fluorine, F ₂	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helium, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
<i>n</i> -Heptane, C ₇ H ₁₆	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
<i>n</i> -Hexane, C ₆ H ₁₄	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hydrogen, H ₂	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Krypton, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Methane, CH ₄	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Neon, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrogen, N ₂	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Nitric oxide, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Nitrogen dioxide, NO ₂	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Oxygen, O ₂	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
<i>n</i> -Pentane, C ₅ H ₁₂	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propane, C ₃ H ₈	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propylene, C ₃ H ₆	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Steam, H ₂ O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Sulfur dioxide, SO ₂	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Tetrachloromethane, CCl ₄	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluoroethane (R-134a), C ₂ H ₂ F ₄	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluoroethane (R-143a), C ₂ H ₃ F ₃	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Xenon, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

Fuente: Cengel Yanus. *Heat Transfer*. 2nd edition.

Figura 47. Propiedades del agua saturada

TABLE A-9 Properties of saturated water

Temp. T, °C	Saturation Pressure P _{sat} , kPa	Density ρ, kg/m ³		Enthalpy of Vaporization h _g , kJ/kg	Specific Heat c _p , J/kg · K		Thermal Conductivity k, W/m · K		Dynamic Viscosity μ, kg/m · s		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient β, 1/K
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1,553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2,318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3,344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4,688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6,412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8,581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11,274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	
360	18,651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	
374.14	22,090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵			

Fuente: Cengel Yanus. Heat Transfer. 2nd edition.

Figura 48. Propiedades de gases a 1 atm de presión

TABLE A-16							
Properties of gases at 1 atm pressure							
Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
<i>Carbon Dioxide, CO₂</i>							
-50	2.4035	746	0.01051	5.860×10^{-6}	1.129×10^{-5}	4.699×10^{-6}	0.8019
0	1.9635	811	0.01456	9.141×10^{-6}	1.375×10^{-5}	7.003×10^{-6}	0.7661
50	1.6597	866.6	0.01858	1.291×10^{-5}	1.612×10^{-5}	9.714×10^{-6}	0.7520
100	1.4373	914.8	0.02257	1.716×10^{-5}	1.841×10^{-5}	1.281×10^{-5}	0.7464
150	1.2675	957.4	0.02652	2.186×10^{-5}	2.063×10^{-5}	1.627×10^{-5}	0.7445
200	1.1336	995.2	0.03044	2.698×10^{-5}	2.276×10^{-5}	2.008×10^{-5}	0.7442
300	0.9358	1060	0.03814	3.847×10^{-5}	2.682×10^{-5}	2.866×10^{-5}	0.7450
400	0.7968	1112	0.04565	5.151×10^{-5}	3.061×10^{-5}	3.842×10^{-5}	0.7458
500	0.6937	1156	0.05293	6.600×10^{-5}	3.416×10^{-5}	4.924×10^{-5}	0.7460
1000	0.4213	1292	0.08491	1.560×10^{-4}	4.898×10^{-5}	1.162×10^{-4}	0.7455
1500	0.3025	1356	0.10688	2.606×10^{-4}	6.106×10^{-5}	2.019×10^{-4}	0.7745
2000	0.2359	1387	0.11522	3.521×10^{-4}	7.322×10^{-5}	3.103×10^{-4}	0.8815
<i>Carbon Monoxide, CO</i>							
-50	1.5297	1081	0.01901	1.149×10^{-5}	1.378×10^{-5}	9.012×10^{-6}	0.7840
0	1.2497	1048	0.02278	1.739×10^{-5}	1.629×10^{-5}	1.303×10^{-5}	0.7499
50	1.0563	1039	0.02641	2.407×10^{-5}	1.863×10^{-5}	1.764×10^{-5}	0.7328
100	0.9148	1041	0.02992	3.142×10^{-5}	2.080×10^{-5}	2.274×10^{-5}	0.7239
150	0.8067	1049	0.03330	3.936×10^{-5}	2.283×10^{-5}	2.830×10^{-5}	0.7191
200	0.7214	1060	0.03656	4.782×10^{-5}	2.472×10^{-5}	3.426×10^{-5}	0.7164
300	0.5956	1085	0.04277	6.619×10^{-5}	2.812×10^{-5}	4.722×10^{-5}	0.7134
400	0.5071	1111	0.04860	8.628×10^{-5}	3.111×10^{-5}	6.136×10^{-5}	0.7111
500	0.4415	1135	0.05412	1.079×10^{-4}	3.379×10^{-5}	7.653×10^{-5}	0.7087
1000	0.2681	1226	0.07894	2.401×10^{-4}	4.557×10^{-5}	1.700×10^{-4}	0.7080
1500	0.1925	1279	0.10458	4.246×10^{-4}	6.321×10^{-5}	3.284×10^{-4}	0.7733
2000	0.1502	1309	0.13833	7.034×10^{-4}	9.826×10^{-5}	6.543×10^{-4}	0.9302
<i>Methane, CH₄</i>							
-50	0.8761	2243	0.02367	1.204×10^{-5}	8.564×10^{-6}	9.774×10^{-6}	0.8116
0	0.7158	2217	0.03042	1.917×10^{-5}	1.028×10^{-5}	1.436×10^{-5}	0.7494
50	0.6050	2302	0.03766	2.704×10^{-5}	1.191×10^{-5}	1.969×10^{-5}	0.7282
100	0.5240	2443	0.04534	3.543×10^{-5}	1.345×10^{-5}	2.567×10^{-5}	0.7247
150	0.4620	2611	0.05344	4.431×10^{-5}	1.491×10^{-5}	3.227×10^{-5}	0.7284
200	0.4132	2791	0.06194	5.370×10^{-5}	1.630×10^{-5}	3.944×10^{-5}	0.7344
300	0.3411	3158	0.07996	7.422×10^{-5}	1.886×10^{-5}	5.529×10^{-5}	0.7450
400	0.2904	3510	0.09918	9.727×10^{-5}	2.119×10^{-5}	7.297×10^{-5}	0.7501
500	0.2529	3836	0.11933	1.230×10^{-4}	2.334×10^{-5}	9.228×10^{-5}	0.7502
1000	0.1536	5042	0.22562	2.914×10^{-4}	3.281×10^{-5}	2.136×10^{-4}	0.7331
1500	0.1103	5701	0.31857	5.068×10^{-4}	4.434×10^{-5}	4.022×10^{-4}	0.7936
2000	0.0860	6001	0.36750	7.120×10^{-4}	6.360×10^{-5}	7.395×10^{-4}	1.0386
<i>Hydrogen, H₂</i>							
-50	0.11010	12635	0.1404	1.009×10^{-4}	7.293×10^{-6}	6.624×10^{-5}	0.6562
0	0.08995	13920	0.1652	1.319×10^{-4}	8.391×10^{-6}	9.329×10^{-5}	0.7071
50	0.07603	14349	0.1881	1.724×10^{-4}	9.427×10^{-6}	1.240×10^{-4}	0.7191
100	0.06584	14473	0.2095	2.199×10^{-4}	1.041×10^{-5}	1.582×10^{-4}	0.7196
150	0.05806	14492	0.2296	2.729×10^{-4}	1.136×10^{-5}	1.957×10^{-4}	0.7174
200	0.05193	14482	0.2486	3.306×10^{-4}	1.228×10^{-5}	2.365×10^{-4}	0.7155

Fuente: Cengel Yanus. *Heat Transfer*. 2nd edition.

Figura 49. Propiedades de gases a 1 atm de presión

TABLE A-16							
Properties of gases at 1 atm pressure (Continued)							
Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
300	0.04287	14481	0.2843	4.580×10^{-4}	1.403×10^{-5}	3.274×10^{-4}	0.7149
400	0.03650	14540	0.3180	5.992×10^{-4}	1.570×10^{-5}	4.302×10^{-4}	0.7179
500	0.03178	14653	0.3509	7.535×10^{-4}	1.730×10^{-5}	5.443×10^{-4}	0.7224
1000	0.01930	15577	0.5206	1.732×10^{-3}	2.455×10^{-5}	1.272×10^{-3}	0.7345
1500	0.01386	16553	0.6581	2.869×10^{-3}	3.099×10^{-5}	2.237×10^{-3}	0.7795
2000	0.01081	17400	0.5480	2.914×10^{-3}	3.690×10^{-5}	3.414×10^{-3}	1.1717
Nitrogen, N_2							
-50	1.5299	957.3	0.02001	1.366×10^{-5}	1.390×10^{-5}	9.091×10^{-6}	0.6655
0	1.2498	1035	0.02384	1.843×10^{-5}	1.640×10^{-5}	1.312×10^{-5}	0.7121
50	1.0564	1042	0.02746	2.494×10^{-5}	1.874×10^{-5}	1.774×10^{-5}	0.7114
100	0.9149	1041	0.03090	3.244×10^{-5}	2.094×10^{-5}	2.289×10^{-5}	0.7056
150	0.8068	1043	0.03416	4.058×10^{-5}	2.300×10^{-5}	2.851×10^{-5}	0.7025
200	0.7215	1050	0.03727	4.921×10^{-5}	2.494×10^{-5}	3.457×10^{-5}	0.7025
300	0.5956	1070	0.04309	6.758×10^{-5}	2.849×10^{-5}	4.783×10^{-5}	0.7078
400	0.5072	1095	0.04848	8.727×10^{-5}	3.166×10^{-5}	6.242×10^{-5}	0.7153
500	0.4416	1120	0.05358	1.083×10^{-4}	3.451×10^{-5}	7.816×10^{-5}	0.7215
1000	0.2681	1213	0.07938	2.440×10^{-4}	4.594×10^{-5}	1.713×10^{-4}	0.7022
1500	0.1925	1266	0.11793	4.839×10^{-4}	5.562×10^{-5}	2.889×10^{-4}	0.5969
2000	0.1502	1297	0.18590	9.543×10^{-4}	6.426×10^{-5}	4.278×10^{-4}	0.4483
Oxygen, O_2							
-50	1.7475	984.4	0.02067	1.201×10^{-5}	1.616×10^{-5}	9.246×10^{-6}	0.7694
0	1.4277	928.7	0.02472	1.865×10^{-5}	1.916×10^{-5}	1.342×10^{-5}	0.7198
50	1.2068	921.7	0.02867	2.577×10^{-5}	2.194×10^{-5}	1.818×10^{-5}	0.7053
100	1.0451	931.8	0.03254	3.342×10^{-5}	2.451×10^{-5}	2.346×10^{-5}	0.7019
150	0.9216	947.6	0.03637	4.164×10^{-5}	2.694×10^{-5}	2.923×10^{-5}	0.7019
200	0.8242	964.7	0.04014	5.048×10^{-5}	2.923×10^{-5}	3.546×10^{-5}	0.7025
300	0.6804	997.1	0.04751	7.003×10^{-5}	3.350×10^{-5}	4.923×10^{-5}	0.7030
400	0.5793	1025	0.05463	9.204×10^{-5}	3.744×10^{-5}	6.463×10^{-5}	0.7023
500	0.5044	1048	0.06148	1.163×10^{-4}	4.114×10^{-5}	8.156×10^{-5}	0.7010
1000	0.3063	1121	0.09198	2.678×10^{-4}	5.732×10^{-5}	1.871×10^{-4}	0.6986
1500	0.2199	1165	0.11901	4.643×10^{-4}	7.133×10^{-5}	3.243×10^{-4}	0.6985
2000	0.1716	1201	0.14705	7.139×10^{-4}	8.417×10^{-5}	4.907×10^{-4}	0.6873
Water Vapor, H_2O							
-50	0.9839	1892	0.01353	7.271×10^{-6}	7.187×10^{-6}	7.305×10^{-6}	1.0047
0	0.8038	1874	0.01673	1.110×10^{-5}	8.956×10^{-6}	1.114×10^{-5}	1.0033
50	0.6794	1874	0.02032	1.596×10^{-5}	1.078×10^{-5}	1.587×10^{-5}	0.9944
100	0.5884	1887	0.02429	2.187×10^{-5}	1.265×10^{-5}	2.150×10^{-5}	0.9830
150	0.5189	1908	0.02861	2.890×10^{-5}	1.456×10^{-5}	2.806×10^{-5}	0.9712
200	0.4640	1935	0.03326	3.705×10^{-5}	1.650×10^{-5}	3.556×10^{-5}	0.9599
300	0.3831	1997	0.04345	5.680×10^{-5}	2.045×10^{-5}	5.340×10^{-5}	0.9401
400	0.3262	2066	0.05467	8.114×10^{-5}	2.446×10^{-5}	7.498×10^{-5}	0.9240
500	0.2840	2137	0.06677	1.100×10^{-4}	2.847×10^{-5}	1.002×10^{-4}	0.9108
1000	0.1725	2471	0.13623	3.196×10^{-4}	4.762×10^{-5}	2.761×10^{-4}	0.8639
1500	0.1238	2736	0.21301	6.288×10^{-4}	6.411×10^{-5}	5.177×10^{-4}	0.8233
2000	0.0966	2928	0.29183	1.032×10^{-3}	7.808×10^{-5}	8.084×10^{-4}	0.7833

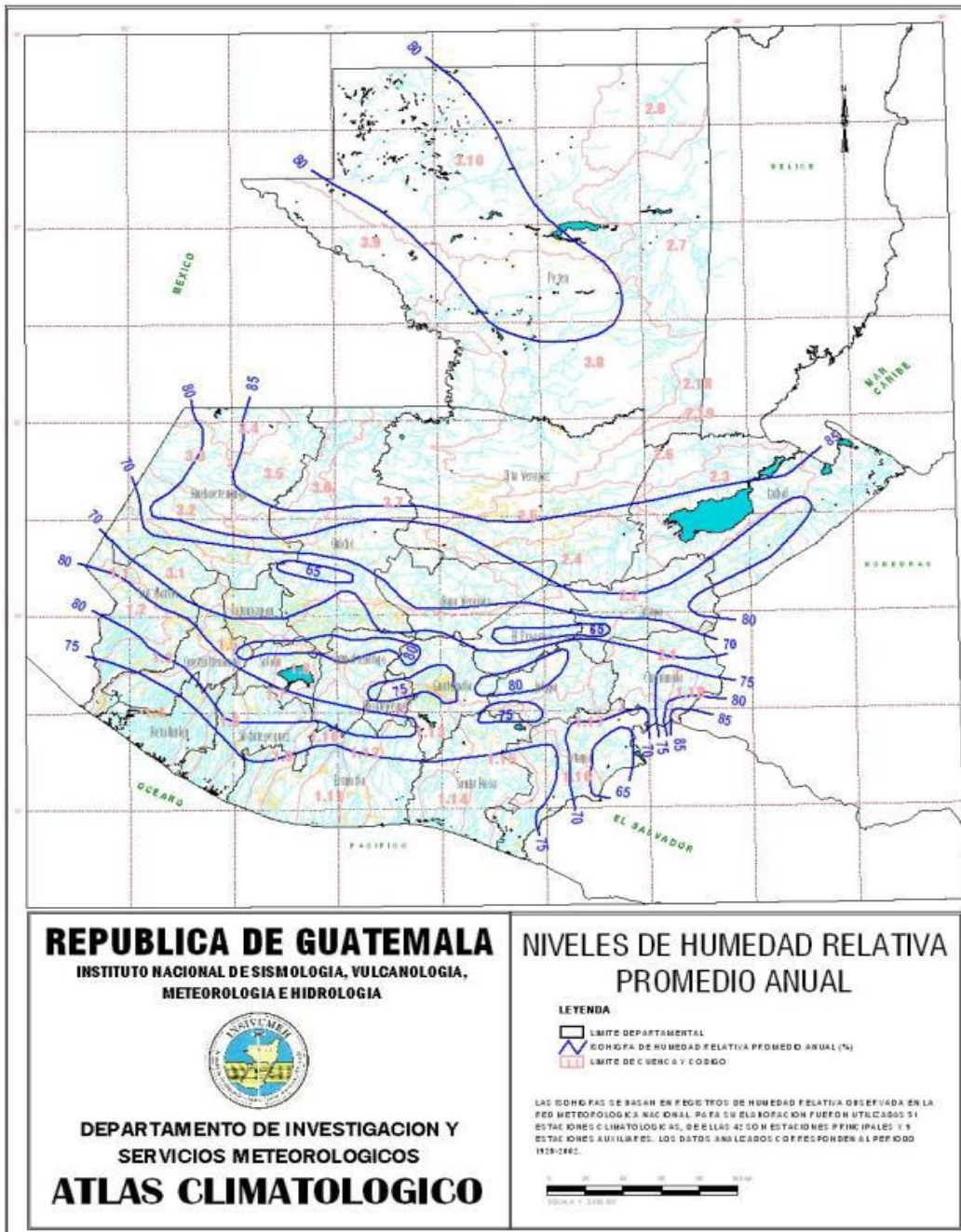
Fuente: Heat Transfer by Yanus Cengel, 2nd edition.

Figura 50. **Propiedades de la atmósfera a grandes altitudes**

TABLE A-17 Properties of the atmosphere at high altitude							
Altitude, <i>z</i> , m	Temperature, <i>T</i> , °C	Pressure, <i>P</i> , kPa	Gravity <i>g</i> , m/s ²	Speed of Sound, <i>c</i> , m/s	Density, <i>ρ</i> , kg/m ³	Viscosity <i>μ</i> , kg/m · s	Thermal Conductivity, <i>k</i> , W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789 × 10 ⁻⁵	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783 × 10 ⁻⁵	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777 × 10 ⁻⁵	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771 × 10 ⁻⁵	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764 × 10 ⁻⁵	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758 × 10 ⁻⁵	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752 × 10 ⁻⁵	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745 × 10 ⁻⁵	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739 × 10 ⁻⁵	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732 × 10 ⁻⁵	0.0244
2000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726 × 10 ⁻⁵	0.0243
2200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720 × 10 ⁻⁵	0.0242
2400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713 × 10 ⁻⁵	0.0241
2600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707 × 10 ⁻⁵	0.0240
2800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700 × 10 ⁻⁵	0.0239
3000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694 × 10 ⁻⁵	0.0238
3200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687 × 10 ⁻⁵	0.0237
3400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681 × 10 ⁻⁵	0.0236
3600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674 × 10 ⁻⁵	0.0235
3800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668 × 10 ⁻⁵	0.0234
4000	-10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661 × 10 ⁻⁵	0.0233
4200	-12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655 × 10 ⁻⁵	0.0232
4400	-13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648 × 10 ⁻⁵	0.0231
4600	-14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642 × 10 ⁻⁵	0.0230
4800	-16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635 × 10 ⁻⁵	0.0229
5000	-17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628 × 10 ⁻⁵	0.0228
5200	-18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622 × 10 ⁻⁵	0.0227
5400	-20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615 × 10 ⁻⁵	0.0226
5600	-21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608 × 10 ⁻⁵	0.0224
5800	-22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602 × 10 ⁻⁵	0.0223
6000	-24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595 × 10 ⁻⁵	0.0222
6200	-25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588 × 10 ⁻⁵	0.0221
6400	-26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582 × 10 ⁻⁵	0.0220
6600	-27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575 × 10 ⁻⁵	0.0219
6800	-29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568 × 10 ⁻⁵	0.0218
7000	-30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561 × 10 ⁻⁵	0.0217
8000	-36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527 × 10 ⁻⁵	0.0212
9000	-43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493 × 10 ⁻⁵	0.0206
10,000	-49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458 × 10 ⁻⁵	0.0201
12,000	-56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422 × 10 ⁻⁵	0.0195
14,000	-56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422 × 10 ⁻⁵	0.0195
16,000	-56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422 × 10 ⁻⁵	0.0195
18,000	-56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422 × 10 ⁻⁵	0.0195

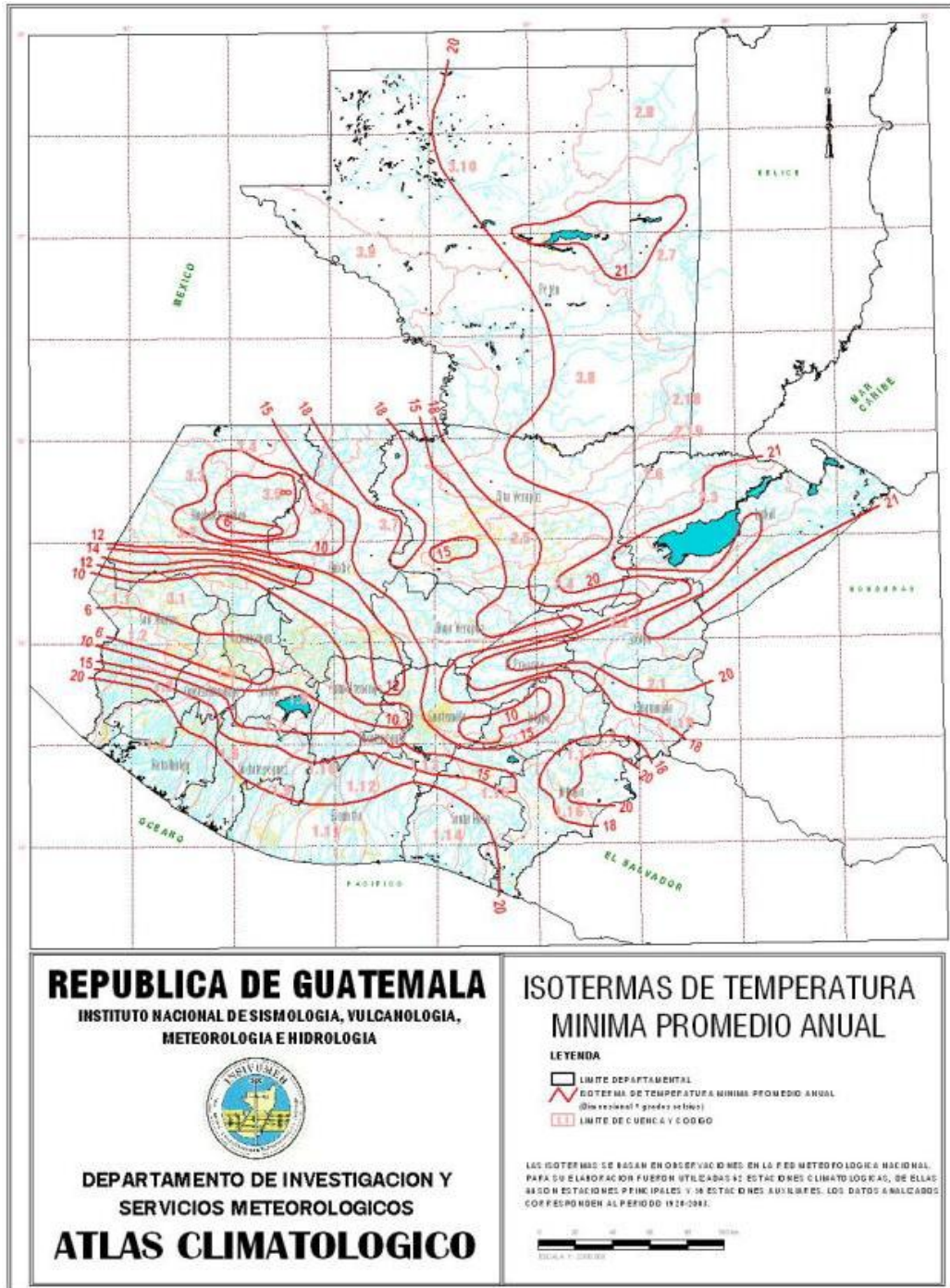
Fuente: Cengel Yanus. *Heat Transfer*. 2nd edition.

Figura 51. Niveles promedio de humedad relativa promedio anual



Fuente: www.insivumeh.com. Consulta: 26 de octubre de 2012.

Figura 52. Isotermas de temperatura mínima promedio anual



Fuente: www.insivumeh.com. Consulta: 26 de octubre de 2012.

Figura 53. Propiedades de metales sólidos

TABLE A-3 Properties of solid metals											
Composition	Melting Point, K	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1000
Aluminum:											
Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218	
						482	798	949	1033	1146	
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	65	163	186	186		
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)		2790	883	168	68.2			174	185		
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8
						203	1114	2191	2604	2823	3018
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04			
						112	120	127			
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85
						128	600	1463	1892	2160	2338
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7			
						198	222	242			
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4
						192	384	484	542	581	616
Cobalt	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1
						236	379	450	503	550	628
Copper:											
Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352
						252	356	397	417	433	451
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14		42	52	59		
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17		785	160	545		
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149		
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19				
						237	362				
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4
						190	290	337	348	357	375
Gold	1336	19,300	129	317	127	327	323	311	298	284	270
						109	124	131	135	140	145
Iridium	2720	22,500	130	147	50.3	172	153	144	138	132	126
						90	122	133	138	144	153
Iron:											
Pure	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8
						216	384	490	574	680	975
Armco (99.75% pure)		7870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3
						215	384	490	574	680	975
Carbon steels:											
Plain carbon (Mn ≤ 1% Si ≤ 0.1%)		7854	434	60.5	17.7			56.7	48.0	39.2	30.0
								487	559	685	1169
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			58.7	48.8	39.2	31.3
								487	559	685	1168
Carbon-silicon (Mn ≤ 1% 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7817	446	51.9	14.9			49.8	44.0	37.4	29.3
								501	582	699	971

Fuente: Cengel Yanus. *Heat Transfer*. 2nd edition.

Tabla VIII. Distribución Chi cuadrado X^2

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722	1,6424	1,3233	1,0742	0,8735	0,7083	0,5707	0,4549
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942	3,2189	2,7726	2,4079	2,0996	1,8326	1,5970	1,3863
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514	5,3170	4,6416	4,1083	3,6649	3,2831	2,9462	2,6430	2,3660
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794	6,7449	5,9886	5,3853	4,8784	4,4377	4,0446	3,6871	3,3567
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152	7,2893	6,6257	6,0644	5,5731	5,1319	4,7278	4,3515
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461	8,5581	7,8408	7,2311	6,6948	6,2108	5,7652	5,3481
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479	9,8032	9,0371	8,3834	7,8061	7,2832	6,8000	6,3458
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271	11,0301	10,2189	9,5245	8,9094	8,3505	7,8325	7,3441
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837	13,2880	12,2421	11,3887	10,6564	10,0060	9,4136	8,8632	8,3428
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872	14,5339	13,4420	12,5489	11,7807	11,0971	10,4732	9,8922	9,3418
11	31,2635	28,7291	26,7569	24,7250	21,9200	19,6752	17,2750	15,7671	14,6314	13,7007	12,8987	12,1836	11,5298	10,9199	10,3410
12	32,9092	30,3182	28,2997	26,2170	23,3367	21,0261	18,5493	16,9893	15,8120	14,8454	14,0111	13,2661	12,5838	11,9463	11,3403
13	34,5274	31,8830	29,8193	27,6882	24,7356	22,3620	19,8119	18,2020	16,9848	15,9839	15,1187	14,3451	13,6356	12,9717	12,3398
14	36,1239	33,4262	31,3194	29,1412	26,1189	23,6848	21,0641	19,4062	18,1508	17,1169	16,2221	15,4209	14,6853	13,9961	13,3393
15	37,6978	34,9494	32,8015	30,5780	27,4884	24,9958	22,3071	20,6030	19,3107	18,2451	17,3217	16,4940	15,7332	15,0197	14,3389
16	39,2518	36,4555	34,2671	31,9999	28,8453	26,2962	23,5418	21,7931	20,4651	19,3689	18,4179	17,5646	16,7795	16,0425	15,3385
17	40,7911	37,9462	35,7184	33,4087	30,1910	27,5871	24,7690	22,9770	21,6146	20,4887	19,5110	18,6330	17,8244	17,0646	16,3382
18	42,3119	39,4220	37,1564	34,8052	31,5264	28,8693	25,9894	24,1555	22,7595	21,6049	20,6014	19,6993	18,8679	18,0860	17,3379
19	43,8194	40,8847	38,5821	36,1908	32,8523	30,1435	27,2036	25,3289	23,9004	22,7178	21,6891	20,7638	19,9102	19,1069	18,3376
20	45,3142	42,3358	39,9969	37,5663	34,1696	31,4104	28,4120	26,4976	25,0375	23,8277	22,7745	21,8265	20,9514	20,1272	19,3374
21	46,7963	43,7749	41,4009	38,9322	35,4789	32,6706	29,6151	27,6620	26,1711	24,9348	23,8578	22,8876	21,9915	21,1470	20,3372
22	48,2676	45,2041	42,7957	40,2894	36,7807	33,9245	30,8133	28,8224	27,3015	26,0393	24,9390	23,9473	23,0307	22,1663	21,3370
23	49,7276	46,6231	44,1814	41,6383	38,0756	35,1725	32,0069	29,9792	28,4288	27,1413	26,0184	25,0055	24,0689	23,1852	22,3369
24	51,1790	48,0336	45,5584	42,9798	39,3641	36,4150	33,1962	31,1325	29,5533	28,2412	27,0960	26,0625	25,1064	24,2037	23,3367
25	52,6187	49,4351	46,9280	44,3140	40,6465	37,6525	34,3816	32,2825	30,6752	29,3388	28,1719	27,1183	26,1430	25,2218	24,3366
26	54,0511	50,8291	48,2898	45,6416	41,9231	38,8851	35,5632	33,4295	31,7946	30,4346	29,2463	28,1730	27,1789	26,2395	25,3365
27	55,4751	52,2152	49,6450	46,9628	43,1945	40,1133	36,7412	34,5736	32,9117	31,5284	30,3193	29,2266	28,2141	27,2569	26,3363
28	56,8918	53,5939	50,9936	48,2782	44,4608	41,3372	37,9159	35,7150	34,0266	32,6205	31,3909	30,2791	29,2486	28,2740	27,3362
29	58,3006	54,9662	52,3355	49,5878	45,7223	42,5569	39,0875	36,8538	35,1394	33,7109	32,4612	31,3308	30,2825	29,2908	28,3361

Fuente: <http://www.mat.uda.cl/hsalinas/cursos/2009/estadistica/semestre%202/tabla-ji.pdf>. 10 de diciembre de 2012.

Tabla IX. Distribución Chi cuadrado X^2 (Continuación)

v/p	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9975	0,999
1	0,3573	0,2750	0,2059	0,1485	0,1015	0,0642	0,0358	0,0158	0,0039	0,0010	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
2	1,1957	1,0217	0,8616	0,7133	0,5754	0,4463	0,3250	0,2107	0,1026	0,0506	0,0201	0,0100	0,0050	0,0020
3	2,1095	1,8692	1,6416	1,4237	1,2125	1,0052	0,7978	0,5844	0,3518	0,2158	0,1148	0,0717	0,0449	0,0243
4	3,0469	2,7528	2,4701	2,1947	1,9226	1,6488	1,3665	1,0636	0,7107	0,4844	0,2971	0,2070	0,1449	0,0908
5	3,9959	3,6555	3,3251	2,9999	2,6746	2,3425	1,9938	1,6103	1,1455	0,8312	0,5543	0,4118	0,3075	0,2102
6	4,9519	4,5702	4,1973	3,8276	3,4546	3,0701	2,6613	2,2041	1,6354	1,2373	0,8721	0,6757	0,5266	0,3810
7	5,9125	5,4932	5,0816	4,6713	4,2549	3,8223	3,3583	2,8331	2,1673	1,6899	1,2390	0,9893	0,7945	0,5985
8	6,8766	6,4226	5,9753	5,5274	5,0706	4,5936	4,0782	3,4895	2,7326	2,1797	1,6465	1,3444	1,1042	0,8571
9	7,8434	7,3570	6,8763	6,3933	5,8988	5,3801	4,8165	4,1682	3,3251	2,7004	2,0879	1,7349	1,4501	1,1519
10	8,8124	8,2955	7,7832	7,2672	6,7372	6,1791	5,5701	4,8652	3,9403	3,2470	2,5582	2,1558	1,8274	1,4787
11	9,7831	9,2373	8,6952	8,1479	7,5841	6,9887	6,3364	5,5778	4,5748	3,8157	3,0535	2,6032	2,2321	1,8338
12	10,7553	10,1820	9,6115	9,0343	8,4384	7,8073	7,1138	6,3038	5,2260	4,4038	3,5706	3,0738	2,6612	2,2141
13	11,7288	11,1291	10,5315	9,9257	9,2991	8,6339	7,9008	7,0415	5,8919	5,0087	4,1069	3,5650	3,1118	2,6172
14	12,7034	12,0785	11,4548	10,8215	10,1653	9,4673	8,6963	7,7895	6,5706	5,6287	4,6604	4,0747	3,5820	3,0407
15	13,6790	13,0298	12,3809	11,7212	11,0365	10,3070	9,4993	8,5468	7,2609	6,2621	5,2294	4,6009	4,0697	3,4825
16	14,6555	13,9827	13,3096	12,6243	11,9122	11,1521	10,3090	9,3122	7,9616	6,9077	5,8122	5,1422	4,5734	3,9417
17	15,6328	14,9373	14,2406	13,5307	12,7919	12,0023	11,1249	10,0852	8,6718	7,5642	6,4077	5,6973	5,0916	4,4162
18	16,6108	15,8932	15,1738	14,4399	13,6753	12,8570	11,9462	10,8649	9,3904	8,2307	7,0149	6,2648	5,6234	4,9048
19	17,5894	16,8504	16,1089	15,3517	14,5620	13,7158	12,7727	11,6509	10,1170	8,9065	7,6327	6,8439	6,1673	5,4067
20	18,5687	17,8088	17,0458	16,2659	15,4518	14,5784	13,6039	12,4426	10,8508	9,5908	8,2604	7,4338	6,7228	5,9210
21	19,5485	18,7683	17,9843	17,1823	16,3444	15,4446	14,4393	13,2396	11,5913	10,2829	8,8972	8,0336	7,2889	6,4467
22	20,5288	19,7288	18,9243	18,1007	17,2396	16,3140	15,2787	14,0415	12,3380	10,9823	9,5425	8,6427	7,8648	6,9829
23	21,5095	20,6902	19,8657	19,0211	18,1373	17,1865	16,1219	14,8480	13,0905	11,6885	10,1957	9,2604	8,4503	7,5291
24	22,4908	21,6525	20,8084	19,9432	19,0373	18,0618	16,9686	15,6587	13,8484	12,4011	10,8563	9,8862	9,0441	8,0847
25	23,4724	22,6156	21,7524	20,8670	19,9393	18,9397	17,8184	16,4734	14,6114	13,1197	11,5240	10,5196	9,6462	8,6494
26	24,4544	23,5794	22,6975	21,7924	20,8434	19,8202	18,6714	17,2919	15,3792	13,8439	12,1982	11,1602	10,2561	9,2222
27	25,4367	24,5440	23,6437	22,7192	21,7494	20,7030	19,5272	18,1139	16,1514	14,5734	12,8785	11,8077	10,8733	9,8029
28	26,4195	25,5092	24,5909	23,6475	22,6572	21,5880	20,3857	18,9392	16,9279	15,3079	13,5647	12,4613	11,4973	10,3907
29	27,4025	26,4751	25,5391	24,5770	23,5666	22,4751	21,2468	19,7677	17,7084	16,0471	14,2564	13,1211	12,1278	10,9861

Fuente: <http://www.mat.uda.cl/hsalinas/cursos/2009/estadistica/semestre%202/tabla-ji.pdf>. 10 de diciembre de 2012.