

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

**ACTUALIZACION DEL BALANCE ENERGETICO DEL  
INGENIO LOS TARROS  
SANTA LUCIA COTZUMALGUAPA-ESCUINTLA**

INFORME FINAL DEL EJERCICIO FINAL SUPERVISADO

PRESENTADO  
POR

**CESAR ADALBERTO LANDAVERRY VILLEDA**

GUATEMALA, JUNIO DE 1,996.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

08

T(3749)

C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración mi trabajo de ejercicio profesional supervisado, realizado en el Ingenio Los Tarros, Santa Lucía Cotzumalguapa-Escuintla, el cual se titula:

**ACTUALIZACION DEL BALANCE ENERGETICO DEL INGENIO LOS TARROS  
SANTA LUCIA COTZUMALGUAPA-ESCUINTLA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Unidad de Ejercicio Profesional Supervisado de la Facultad de Ingeniería.



CESAR ADALBERTO LANDAVERRY VILLEDA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



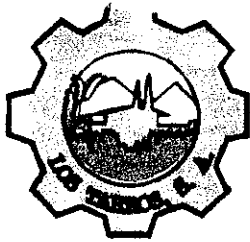
FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK
VOCAL PRIMERO	ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA
VOCAL SEGUNDO	ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO
VOCAL TERCERO	ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ
VOCAL CUARTO	BR. FERNANDO WALDEMAR DE LEON CONTRERAS
VOCAL QUINTO	BR. PEDRO IGNACIO ESCALANTE PASTOR
SECRETARIO	ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK
EXAMINADOR	ING. CARLOS ANIBAL CHICOJAY COLOMA
EXAMINADOR	ING. JORGE CHILO SIGUERE R.
EXAMINADOR	ING. CARLOS ALBERTO FIGUEROA
SECRETARIO	ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ



# LOS TARROS, S. A.

SANTA LUCIA COTZ. ESCUINTLA  
TEL. 0845335

Septiembre 14 de 1,995

Ingeniero  
Pedro Quiroa  
Coordinador de E.P.S.  
Facultad de Ingeniería  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Ciudad

Respetable Ing. Quiroa:

Por este medio me permito enviarle un cordial saludo deseándole éxitos en todas sus actividades.

El motivo de la presente es para informarle que tuve a bien revisar y aprobar el Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.) titulado **ACTUALIZACION DEL BALANCE ENERGETICO DEL INGENIO LOS TARROS, SANTA LUCIA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**, del alumno **César Adalberto Landaverry Villeda** con número de carnet **88-11961**.

Sin otro particular por el momento, me suscribo de usted.

Atentamente,

  
ING. CARLOS RENE CIFUENTES  
No. de Colegiado 1843



**FACULTAD DE INGENIERIA**  
Unidad de Prácticas de Ingeniería  
Ejercicio Profesional Supervisado  
E.P.S

Ciudad Universitaria, Zona 12  
01012 Guatemala, Centroamérica

REF.EPS. 035.96

Guatemala, 6 de marzo de 1,996

Señor  
Ing. Jorge Siguere R.  
Director de la Escuela  
de Ingeniería Mecánica  
Presente

Señor Director:

Por este medio, estoy adjuntando el Informe Final, correspondiente al Trabajo de Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), titulado **ACTUALIZACION DEL BALANCE ENERGETICO DEL INGENIO "LOS TARROS" SANTA LUCIA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**, desarrollado por el estudiante universitario **CESAR ADALBERTO LANDAVERRY VILLEDA**, de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

Proyecto que fue asesorado por el Ingeniero **Carlos René Cifuentes**, Colegiado No. 1,843 y supervisado por el Ingeniero **Luis Antonio Tello Castro**.

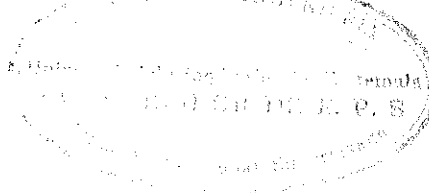
Considerando que se cumplieron los objetivos del trabajo, esta Unidad da su **APROBACION** al mismo y solicita el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Muy Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

ING. PEDRO QUIROGA MENDEZ  
COORDINADOR DE E.P.S.



PQM/lgg.  
c.c.: Archivo  
Anexo: El Informe Final mencionado.



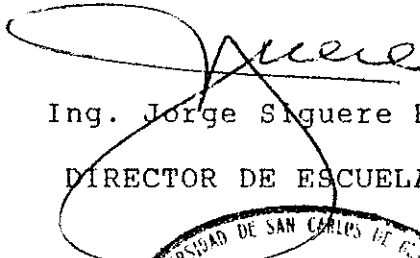
**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela Técnica, Ingeniería en Sistemas Ingeniería Electrónica y Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.

Apartado Postal 217-1-01-907, Guatemala  
Ciudad Universitaria, Zona 12  
Guatemala, Centroamérica

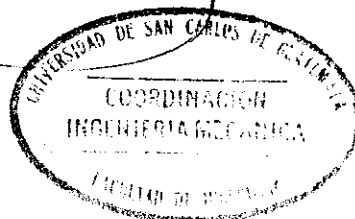
El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador de E. P. S. al trabajo de tesis titulado ACTUALIZACION DEL BALANCE ENERGETICO DEL INGENIO "LOS TARROS" SANTA LUCIA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, desarrollado por el estudiante César Adalberto Landaverry Villeda, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Jorge Siguere R.

DIRECTOR DE ESCUELA

Guatemala, marzo de 1, 996



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

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, Ingeniero Jorge C. Siguere Rockstroh, al trabajo de tesis titulado Actualización del Balance Energético del Ingenio Los Tarros Santa Lucía Cotzumalguapa-Escuintla, presentado por el estudiante universitario César Adalberto Landaverry Villeda, procede a la autorización para la impresión del mismo.

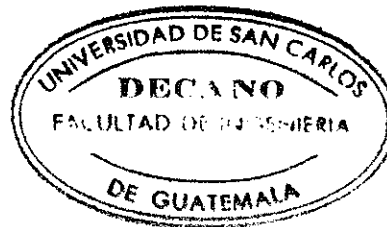
IMPRIMASE

ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK

DECANO

Guatemala, mayo de 1,996.

/behdei.



## AGRADECIMIENTOS

AL ING. SERGIO CABRERA

Por su apoyo y autorización para la realización del presente trabajo de tesis.

AL ING. CARLOS RENE CIFUENTES

Por el asesoramiento y colaboración para realizar dicho proyecto.

AL ING. ENRIQUE VELASQUEZ

Por su valiosa cooperación.

AL PERSONAL DEL INGENIO LOS TARROS

Por su apoyo y amistad brindada.

A LOS COMPAÑEROS DE E.P.S.

Por la serie de experiencias vividas durante la duración del proyecto.

AL INGENIO LOS TARROS S.A.

A TODAS LAS PERSONAS QUE DE UNA U OTRA FORMA COLABORARON EN LA REALIZACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO DE TESIS.



## ACTO QUE DEDICO

A DIOS,

Con amor y fe, ya que sin su ayuda hubiera sido imposible culminar mi carrera.

A MIS PADRES

Alfredo Enrique Landaverry Guzmán,  
Celia Villeda de Landaverry.  
Que esto sirva como una pequeña recompensa a su ayuda.

A MIS HERMANOS

Edgar, Consuelo, Iblin, Lidia, Eduardo, Ondina, Hilda ( Q.E.P.D.), Jerson y David.  
Por su apoyo incondicional.

A MIS SOBRINOS

Con cariño.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE PROMOCION

A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

A LA FACULTAD DE INGENIERIA

Y A USTED

Con respeto.

# INDICE GENERAL

LISTA DE ILUSTRACIONES	I
LISTA DE SIMBOLOS	III
GLOSARIO	IX
INTRODUCCION	XIV

## CAPITULO 1

### MONOGRAFIA GEOGRAFICA Y SOCIO-ECONOMICA DEL INGENIO LOS TARROS.

1.1 MONOGRAFIA GEOGRAFICA	1
1.2 MONOGRAFIA SOCIO-ECONOMICA	1
1.3 DESCRIPCION GENERAL DEL INGENIO LOS TARROS	3

## CAPITULO 2

### PRINCIPIOS DEL PROCESO DE FABRICACION DEL AZUCAR DE CAÑA.

2.1 INTRODUCCION	5
2.2 PREPARACION DE LA CAÑA	5
2.3 MOLIENDA Y EXTRACCION DEL JUGO	7
2.4 CLARIFICACION	8
2.4.1 SULFITACION	8
2.4.2 ALCALIZACION	9
2.4.3 CALENTAMIENTO	9
2.4.4 DECANTACION Y FILTRADO	10
2.5 EVAPORACION	11
2.6 CRISTALIZACION	11
2.7 CENTRIFUGACION Y RECOCCION DE MIELES	12
2.8 ALMACENAMIENTO Y SECADO DEL AZUCAR	13

## CAPITULO 3

### PRINCIPIOS DE TERMODINAMICA.

3.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	16
3.2 LEYES QUE GOBIERNAN LA TERMODINAMICA	18
3.2.1 LEY CERO DE LA TERMODINAMICA	18
3.2.2 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA	19
3.2.3 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA	19
3.2.4 TERCERA LEY DE LA TERMODINAMICA	19
3.3 PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS Y LOS GASES	19
3.3.1 PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL VAPOR	19
3.3.2 DIAGRAMAS TERMODINAMICOS	20
3.3.3 PROCESOS	22

3.4	LOS GASES IDEALES	22
3.5	CICLOS DE POTENCIA DEL VAPOR	23
3.5.1	CICLO CARNOT	23
3.5.2	CICLO RANKINE	25
3.5.3	EL CICLO DE RECALENTAMIENTO	27
3.6	TRANSFERENCIA DE CALOR	27
3.6.1	TRANSMISION POR CONDUCCION	27
3.6.2	TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION	28
3.6.3	TRANSMISION DE CALOR POR RADIACION	28
3.6.4	EQUIPO DE TRANSFERENCIA DE CALOR O INTERCAMBIADORES DE CALOR	29

## **CAPITULO 4**

### **GENERALIDADES SOBRE GENERADORES DE VAPOR.**

4.1	DEFINICIONES FUNDAMENTALES	31
4.2	CLASIFICACION DE LAS CALDERAS	31
4.2.1	CALDERAS PIROTUBULARES	32
4.2.2	CALDERAS ACUATUBULARES	32
4.2.3	CALDERAS DE TUBOS CURVOS O DOBLADOS	35
4.2.4	CALDERAS UTILIZADAS EN FABRICAS DE AZUCAR	37
4.3	CAPACIDAD DE PRODUCCION DE CALDERAS	38
4.4	COMPORTAMIENTO DE LAS CALDERAS.	40
4.5	ACCESORIOS DE LAS CALDERAS	41
4.5.1	MANOMETROS	42
4.5.2	INDICADORES DE NIVEL	42
4.5.3	CONTROLADOR DEL NIVEL DEL AGUA DE ALIMENTACION	43
4.5.4	VALVULAS DE SEGURIDAD	43
4.5.5	LOS PURGADORES	44
4.5.6	SOPLADORES DE HOLLIN	44
4.6	EQUIPOS AUXILIARES DE LAS CALDERAS	45
4.6.1	HOGARES DE LAS CALDERAS	45
4.6.2	CALENTADORES DE AIRE	50
4.6.3	RECALENTADORES O SOBRECALENTADORES	52
4.6.4	SATURADORES	52
4.6.5	ECONOMIZADORES	53
4.6.6	CONDENSADORES	53
4.6.7	SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTION Y AGUA DE ALIMENTACION EN CALDERAS	55
4.7	CALENTAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION DE CALDERAS	59
4.7.1	CALENTAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION	59
4.7.2	ACONDICIONAMIENTO DE AGUA DE ALIMENTACION DE CALDERAS	60
4.7.3	EQUIPO DE BOMBEO PARA LA ALIMENTACION DE CALDERAS	62

4.8	PRODUCCION DE TIRO, CHIMENEAS Y VENTILADORES	63
4.8.1	TIRO NATURAL	63
4.8.2	CHIMENEAS	64
4.8.3	TIRO MECANICO	64
4.8.4	VENTILADORES	66
4.9	PRINCIPIOS BASICOS PARA LA EFICIENCIA DE CALDERAS	66
4.9.1	PRUEBAS QUE DETERMINAN LA EFICIENCIA DE UNA CALDERA	66
4.9.2	PRINCIPALES PERDIDAS DE CALOR EN CALDERAS	68
4.9.3	POSIBLES SOLUCIONES PARA MEJORAR EFICIENCIA EN LAS CALDERAS	69

## **CAPITULO 5**

### **DESCRIPCION GENERAL DE LOS EQUIPOS ANALIZADOS EN EL BALANCE ENERGETICO.**

5.1	CONDICIONES Y ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO EXISTENTE	70
5.1.1	TURBINAS DE VAPOR	70
5.1.2	TURBOGENERADOR	73
5.1.3	SECADORA DE AZUCAR	75
5.1.4	CONDENSADORES-EYECTORES DE VAPOR	76
5.1.5	DEAREADOR O DESGASIFICADOR	77
5.1.6	CALENTADORES DE JUGO	79
5.1.7	EVAPORADORES	82
5.1.8	TACHOS	85
5.1.9	GENERADOR DE VAPOR	87
5.2	REQUERIMIENTOS DE VAPOR	90
5.3	PERDIDAS DE ENERGIA	93
5.3.1	PERDIDAS DEBIDAS A DEFECTOS O FALTA DE AISLAMIENTO TERMICO	93
5.3.2	PERDIDAS EN SISTEMAS DE VAPOR	94
5.3.3	PERDIDAS EN SISTEMAS DE COMBUSTION	95
5.3.4	PERDIDAS DE CALOR EN EL EXTERIOR DE LA CALDERA	95

## **CAPITULO 6**

### **DESARROLLO PRACTICO DEL BALANCE ENERGETICO.**

6.1	TOMA DE DATOS POR MUESTREO DE LOS DIFERENTES PARAMETROS UTILIZADOS EN EL BALANCE ENERGETICO	96
6.2	EQUIPOS CONSUMIDORES DE VAPOR SOBRECALENTADO	106
6.2.1	VAPOR REQUERIDO POR TURBINAS	106
6.2.2	CALCULOS REALIZADOS AL TURBOGENERADOR	108
6.2.3	VAPOR REQUERIDO POR LA SECADORA DE AZUCAR	112
6.2.4	VAPOR REQUERIDO POR JET DE VACIO Y OTROS ACCESORIOS	114

6.2.5 VAPOR REQUERIDO PARA LAVADO DE EQUIPOS Y PERDIDAS	118
6.3 CALCULO DE LA CANTIDAD DE JUGO PRODUCIDO	119
6.4 CALCULO DEL VAPOR REQUERIDO POR LOS CALENTADORES DE JUGO	121
6.4.1 CALOR ESPECIFICO DE LAS SOLUCIONES AZUCARADAS	121
6.4.2 CALOR NECESARIO EN LOS CALENTADORES	122
6.4.3 CANTIDAD DE VAPOR QUE NECESITAN LOS CALENTADORES	122
6.5 CALCULO DEL VAPOR REQUERIDO EN EL PROCESO DE COCCION O CRISTALICACION ( TACHOS )	126
6.6 CALCULO DEL VAPOR UTILIZADO POR EL DEAREADOR	127
6.7 CALCULO DEL VAPOR REQUERIDO EN EL MULTIPLE EFECTO O EVAPORADORES	128
6.8 CALCULOS CONCERNIENTES A LA CALDERA ALPHA # 1	139
6.8.1 PRODUCCION DE VAPOR	139
6.8.2 FACTOR DE VAPORIZACION	142
6.8.3 VAPORIZACION EQUIVALENTE	143
6.8.4 RENDIMIENTO	143
6.9 BALANCE ENERGETICO TOMANDO EN CUENTA LA ENERGIA GENERADA	144
6.9.1 VAPOR DIRECTO O DE ALTA PRESION	144
6.9.2 VAPOR DE ESCAPE	145
6.10 BALANCE TERMICO Y PERDIDAS DE ENERGIA	148
CONCLUSIONES	XVI
RECOMENDACIONES	XVII
REFERENCIAS	XVIII
BIBLIOGRAFIA	XX
ANEXOS	XXI

## LISTA DE ILUSTRACIONES

DESCRIPCION	PAGINA
Fotografía del Ingenio Los Tarros	4
Figura del diagrama de flujo de un Ingenio azucarero	6
Fotografía de la sección de envasado	14
Diagrama de flujo del proceso de fabricación de azúcar del Ingenio Los Tarros	15
Figura que muestra los tipos de presiones	18
Figura del diagrama temperatura-entropía del vapor de agua	21
Esquema del diagrama T-s del ciclo Carnot	24
Figura que muestra los elementos de un ciclo Rankine simple	25
Figura de los diagramas temperatura-entropía y entalpía-entropía del ciclo Rankine para el vapor de agua	26
Figura que muestra los esquemas de los tipos básicos de calderas medianas	33
Diagrama esquemático de la circulación natural del agua en una caldera	34
Esquema que muestra el interior de un domo de vapor	35
Esquema de una caldera marca Stirling	36
Figura de una parrilla tipo vertedero	48
Figura que muestra un calentador de aire tipo tubular	51
Diagrama de una sistema de control en una caldera	55
Diagrama de un sistema de control de combustión	57
Diagrama de un sistema de control de agua de alimentación	58
Diagrama de un sistema de control de la temperatura del vapor	59
Fotografía del conjunto de suavizadores del agua de calderas del Ingenio los Tarros	62
Fotografía de las chimeneas del Ingenio	64
Fotografía de una de las turbinas del departamento de molinos	71
Fotografía del turbogerador Westinghouse	74
Fotografía del secador de azúcar	76
Fotografía del calentador deareador	79
Fotografía de los calentadores de jugo	81
Fotografía del departamento de evaporadores	85
Fotografía de los tachos del Ingenio	87
Fotografía de la caldera Alpha # 1	90
Esquema de energía de un Ingenio azucarero	92
Figura del balance de materiales del departamento de Molinos	120
Figura de las variables que participan en el calentamiento del jugo	123
Esquema del Departamento de Evaporación con sus variables	129
Figura del balance de energía de un evaporador	130
Figura del balance de masa en evaporadores	138

Balance de vapor del Ingenio Los Tarros	147
Tabla de la nomenclatura de las propiedades del vapor	20
Tabla de características del conjunto de turbinas	72
Tabla de datos de molienda	97
Tabla de análisis de gases de combustión a la entrada del calentador de aire de la caldera	98
Tabla de análisis de gases de combustión en la salida del calentador de aire de la caldera	99
Tabla de datos de la secadora de azúcar	100
Tabla de datos de los calentadores de jugo	101
Tabla de presiones en evaporadores	102
Tabla de temperaturas en evaporadores	103
Tabla de los grados brix en evaporadores	104
Tabla de producción de vapor de la caldera Alpha # 1	105
Tabla de consumo de vapor por el conjunto de turbinas	107

## LISTA DE SIMBOLOS

SIMBOLO	DESCRIPCION	DIMENSIONAL
v -----	Velocidad del jugo,	pie/segundo.
V -----	Cantidad de aire en el secador, Evaporación del quintuple efecto,	Lb; Lb .
P -----	Presión, Potencia del generador, Peso del azúcar por secarse, Peso del jugo por calentar,	Lb/pulgada <sup>2</sup> ; kW; Lb/hora; Lb/hora;
A -----	Area, Cantidad de aire requerido por el secador, Cantidad de jugo que fluye,	pie <sup>2</sup> o pulgadas <sup>2</sup> ;  Lb/hora; Lb/hora.
m -----	Longitud, Exceso de aire empleado en la combustión,	metros;  % .
Pabs = PSIA-----	Presión absoluta,	Lb/pulgada <sup>2</sup> .
Pman = PSIG-----	Presión manométrica,	Lb/pulgada <sup>2</sup> .
Patm-----	Presión atmosférica,	Lb/pulgada <sup>2</sup> .
T -----	Temperatura, Temperatura del vapor caliente,	°F; °F.
°F -----	Grados Fahrenheit.	
°C -----	Grados Centígrados.	
°K -----	Grados Kelvin.	
R -----	Grados Rankine.	
Lb/h-----	Libras/hora.	



IV

<b>h</b> -----	Entalpía del vapor producido, Humedad del azúcar con relación a la unidad,	BTU/Lb;  fracción decimal.
<b><math>\eta_c</math></b> -----	Eficiencia del ciclo Carnot,	fracción decimal.
<b><math>\eta_R</math></b> -----	Rendimiento térmico,	% .
<b><math>\eta'_R</math></b> -----	Rendimiento térmico total,	% .
<b>x</b> -----	Calidad del vapor, Título el vapor en la descarga de la turbina, Evaporación del primer efecto,	% ;  fracción decimal; Lb.
<b>k</b> -----	Conductividad térmica, Coeficiente de transmisión de calor,	BTU/(hora. ft. °F); BTU/ft <sup>2</sup> /K/hora.
<b>T<sub>1</sub></b> -----	Temperatura superior,	°F.
<b>T<sub>2</sub></b> -----	Temperatura inferior,	°F.
<b>ASME</b> -----	American Society of Mechanical Engineer.	
<b>Lb</b> -----	Libras.	
<b>cm</b> -----	Centímetro.	
<b>mm</b> -----	Milímetro.	
<b>kilo</b> -----	1,000.	
<b>kcal</b> -----	kilocalorías.	
<b>MBTU</b> -----	1,000,000 de BTU.	
<b>m/seg</b> -----	Metros/segundo.	
<b>CO</b> -----	Monóxido de carbono.	
<b>CO<sub>2</sub></b> -----	Bióxido de carbono.	
<b>O<sub>2</sub></b> -----	Oxígeno.	

V

<b>kW</b> -----	1,000 watts.	
<b>m<sub>s</sub></b> -----	Flujo de vapor, Peso del vapor producido,	Lb/hora; Lb/hora.
<b>Q</b> -----	Producción de la caldera, Cantidad de calor transmitido,	BTU/Lb; BTU.
<b>h<sub>f</sub></b> -----	Entalpía del agua de alimentación, Entalpía del líquido saturado,	BTU/Lb; BTU/Lb.
<b>F.V.</b> -----	Factor de vaporización.	
<b>V.E.</b> -----	Vaporización equivalente,	Lb/hora.
<b>e<sub>b</sub></b> -----	Rendimiento de la caldera,	%.
<b>m<sub>f</sub></b> -----	Peso del combustible quemado,	Lb/hora.
<b>F</b> -----	Poder calorífico del bagazo,	Btu/Lb.
<b>m<sub>t</sub></b> -----	Consumo teórico de vapor,	Lb/kWh.
<b>h<sub>1</sub></b> -----	Entalpía del vapor a la entrada de la turbina,	BTU/Lb.
<b>h<sub>2</sub></b> -----	Entalpía del vapor a la salida de la turbina,	BTU/Lb.
<b>s</b> -----	Entropía del vapor,	BTU/Lb°R;
<b>S</b> -----	Superficie de calentamiento,	ft <sup>2</sup> .
<b>s<sub>f</sub></b> -----	Entropía del líquido saturado,	BTU/Lb°R.
<b>s<sub>fg</sub></b> -----	Entropía de evaporación,	BTU/Lb °R.
<b>m<sub>r</sub></b> -----	Consumo real de vapor,	Lb/kw-hora.
<b>ε<sub>g</sub></b> -----	Rendimiento termodinámico de la turbina,	%.
<b>n</b> -----	Eficiencia del generador,	%.

## VI

$e_1$ -----	Eficiencia o rendimiento térmico,	% .
$h_{f2}$ -----	Entalpía del líquido a la presión absoluta del vapor de escape,	BTU/Lb.
<b>HEAT-RATE</b> -----	Razón de calor,	BTU/kWh.
$H_1$ -----	Peso del vapor de agua contenido en el aire saturado a la temperatura ambiente,	Lb/1,000 Lb.
$H_2$ -----	Peso del vapor de agua contenido en el aire saturado a la temperatura de salida del secador,	Lb/1,000 Lb.
$a_0$ -----	Densidad del aire a $t_0$ grados,	Lb/pie <sup>3</sup> .
$e_0$ -----	Peso del vapor contenido en el aire saturado,	Lb/pie <sup>3</sup> .
$q_1$ -----	Calor necesario para calentar el aire,	BTU/hora.
$c$ -----	Calor específico del vapor, Calor específico del aire , Calor específico de las soluciones azucaradas,	0.475; 0.240; BTU/Lb °F.
$t_0$ -----	Temperatura ambiente,	°F.
$q_2$ -----	Calor necesario para evaporar el agua contenida en el azúcar,	BTU/hora.
$t_2$ -----	Temperatura del aire caliente,	°F.
$Q_T$ -----	Cantidad de energía utilizada en la secadora de azúcar,	BTU/Lb.
$w$ -----	Cantidad de vapor que fluye, Humedad del bagazo,	Lb/minuto; %.
$p$ -----	Pérdida de presión,	Lb/pulgada <sup>2</sup> .
$D$ -----	Diámetro interior del tubo,	pulgadas.
$d$ -----	Peso del vapor o masa específica,	pie <sup>3</sup> .

## VII

L -----	Longitud equivalente del tubo,	pies.
B -----	Brix de la solución, Razón de evaporación,	°BRIX; % .
Q <sub>c</sub> -----	Calor a los calentadores de jugo,	BTU.
M <sub>j</sub> -----	Peso del jugo por hora, Cantidad de jugo por hora,	Lb/hora; Lb/hora.
T <sub>sal</sub> -----	Temperatura del jugo que sale,	°F.
T <sub>ent</sub> -----	Temperatura del jugo que entra,	°F.
Q <sub>v</sub> -----	Energía perdida por el vapor,	BTU.
Q <sub>j</sub> -----	Energía ganada por el vapor,	BTU.
M <sub>v</sub> -----	Libras de vapor requeridas, Vapor vegetal requerido por el primer calentador, Calor transmitido por libra de bagazo quemado,	Lb/hora; Lb/hora; BTU/Lb.
C <sub>j</sub> -----	Calor específico del jugo,	BTU/Lb °F.
AT -----	Diferencia de temperatura lograda por el calentamiento,	°F.
h <sub>v</sub> -----	Entalpía de condensación del vapor, Entalpía del vapor a las condiciones existentes,	BTU/Lb. BTU/Lb.
t <sub>1</sub> -----	Temperatura del jugo frío,	°F.
Q <sub>1</sub> -----	Energía del vapor que entra,	BTU/Lb.
Q <sub>2</sub> -----	Energía del jugo que entra,	BTU/Lb.
Q <sub>3</sub> -----	Energía del condensado que sale,	BTU/Lb.
Q <sub>4</sub> -----	Energía de la evaporación que sale,	BTU/Lb.

## VIII

$Q_5$ -----	Energía del jugo que sale,	BTU/Lb.
$W$ -----	Cantidad de vapor de escape que necesita el primer efecto,	Lb/hora.
$T_{JE}$ -----	Temperatura del jugo que entra,	°F.
$T_{JS}$ -----	Temperatura del jugo que sale,	°F.
$h_g$ -----	Entalpía de evaporación,	BTU/Lb.
$h_{fg}$ -----	Entalpía del fluido-gas,	BTU/Lb.
$M_c$ -----	Vapor vegetal requerido por los tachos,	Lb/hora.
$Y$ -----	Evaporación del segundo efecto,	Lb.
$Z$ -----	Evaporación del tercer efecto,	Lb.
$U$ -----	Evaporación del cuarto efecto,	Lb.
V.C.N.-----	Valor calorífico neto,	BTU/Lb.
$t$ -----	Temperatura de los gases finales,	°F.
$q$ -----	Pérdida de calor sensible en los gases de combustión,	BTU/ Lb.
$H$ -----	Energía necesaria para evaporar una Libras de agua a las condiciones existentes	BTU/Lb.
$h$ -----	Entalpía del vapor producido o generado,	BTU/Lb.
P.C.-----	Pérdidas por condensación,	%.
P.C.R.-----	Pérdidas por convección y radiación,	%.
#/hora-----	Libras por hora.	

## GLOSARIO

### ALCALIZACION

Proceso que consiste en agregar cierta cantidad de cal al jugo de caña con el objeto de impurezas prepararlo para poder eliminar las contenidas en él.

### ATOMIZAR

Proceso que consiste en expandir el combustible en forma de neblina o llovizna para mezclarlo convenientemente con el aire y realizar la combustión.

### BAGAZO

Material sólido y fibroso subproducto de la molienda de la caña de azúcar; se utiliza como combustible para generar energía .

### BTU

Unidad térmica británica; es la cantidad de energía necesaria para elevar a una libra de agua de una temperatura de 63°F a 64°F.

### CACHAZA

Sedimento obtenido en los clarificadores debido a la precipitación de impurezas que provoca la alcalización.

### CENTRIFUGACION

Proceso que consiste en separar los cristales de azúcar de las mieles por medio de la acción de fuerza centrífuga.

### CALANDRIA

Parte interior de un intercambiador de calor simple compuesto por una serie de tubos por los cuales circula el jugo y alrededor el vapor. Es el elemento calefactor de los evaporadores y tachos.

### CALOR LATENTE

Energía necesaria para hacer cambiar de fase una sustancia.

### CALOR SENSIBLE

Energía necesaria para elevar la temperatura de una sustancia pero sin que cambie de fase.

### CLARIFICACION

Proceso realizado con el objeto de eliminar tanto las impurezas solubles como insolubles del guarapo, mediante el uso de cal, productos químicos y calor.

### COMBUSTION

Combinación de oxígeno con un combustible, que da como resultado la liberación de energía. Oxidación de una sustancia combustible acompañada con calor y usualmente luz.

**CONDENSADO**

Líquido que se forma cuando el vapor se enfría o ha perdido su energía.

**CAÑA MALETEADA**

Caña transportada en camiones de plataforma en forma de paquetes o maletas y sujetas con cadenas.

**CAÑA A GRANEL**

Caña suelta que se transporta por medio de jaulas haladas por cabezales.

**CRISTALIZADORES**

Son tanques de acero en forma de U, provistos de agitadores horizontales para mantener la masa-cocida en movimiento lento y continuo.

**COLCHON DE CAÑA**

Altura determinada de caña viajando desde las mesas alimentadoras y conductores hasta la entrada del primer molino.

**EVAPORACION**

Proceso que consiste en extraer agua de una solución por medio de la aplicación de calor.

**GASES INCONDENSABLES**

Es una serie de gases que se forman en la evaporación del jugo que no se condensan, es necesaria su evacuación, ya que reducen la superficie de transferencia de calor.

**GUARAPO**

Nombre que se le da al jugo de caña extraído de los molinos.

**HOGAR**

Recinto en donde se quema el combustible, se forma o se construye de ladrillos refractarios.

**IMBIBICION**

Proceso de aplicar agua fría o caliente al bagazo, con el objeto de aumentar la extracción de sacarosa en el último molino.

**INCRUSTACIONES**

Es una serie de sedimentos o suciedades que se adhieren a una superficie de calentamiento y no permiten que existe transferencia de calor entre dos fluidos.

**MACERACION**

Proceso en el cual se rocía o aplica guarapo procedente del último de los molinos a el bagazo con el objeto de hacer una mejor extracción de sacarosa .

**MAMPARA**

Es una estructura metálica o refractaria que se utiliza para darle dirección a un fluido.

**MASA-COCIDA**

Masa densa compuesta por cristales de azúcar y mieles.

**MAZA**

Cilindro metálico ranurado que se utiliza para la extracción del jugo de la caña.

**MELAZA**

Nombre que se le da a la miel final; es el producto del lavado de una masa-cocida C.

**MELADURA**

Nombre que recibe el jugo al salir de los evaporadores.

**MOLIENDA**

Proceso de extracción del jugo de la caña a través de las mazas de los molinos.

**MULTIPLE EFECTO**

Proceso que consiste en evaporar cierta cantidad de agua a una sustancia por medio de la aplicación de calor en un conjunto de cuerpos llamados evaporadores conectados en serie; puede costar de tres hasta seis cuerpos .

**PANTE**

Lote de caña sembrado con determinada extensión.

**PAREDES DE AGUA**

Hilera continua de tubos adosados a una pared de refractario, son altamente eficientes en la absorción de energía radiante, se logra conseguir con ellas grandes producciones de vapor, además de proteger las paredes de la erosión.

**PRESION DE VACIO**

Es una presión por debajo ( presión negativa ) de la presión atmosférica. Generalmente se da en pulgadas de mercurio.

**PROCESO REVERSIBLE**

Es aquel que sucede cuando un sistema y sus alrededores pueden regresar a sus estados iniciales efectuando el proceso inverso.

**PUNTO TRIPLE**

Estado que se define cuando las fases líquida, sólida y gaseosa de una sustancia pura están en equilibrio.



**PURGADO**

Proceso que se efectúa con el objeto de eliminar de suciedad o de gases indeseables a un fluido contenido en un recipiente con el objeto de purificarlo.

**QUEMADOR**

Accesorio que se utiliza para atomizar el combustible, y para que pueda ser realizada su combustión en el hogar.

**RODETE**

Es un elemento de una turbina en forma de una rueda compuesta por una serie de paletas en las cuales el vapor descarga su energía de presión y velocidad .

**SULFITACION**

Proceso que tiene por objetivo decolorar el azúcar y se realiza por medio de los gases de azufre que se hacen pasar en contracorriente con el guarapo.

**SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO**

Es aquella superficie en uno de cuyos lados el fluido está recibiendo calor, y en el otro, el gas o el refractario se está enfriando.

**SUSTANCIA PURA**

Es una sustancia que mantiene una estructura molecular invariable.

**TACHOS**

Intercambiadores de calor de forma cilíndrica, cuya función es producir y desarrollar los cristales de azúcar a partir de la meladura que los alimenta.

**TANDEM:**

Con este nombre se denomina a un determinado número de molinos conectados en serie.

**TOBERA**

Dispositivo que recibe un fluido y lo guía su expansión hasta una presión menor; convierte parte de la energía que entra en energía cinética de salida.

**TRAMPA DE VAPOR**

Accesorio que sirve como un drenaje de todos los condensados, producto del enfriamiento del vapor, así como para otro tipo de gases.

**VACUOMETRO**

Instrumento utilizado para medir la presión de vacío o negativa de un sistema.

**VAPOR:**

Fase gaseosa del agua.

**VAPOR DE ESCAPE**

Es el vapor que fue utilizado por una turbina y que ya no cuenta con la presión original, por haber cedido parte de su energía.

**VAPOR DIRECTO**

Es el vapor que sale de las calderas y que circula con una alta presión.

**VAPOR VEGETAL**

Es el que se ha producido como consecuencia de la evaporación del guarapo en múltiple efecto.

**VAPOR SATURADO**

Vapor a la temperatura de la caldera para la presión existente y sin contenido de líquido condensado.

**VAPOR SOBRECALENTADO**

Vapor por encima de la temperatura de saturación de la caldera a la presión existente.

**ZAFRA**

Tiempo en que se cosecha o procesa la caña de azúcar.



## INTRODUCCION

Uno de los aspectos más importantes para el funcionamiento de una industria es la obtención de energía necesaria para su operación. Específicamente la industria del azúcar necesita grandes cantidades de energía eléctrica y calorífica para poder realizar económica y eficientemente la elaboración del azúcar. Esto lo logra utilizando como combustible el bagazo, que es un subproducto de la molienda de la caña, el cual se quema en calderas para generar vapor de agua, que será utilizado en los turbogeneradores y para el proceso de fabricación del ingenio. El vapor de agua es uno de los fluidos más económicos utilizados en la industria desde hace varios siglos y no ha encontrado un sustituto en la presente época.

La situación del sector energético del país es crítica, en especial la del sector eléctrico, el cual tiene como fuentes de generación: las hidroeléctricas y plantas térmicas que funcionan con vapor o con gas. En cuanto a las hidroeléctricas, existe el problema de que los embalses de almacenamiento de agua no mantienen su nivel constante debido al bajo régimen de lluvias por lo cual la planta trabaja en un porcentaje bajo de su capacidad. Las termoeléctricas utilizan como combustible para su operación, los derivados del petróleo, el que es un producto escaso y caro, generalmente se importa del extranjero y representa fuga de divisas. Lo anterior ha llevado a ciertas organizaciones a tratar de encontrar una solución, haciendo estudios en la industria azucarera que representa una fuerte productora de energía.

La realización del presente trabajo permite al lector conocer un poco más sobre fabricación de azúcar realizada en ingenios azucareros; lo que da oportunidad a estudiantes universitarios para poder culminar su carrera e introducirlos en el campo de trabajo en la industria aplicando los conocimientos adquiridos en las aulas.

Este trabajo pretende determinar la energía generada y consumida por los distintos equipos utilizados en el proceso de fabricación de azúcar en el Ingenio los Tarros con una determinada cantidad de caña molida por día. Se toma como punto de partida el montaje de un generador de vapor proveniente del Ingenio La Unión, al cual se le harán modificaciones para mejorar su eficiencia y capacidad de producción de vapor. Los resultados que dé el balance serán de gran utilidad para determinar una eficiente operación del equipo y la posibilidad de comercializar un porcentaje de energía eléctrica producida a partir de los turbogeneradores. Uno de los factores de extrema importancia para la producción de energía en la empresa son las condiciones del combustible, ya que si no cumple con ciertas características de fibra y humedad el flujo de energía se mantendrá oscilando en perjuicio de la operación normal de los equipos.

En el primer capítulo, se da una monografía geográfica y socioeconómica del lugar en donde se encuentra instalada la planta de fabricación de la empresa. También se da una descripción en forma general de los departamentos que forman el ingenio.

Los aspectos relevantes del proceso de fabricación del azúcar de caña son mencionados en el capítulo dos.

El capítulo tres introduce al lector a conocer los principios más importantes de termodinámica que serán utilizados para el análisis de cualquier sistema que genera o consume energía.

En el capítulo cuatro, se describen generalidades sobre generadores de vapor; son relevantes aspectos tales como tipos, equipo principal y accesorios.

Los equipos tomados en cuenta para realizar el balance energético y su principio de funcionamiento se muestran en el capítulo cinco.

En el capítulo seis, se analizan los diferentes cálculos con base en mediciones tabuladas de cada uno de los aspectos analizados en el proyecto, se menciona entre ellos el generador de vapor, el consumo de vapor de los equipos, así como el balance entre la energía generada y consumida.

Las conclusiones, recomendaciones, referencias, bibliografía y anexos se describen en la parte final.

## **CAPITULO No. 1**

### **1. MONOGRAFIA GEOGRAFICA Y SOCIO-ECONOMICA DEL INGENIO LOS TARROS**

#### **1.1 MONOGRAFIA GEOGRAFICA**

Las empresas que se dedican al proceso de elaboración de azúcar de caña se les llama comúnmente en Guatemala Ingenios azucareros; en otras partes son conocidas como fábricas de azúcar. Tienen sus plantaciones y específicamente sus fábricas instaladas en los departamentos de Escuintla y Suchitepéquez.

En el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa del Departamento de Escuintla, tienen montadas sus plantas para elaborar el azúcar de caña los Ingenios La Unión, Madre Tierra, el Baul y **Los Tarros**.

El **Ingenio Los Tarros** tiene sus instalaciones en la Finca que lleva por nombre Finca Los Tarros, distante de la Ciudad de Santa Lucía Cotzumalguapa 6 kilómetros y ésta a su vez dista de la Ciudad Capital 90 kilómetros. Para llegar al ingenio, se toma la carretera que conduce al municipio de San Pedro Yepocapa del Departamento de Chimaltenango.

Está topográficamente delimitado de la siguiente forma: al norte con las fincas Giralda y Versailles, al sur con la finca San Francisco, al este con la Finca Santa Sofía y al oeste con el Ingenio El Baul y el río Cristóbal.

El área que ocupa la comunidad de la Finca Los Tarros e ingenio es de aproximadamente 22 manzanas. Tiene como coordenadas geográficas: longitud oeste 91 grados, 05 minutos, 58 segundos; latitud norte 14 grados, 16 minutos, 05 segundos.

El clima con que goza la comunidad es agradable, ya que se encuentra a 700 metros sobre el nivel del mar y se puede catalogar como templado.

#### **1.2 MONOGRAFIA SOCIO-ECONOMICA**

Guatemala en un país eminentemente agrícola; tiene entre sus principales productos el azúcar proveniente del proceso de la caña de azúcar. Una buena cantidad del azúcar producida por los ingenios se exporta hacia otros países, lo cual representa ingresos monetarios o divisas para el territorio, el otro porcentaje se consume internamente ya que representa uno de los principales productos de la canasta básica familiar y otro parte se utiliza en fábricas de dulces, embotelladoras de gaseosas, etc.

La ciudad de Santa Lucía ha prosperado grandemente debido a la serie de industrias (entre ellas la azucarera ) que alrededor de ella funcionan, proporcionando fuentes de trabajo para una gran cantidad de personas. Cuenta con todos los medios necesarios para que sus habitantes puedan vivir cómodamente tales como: Guatel, Correos y telégrafos, centros comerciales, servicio de buses hacia el área rural y hacia la capital, bomberos Voluntarios, sanatorio para servicio médico, etc. Además cuenta con varios

centros de enseñanza primaria, Institutos de enseñanza media y colegios con diversidad de carreras para que los jóvenes puedan prepararse convenientemente para ser ciudadanos útiles al país.

El Ingenio Los Tarros representa una fuente de trabajo para muchas personas. En tiempo de reparación se necesitan de 150 a 170 personas para los diferentes departamentos, comprende los meses de Mayo a Octubre. En tiempo de cosecha que generalmente se conoce como zafra, el número de personas que laboran es de 350 a 400, y está comprendida entre los meses de Noviembre hasta Abril.

La empresa proporciona una serie de prestaciones entre las cuales podemos mencionar: indemnización, vacaciones, aguinaldo y bono 14. Además que la ley exige a la empresa el servicio médico hacia el trabajador por medio del Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, aunque también un médico pagado por la empresa visita dos veces por semana al ingenio para realizar consulta a los trabajadores proporcionando algunas medicinas. En caso de un tratamiento de alto costo, la empresa puede proporcionar un préstamo al trabajador. Cuando ocurre la muerte de un empleado o familiar, la empresa suministra una ayuda económica a la familia doliente.

Además se ha implementado como una forma de capacitar y dar la oportunidad a los trabajadores para poder superarse un programa de estudio por madurez, que comprende toda la enseñanza primaria hasta el tercero básico. Se les imparten con regularidad cursos de capacitación tales como soldadura eléctrica y autógena, electricidad, seguridad e higiene industrial, mantenimiento de maquinaria, etc., que son impartidos por el Instituto nacional de capacitación y productividad INTECAP, así como empresas proveedoras de accesorios y maquinaria para los ingenios.

A los empleados que tienen el deseo de estudiar una carrera a nivel medio e incluso universitario, la empresa les proporciona un porcentaje de la colegiatura además de darles permiso para que puedan asistir al centro de enseñanza.

La empresa cuenta con una cooperativa denominada Asociación Solidarista de Trabajadores de Ingenio Los Tarros, ASTILT, la cual otorga a los trabajadores que son socios un paquete de servicios tales como: venta de productos comestibles y electrodomésticos al crédito, seguro de vida, ahorro y repartición de dividendos al final de cada zafra de acuerdo al monto de lo ahorrado y al tiempo que tiene como miembro activo. La cooperativa tiene entre otros servicios un comedor y dos comisariatos para la venta de productos varios.

En cuanto a instalaciones se refiere, la finca Los Tarros conjuntamente con el Ingenio cuenta con los siguientes edificios: varias viviendas para los trabajadores, ingenieros e incluso un hotel; una escuela de enseñanza primaria para los hijos de los trabajadores con campos de foot-ball y basket-ball a la cual asisten una población de 250 a 300 alumnos; las instalaciones propiamente de la fábrica; oficinas de auditoría y división agrícola, así como un edificio que alberga a los elementos de seguridad de la empresa. Existe un complejo habitacional con una cocina tipo industrial especialmente para empleados que se dedican a labores agrícolas, generalmente en tiempo de zafra.

En total la comunidad está compuesta por aproximadamente 50 familias con unas 300 personas. Las actividades principales de sus habitantes son corte y siembra de caña, corte de café y trabajo propiamente en el Ingenio.

### **1.3 DESCRIPCION DEL INGENIO**

En un principio, la actividad principal de la empresa se centraba en la elaboración de panela y venta de mieles para el añejado de licores, fabricación de alcohol, alimentación de ganado, etc. La maquinaria con que inició operaciones el Ingenio, fué traída de la finca nacional Santa Cecilia de San Antonio Suchitepéquez. Tenía una producción en el año de 1,959 cuando se molían 90 toneladas de caña de 135 quintales de azúcar en un período de 24 horas.

El nombre que lleva el ingenio se atribuye a un plantación grande de bambú que existió originando la denominación de Tarrales que despues cambió por el de Tarros. En la actualidad, el Ingenio ha tenido varios cambios, se ha catalogado en cuanto al volumen de producción como mediano, mientras en lo que a rendimiento se refiere o sea a la obtención de libras de azúcar por tonelada de caña se encuentra ubicado en el **PRIMER LUGAR**. La producción aproximada de azúcar por día es de 5,000 a 5,500 quintales de 2,300 a 2500 toneladas de caña molida, con un rendimiento entre 220 a 230 Lbs de azúcar/ton de caña.

El ingenio se encuentra dividido en dos áreas principales: maquinaria y fábrica.

#### **AREA DE MAQUINARIA**

Pertencen a esta sección los departamentos de:

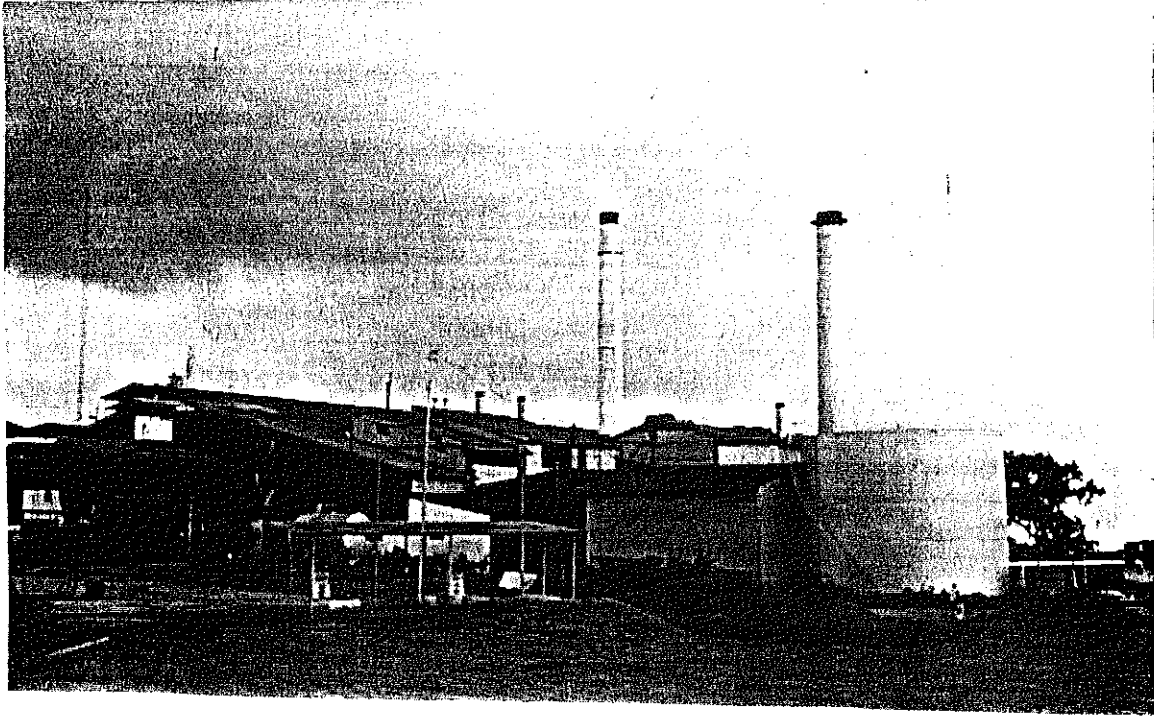
- calderas,
- molinos, turbinas y reductores,
- electricidad,
- talleres de soldadura, tornos y mecánica automotriz,
- instrumentación,
- centrifugas,
- báscula y patio de caña.

#### **AREA DE FABRICACION**

- clarificación,
- evaporación,
- tachos,
- cristalizadores,
- envasado,
- laboratorio.



En la figura 1.3, se muestra una fotografía de las instalaciones del Ingenio Los Tarros.



**Figura 1.3**  
**Fotografía de las instalaciones del Ingenio Los Tarros.**

## **CAPITULO No. 2**

### **2. PRINCIPIOS DEL PROCESO DE FABRICACION DEL AZUCAR DE CAÑA**

#### **2.1 INTRODUCCION**

En este capítulo, se describen en forma breve las distintas etapas del proceso de fabricación de azúcar de caña, de manera que el lector se familiarice con ciertos términos y conozca el recorrido que hace la caña desde la plantación hasta el producto final: azúcar, que tiene como subproductos la melaza, el bagazo y energía eléctrica (cogeneración para autoconsumo).

En la figura 2.1, se muestran en forma general, las distintas etapas del proceso de elaboración de azúcar realizado en ingenios modernos; existen algunas variantes que dependen del diseño de la instalación.

#### **2.2 PREPARACION DE LA CAÑA**

El proceso da inicio desde que los profesionales del campo, por medio de análisis de laboratorio, determinan la parcela o pante que se encuentra ya en condiciones de corte para efectuar su traslado hacia el ingenio. El corte puede realizarse por medios mecánicos y manuales; el que es utilizado en Guatemala y en forma específica en el ingenio es el manual, ya sea que la caña sea cortada verde o que previamente el cañaveral se queme para facilitar el mismo.

Existen varias formas para poder transportar la caña desde las parcelas hacia el patio de caña localizado en el ingenio; los más conocidos son: por medio de camiones de plataforma en los cuales la caña es amarrada en forma de paquetes o maletas por medio de cadenas, que da origen al término maleteado que es la forma en la cual trabaja el ingenio Los Tarros; la otra forma es el acarreo o transporte por medio de jaulas haladas por camiones; se conoce esta forma como a granel. Existe un proyecto para implementar este último método en la próxima zafra.

Cada uno de los camiones debe registrar el contenido de su carga en peso en la báscula; esta lectura es de mucha utilidad para cálculos estadísticos llevados a cabo por los distintos departamentos del ingenio.

Las fábricas de azúcar de caña funcionan las 24 horas, de lunes a domingo, durante 150 días. En el caso particular, en la empresa existen las llamadas paradas programadas cada 15 días (día Domingo), para hacer las reparaciones necesarias de la maquinaria. Como se mencionó anteriormente, este tipo de empresas funciona continuamente, con lo cual es necesario aprovisionarse de caña para poder trabajar tanto en el día como en la noche, ésto se hace porque el transporte de caña se realiza de las 6 de la mañana hasta las 9 de la noche.

La descarga de la caña se realiza por medio de grúas, ya sean del tipo estacionario o por medio de grúas móviles; se hace directamente en las mesas alimentadoras o en el patio de caña.

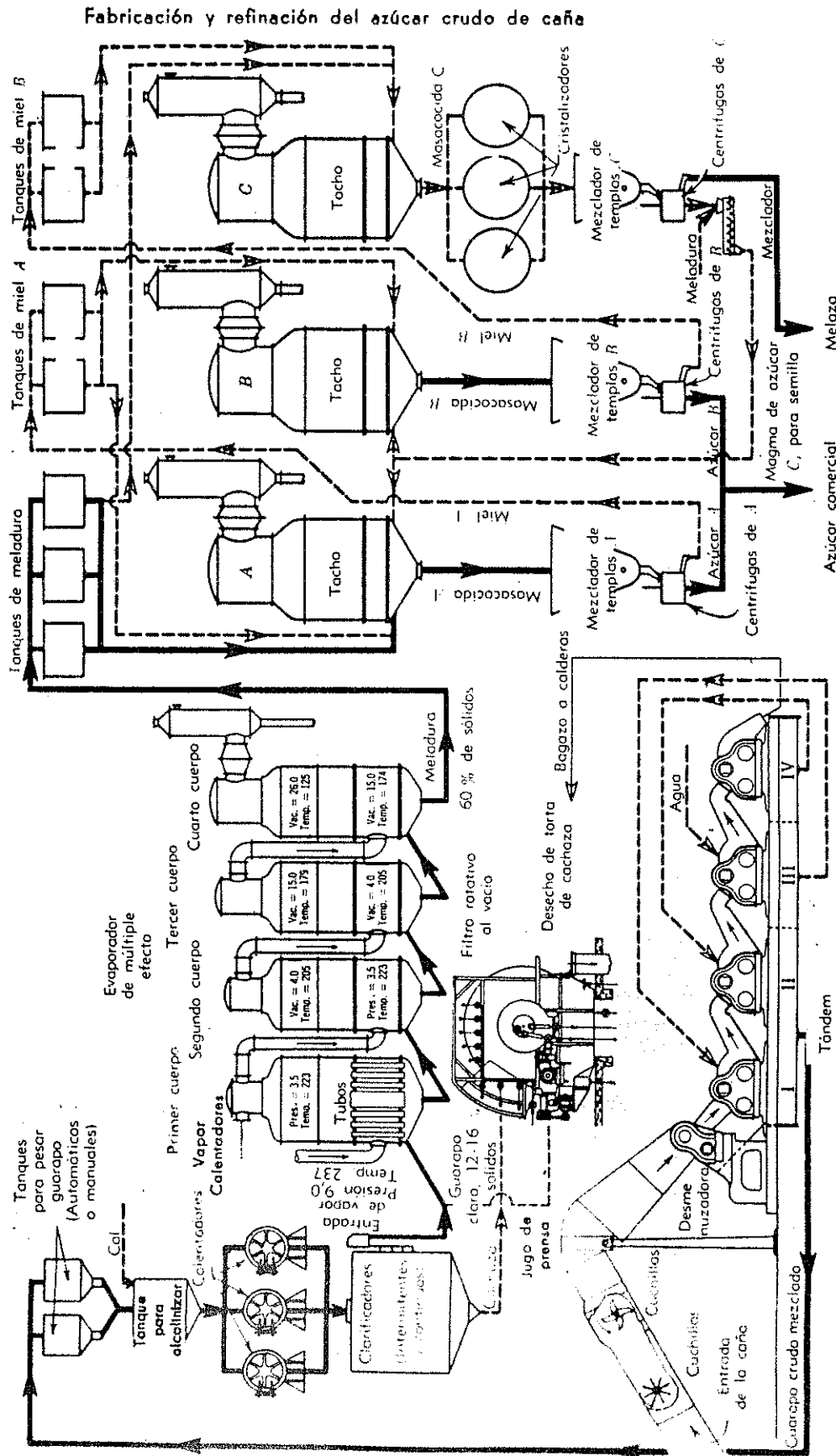


FIGURA 4.1. Diagrama de flujo de un ingenio de crudos.

Figura 2.1  
Diagrama del proceso de elaboración de azúcar de caña en un ingenio moderno.

Las mesas alimentadoras son las encargadas de transportar la caña hacia un conductor que a su vez la dirige hacia las picadoras, que se encargan de prepararla convenientemente previo a su paso por el tándem de molinos. Estas mesas son auxiliadas por medio de un conjunto de cuchillas giratorias movidas por medio de un motor eléctrico, para mantener un flujo constante de caña, no permitiendo el trabajo excesivo de las picadoras.

Con el objeto de limpiar la caña de tierra y arena que pueda ésta traer, es necesario hacer un lavado y en algunos casos un pre-lavado con agua fría o caliente proveniente de los condensados, manteniendo la calidad del producto final: azúcar y prevenir incrustaciones en el equipo subsiguiente.

Las máquinas picadoras son de gran utilidad, ya que permiten, con el rompimiento de la corteza de la caña, transformarla en una masa compacta y homogénea que favorece la capacidad de extracción del jugo en el tándem de molinos.

Un aspecto que toman muy en cuenta los ingenios azucareros en sus diseños es la instalación de un separador magnético, antes que la caña ya preparada realice su paso por el conjunto de molinos, atrapando cuanto material ferreo extraño circula, y protegiendo desgaste o roturas en las máquinas que preceden al proceso.

### **2.3 MOLIENDA Y EXTRACCION DEL JUGO**

La molienda se realiza con el paso de la caña ya preparada y con un flujo constante mediante un nivelador que dosifica, por un conjunto de rodillos llamados mazas, que se encuentran colocados horizontalmente en forma triangular sobre un soporte metálico; todo esto es con el objeto de hacer la extracción del jugo.

En las fábricas de azúcar, el conjunto de molinos puede estar constituido de 4 a 6 molinos colocados uno a continuación de otro. Actualmente en el ingenio se trabaja con un tándem de 4 molinos, se tiene como parte del proyecto la instalación de una quinta unidad con el objeto de mejorar la extracción de sacarosa de la caña e incluso con la alternativa de incrementar la cantidad de caña molida.

Anteriormente se mencionó cómo se encuentran colocadas las mazas de cada molino y que éste constaba de tres, aunque la mayoría de ingenios modernos ha incrementado la instalación de una cuarta maza con el objeto de hacer más efectiva la extracción de sacarosa.

Esta extracción se realiza por la compresión de los rodillos o mazas sobre el colchón de caña previamente preparada. Las mazas están constituidas por un eje de acero que gira sobre chumaceras; la toma de potencia se hace por medio de coronas; en la parte central tienen una camisa de hierro fundido con un rayado especial por medio de un torneado, el cual permite mayor agarre sobre la caña y mayor compresión entre mazas.

La potencia necesaria para el accionamiento de los diferentes molinos, es obtenida por medio de turbinas de vapor de contrapresión. Es conveniente la instalación de reductores de velocidad, ya que las turbinas funcionan a altas velocidades, mientras que los molinos sólo necesitan de 5 a 7 revoluciones por minuto en su funcionamiento normal.

La maza accionada en los molinos es la que se encuentra colocada en la parte de arriba y se le llama maza superior, y transmite la fuerza a las mazas colocadas abajo llamadas cañera y bagacera, por medio de un juego de engranes. Estas mazas reciben dichos nombres debido a la entrada y salida de caña. El colchón de caña realiza su traslado de un molino hacia el otro por medio de conductores intermedios.

Para ayudar a mejorar la extracción de sacarosa de la caña, se rocía la torta de bagazo al salir de cada unidad moledora con guarapo residual del último de los molinos a los intermedios llamando a este proceso maceración y con agua caliente obtenida de los condensados de los últimos vasos evaporadores y que recibe por nombre imbibición.

El bagazo, procedente del último de los molinos, es un subproducto de la molienda y contiene una humedad aproximada entre 45 y 55%. Es enviado por medio de un conductor al departamento de calderas, donde es utilizado como combustible para la generación de vapor. Existen ingenios en otros países, en los cuales se utiliza otro tipo de combustible, que le da al bagazo otras utilidades como: fabricación de papel, construcción de tablas de bagazo prensado, etc.

El jugo, al salir de los diferentes molinos, es llamado guarapo crudo y contiene cierta cantidad de residuos de fibra; los cuales son atrapados en un filtro localizado en el conductor de bagazo. Este conjunto de residuos, llamado bagacillo, es enviado al departamento de clarificación para darle consistencia a la cachaza. El jugo ya limpio es recolectado y enviado al Departamento de Fabricación.

## **2.4 CLARIFICACION**

La fase de clarificación en la fabricación de azúcar es muy importante, pues determina la calidad del producto final, así como facilita la operación de los procesos subsiguientes tales como: la evaporación y cristalización.

El guarapo crudo, proveniente del departamento de molinos, es ácido, turbio y de color verduzco. Uno de los objetivos del proceso de purificación del jugo, es la eliminación de la mayor cantidad de impurezas contenidas en el mismo.

A continuación, se da una descripción de las distintas etapas del proceso de clarificación, tanto para la fabricación de azúcar cruda como para la blanca.

### **2.4.1 SULFITACION**

Este proceso es utilizado para la obtención de azúcar blanca, con lo cual para la fabricación de azúcar cruda llamada de exportación se utiliza en un porcentaje mínimo.

El sulfitor consiste en tanques o torres rectangulares( en el caso de la empresa construidos de madera), en los cuales se deja precipitar el jugo crudo; se aspira en el trayecto gas sulfuroso, proveniente de la quema de azufre en hornos especiales para ese fin. El flujo entre jugo y gas se da a contracorriente.

Existen varias formas de sulfitación, el utilizado comúnmente es el sulfitado en caliente, que tiene la conveniencia de no permitir incrustaciones en los calentadores.

El sulfitado o también llamado azufrado presenta varias ventajas, entre las cuales podemos mencionar: el jugo decanta más rápidamente, las masas cocidas son menos viscosas y se cuecen en menos tiempo, mejora el color del azúcar y por último aumenta la capacidad de centrifugado.

Otros procedimientos para la fabricación de azúcar blanca usados por otros ingenios son, por ejemplo: la sulfitación de meladura, clarificación de meladura e incluso la carbonatación. La empresa utiliza el azufrado o sulfitado del jugo crudo.

#### **2.4.2 ALCALIZACION**

Consiste en agregar al jugo cierta cantidad de cal para neutralizar la acidez natural del jugo, para evitar que el jugo sea demasiado corrosivo y facilite la remoción de impurezas tanto solubles como insolubles.

El mezclado de la cal con el jugo se realiza en tanques cilíndricos accionados por motores eléctricos. La dosificación es muy importante; poca cantidad de cal produce una decantación deficiente y un jugo turbio, mientras una cantidad excesiva da como resultado oscurecimiento de jugos, aumento de cenizas y una producción muy grande de melaza.

Las proporciones utilizadas de cal en las fábricas de azúcar, generalmente se toman por tonelada de caña molida y ésta oscila entre 1 a 1.25 lbs. La variable que se va a medir en este proceso es el PH del jugo ya alcalizado que consiste en determinar el grado de acidez del mismo; es aconsejable un valor cercano a 7.

El jugo ya alcalizado es bombeado hacia las superficies de calentamiento.

#### **2.4.3 CALENTAMIENTO**

Este se realiza en intercambiadores de calor llamados calentadores, que consisten en superficies cilíndricas en cuyo interior se instala una determinada cantidad de tubos (generalmente de cobre), por los cuales circula en su parte interna el jugo por calentar. En los espacios existentes entre los tubos, se le hace circular vapor ya sea procedente de la expansión (escape) del vapor directo que ingresa a las turbinas o del vapor generado por la ebullición del jugo en los vasos evaporadores. El calentamiento se efectúa por transferencia de calor entre los fluidos en este caso jugo alcalizado y vapor.

Con el calentamiento del jugo alcalino hasta el punto de ebullición, se logra la coagulación de la albúmina; algunas grasas, ceras y el precipitado que se forma engloba tanto a los sólidos en suspensión como a las partículas más finas.

En cuanto a su ayuda en el proceso de evaporación, permite con la elevación de la temperatura del jugo al estado de ebullición, a que los evaporadores realicen la función para la cual fueron diseñados y por ende no existan pérdidas de energía y tiempo en el proceso.

#### 2.4.4 DECANTACION Y FILTRADO

Una vez el jugo ha pasado por las fases de sulfitado, alcalizado y calentamiento, es necesario dejarlo decantar para separar el jugo claro del precipitado que se formó en su masa.

Se conocen varios métodos para realizar la decantación, entre los cuales se pueden mencionar: defecadores, defecadores discontinuos y defecadores continuos o clarificadores.

El método utilizado en el ingenio es la decantación por medio de clarificadores. Estos consisten en un recipiente cilíndrico cerrado con varias bandejas cónicas colocadas en su interior, montadas una sobre la otra sujetas a un eje central que gira muy lentamente. El jugo que va a decantarse entra en la parte superior y luego fluye a través de las bandejas depositando en ellas la cachaza, la cual es empujada por medio de raspadores hacia el lugar de salida que se encuentra, ya sea al centro donde hay un tubo que la envía hacia la parte inferior o en la periferia de las mismas.

El jugo obtenido al cual se le denomina jugo claro o clarificado, previo a ser bombeado al siguiente paso de su recorrido, recibe un tratamiento de filtración por medio de láminas con una serie de orificios muy finos.

El uso generalizado de la defecación por medio de clarificadores lo determinan sus ventajas tales como: combina la economía con la simplicidad de su instalación, mantiene la calidad del jugo y conserva el calor del mismo, no permitiendo pérdidas de temperatura entre los calentadores y el múltiple efecto.

La cachaza que es un producto de la decantación, contiene cierta cantidad de sacarosa por lo cual es necesario hacerla pasar por un proceso de lavado y filtrado, con el objeto de minimizar las pérdidas y por lo mismo aumentar el rendimiento en la producción (se expresa en lbs de azúcar por tonelada de caña). Esta fase de filtración se puede realizar por medio de filtros de prensa, filtros mecánicos y el actualmente utilizado en los ingenios modernos, que es por medio de filtros rotativos continuos al vacío.

El filtro consiste en un tambor que gira alrededor de un eje horizontal movido por un motor eléctrico, el cual se sumerge una parte en el líquido por filtrar. La periferia de este tambor se divide en secciones, cubiertas por medio de telas perforadas, a las cuales se les aplica vacío con el objeto de succionar el líquido y queden atrapados en los orificios el bagacillo (utilizado para darle consistencia a la cachaza) y los materiales en suspensión. A esta materia se le efectúa un lavado con agua caliente, con el objeto de extraer sacarosa para luego hacerle un secado por medio de la aplicación siempre de vacío.

El material completamente seco es desprendido del filtro por medio de un raspador de hule, y le hace caer en un gusano metálico que lo mezcla con agua para luego ser bombeado al campo, ya que constituye un buen fertilizante para los cañaverales.

El jugo filtrado se bombea hacia el tanque de jugo alcalizado para reiniciar el proceso, aunque hay ingenios que lo recirculan a la entrada del clarificador.

## 2.5 EVAPORACION

El jugo clarificado, que posee casi la misma composición que el jugo crudo extraído (con la excepción de las impurezas precipitadas por el tratamiento con cal) contiene aproximadamente 85% de agua. Las dos terceras partes de esta agua se evaporan en evaporadores al vacío de múltiple efecto, los cuales consisten en una sucesión (generalmente cuatro) de celdas de ebullición al vacío llamados cuerpos, dispuestos en serie para que en cada cuerpo haya más vacío que en el cuerpo inmediatamente anterior y de esta forma el jugo que dicho cuerpo contiene pueda hervir a menor temperatura. Así, los vapores producidos en un cuerpo podrán calentar a ebullición el jugo que contenga el siguiente. Con el uso de este sistema, el vapor que se introduce al primer cuerpo logra producir evaporación en múltiple efecto. El vapor que sale del último evaporador, llamado generalmente melador, va a un condensador.

El jarabe (meladura en Latinoamérica) sale en forma continua del último cuerpo con aproximadamente 65% de sólidos y 35% de agua.

En el ingenio se utiliza el sistema de 5 cuerpos llamado de forma común quintuple efecto.

## 2.6 CRISTALIZACION

La cristalización se lleva a cabo en recipientes al vacío de simple efecto denominados tachos. En los cuales se concentra la meladura hasta quedar saturada de azúcar. Al llegar a este punto, se producen cristales de siembra para que sirvan de núcleos a los cristales de azúcar, y se va añadiendo más meladura a medida que se evapora el agua. Los cristales originales, que fueron formados por la destreza del operador o tachero del cristizador (tacho), o por el control mediante instrumentos, crecen sin que se formen cristales adicionales, a medida que en ellos se va depositando azúcar procedente de la masa en ebullición. Este crecimiento de los cristales continúa hasta que al quedar lleno el recipiente, se haya alcanzado un tamaño previamente determinado.

La mezcla de cristales y meladura queda concentrada hasta formar una masa densa, masa-cocida, y la templa o contenido del tanque se descarga a través de una válvula inferior hacia un mezclador o mal llamado cristizador.

La ebullición de las masas-cocidas y la reebullición de las mieles se controlan cuidadosamente y se llevan a cabo de acuerdo con sistemas de cocción que se seleccionan teniendo en cuenta muchas consideraciones.

En Guatemala, la mayoría de ingenios azucareros utiliza en la cocción de masas los denominados tachos de calandria, parecidos a los evaporadores en ciertos aspectos pero diferencias de diseño debido al tipo de trabajo que realizan. En el capítulo No. 5, se describirá la composición de un tacho, así como su funcionamiento.



## 2.7 CENTRIFUGACION Y RECOCCION DE MIELES

La masa-cocida que se llevó al mezclador o cristalizador se hace pasar en máquinas giratorias llamadas centrifugas. El canasto cilíndrico de la centrifuga, que está suspendido de una flecha o huso, tiene sus costados perforados y forrados de tela metálica; entre el forro y el costado hay láminas de metal que contienen de 400 a 600 perforaciones por pulgada cuadrada ( 62 a 93 perforaciones por centímetro cuadrado). Las máquinas son impulsadas por motores eléctricos verticales que pueden ser de corriente continua o corriente alterna y que giran a velocidades de 1000 a 1800 rpm. El forro perforado retiene los cristales de azúcar , que son lavados con agua. Las aguas madres o mieles pasan a través del forro o revestimiento debido a la fuerza centrífuga ejercida (de 500 hasta 800 veces la fuerza de gravedad), y después de que el azúcar es purgada se corta, y se deja la centrifuga lista para recibir otra masa-cocida.

Las máquinas modernas son exclusivamente del tipo de alta velocidad (o de muy alta fuerza de gravedad) provistas de un control automático para todo el ciclo. Los azúcares de un grado (templás de segunda o B y templás de tercera o C) se purgan utilizando centrifugas continuas.

Cuando la concentración de la meladura que viene de los evaporadores continua en el tacho, cuando la masa-cocida cristalizó y creció pasando subsecuentemente esta masa-cocida a las centrifugas, el azúcar permanece en el canasto de éstas y el licor madre pasa a través de la tela. Al licor madre así separado se le llama mieles de masa-cocida centrifugada. La primera masa-cocida obtenida a partir de la meladura (o a la que algunas veces se agrega cierta cantidad de mieles primeras durante su cocimiento), se le llama masa-cocida A, y al licor madre separado de ella en las centrifugas, se le llama miel A o miel primera.

Sin embargo, estas mieles primeras contienen todavía una alta proporción de sacarosa cristalizable, razón por la cual se conservan en tanquería aparte y se usan por ejemplo para hacer crecer una masa-cocida posterior en un pie de templa conveniente. A la masa-cocida que se obtiene de esta manera se le llama masa-cocida B y el licor madre que se separa de ella en la centrifuga (tipo continuo) se le denomina miel B.

Esta operación puede repetirse varias veces; es limitado el número de masas-cocidas debido a:

- a) las mieles se agotan más y más;
- b) no toda el azúcar que contienen es cristalizable;
- c) el descenso de pureza de las templás, consecuencia de la remoción del azúcar, junto con el cocimiento repetido, mezclado y centrifugado aumentan la viscosidad de las mieles, y es muy difícil el movimiento dentro de los tachos.

Existen varios métodos en la recocción de mieles; los más conocidos son: el de dos templás, el de tres templás y el de cuatro templás. El sistema que más se emplea es el de tres templás, en el cual se conocen tres tipos de masa-cocida:

- 1) Una masa-cocida "A" que se obtiene de acuerdo con la pureza de la meladura, ya sea enteramente de meladura virgen o de un pie de templa de meladura con una adición más o menos sustancial de mieles "A" hacia el final de la templa.

2) Una masa-cocida "B" que se obtiene con un pie de templa de meladura virgen y que se complementa con mieles "A".

3) Una masa-cocida "C" que se obtiene con un pie de templa de meladura y que se complementa con mieles "B".

Cada una de las templas del sistema mencionado anteriormente generan las llamadas azúcar A, azúcar B y azúcar C. El azúcar A constituye la producción comercial del ingenio.

Las masas-cocidas de bajo grado permanecen durante varios días en unos depósitos llamados cristalizadores, donde se enfrían y mantienen en movimiento por medio de brazos agitadores. El azúcar C se mezcla con el jarabe(meladura) y se utiliza como semilla para la masa-cocida B.

La última miel que se obtiene (centrifugación de una masa "C"), y a la que se considera prácticamente agotada o de la cual se renuncia a obtener más recuperaciones, se le llama miel final o melaza, que es un material denso y viscoso que contiene aproximadamente una tercera parte de sacarosa, una quinta parte de azúcares reductores y el resto de ceniza, compuestos orgánicos no azúcares y agua; ésta sirve como base para la alimentación del ganado, fabricación de alcohol industrial, producción de levadura y otras diversas utilidades.

## **2.8 ALMACENAMIENTO Y SECADO DEL AZUCAR**

Una vez obtenidos los cristales de azúcar de las centrifugas, resta únicamente la fase de secado, envasado y almacenado.

Cuando el azúcar se purga, ésta cae a una bandeja debajo de las centrifugas, la cual mediante el movimiento que le da una excéntrica que a su vez es accionado por un motoreductor dirige el azúcar hacia un elevador, que la envía hacia un secador inclinado en forma de tambor que gira con la ayuda de un motor eléctrico. En el secador se le inyecta vapor directo con el objeto de calentar el aire proveniente de un ventilador y eliminar la humedad presente, que está entre los valores de 0.5 al 2% y debe rebajarse hasta un 0.035 para garantizar su conservación. El secador en su punto medio suele poseer un extractor que absorbe el polvillo el cual se seca más rápidamente que los cristales. Este polvillo se recoge y se disuelve en agua, siendo utilizado para el lavado de centrifugas o se disuelve con jarabe para reiniciar el proceso de cocción en el departamento de tachos.

El azúcar, luego de pasar por la fase de secado, se envía hacia la tolva de llenado por medio de otro conductor elevador para ser envasada en sacos de 100 libras.

En la figura 2.2, se muestra la fotografía de la sección de envasado de azúcar del Ingenio.



**Figura 2.2**  
**Fotografía de la sección de envasado del Ingenio.**

En la figura 2.3, se muestra un diagrama de flujo del proceso de fabricación de azúcar realizado en el ingenio.

## GRUPO DE TRABAJO LOS TARROS

DIAGRAMA DE FLUJO AL TO NIVEL  
 PROCESO TRANSFORMACION CAÑA DE AZUCAR

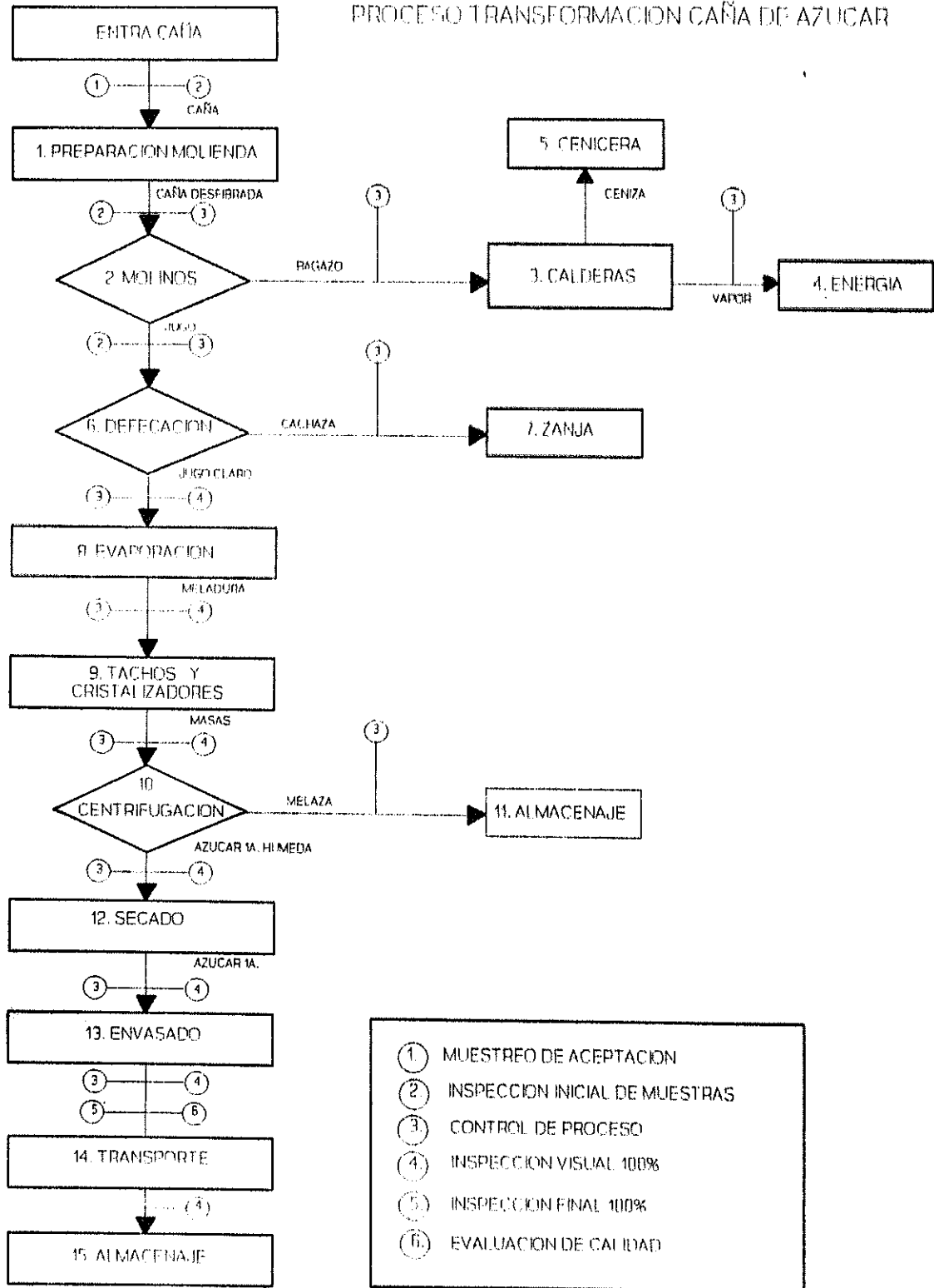


Figura 2.3

Diagrama de flujo del proceso de Fabricación de Azúcar del ingenio Los Tarros.

## CAPITULO No. 3

### 3. PRINCIPIOS DE TERMODINAMICA

#### 3.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

La termodinámica es una ciencia que se ocupa en general del estudio de las transformaciones de la energía, y las relaciones existentes entre las propiedades de las sustancias. Como por ejemplo se tiene: la conversión de calor en trabajo o más específicamente la conversión de energía química en energía eléctrica, como en el caso de una planta de energía térmica.

Esta ciencia se puede estudiar con base en ciertos análisis, y que son: desde el punto de vista macroscópico de la cual se encarga la termodinámica clásica que es la que se trata de definir, y del microscópico, el cual define la termodinámica estadística. La termodinámica clásica o macroscópica expresa las condiciones en que se encuentra un determinado cuerpo o sistema, en términos como por ejemplo: presión, temperatura, las cuales son cantidades grandes debiéndose a ello la palabra macroscópica.

Los procesos analizados, desde el punto de vista termodinámico, son descritos en forma ideal, y sirven como referencia para la determinación de las condiciones de equilibrio para cierto sistema en especial.

Es conveniente definir ciertos términos para que el lector se familiarice con la terminología utilizada en termodinámica, ya que es una herramienta de gran utilidad en el análisis de ciertas aplicaciones como: plantas de vapor o calderas, motores de combustión interna, etc.

**SUSTANCIA DE TRABAJO:** es el agente que se utiliza para realizar la transformación de energía. Citando entre ellas el vapor de agua en el caso de una turbina de vapor, la mezcla de aire y gasolina en el caso del motor de un camión.

**SISTEMA:** es una porción definida o limitada de materia, o un espacio determinado y de magnitud fija; es uno de los conceptos de mayor importancia en el estudio de la termodinámica.

**SISTEMA CERRADO:** se define como aquel en el cual no existe ningún intercambio de masa, de manera que contiene una cantidad fija e invariable de materia, o sea que únicamente la atraviesan su frontera la energía conjuntamente con el trabajo.

**SISTEMA ABIERTO:** en éste si existe un intercambio de masa, por lo cual varía debido a que está en contacto con los alrededores; existe un intercambio de energía.

**SISTEMA AISLADO:** en este tipo de sistema no existe intercambio de masa y tampoco de energía.

**PROPIEDADES:** son características propias de todo sistema y no dependen de las maneras en que un sistema cambie de estado, sino únicamente de su condición o estado final. Para su estudio se divide en: extensivas que son las que dependen de la magnitud o tamaño como en el caso de la masa y el volumen, e intensivas que no dependen de la extensión o magnitud del sistema como el caso de la temperatura y presión.

**FASES Y SUS CAMBIOS:** el término fase se refiere a ciertas condiciones físicas de una sustancia determinada, también se le conoce como estado. Dependiendo del tipo de sustancia, así serán las fases o estados en los cuales podrá existir. Así por ejemplo, el agua presenta tres fases: líquida, sólida y gaseosa. Una sustancia podrá existir en cualquier combinación si es pura. La transición de una fase a otra se define de la manera siguiente: fusión, que es la que se produce cuando un sólido se convierte en líquido; solidificación, se realiza cuando un líquido es convertido en sólido; vaporización, se da cuando un líquido se convierte en gas o vapor; condensación, cuando un gas o vapor se convierte en líquido; sublimación, se produce cuando un sólido se convierte directamente en un gas.

**PROCESO:** se utiliza para denotar el cambio de estado de una sustancia (desde el punto de vista termodinámico).

**CICLO TERMODINAMICO:** es el conjunto de dos o más procesos para los cuales los estados inicial y final son exactamente los mismos.

**VOLUMEN ESPECIFICO:** es el volumen de una sustancia dividido entre su masa.

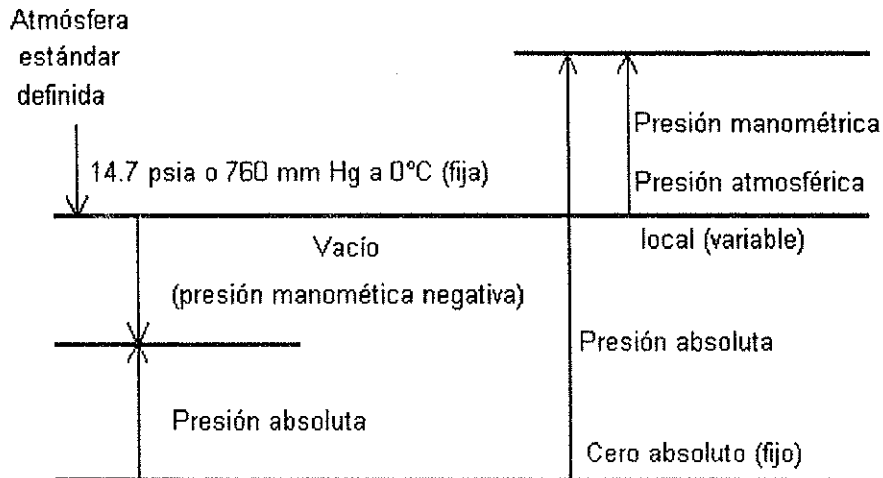
**DENSIDAD:** resulta de la división de la masa entre el volumen, de manera que viene a ser el recíproco del volumen específico.

**PRESION:** llamamos así a la fuerza ejercida por unidad de área sobre determinada sustancia, cuando ésta es homogénea y se encuentra en equilibrio. El valor de presión que suele medirse resulta de la diferencia entre la presión de los alrededores y la presión del sistema. Por la forma en la que actúa en los sistemas, se divide en: presión absoluta que resulta de la suma de la presión manométrica con la presión de los alrededores del sistema, presión manométrica, que es la presión que se lee en cualquier instrumento, y no es influenciada por sus alrededores, y presión atmosférica que es la que ejerce la fuerza de gravedad sobre una masa por unidad de área. Se denota mediante la expresión  $P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$ .

Si la presión manométrica es nula, entonces la presión absoluta es igual a la de los alrededores o presión atmosférica. Si es menor, se considera una presión negativa.

Una presión menor que la atmosférica se conoce con el nombre de presión de vacío o simplemente vacío.

En la figura 3.1, se muestra la definición de cada una de las presiones.



**Figura 3.1**  
Definición de los diferentes tipos de presiones .

## 3.2 LEYES QUE GOBIERNAN LA TERMODINAMICA

### 3.2.1 LEY CERO DE LA TERMODINAMICA

Establece que cuando dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico respecto a un tercero, entonces estarán en equilibrio térmico entre sí, por lo cual presentarán una misma temperatura.

Los dispositivos empleados para realizar mediciones de temperatura son los llamados termómetros, que están constituidos por un tubo capilar de vidrio, con un bulbo en su extremo, sellado y lleno de mercurio o alcohol coloreado. El funcionamiento se da con el cambio de densidad del mercurio o alcohol debido a la temperatura de la sustancia analizada. La lectura en el instrumento se ve en la escala del mismo.

Se conocen dos escalas de temperatura, que son: la centígrada que toma como valor del punto de ebullición del agua 100°C y un valor cercano a 0°C para el punto triple, y toma como temperatura absoluta el grado kelvin; y la de Fahrenheit que toma como valor del punto triple del agua 32°F y alcanza el punto de ebullición a 212°F, toma como temperatura absoluta el grado rankine. A continuación se, dan las expresiones más importantes de estas dos escalas:

$$T(^{\circ}\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad , \quad T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 460$$

$$^{\circ}\text{C} = 5/9(\text{F} - 32) \quad , \quad ^{\circ}\text{F} = 9/5\text{C} + 32.$$

### 3.2.2 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA

Esta expresa que la variación de la energía de un sistema durante cualquier transformación es igual a la cantidad de energía que el sistema recibe de sus alrededores ( según Fermi, p. 11 ).

Una definición de orden más común es: que la energía no puede crearse ni destruirse, sino sólo transformarse de una forma a otra.

### 3.2.3 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA

Enuncia que es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo y cuyo único efecto sea el de transferir calor de un cuerpo frío a otro más caliente. "El calor no puede, por sí solo, pasar de una temperatura baja a otra más alta". El concepto anterior fue dado por Clausius.

De forma más específica, la segunda ley de la termodinámica determina que todos los procesos naturales son irreversibles.

### 3.2.4 TERCERA LEY DE LA TERMODINAMICA

Establece que a la temperatura del cero absoluto, la entropía de una sustancia pura en forma cristalina "perfecta", se vuelve cero.

## 3.3 PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS Y LOS GASES

### 3.3.1 PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL VAPOR

El agua se ha empleado como fluido de trabajo termodinámico durante muchos siglos, y ha sido sujeta a una extensa investigación para establecer sus propiedades termodinámicas en los dos últimos siglos.

Las investigaciones sobre las propiedades termodinámicas del agua se han realizado a través de todo el mundo, y como resultado de éstas se han elaborado tablas extensas de sus propiedades. Existen nueve tablas sobre propiedades termodinámicas en las tablas de vapor (como se denomina a este trabajo ), que tratan sobre las propiedades del hielo, el agua y el vapor.

Estas tablas comprenden las propiedades de transporte, viscosidad y conductividad térmica. El punto triple o sea, el estado en que están en equilibrio el sólido, el líquido y el vapor, se usa como el estado de referencia para la energía interna nula y la entropía nula. El uso de ese estado de referencia da lugar a los valores negativos de energía interna, entalpía y entropía del estado líquido a 32°F.

En la tabla 3.3.1 se muestra la nomenclatura utilizada en las tablas de vapor.



	SISTEMA INGLES	SISTEMA INTERNACIONAL
t= temperatura	°F	°C
p= presión absoluta	psia o in de Hg	MPa
v= volumen específico	ft <sup>3</sup> /Lb	m <sup>3</sup> /kg
h= entalpía	BTU/Lb	kJ/kg
s= entropía	BTU/Lb °F	kJ/kg °K
u= energía interna	BTU/Lb	kJ/kg

Subíndices:

f = a propiedad de líquido saturado

g = a propiedad del vapor saturado

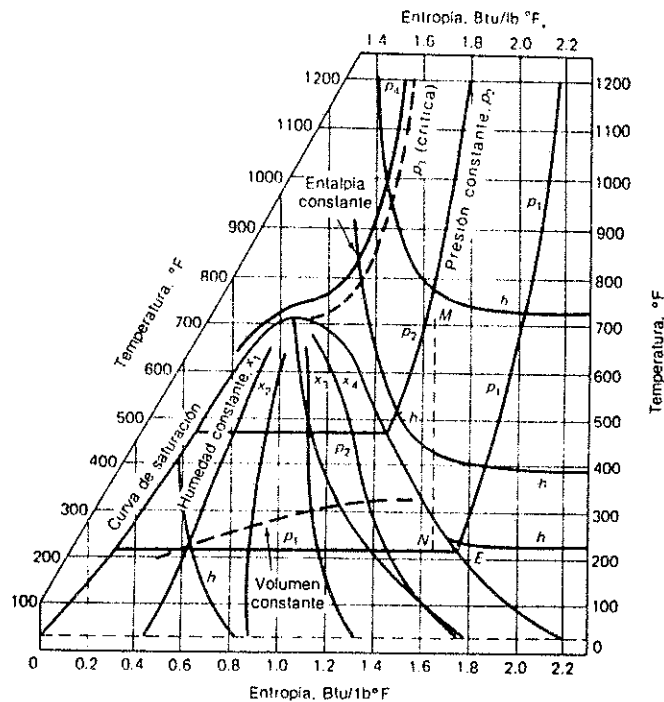
fg= a cambio de propiedad debido  
a la evaporación.

**Tabla 3.3.1**  
**Nomenclatura utilizada en las tablas de Vapor**

### 3.3.2 DIAGRAMAS TERMODINAMICOS

Las tablas de las propiedades termodinámicas proporcionan datos precisos para varias sustancias. Sin embargo, los diagramas y las gráficas basadas en los datos de estas tablas son útiles y deseables. Debe de tomarse en cuenta que los datos proporcionados por las tablas de vapor son datos en equilibrio, y las gráficas trazadas a partir de éstos pueden representar sólo estados en equilibrio. La trayectoria de un proceso, que no es una trayectoria de equilibrio, no puede dibujarse sobre estas gráficas.

En la figura 3.3.2, se muestra el diagrama Ts (temperatura - entropía) para el vapor de agua en el que se representan las fases líquida y vapor. En la región húmeda las líneas de temperatura constante y las líneas de presión constante son horizontales. En la región de sobrecalentamiento encima de la curva de saturación, parten líneas de presión constante que se elevan rápidamente y en forma casi vertical. En el diagrama Ts que se encuentra en las tablas de vapor, las curvas de sobrecalentamiento constante se muestran en la región de sobrecalentamiento. Mientras que el diagrama Ts es útil para representar procesos, no es tan útil ni tan usado como el diagrama hs ( o diagrama de Mollier, como se conoce comúnmente el diagrama h-s ).



**Figura 3.3.2**  
Esquema del diagrama T-s del vapor de agua.

El diagrama de Mollier es una gráfica de las propiedades termodinámicas de una sustancia dibujada sobre sus coordenadas h-s.

Debajo de la línea de saturación, se muestran las líneas de presión constante (que son también líneas de temperatura constante) y las líneas de humedad constante. Sobre la línea de saturación se muestran las curvas de temperatura constante, presión constante y sobrecalentamiento constante. De manera que el diagrama de Mollier es particularmente adecuado para obtener propiedades, describir un flujo o los procesos que ocurren a presión constante. Si un proceso no es reversible, entonces sólo sus estados finales pueden mostrarse sobre un diagrama termodinámico como el diagrama Ts o el diagrama de Mollier.

Existen otros diagramas que muestran más propiedades como el calor específico del vapor que será de utilidad en los cálculos del consumo de vapor de algunos equipos; también está el diagrama de p-v (presión-volumen) que proporciona informaciones importantes.

### 3.3.3 PROCESOS

Entre los procesos más importante se tienen:

**Proceso isobárico ( presión constante ):** es una idealización que puede usarse para describir el suministro de calor al fluido de trabajo en una caldera o en el proceso de combustión en una turbina de gas.

**Proceso isotérmico ( temperatura constante ):** entre sus aplicaciones tenemos el condensador de coraza y tubo utilizado para condensar el vapor de escape de una turbina. Como el vapor está húmedo el proceso se realiza a temperatura constante. En la región húmeda este proceso también ocurre a presión constante.

**Proceso adiabático ( no se transmite calor ):** es uno de los procesos más importantes, ya que la mayor parte de las compresiones y expansiones pueden idealizarse como procesos adiabáticos. Entre sus aplicaciones tenemos: turbinas de vapor, compresores, etc.

**Proceso isométrico ( volumen constante ):** ocurre cuando se calienta un fluido en un recipiente cerrado. Es utilizado para calentar sustancias almacenadas o para calentar fluidos en industrias químicas ( por medio de intercambiadores de calor ).

### 3.4 LOS GASES IDEALES

En termodinámica se utiliza mucho la idealización, ya que facilita ciertos cálculos matemáticos. Tomamos como punto de referencia a la más simple de las sustancias puras ( aire ) asumiéndolo como gas ideal o perfecto.

El aire es casi un gas ideal en sus estados más comunes. Y aunque ningún gas real es ideal, muchos de ellos se comportan de manera tan semejante como para tomar como válidos los cálculos realizados como gases ideales.

Como las leyes de los gases ideales son inexactas para los gases más imperfectos, se pueden utilizar los mejores métodos matemáticos o valores tabulados y cartas o gráficos de propiedades. No existe una línea definida de separación que divida a los gases imperfectos de los gases ideales o perfectos, pero si las leyes de los gases ideales rinden resultados suficientemente exactos, la sustancia se considera como un gas ideal; si no es un gas imperfecto.

Todas las sustancias gaseosas se aproximan en su comportamiento a un gas ideal a medida que se reduce su presión, debido a que las moléculas se separan más y las fuerzas de atracción entre ellas tienden a cero. Por tanto, decimos que los gases a bajas presiones son casi gases ideales, debiéndose interpretar presión baja en relación con la sustancia.

Según el grado de exactitud requerido y la temperatura, la baja presión para los gases más aproximadamente perfectos como el helio, hidrógeno, aire, etc., puede ser de varios cientos de Lb/pulg<sup>2</sup> abs ( PSIA ); para el vapor de agua a temperaturas del orden de la atmosférica, la baja presión es probable que sea 1 Lb/pulg<sup>2</sup> abs ( PSIA ). Los gases que están en un punto cercano al punto en que se produce condensación se llaman a menudo vapores.

## LEYES DE LOS GASES IDEALES

**LEY DE BOYLE:** determina que si se mantiene constante la temperatura( proceso isotérmico ) de un gas (en su caso el aire ), su volumen varía en relación inversa a la presión absoluta durante la variación de su condición o estado.

**LEY DE CHARLES:** esta ley se enuncia en dos partes: 1) Si la presión sobre una cantidad particular de gas se mantiene constante, entoces, con una variación de condición o estado, el volumen variará en proporción directa a su temperatura absoluta; 2) Si el volumen de una cantidad particular de gas se mantiene constante, entonces, con una variación de condición o estado, la presión variará en proporción directa a su temperatura absultuta.

**LEY DE AVOGADRO:** establece que volúmenes iguales de todos los gases ideales a una presión y temperatura particulares, contienen el mismo número de moléculas.

### 3.5 CICLOS DE POTENCIA DEL VAPOR

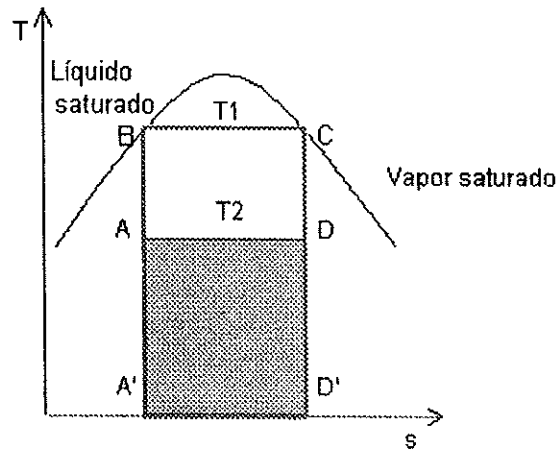
Un ciclo se define como una serie de procesos termodinámicos durante los cuales el fluido de operación puede someterse a cambios que comprendan transiciones de energía, y , a continuación, retornar a su estado original. El objetivo de cualquier ciclo práctico es convertir energía de una forma a otra más útil.

Se analizan los ciclos que conciernen al vapor de agua desde un punto de vista ideal o sea que se propusieron como prototipos de ciclos prácticos y, en el límite, sus eficiencias se aproximan a la eficiencia del ciclo Carnot (tomado de referencia).

En el ciclo de vapor, la sustancia de trabajo se condensa hasta la fase líquida a la temperatura inferior del ciclo. El líquido se bombea a la presión deseada de salida. Como el líquido es en esencia incompresible; el trabajo de bombeo del ciclo de vapor representa un pequeño porcentaje de la salida de trabajo útil del ciclo. Otra situación es que, en el ciclo la sustancia, pueda contener humedad cuando se expande en una turbina. Como ésta es indeseable, se hacen modificaciones en el ciclo de vapor para evitar o reducir la humedad.

#### 3.5.1 CICLO CARNOT

El ciclo consiste en dos etapas isotérmicas reversibles y dos etapas isoentrópicas. En la figura 3.5.1, se muestra el diagrama Ts propuesto por Carnot para el ciclo de vapor.



**Figura 3.5.1**

**Esquema de un diagrama T-s del Ciclo Carnot del Vapor de agua.**

La línea A-B representa la compresión isentrópica del fluido desde la temperatura ( y presión ) inferior hasta la temperatura superior del ciclo. A la temperatura superior existe una recepción isoterma y reversible de energía en forma de calor a partir de alguna fuente. Esta transferencia de calor continúa a lo largo de la trayectoria B-C con un subsecuente incremento del volumen del vapor. Entonces, el fluido se expande de manera isentrópica a lo largo de la trayectoria C-D con energía extraída en forma de trabajo. A medida que se expande el fluido, aumenta el volumen del mismo. Por último, el fluido húmedo se condensa de manera isotérmica y reversible a la temperatura inferior del ciclo. Durante el proceso de condensación, el volumen del fluido disminuye en tanto que se desecha calor al sumidero del sistema. La energía disponible está representada por el área A-B-C-D, y la energía desechada por el área A'-A-D-D' sobre el diagrama Ts de la figura 3.5.1.

La eficiencia de un ciclo carnot es sólo una función de las temperaturas inferior y superior y está dada por la expresión siguiente:

$$\eta_c = [( T_1 - T_2 ) / ( T_1 ) ] * 100$$

### 3.5.2 CICLO RANKINE

El ciclo de Rankine o ciclo de expansión completa, fue el primer estándar de comparación aceptado para las plantas de vapor productoras de potencia, y frecuentemente se usa como tal en la actualidad.

Los elementos que generalmente componen un ciclo de Rankine simple son: la caldera, el motor primario ( turbina), el condensador ( sumidero ) y la bomba. En la figura 3.5.2, se muestran sus componentes.

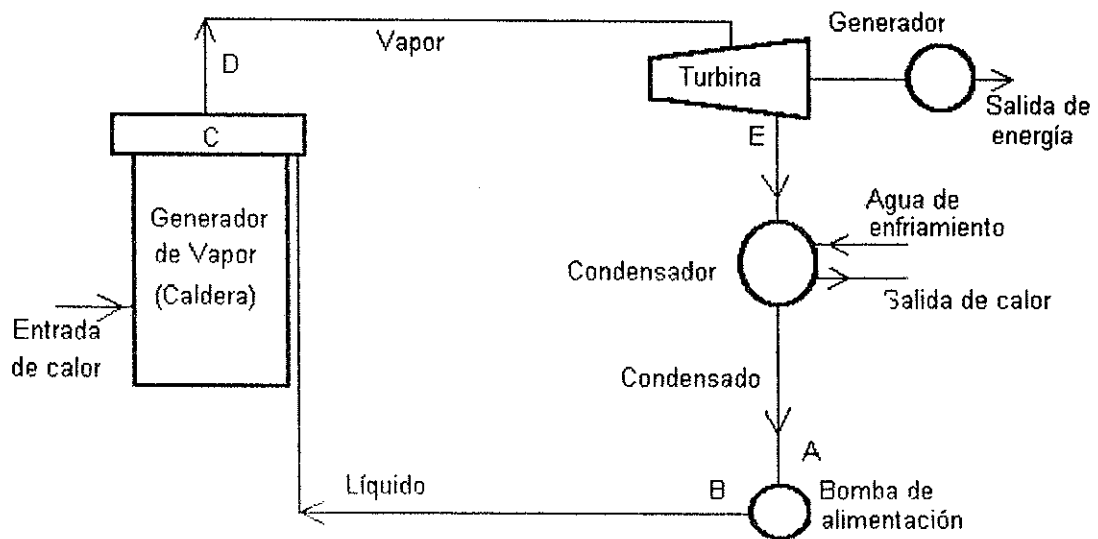


Figura 3.5.2

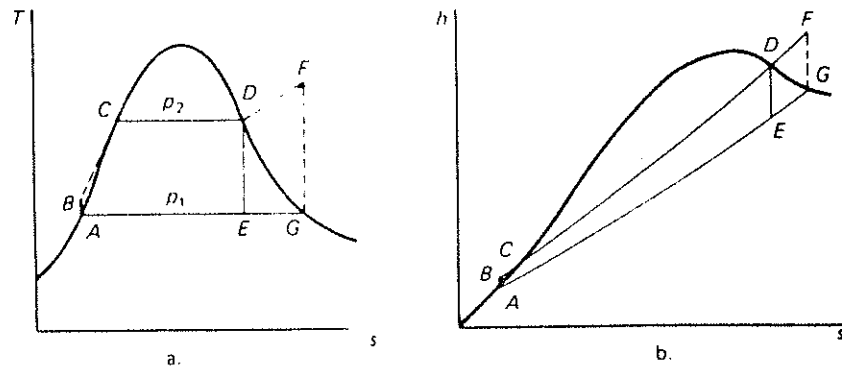
Elementos de un ciclo Rankine simple .

Se compone de cuatro procesos distintos. Comenzando con la bomba de alimentación, el líquido que entra al calentador se lleva primero a la presión del calentador (Proceso A-B ). En el ciclo ideal, se supone que el líquido suministrado a la bomba está saturado a la presión más baja del ciclo. En un ciclo real, el líquido por lo regular está ligeramente subenfriado para evitar la formación de burbujas de vapor en la bomba ( lo que ocasiona un proceso conocido como cavitación, que produce daños a la bomba ). Para el ciclo real, el proceso de compresión se considera isoentrópico y el estado final del líquido suministrado al calentador está subenfriado a la presión del calentador.

El líquido subenfriado se calienta hasta el punto de saturación en el calentador (Proceso B-C ) y, a continuación, se vaporiza para conseguir el vapor para el motor primario o turbina (Proceso B-D). La energía para el calentamiento y la vaporización del líquido está proporcionada por la acción del combustible en el

calentador. Si se requiere el sobrecalentamiento del vapor (Proceso B-F); éste también puede lograrse en el calentador (también llamado generador de vapor). El vapor sale del generador de vapor y se expande en forma isoentrópica en un motor primario ( como turbina o máquina de vapor ) hasta proporcionar la salida de trabajo del ciclo (Proceso D-E). Después de que se completa el proceso de expansión, la sustancia de trabajo es conducida de nuevo al condensador donde desecha calor de agua de enfriamiento( Proceso E-A ).

En la figura 3.5.3, se muestran los diagramas de Ts y hs de un Ciclo Rankine ideal.



**Figura 3.5.3**  
Esquema de los diagramas T-s y h-s del ciclo Rankine del vapor de agua.

Por definición, el rendimiento térmico de cualquier ciclo es el trabajo útil (neto) que sale del ciclo entre la energía térmica suministrada ( de entrada) al ciclo. De manera que la eficiencia del ciclo Rankine ideal es:

$$\begin{aligned} n_R &= ((\text{trabajo de la turbina}) - (\text{trabajo de la bomba})) / (\text{calor suministrado}) \\ &= ((h_D - h_E) - (h_B - h_A)) / (h_D - h_B) \end{aligned}$$

Como generalmente el trabajo de la bomba se considera despreciable, entonces:

$$n'_R = (h_D - h_E) / (h_D - h_B)$$

Tomando en cuenta sobrecalentamiento del vapor, se tiene:

$$n'_R = (h_F - h_G) / (h_F - h_B).$$

### 3.5.3 EL CICLO DE RECALENTAMIENTO

Se considera que la humedad máxima conveniente mientras el vapor pasa por las paletas o álabes de la turbina es alrededor del 10 al 12%, debido a que las partículas de agua erosionan dichas paletas, y originan una conservación o mantenimiento costoso. Desde una temperatura inicial particular, la humedad del vapor aumenta después de un proceso isoentrópico ( u otro proceso adiabático de trabajo ) a medida que aumenta la presión inicial.

El sobrecalentamiento del vapor tiende a ayudar a la turbina, pero termodinámicamente no aporta un aumento considerable a la eficiencia térmica del ciclo. Para lograr una mayor eficiencia térmica y al mismo tiempo resolver el problema de la turbina, se propuso el ciclo de recalentamiento. Este se basa en un intento por aproximarse a la eficiencia del ciclo Carnot mediante la adición de calor en incrementos al máximo nivel de temperatura posibles. Se permite que el vapor se expanda con libertad en una parte de la turbina y entonces regrese al calentador, en donde se vuelve a calentar ( se recalienta ), y a continuación se reexpanda a través de la turbina. El número de etapas de recalentamiento usado en la práctica son dos o a lo sumo tres.

Existen otros ciclos como el regenerativo y otros, pero como están fuera del alcance del proyecto no se menciona en qué consisten.

## 3.6 TRANSFERENCIA DE CALOR

Esta sección tiene gran importancia debido a que varios de los equipos utilizados para el proceso de elaboración de azúcar de caña se construyen y funcionan de acuerdo con principios de transferencia de calor. Se dan algunas definiciones en forma general de manera que el lector conozca la base sobre intercambiadores de calor.

Los mecanismos o formas de transferencia de calor más conocidos son: conducción, convección y radiación. En sus aplicaciones es posible encontrar que más de una de estas formas de transferencia de calor están ocurriendo en forma simultánea de manera que es importante considerar las combinaciones cuando se diseñan .

### 3.6.1 TRANSMISION DE CALOR POR CONDUCCION

La transferencia de calor por conducción tiene lugar en virtud de dos mecanismos: las moléculas o átomos que se mueven más a prisa ( vibrando en un sólido, moviéndose en forma restringida en un líquido) en las partes más calientes de un cuerpo, transfieren una parte de energía por medio de choques a las moléculas adyacentes, y los electrones libres proporcionan un flujo de energía en el sentido de la temperatura decreciente. En los metales, especialmente en los buenos conductores eléctricos, el mecanismo electrónico es el causante de la mayor parte de flujo calorífico, excepto a baja temperatura. El calor es conducido por los sólidos, líquidos y gases.

Entre sus propiedades tenemos: la conductividad térmica (su símbolo es  $k$  y se expresa en BTU/hora - ft - °F) que es mucha importancia ya que su valor, que es



relativamente pobre en los gases comparada con la de los metales, determina en gran parte la adaptabilidad de un material para un uso determinado; la resistividad que es el recíproco de la conductividad.

### 6.3.2 TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION

La transferencia de calor por convección de un cuerpo comprende el movimiento de un fluido ( líquido o gas ) en relación con el cuerpo. Si el movimiento es provocado por las diferencias de densidad debidas a las diferencias de temperatura en las diferentes localidades del fluido, se conoce como convección natural. Si el movimiento del fluido es provocado por un agente externo como un ventilador, se denomina convección forzada.

La transmisión por convección ( forzada ) puede manifestarse también en régimen laminar y en el turbulento. El régimen laminar se caracteriza porque el flujo es suave y el fluido se mueve en trayectorias paralelas entre sí. Cuando el fluido se mueve en esta forma sobre una superficie caliente se transfiere calor por medio de la convección molecular dentro del fluido y desde un estrato hasta otro. Se caracteriza porque se realiza a ritmos de transferencia bajos.

El flujo turbulento se caracteriza por corrientes que provocan la mezcla de los estratos de fluido hasta que estos estratos se hacen indistinguibles. La mezcla del fluido debido a esa turbulencia hace que se incremente la transferencia de calor, de manera que entre mayor sea la turbulencia, mayor será el ritmo de transferencia de calor.

### 3.6.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

Este tipo de transferencia de calor se diferencia de la de conducción y de la de convección en que no se requiere un medio para la transferencia de calor. De hecho, el intercambio radiante entre las superficies es máximo cuando no hay material que ocupe el espacio intermedio. El intercambio de energía radiante puede ocurrir entre dos superficies, entre una superficie y un gas o medio participante, o puede involucrar una interacción compleja entre varias superficies y fluidos participantes.

La transferencia de calor por radiación es un fenómeno electromagnético similar a las ondas de radio, transmisión de la luz, y todos lo cuerpos que radian calor. Un intercambio neto de calor ocurre cuando la absorción de la energía de radiación por un cuerpo excede la energía que está radiando. Un cuerpo que absorbe toda la radiación que lo alcanza o incida sobre el, se dice que es un **cuerpo negro**. Los cuerpos reales reflejan radiación térmica en la misma forma en que la absorben, y se encuentra que los metales muy pulidos son buenos reflectores de la radiación térmica.

La fracción de calor incidente que se refleja se conoce como **reflectividad** del cuerpo, la fracción que se absorbe se conoce como **absortividad**, y la efectividad del cuerpo como radiador térmico a una temperatura dada se conoce como su **emisividad**. De manera que la emesividad es también la relación de emisión de

calor a una temperatura dada a la emisión de calor desde un cuerpo negro a la misma temperatura.

#### 6.3.4 EQUIPO DE TRANSFERENCIA O INTERCAMBIADORES DE CALOR

En los procesos industriales, casi siempre es necesario transferir cantidades relativamente grandes de energía térmica entre el sistema y el medio ambiente o entre distintas partes de un sistema dado. Se llama **intercambiador de calor** al dispositivo, cuyo propósito principal es transferir el calor entre dos fluidos. Generalmente se emplean tres categorías para clasificar los intercambiadores de calor:

- a) regeneradores,
- b) intercambiadores de tipo abierto,
- c) intercambiadores de tipo cerrado o recuperadores.

Los **regeneradores** son intercambiadores en donde un fluido caliente fluye a través del mismo espacio seguido de uno frío en forma alternada, con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes. La superficie, que alternativamente recibe y luego libera la energía térmica, es muy importante en este dispositivo. Las propiedades del material superficial, junto con las propiedades del flujo y del fluidos de las corrientes fluidas, y con la geometría del sistema, son cantidades que se deben conocer para analizar y diseñar los regeneradores.

Los **intercambiadores de calor de tipo abierto** son dispositivos en los que las corrientes de fluido de entrada fluyen hacia la cámara abierta, y ocurre una mezcla física completa de las dos corrientes. Las corrientes caliente y fría que entran por separado a este intercambiador salen mezcladas en una sola. El análisis de los intercambiadores de calor de tipo abierto involucra la ley de la conservación de la masa y la primera ley de la termodinámica; no se necesitan ecuaciones de relación para el análisis o diseño de este tipo de intercambiador.

Los **intercambiadores de tipo cerrado** son aquellos en los cuales ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezcla o que están involucradas en esa forma; están separadas entre sí por una pared de tubo, o cualquier otra superficie que pueda estar involucrada en el camino de la transferencia de calor. De manera que el calor ocurre por convección desde el fluido más caliente a la superficie sólida, por conducción a través del sólido, y de allí por convección desde la superficie sólida al fluido más frío.

Las plantas de generación de vapor usan intercambiadores de calor como condensadores, economizadores, calentadores de aire, calentadores de agua de alimentación, recalentadores, etc. En el proceso de fabricación de azúcar e caña se utilizan algunos como evaporadores, calentadores de jugo, cristalizadores (tachos).

Existe otra clasificación ( del tipo cerrado ) y consiste en las direcciones de flujo relativo de las dos corrientes fluidas y el número de pasadas que hace cada fluido al recorrer el intercambiador.

A las direcciones relativas de flujo de las corrientes de fluido, se les llama flujo de **contraflujo o contracorriente** cuando las corrientes del fluido fluyen en direcciones opuestas, **flujo concorrente o flujo paralelo** cuando las corrientes fluyen en la misma dirección, y flujo **cruzado** si las corrientes del fluido fluyen perpendiculares entre sí.

Haciendo comparaciones entre un flujo paralelo y uno de contraflujo, se determina que el contraflujo da los requerimientos mínimos de superficie y que es posible elevar la temperatura de salida del fluido de enfriamiento más cercana a la temperatura de entrada del fluido caliente.



## **CAPITULO No. 4**

### **4. GENERALIDADES SOBRE GENERADORES DE VAPOR**

#### **4.1 DEFINICIONES FUNDAMENTALES**

La expresión generador de vapor o unidad generadora de vapor significa la caldera con su hogar más todos los diversos accesorios, como el equipo encargado de quemar el combustible, los serpentines del sobrecalentador, el calentador de aire, economizador y el sistema limpiador de hollín. El término caldera, se aplica estrictamente a aquella parte de la unidad en la cual el agua (u otro líquido en general ) se vaporiza. Al principio, un generador de vapor consistía solamente en una caldera; nombre que se ha aplicado a todos los tipos de generadores de vapor.

Las calderas antiguas solamente podían trabajar a presiones muy bajas a causa de su forma, materiales y posibilidades constructivas ( del orden de 10.5 psia a 75.00 psia ). Las instalaciones industriales suelen emplear vapor a presiones menores de 300.00 psia, y en muchos casos el vapor a baja presión se utiliza para calefacción y procesos de fabricación ( como en el caso de la industria azucarera ). En las plantas generadoras de electricidad de gran tamaño que utilizan energía térmica, se genera el vapor a presiones arriba de 1,000 psia y temperaturas del orden de 900°F.

Cuando las calderas se califican de un 100% de capacidad nominal, significa que transmiten en promedio 3,347.5 BTU/hora por pie cuadrado de superficie de calefacción. Este número proviene de la unidad norteamericana caballo de caldera, y es de poca importancia. Superficie de calefacción: es aquella superficie en uno de cuyos lados el fluido está recibiendo calor, y en el otro lado, el gas o el refractario se está enfriando; se mide en el lado de la temperatura más alta.

#### **4.2 CLASIFICACION DE LAS CALDERAS**

Las calderas de vapor se clasifican, atendiendo a la posición relativa de los gases calientes y del agua (sustancia de trabajo), en acuatubulares y piro-tubulares; por la posición de los tubos, en verticales, horizontales e inclinados; por la forma de los tubos, de tubos rectos y de tubos curvados; y por la naturaleza del servicio que prestan, en fijas, portátiles, locomóviles y marinas. También existe una clasificación de acuerdo con la presión de trabajo: baja presión con valores menores o iguales a 450 psia (se utilizan en procesos industriales como el caso de los ingenios azucareros ), mediana presión de 450 a 900 psia ( plantas térmicas productoras de energía eléctrica ) y alta presión con valores arriba de 900 psia.

La elección de una caldera para un servicio determinado depende del combustible de que se disponga, tipo de servicio, capacidad de producción de vapor requerida, duración probable de la instalación y otros factores de carácter económico.

#### 4.2.1 CALDERAS PIROTUBULARES

En estas calderas, los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales se hallan rodeados de agua. Las calderas pirotubulares pequeñas, junto con las máquinas de vapor correspondientes han sido desplazadas en su mayoría por los motores de combustión interna en la producción de energía destinada al accionamiento de grúas portátiles y grupos para extinción de incendios. Las calderas pirotubulares generalmente tienen un hogar integral (denominado caja de fuego) limitado por superficies enfriadas por agua. En la actualidad, las calderas pirotubulares horizontales con hogar integral se utilizan en instalaciones de calefacción a baja presión y algunos tipos más grandes para producir vapor a presión relativamente baja destinado a calefacción y a producción de energía. Tienen como principal aplicación industrias pequeñas y equipos que operan en hospitales.

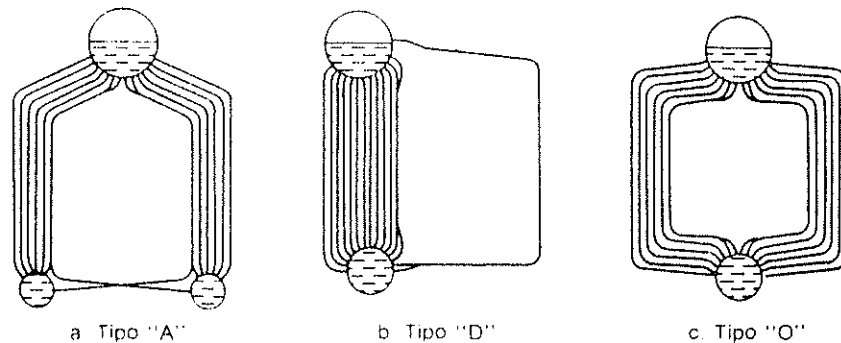
Las presiones con que operan este tipo de calderas son menores de 150.00 psia con capacidades de producción de vapor de unos 12,000.00 Lb/hora, y tiene como presión máxima 250.00 psia.

#### 4.2.2 CALDERAS ACUATUBULARES

En las calderas acuatubulares, por el interior de los tubos pasa agua o vapor y los gases calientes se hallan en contacto con la superficie externa de aquellos. Son las empleadas casi exclusivamente cuando interesa obtener elevadas presiones y rendimientos, lográndose esto debido a que los esfuerzos desarrollados en los tubos por las altas presiones son de tracción o tensión en vez de compresión, como ocurre en los pirotubos (calderas pirotubulares). La limpieza de las calderas acuatubulares se lleva a cabo fácilmente porque las incrustaciones se quitan sin dificultad utilizando un dispositivo limpia-tubos movido con agua o aire. Los objetivos perseguidos al construir una caldera cualquiera son: costo reducido, formas simples de los tubos, accesibilidad, compacta, transmisión eficiente de calor, buena circulación y elevada capacidad de producción de vapor. Este tipo de ventajas de las calderas ha dado como resultado muchos diseños y modificaciones de la caldera acuatubular, tales como de tubos rectos, tubos curvos, de un solo cuerpo cilíndrico (domo), de varios cuerpos, de cuerpo cilíndrico longitudinal y de cuerpo transversal.

Dentro de las calderas acuatubulares mencionadas en la clasificación anterior, se tienen las llamadas de tipo paquete (calderas de tipo mediano), las cuales se construyen y equipan por completo con controles de combustión antes de su embarque. Se clasifican de acuerdo con su arreglo de tubos básico: de tipo A, de tipo D y de tipo O. El tipo A tiene dos domos pequeños en la parte inferior y un domo en la parte superior para conseguir la separación del agua y del vapor. Gran parte de la generación de vapor se presenta en las paredes del horno. En la unidad tipo D, gran parte del vapor se genera en el banco de tubo. En el tipo O, la generación de vapor se lleva a cabo principalmente en las paredes del horno. El tipo O es normalmente mayor que los tipos A y D para una capacidad de vapor igual.

En la figura 4.2.2.1, se muestra los esquemas de las calderas tipo A, O y D.

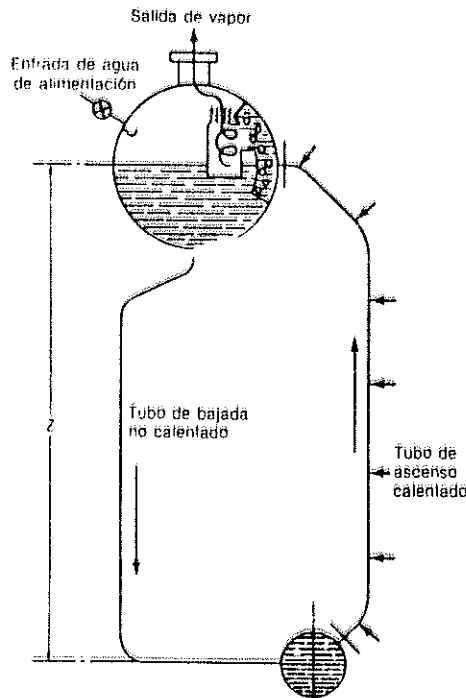


**Figura 4.2.2.1**  
Esquema de los tipos básicos de calderas medianas.

En las calderas acuatubulares, el agua y el vapor fluyen en un número relativamente grande de trayectorias de calentamiento externo. La circulación de la mezcla de agua y vapor en los tubos puede realizarse de dos formas: natural y forzada.

**a) Circulación natural:** el vapor se forma en el lado de calentamiento y la circulación se realiza debido a que la mezcla de agua y vapor pesa menos que la mezcla fría en el lado sin calentar por donde baja y es desplazada por agua que circula en forma convectiva por el circuito, ilustrado en la figura 4.2.2.2. La diferencia de fuerzas entra la columna de agua en la baja y la mezcla de agua y vapor en la subida provoca el flujo. Se alcanza una velocidad de equilibrio en el circuito cuando la diferencia de fuerzas entre la bajada y la subida es igual a las pérdidas del flujo en los circuitos. Si la diferencia de presión obtenida, es mayor que la resistencia del flujo en los circuitos, el flujo se incrementará hasta que se alcance un punto de equilibrio entre la fuerza obtenida y la resistencia.

La mezcla de vapor y agua pasa entonces al domo de vapor, donde se libera el vapor y el agua se regresa al circuito de bajada. A menos que no se mantenga una circulación adecuada, es posible tener un tapón de vapor estacionario, que a su vez origina un sobrecalentamiento local del tubo y por último una falla del tubo (quemadura).



**Figura 4.2.2.2**  
**Diagrama esquemático de la circulación natural.**

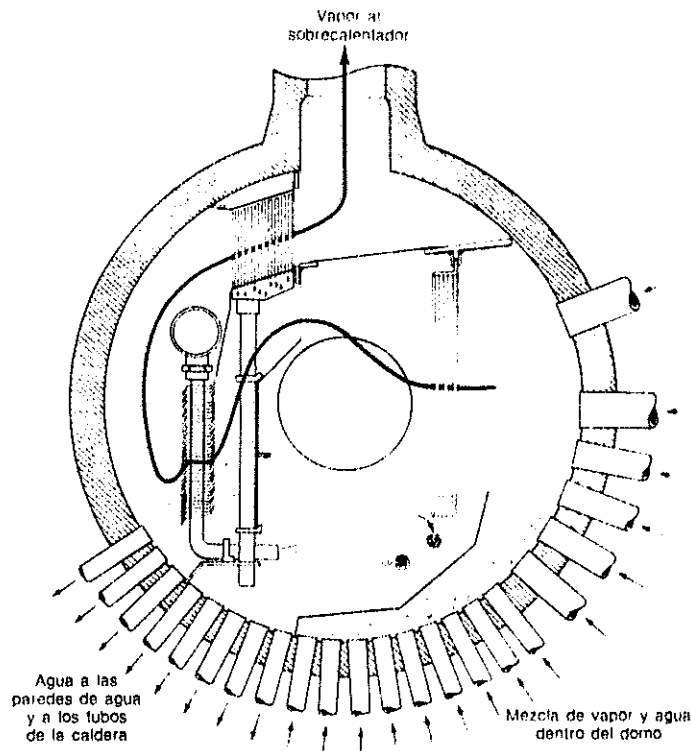
**b) Circulación forzada:** para asegurar una circulación adecuada a todas las cargas, algunos generadores de vapor usan una bomba para vencer las resistencias del circuito. Esto generalmente se hace en unidades de presiones supercríticas en las que las fuerzas de circulación natural son relativamente pequeñas o en unidades de baja presión para tener libertad en el trazo de tuberías. Dentro de sus ventajas de las calderas que utilizan este tipo de circulación, están: respuesta rápida a los controles, puesta en marcha rápida, el hogar ocupa menos espacio de los convencionales, y tienen un peso liviano para calderas de la misma capacidad de producción de vapor.

El **domo de vapor** juega un papel importante en la mayor parte de los diseños de calderas, ya que es el lugar donde se realiza el limpiado y secado del vapor saturado, donde se distribuye el agua de alimentación y el que provee la protección de la unidad. Los domos de vapor de gran diámetro proporcionan capacidades de liberación de vapor conservadoras por pie cuadrado de superficie de separación, con lo que se asegura una alta pureza del vapor y niveles estables de agua.

En la figura 4.2.2.3, se muestra el interior de un domo de vapor en el que entra el vapor al domo a través de su separador primario, que extrae el remanente de agua de la descarga del tubo de generación y lo regresa al domo de agua. El vapor pasa entonces, a través de las aletas de acero en forma de Z, muy próximas entre



sí de los elementos del tubo condensador de agua fría, en donde es lavado y depurado de su propio condensado. En este diseño, unas cajas secadoras extraen la humedad restante del vaporantes de que éste entre al sobrecalentador (recalentador). Los diámetros del domo de vapor son del orden de 60 pulgadas en muchas instalaciones.



**Figura 4.2.2.3**  
Esquema que muestra el interior de un domo de vapor.

Limpiar el vapor es importante porque las turbinas modernas operan a una capacidad establecida y a altas velocidades por largos períodos, con lo que generando un vapor limpio y seco, la capacidad y eficiencia de las turbinas se mantendrá en un valor adecuado.

#### 4.2.3 CALDERAS DE TUBOS CURVOS O DOBLADOS

La mayoría de calderas acuatubulares son de tubos doblados; es tal el doblado que los tubos entren radialmente al colector. La figura 4.2.3, muestra una caldera de cuatro colectores o domos conocida como caldera Stirling. Esta caldera puede proyectarse para quemar cualquier clase de combustible ( en este caso queman carbón pulverizado ). La caldera de cuatro colectores tiene capacidad de agua relativamente grande, y es apropiada en casos en que la carga fluctúa rápidamente.

Los gases del hogar suben a través de los tubos hasta el colector frontal y a través de los serpentines del sobrecalentador ( si existe ), descenden hasta las placas

desviadoras, ascienden nuevamente en el último paso y, finalmente, pasando por encima de la parte alta de la placa desviadora trasera, van al precalentador.

Esta es una caldera de tres pasos porque los gases del hogar hacen tres pasadas alrededor de los tubos de agua. El calor se transmite al agua contenida en los tubos gracias a la convección de los gases. Aunque la rapidez de la transmisión de calor aumenta con la velocidad de la corriente de los gases, no es económico incrementar el número de pasos indefinidamente, debido a que el menor espacio para la circulación daría como resultado una pérdida mayor por rozamiento y por lo tanto un mayor consumo de energía de los ventiladores de tiro. En cada diseño, se hace un intento para **balancear** estos diversos factores entre sí y asegurar las proporciones que conducirán al máximo beneficio económico.

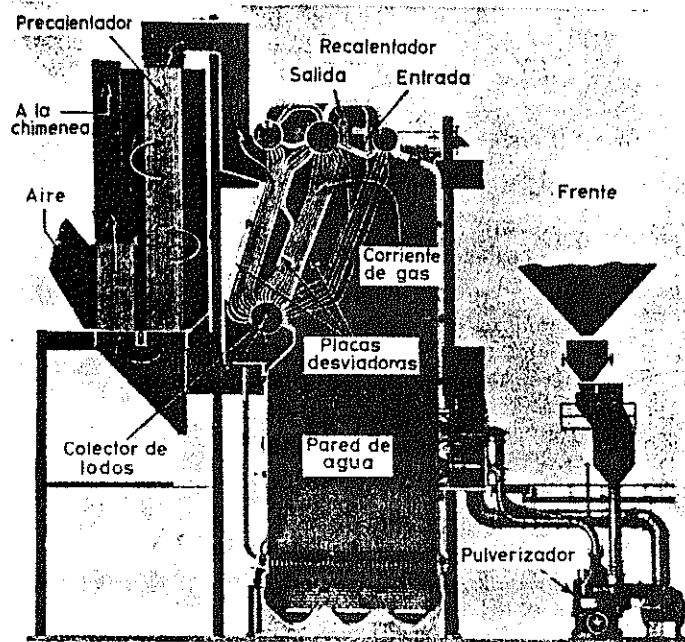


FIGURA 4.2.3

Esquema de una aldera Stirling. Capacidad: 200 KLb/hora a una presión y temperatura de diseño de 450 psia y 550°F .

Las paredes del hogar están enfriadas por agua. Los tubos de agua, conectados al sistema central principal generador de vapor, corren verticalmente sobre las paredes del hogar. Estos tubos se suman a la superficie absorbente de calor de la caldera, y limitan el incremento de temperatura del revestimiento refractario del interior del hogar, lo que hace posible elevar la intensidad de la combustión y por lo tanto la producción de la caldera, sin perjudicar excesivamente este revestimiento.

Las paredes del hogar protegidas o enfriadas por tubos de agua se llaman **paredes con pantallas de agua** o simplemente **paredes de agua**. El agua de alimentación entra en el colector trasero y circula hacia abajo por el haz trasero de tubos hasta el colector de lodos o sedimentos. En general, el agua más fría de los tubos está rodeada por los gases más fríos y el agua más caliente de los tubos por

los gases más calientes. El vapor se recoge en la parte de arriba de los tres colectores superiores que se encuentran conectados por pasos de vapor. El vapor casi saturado sale del colector trasero y pasa por los serpentines del sobrecalentador llamado de **convección**, y esto es porque la mayor parte del calor utilizado para calentar el vapor se debe a la corriente de gas caliente a través de los serpentines.

Algunas veces, los serpentines del sobrecalentador se colocan contra una pared del hogar, semejantes a los tubos de la pared de agua, llamando a dichos sobrecalentadores **radiantes** y se hace debido a que la mayor proporción de calor que pasa al vapor es calor radiante o por radiación. El vapor sobrecalentado pasa del generador de vapor a la maquina motriz que podría ser una turbina de vapor.

El tipo de caldera Stirling puede proyectarse para producir hasta 1,000,000.00 Lb/hora de vapor para presiones del orden de 750.00 psia.

#### 4.2.4 CALDERAS UTILIZADAS EN FABRICAS DE AZUCAR

En los ingenios azucareros se utilizan generalmente cuatro tipos de calderas:

- a) La caldera de tubos de fuego o tipo elefante.
- b) La caldera semitubular o multitubular.
- c) La caldera de tubos de agua con cabezales y tubos rectos de pendientes moderadas.
- d) La caldera de tubos de agua curvos, inclinados agudamente y conectados directamente a los domos.

La caldera del tipo elefante se utiliza pocas veces. Es más o menos similar a la caldera semitubular pero tiene una capacidad de agua apreciablemente mayor.

Los dos tipos de calderas de tubos de agua modernas no difieren mucho. El de tipo de tubos rectos tiene la ventaja de que los tubos pueden disponerse en zig-zag ( como el caso de las calderas Babcock y Wilcox o Cail-Steinmuller ); proporciona por esta razón una mejor mezcla de los gases de combustión, una mejor utilización de la superficie de calentamiento de los tubos y origina depósitos de hollín menos voluminosos en las caras trasera y frontal de los tubos. En cuanto a las calderas de tubos curvos, permiten una circulación de agua más rápida por la inclinación aguda de éstos ( de 50 a 80° ).

Un inconveniente del tipo de tubos curvos es el reemplazo de éstos, que es difícil. La dificultad se vence arreglándolos a intervalos longitudinales alternativamente anchos y angostos, para poder pasar el tubo de cambio a través de los espacios anchos.

De la misma manera, el tipo de caldera de cabezales y tubos rectos necesita, para permitir un cambio fácil de los tubos, que el frente de la caldera tenga un espacio suficiente e igual a lo largo de ellos; los conductores de bagazo deben arreglarse en consecuencia.

### 4.3 CAPACIDAD DE PRODUCCION DE VAPOR DE CALDERAS

La producción de un generador de vapor se da frecuentemente en kilogramos de vapor por hora, pero como el vapor a distintas presiones y temperaturas posee variadas cantidades de energía no se mide exactamente la energía producida. La capacidad de una caldera de vapor se expresa más concretamente en forma de calor total transmitido por las superficies de caldeo en kcal por hora. La ASME recomienda como unidad el kilo BTU (1,000 BTU=254 kcal) o la mega BTU ( 1,000,000 BTU=254,000 kcal ).

El proceso de transmisión de calor realizado en un generador de vapor es un proceso de flujo constante, en el cual el calor transmitido es igual a la variación de la entalpía del fluido. Por lo tanto, la producción de la caldera medida por el calor absorbido por el agua y vapor será:

$$Q = m_s ( h - h_f )$$

en donde :

$Q$  = producción de la caldera, en kcal/hora.

$m_s$  = peso del vapor producido por la caldera, en kcal/kg.

$h$  = entalpía de un kg de vapor a la presión y título o temperatura observados, en kcal/kg.

$h_f$  = entalpía del líquido de un kg de agua de alimentación a las condiciones que llega a la caldera, en kcal/kg.

Cuando el peso de vapor  $m_s$  es la cantidad máxima que la caldera puede producir por hora a la temperatura de trabajo especificado, la expresión de la producción de la caldera da **la capacidad máxima**. Pero si  $m_s$  representa el peso del vapor que la caldera puede producir con más eficiencia; la producción correspondiente se denomina **capacidad normal**.

La potencia en **HP de caldera**, establecida en 1,859 por la ASME, estaba basada en una máquina de vapor que empleaba 30 libras (13.62 kg) de vapor por HP hora a una presión relativa de 4.9 kg/cm<sup>2</sup> ( 69.7 psi ) y con agua de alimentación de la caldera 38.5°F. Esto corresponde a la vaporización de 15.66 kg (34.452 Lb) de agua por hora a 100°C ( 212 °F ), lo cual significa la conversión de 15.66 kg de agua por hora a 100°C en vapor seco a 100°C, a la presión atmosférica normal ( 1.033 kg/cm<sup>2</sup> o 14.696 psi ) . En estas condiciones, cada kg de vapor producido requiere la entalpía de vaporización a la presión atmosférica normal, la cual vale 543.4 kcal (970.30 Btu/Lb). Por lo tanto, la capacidad de una caldera podrá expresarse de la forma siguiente:

$$\text{HP de caldera} = [ m_s * (h - h_f) / (543.4 * 15.66) ]$$

Aunque el término **HP de caldera** no se considera actualmente como una unidad aceptable de capacidad de una caldera, el hecho de haberse empleado durante muchos años exige que el técnico conozca su significado y limitaciones, se aplica más en calderas pequeñas.

Otras unidades de capacidad de caldera que se han utilizado para fines comparativos son el factor de vaporización y la vaporización equivalente.

**El factor de vaporización:** es la relación entre el calor absorbido por 1 kg de agua de alimentación en las condiciones reinantes de la caldera y el absorbido por 1 kg de agua a 100°C, al vaporizarla a 100°C . De donde resulta:

$$F. V = (h - h_f) / 543.4 \quad \text{Sistema Internacional.}$$

$$F. V = (h - h_f) / 970.3 \quad \text{Sistema Inglés.}$$

**La vaporización equivalente:** se define como los kilogramos de agua por hora a 100°C, que se vaporizarían a 100°C, si se hubiese absorbido la misma cantidad de energía que en las condiciones observadas en la caldera. Por lo tanto la expresión resulta ser:

$$V. E. = [m_s (h - h_f)] / 543.4 \quad \text{Sistema Internacional.}$$

$$V. E. = [ m_s (h - h_f) ] / 970.3 \quad \text{Sistema Inglés.}$$

Un término utilizado especialmente para pequeñas calderas es la potencia nominal. Todas las calderas están basadas en 0.93 m<sup>2</sup> de superficie de caldeo por HP de caldera. Según este procedimiento, todas las calderas que tengan la misma superficie de caldeo tienen la misma potencia nominal, pero si una caldera tiene una superficie de caldeo dispuesta en forma más ventajosa que otra teniendo como consecuencia más capacidad en condiciones de trabajo similares. La potencia nominal no expresa las limitaciones de capacidad de las calderas actuales, ya que la mayoría de las centrales térmicas pueden desarrollar del 400 al 600% de su potencia nominal y algunas de ellas trabajan durante largos períodos al 300%. El rendimiento de las calderas puede disminuir cuando desarrollan más de su potencia nominal. Esta disminución de rendimiento no suele ser apreciable hasta que la caldera desarrolle 200% o más de su potencia normal, y es debida a la capacidad de la caldera de absorber el calor adicional liberado por el fuego en estas condiciones de trabajo.

#### 4.4 COMPORTAMIENTO DE LAS CALDERAS

Este puede expresarse en función de los kilogramos de vapor producidos, velocidad de combustión, transmisión de calor en kcal por metro cuadrado de superficie de caldeo y por hora, temperatura de los gases de la chimenea, porcentaje de CO<sub>2</sub> en dichos gases, combustible sin quemar contenido en las cenizas y escorias, porcentaje de la potencia nominal de la caldera desarrollado y rendimiento global.

El **rendimiento global** de una caldera de vapor en condiciones de funcionamiento cualquiera es la relación entre el calor transmitido y la energía suministrada en forma de combustible. Se determina mediante la expresión:

$$e_b = [(m_s (h - h_r)) / (m_f * F)] * 100$$

en donde:

$e_b$  = rendimiento del generador de vapor, en % ; incluyendo caldera, recalentador, hogar, camisas de agua y calentador del aire.

$m_f$  = peso total del combustible quemado por hora, en kg;  
m<sup>3</sup> tratándose de combustibles gaseosos.

$F$  = potencia calorífica superior del combustible quemado, en kcal por kg; kcal por m<sup>3</sup> tratándose de combustible gaseoso.

La velocidad de combustión se puede expresar en kilogramos de combustible quemado (a) por metro cuadrado de superficie de parrilla y por hora, o (b) por metro cúbico de volumen de hogar y por hora. La capacidad que una caldera ( kilogramos de vapor producidos por hora ) puede desarrollar depende de la velocidad de combustión, es decir, de la clase de combustible, tamaño y tipo de parrilla, y cantidad de aire suministrada. En las calderas de tipo locomotora, se han obtenido velocidades de combustión de 976 kg de carbón por m<sup>2</sup> de superficie de parrilla, y por hora, y da como resultado una gran capacidad de producción, pero a expensas del rendimiento; en las calderas usadas en la **industria azucarera** que utilizan como combustible el bagazo, se da un efecto similar. En centrales térmicas modernas, se determina experimentalmente la velocidad de combustión hasta alcanzar un valor máximo, pasado el cual disminuye al aumentar la capacidad de producción.

Entre los factores que inciden el rendimiento de una caldera se tienen:

- a) Nivel de exceso de aire,
- b) régimen de producción de vapor,
- c) temperatura de los gases de la chimenea,
- d) temperatura del agua de alimentación,
- e) temperatura del aire de combustión,

- f) suciedad en las superficies de transferencia,
- g) purgas,
- h) presión del vapor,
- i) pérdidas de calor al exterior,
- j) tipo de combustible.

Las calderas provistas de hogares mecánicos pueden alcanzar un rendimiento comprendido entre 60 y 85%, que depende principalmente del tamaño de la caldera, forma del hogar y de los equipos auxiliares instalados para la recuperación de calor. Grandes instalaciones que queman carbón pulverizado tienen un rendimiento de caldera comprendido entre 80 y 88%. Si en estas centrales se utilizan precalentadores de aire y economizadores, se obtienen rendimientos globales hasta del 85%.

#### **4.5 ACCESORIOS DE LAS CALDERAS**

Los accesorios que generalmente llevan las calderas son: instrumentos y controles que son esenciales para que una caldera funcione en forma segura, eficiente y confiable; válvulas de seguridad, purgadores, sopladores de hollín.

Los controles van desde sistemas manuales sencillos hasta sistemas automáticos ayudados por computador, y por consiguiente, el tipo de sistema de control que utilice la caldera depende de las necesidades de toda la operación y de los costos involucrados.

##### **INSTRUMENTOS DE UNA CALDERA**

Todas las calderas de vapor deben de estar dotadas de instrumentos que indiquen o registren las siguientes variables:

- \* Presión de vapor.
- \* Temperatura del vapor.
- \* Nivel de agua.
- \* Presión del agua de alimentación.
- \* Tiro o presión del horno.

Además de los aspectos anteriores, para calderas que producen arriba de 10,000 Libras de vapor/hora, se debe controlar:

- \* El flujo de vapor.
- \* El flujo de agua de alimentación.
- \* El flujo de aire de combustión.
- \* Los componentes del tiro o presiones.
- \* La temperatura del agua de alimentación.
- \* La temperatura de los gases de combustión.
- \* El flujo de combustible ( si es posible ).
- \* Las presiones del combustible ( si es pertinente ).

- \* La temperatura del combustible (si es pertinente ).
- \* La velocidad y amperaje de ventiladores, bombas, alimentadores y otros componentes auxiliares que consumen energía eléctrica.

Otras mediciones deseables son: análisis de gases de la chimenea, densidad del humo, conductividad y concentraciones de iones hidrógeno en el agua de la caldera. La cantidad y lo complejo de los instrumentos que se utilizan en general es proporcional al tamaño y complejidad de la unidad.

#### 4.5.1 MANOMETROS

Son los dispositivos destinados a medir la presión de la caldera sobre el nivel de la presión atmosférica. Generalmente trabajan:

- a) Por la expansión de un diafragma corrugado debido a la acción directa de la presión.
- b) Por el desplazamiento de un tubo espiral bajo la acción directa de la presión.

Los manómetros han de instalarse de manera que se hallen aislados del calor radiante y en un sitio visible. El tubo de expansión estará fijo directamente a la cámara de vapor (domo), y debe estar provisto de un sifón para que el agua condensada en el sifón sea la que actúe sobre el aparato, y evite el rápido deterioro del mismo por la acción directa del vapor.

#### 4.5.2 INDICADORES DE NIVEL

Toda caldera debe estar provista de por lo menos dos aparatos independientes que permitan conocer el nivel de agua; uno de ellos debe ser el cristal indicador (tubo de vidrio ) y el otro puede ser la válvula de prueba. El cristal consiste generalmente en un tubo de vidrio plano resistente con ambos extremos conectados al interior de la caldera, de tal manera que el nivel de agua del tubo es representativo del nivel de agua de la caldera.

Generalmente se montan en la parte frontal del cuerpo cilíndrico de la caldera, de forma que puedan ser visibles fácilmente. La parte alta del nivel de agua se pone en contacto con la cámara de vapor del cuerpo cilíndrico de la caldera, y el otro extremo con la de agua. Existen algunos indicadores con dispositivos de alarma para denunciar los niveles bajo y alto.

La oscilación del nivel del agua alrededor de su nivel de trabajo es característica de la operación normal del nivel. Si el nivel no oscila, esto indica que las conexiones están obstruidas. De las consideraciones dadas anteriormente, se desprende la importancia de mantener el nivel y sus conexiones libres de sedimentos e incrustaciones que perturben el libre flujo del agua, y produzcan indicaciones erróneas del nivel del agua en la caldera.

El nivel de agua de la mayoría de las calderas de acuotubos horizontales se mantiene, de manera que el cuerpo cilíndrico quede lleno hasta la mitad



aproximadamente. El nivel de agua se coloca normalmente de manera que el tubo de vidrio quede lleno hasta la mitad cuando el nivel del agua sea el correcto.

#### **4.5.3 CONTROLADOR DEL NIVEL DE AGUA DE ALIMENTACION**

El nivel de agua del domo de vapor debe ser controlado automáticamente. El control más simple consta de un solo elemento que ajusta la posición de la válvula de agua de alimentación en respuesta a cargas o al nivel del agua de la caldera. Uno de los más comunes consta de un termostato inclinado que efectúa la reposición mediante el control de la válvula de agua de alimentación. Las temperaturas medias varían con la posición del nivel de agua.

Este sistema simple fue instalado en muchas calderas antiguas en fábricas de azúcar en donde la demanda de vapor ( y presión ) varía considerablemente el nivel dentro del domo, y está además sujeto a fluctuaciones rápidas. Este resultado del nivel de agua alarma al sistema que frecuentemente es sonoro, y dentro del tiempo, el operador efectúa las acciones necesarias cuando peligrosamente ocurre una situación baja del nivel de agua.

A manera de proveer una mejor respuesta a las variaciones del nivel de agua, el controlador de un solo elemento puede ser modificado a un controlador de 2 elementos. Esto es muy simple, solamente se agrega un elemento adicional para medir el flujo de vapor. Donde no hay un medidor de orificio para medir el flujo de vapor; algunas veces es posible usar la pérdida de presión a través del sobrecalentador como una señal. La pérdida de presión alta indica alto flujo de vapor con una señal desde el nivel del domo dirigido por la válvula de alimentación y viceversa.

El control de dos elementos mantendrá el nivel de agua más estable con una carga variable más que el control de un solo elemento.

Las calderas modernas son equipadas con un control de tres elementos que dependen del nivel del domo, flujo de vapor y flujo de alimentación para manejar cargas fluctuantes.

Los ingenios modernos, que aún tienen modelos antiguos de calderas, están cambiando sus sistemas por equipos con tres elementos de control, y tiene como ventajas: bajo costo, confiabilidad y modernos sistemas electrónicos.

#### **4.5.4 VALVULAS DE SEGURIDAD**

Se emplean para impedir que en las calderas se desarrollen presiones de vapor mayores que las de diseño, y se abren automáticamente a una presión determinada y dejando escapar el vapor.

La válvula de seguridad tendrá la capacidad para desahogar todo el vapor que pueda ser agregado por la caldera, sin que la presión aumente más del 6% sobre la presión máxima admisible de trabajo. No deberá existir entre la válvula de

seguridad y la caldera, ningún tipo de estrangulamiento, asimismo la descarga de la válvula deberá ser hecha libremente a la atmósfera con el menor estrangulamiento posible.

Cuando hay dos válvulas de seguridad, la segunda se regulará a una presión máxima del 3% más alta que la primera válvula y solo entra en acción cuando la primera válvula no libera la presión acumulada a una velocidad tal que evite la elevación de la presión. El número y tamaño de las válvulas de seguridad para una determinada caldera, generalmente viene especificada por empresas dedicadas a velar por la seguridad del personal que trabaja en dicha caldera.

La ASME ( Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ) es la entidad que por medio de un reglamento de calderas se encarga de que los fabricantes de calderas incluyan dentro de los equipos el tipo de válvula de seguridad adecuado a cada tipo de caldera de acuerdo a la presión de trabajo.

#### 4.5.5 LOS PURGADORES

Generalmente se instalan en la parte más baja de la caldera y algunas veces también en el cuerpo cilíndrico; se utilizan para sacar una cierta cantidad de agua con el fin de extraer de la caldera los lodos, sedimentos y espumas. Las impurezas de las grandes cantidades de agua vaporizada se van precipitando constantemente. En ocasiones, se emplea un purgado (por el fondo) continuo, por medio de un tubo pequeño, para sacar las impurezas a medida que se precipitan. No obstante, cuando se sigue este procedimiento, los purgadores grandes hay que abrirlas de vez en cuando para sacar más completamente los lodos acumulados.

Las impurezas del agua de alimentación se combinan mecánica y químicamente durante el funcionamiento de la caldera para formar la capa de incrustación sobre las superficies de caldeo. Las pérdidas caloríficas ocasionadas por las incrustaciones de las calderas varían con la temperatura y con los caudales de los gases y del agua. Las incrustaciones pueden provocar recalentamientos locales, los cuales representan peligrosas deformaciones y erosiones que deterioran los tubos y las planchas. En todas las calderas que se trabajan con agua sin destilar, se necesita utilizar periódicamente limpiatubos mecánicos para quitar en forma eficiente la incrustación depositada sobre la superficie de los tubos.

#### 4.5.6 SOPLADORES DE HOLLIN

De forma similar a la incrustación depositada sobre las superficies de caldeo bañadas por agua, el hollín se acumula sobre la cara expuesta a los gases que van a la chimenea. El hollín está formado por toda la materia sólida que abandona el hogar y es arrastrado por los productos gaseosos de la combustión. Se ha demostrado, por medios experimentales, que el hollín es un excelente aislante del calor, el cual produce una disminución de la conductibilidad calorífica del 25% para espesores de 1.5 mm.

Las superficies de las calderas en contacto con los gases de combustión se limpian normalmente por medio de lanzas de vapor movidas a mano, con sopladores de hollín, cepillos o dispositivos similares.

Los **sopladores mecánicos de hollín** están instalados en las calderas permanentemente y situados de manera que todas las superficies de caldeo sometidas a la acumulación de hollín puedan limpiarse con chorros de vapor, aire o una mezcla de aire y vapor. Los sopladores de hollín están contruidos para girar en un sentido que estiren una cadena; los chorros barren el arco de soplado una vez cada revolución.

## 4.6 EQUIPOS AUXILIARES DE LAS CALDERAS

Dentro de los equipos auxiliares para la operación normal de una caldera, se tiene: el hogar, las paredes, alimentadores de combustible, calentadores de aire, recalentadores, saturadores, economizadores, etc.

### 4.6.1 HOGARES DE LAS CALDERAS

Las calderas cuya superficie de caldeo es más grande de 93 m<sup>2</sup> (1,000 pie<sup>2</sup>) suelen descansar sobre estructuras contruidas con perfiles de hierro independientes de la obra de albañilería, debido al peso de aquellas y al tiempo para solucionar los problemas que presentan la dilataciones y contracciones. El **hogar** es el lugar o recinto en donde se quema el combustible.

Las paredes de los hogares pueden ser de tres clases: de refractario macizo, de refractario colgante y de **camisa de agua**.

Las paredes de refractario macizo se emplean en pequeñas calderas de poca producción de vapor. La marcha máxima a la cual puede trabajar un hogar viene limitada por el punto en el que el efecto combinado del peso y temperatura deforma el ladrillo; este estado se denomina **punto límite del refractario** y se logra cuando se intenta alcanzar la producción máxima en un generador de vapor dado.

Las paredes de refractario colgante o sostenido descansan en una armazón de perfiles de hierro, a la cual se adaptan refractarios de forma especial.

Las **paredes o camisas de agua** consisten en una hilera continua de tubos unidos a una pared de refractario. El propósito original de las paredes era de proteger o sustituir los refractarios usados en la construcción del horno (hogar) y disminuir la temperatura del depósito de hollín para evitar la acumulación de escoria. Los tubos que forman la pared de agua son altamente eficientes en la absorción de energía radiante, y se puede conseguir con ellos elevadísimas producciones de vapor.

Existe diversidad de hogares de acuerdo con el diseño de la caldera y el tipo de combustible que se va a emplear; en este caso, se utiliza como combustible el **bagazo**, teniendo entre ellos: hogares fijos, hogares mecánicos con parrilla

deslisante, de alimentación superior e inferior, etc. Teniendo relevancia el equipo necesario para preparar convenientemente el combustible para su ignición en dicho hogar.

## **HORNOS UTILIZADOS POR CALDERAS EN FABRICAS DE AZUCAR**

Las calderas que queman bagazo son invariablemente del tipo de tubos de agua o acuatubulares con una diversidad de sistemas de quemado tales como en montón o en suspensión.

Los hornos de celda y de herradura son por excelencia para quemar en montón o en forma de pila. En éstos, el bagazo es alimentado por gravedad a un horno u hogar de refractario alineado a donde llega en forma de montón. La combustión toma lugar en la parte exterior de la superficie del conductor.

El aire de combustión es proporcionado a través de un canal o lumbrera alrededor de la periferia de la superficie del hogar.

Las ventajas del tipo de encendido quemado en montón es que es extremadamente simple, sin partes en movimiento y una acumulación de bagazo es mantenida adentro del horno u hogar. Si debiera el proveedor de bagazo ser interrumpido, la caldera continuará una producción de vapor por un tiempo sin una baja apreciable de la presión del vapor.

Las desventajas son: altos costos de mantenimiento para hornos u hogares con mampostería de ladrillo, control pobre de aire de combustión, a menudo considerables fugas a través del vertedero de alimentación de bagazo y una lenta respuesta a los cambios de carga. La remoción de cenizas representa un trabajo pesado y caluroso, toma bastante tiempo su realización, pues existen unas regiones del hogar en donde la remoción se dificulta. De este modo habrá una caída de presión en todo momento en el hogar durante el principio de limpieza.

Algunas calderas antiguas eran de forma fija con parrilla escalonada o de grada, en la cual el bagazo combustible era alimentado en la parrilla por medio de una canaleta transportadora de bagazo ( corrientemente chifle ) y un alimentador de rotación positiva en la cima o cumbre del hogar.

El aire de combustión pasa a través de la parrilla y es inducida naturalmente hacia una chimenea grande o por un ventilador de tiro inducido. En algunos casos, son empleados ventiladores de tiro forzado, pero este tipo de diseño de parrilla no es usado a lo largo de las calderas modernas.

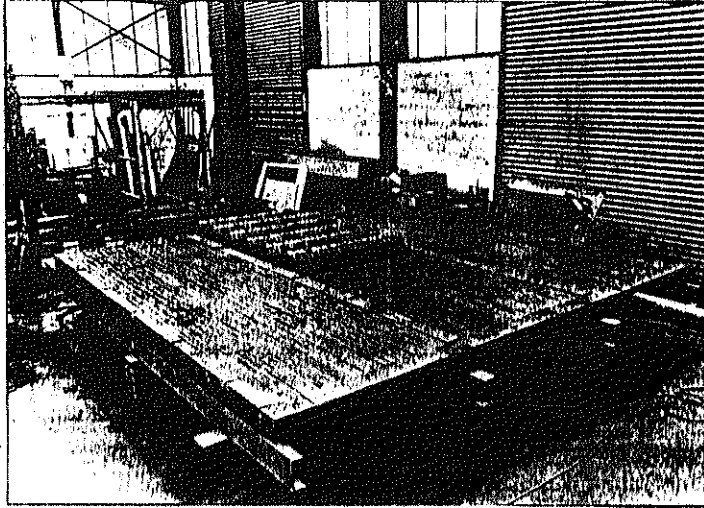
Los sistemas de quemado en suspensión implican: alimentación de bagazo por medio de alimentadores de desplazamiento positivo que pueden ser de tambor rotativo, tornillo o tipo cadena, los cuales forman doble propósito de alimentadores de combustible y prevención de fugas de aire en el hogar u horno a través del conducto de alimentación.

El combustible es alimentado hacia la cámara de combustión por medio de un distribuidor, que junto con el chorro o chorros de aire el combustible se dirige hacia el hogar. Con el aire y el combustible mezclados íntimamente cuando entran al hogar, se logran combustiones considerables entre 25 - 50%, suponiendo o tomando lugar la suspensión dentro del hogar. Así, esta particularidad donde el bagazo es muy fino con textura similar al acerrín. El grueso o conjunto de pedazos o trozos de bagazo caen dentro de la parrilla en donde son quemados rápidamente. Las tendencias del diseño de parrillas, según los fabricantes han sido las de **vertedero estacionario**, agujeros de espiga ( **pin hole grate** ) o de tipo móvil-oscilante ( **Traveling grate** ); estas dos últimas son muy costosas y empleadas adecuadamente sólo para calderas muy grandes.

La principal ventaja con la parrilla de agujeros de espiga (**PIN HOLE GRATE**), es que es estacionaria sin partes en movimiento. La parrilla de barras de hierro fundido es soportada en el frente o pared trasera de tubos de la caldera, que las conserva frescas. A veces es ventajoso para el descargado de ceniza hacerlo en el frente de la caldera. Lo atractivo de la parrilla vertedora es que además es estacionaria, simple, segura y de construcción fuerte. Es esto, además de dar un funcionamiento eficiente y una fácil limpieza.

La superficie de la parrilla es construida de perfiles especiales de hierro fundido resistentes al calor, emparrillado de rosca individual de ejes cuadrados y ordenadas hileras transversales a lo ancho de la caldera. Cada eje es soportado en cojinetes y fundición internamente sellada, son proporcionados en medio o entre secciones o partes de la parrilla y también en el frente y atrás.

Estas parrillas son de 2 secciones hondas o profundas y pueden tener 2, 3 ó 4 zonas anchas. En la figura 4.6.1, se muestra una parrilla para una caldera de 45 Ton/hora, que es de 3 secciones anchas, con una sección de volteo o vaciado. Los brazos de manivela son ajustados a cada una de las flechas y éstas son conectadas a una barra común en turno que es conectada a un cilindro de potencia que puede ser de vapor, neumático o hidráulico.



**Figura 4.6.1**  
Parrilla del tipo de vertedero o de volteo.

La ventaja de las parrillas de vertedero o volteo es que la combustión es adecuada, con exacto control del aire, entregando una máxima eficiencia de caldera.

El mantenimiento es insignificante o despreciable y responde a cambios de carga que son muy rápidos.

La desventaja es que tiene muy poca provisión o almacenamiento de combustible en el hogar; de este modo la presión de la caldera baja brevemente después de la interrupción del suministro de bagazo o detención. Se auxilia con quemadores de **aceite combustible**, corrientemente apropiados o que están ajustados a superar estos problemas, y para lo cual el sistema en atraso de alimentación es esencial.

Existen muchas calderas obtenidas de elementos de hogares antiguos transformados a suspensión ardiente con parrilla para desechos, por lo cual hay compañías de diseño que se dedican a facilitar la conversión de parrillas para quemar desechos en todas partes del mundo.

La llave de futuros diseños cuando se considera la conversión de hogar a uno del tipo de montón de desechos (**DUMP**) o parrilla de agujeros de espiga (**PIN HOLE GRATE**) son:

- 1) El área de la parrilla debe ser adecuada para asegurar la combustión completa del combustible utilizado.
- 2) El volumen del hogar debe ser bastante grande hasta asegurar la combustión completa dentro del hogar.
- 3) Los hogares deben sobretomar una limitada velocidad para prevenir que las partículas de combustible sean conducidas por los tubos de convección hacia la caldera.

La correcta aplicación de futuros diseños dará un hogar lleno de partículas de combustible quemado con una delgada cama de combustible en la parrilla.

Otro de los diseñadores de sistemas de alimentación es la **Riley's Stoker Systems** (Sistemas de Alimentación Riley ), la cual, según ellos, son una industria estándar para una eficiente y confiable operación de calderas. Actualmente ofrecen una amplia gama de sistemas de alimentación, los cuales se acomodan en un amplio rango de combustibles: bituminosos y no bituminosos, madera triturada, **bagazo**, cortezas y cáscaras para ser quemadas, desechos preparados y casi cualquier tipo de combustible sólido.

Ellos ofrecen dos tipos de diseño de parrilla: **Traveling Grate** ( Parrilla móvil ) y **Water - Cooled Grate** ( parrilla enfriada por agua ).

### Parrilla Móvil ( TRAVELIG GRATE )

#### FLEXIBILIDAD DE COMBUSTIBLE

- a- Los sistemas de alimentación (repartidores) se acomodan a cambios de aprovisionamiento de combustibles, mientras se mantiene la planta disponible.
- b- Los diseños Riley le permiten la utilización de una amplia gama de combustibles sólidos y materiales de desecho.

#### COSTOS DE OPERACION BAJOS

- a- Bajo consumo de energía derivado de una baja pérdida en el diseño del sistema de aspiración.
- b- Los requerimientos de aire son bajos gracias a los éxitos alcanzados por los modernos sistemas de combustión.
- c- La eficiencia de combustión es muy alta debido a un bastante efectivo sistema de atomizado de aire de combustión ( Overfire Air System ).
- d- Es capaz de quemar o utilizar combustibles tales como el carbón piedra natural.

#### COSTOS DE MANTENIMIENTO BAJOS

- a- Es el único sistema de soporte de parrilla, el cual permite reemplazar la parrilla sin dejar de operar.
- b- El promedio de vida de la parrilla es prolongado, debido al único diseño de parrilla Riley.

### Parrilla enfriada por agua ( WATER-COOLED GRATE )

#### FLEXIBILIDAD DE COMBUSTIBLE

- Instalación flexible con operación regulada correspondiente con madera combustible acondicionada.

#### POSEE COSTOS TOTALES BAJOS

- a- Un único sistema de parrilla diseñado para proveer una extensa vida al alimentador.
- b- Capaz de quemar una extensa gama de combustibles y desechos de materiales con características extremas de fluir.
- c- Bajo índice de residuos sin quemar, y que resulta en una alta eficiencia de la caldera.
- d- Diseño estacionario que minimiza la operación y los costos.

Además los diseñadores de Riley suministran distribuidores neumáticos de combustible de desecho. Estos expansionan los combustibles de desecho tales como: cortezas, astillas de madera, **bagazo**, y otros combustibles con celulosa totalmente en forma uniforme sobre la superficie de la parrilla. Los combustibles poco densos seguramente son quemados rápidamente y responden inmediatamente a los cambios de carga.

#### 4.6.2 CALENTADORES DE AIRE

Estos dispositivos sirven para calentar el aire recuperando parte del calor de los gases que van a la chimenea. Las ventajas que derivan del empleo de aire precalentado en la combustión son : conservación de la energía , combustión mejorada, quemar con facilidad combustibles de baja calidad, aumento de rendimiento y capacidad. El aire caliente, al ser introducido en el hogar, aumenta la temperatura de éste y como consecuencia aumenta la transmisión de energía radiante a la caldera.

Los calentadores de aire pueden ser de los tipos de convección y regenerativos. El de tipo de convección se subdivide en tubular y de placa.

La selección de un tipo de calentador, para una instalación dada, depende de factores como el espacio, el arreglo y la operación.

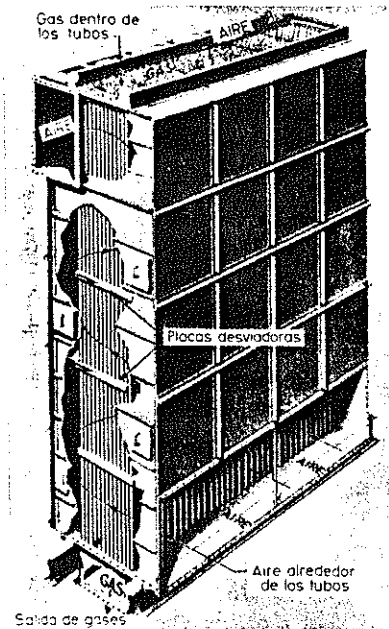
Los calentadores tubulares y de placa son simples intercambiadores de calor que difieren entre ellos por la superficie de intercambio, en el primero de tubos y en el segundo de placas de lámina.

En los calentadores de tipo tubular, generalmente se establece el principio de contraflujo o contracorriente. Los gases calientes entran a los tubos por la parte alta y salen por el fondo. El aire frío entra en la frontal del fondo, lamiendo la superficie externa de los tubos y saliendo en la parte superior por un conducto que lo dirige hacia el hogar. Tabiques horizontales dirigen el curso del aire para conseguir la máxima transmisión de calor. Los tabiques se disponen de forma que



la velocidad del aire se mantenga lo más constante posible. Generalmente se fabrican de acero ordinario o acero cobrizado al cromo, de 51.5 x 57 mm, y como se mencionó con anterioridad, los gases pasan por los tubos y el aire alrededor de ellos.

En la figura 4.6.2, se muestra un calentador de aire del tipo tubular.



**Figura 4.6.2**  
**Calentador de aire tipo tubular.**

El calentador de tipo regenerativo más ampliamente usado es el Ljungstrom y consiste en un laberinto metálico en forma de tambor que gira lentamente, de manera que alternativamente es calentado por los gases y es enfriado por el aire. Los gases que van a la chimenea fluyen en sentido ascendente a través de la mitad del laberinto y el aire inyectado por un ventilador a través de la otra mitad. Una junta divisoria evita en todo lo posible que el aire y los gases se mezclen. El laberinto metálico está diseñado en tal forma que presente la máxima superficie y ofrezca la mínima resistencia al paso de los gases y del aire.

Los calentadores del tipo regenerativo son de bajo rendimiento, pero tienen la ventaja de no estar sometidos a la corrosión y de no necesitar ninguna limpieza, y no son utilizados en calderas en fábricas de azúcar.

El término precalentador se reserva generalmente a los calentadores tubular y de placa, con superficies de transmisión de calor de metal. Siendo usados cuando las corrientes de gases tienen temperaturas inferiores de 500°C ( 932°F ) a temperaturas mayores, los tubos o las placas, aunque, siendo de hierro colado, quedarán rápidamente fuera de servicio.

### 4.6.3 RECALENTADORES O SOBRECALENTADORES

Son simples intercambiadores de calor destinados a comunicar energía adicional al vapor además de la que posee en el estado de saturación a una presión dada . Los sobrecalentadores que toman la energía de los gases de la chimenea se denominan de convección y los que quedan expuestos a la energía radiante de las llamas reciben el nombre de sobrecalentadores o recalentadores de radiación. Reciben el vapor saturado o ligeramente húmedo que viene del domo de la caldera y lo pasan sobrecalentado al colector general de vapor para su distribución en los equipos.

El arreglo de la superficie del sobrecalentador en un generador de vapor es importante debido que a diferentes ubicaciones darán lugar a distintas características de temperatura de salida del sobrecalentador. Los del tipo radiación tienen más rendimiento al aumentar la producción de la caldera, mientras que en los de convección sucede lo contrario. Cuando son de dimensiones adecuadas y se instalan en serie, los dos tienden a dar una temperatura del vapor constante con independencia de las variaciones que pueda experimentar el caudal de vapor.

Generalmente están formados por tubos de pequeña sección de la misma forma y con varios codos, interpuestos entre dos colectores ( cabezales ). Cuando existen incrustaciones debidas a depósitos de agentes contaminantes conducidas por el arrastre de agua, la sección transversal de los tubos se reduce, con la consecuente reducción de la corriente de vapor, y disminuyen también el coeficiente de transmisión de calor. Como consecuencia deben cambiarse los tubos que forman el sobrecalentador, y es necesario tomar las precauciones para que no ocurra nuevamente.

El empleo de vapor sobrecalentado es muy importante cuando la energía necesaria para la operación de los equipos de un industria se obtienen por medio de turbinas de vapor. La humedad en el vapor saturado puede provocar una seria erosión en los álabes de las turbinas e incluso la pérdida total.

### 4.6.4 SATURADORES

En muchos procesos industriales ( fábricas de azúcar, pinturas, aceites, etc. ), es necesario disponer de vapor saturado en lugar de vapor sobrecalentado. Si en tales industrias se necesita también energía, la cual pueda ser generada más económicamente mediante vapor sobrecalentado, será preciso producir a la vez vapor sobrecalentado y vapor saturado. Si se pretende obtener estas dos clases de vapor mediante dos calderas independientes resulta complicado, y por esta razón todas las centrales industriales modernas sobrecalientan todo el vapor y se sirven de aparatos denominados **saturadores** para quitar el recalentamiento a la posición de vapor requerida por los aparatos y procesos. Cada uno de los equipos que utilizan vapor para su operación tienen como limitante la temperatura que puede soportar sin dañarse el material del cual fue construido; es necesario tomar en cuenta los datos de placa de la temperatura admisible para cada uno de los equipos.

Los saturadores pueden ser del tipo pulverizador y del tipo de superficie. En los primeros, se quita el recalentamiento inyectando agua de alimentación de la caldera. En los segundos, es mediante un intercambiador de calor, en el cual el agua y el vapor se mezclan. Cada tipo tiene una regulación automática.

#### 4.6.5 ECONOMIZADORES

En general, es un intercambiador de calor formado por un tubo de acero con aletas longitudinales o en forma de anillos, con el agua de alimentación que fluye dentro de los tubos y los gases de combustión que fluyen en forma anular sobre los tubos. Como el agua ha pasado por la bomba de agua de alimentación, su presión es un poco mayor que la de la caldera, y puede calentarse en ésta casi a la temperatura de saturación. Los tubos pueden ser continuos, en cuyo caso el agua tiene que ser lo suficientemente blanda para que la limpieza interna de los tubos no sea necesaria, a menos que se limpien con desincrustantes químicos. Si el agua de alimentación no es tan adecuada, los extremos de los tubos tienen que conectarse con cabezales, que se quitan para la limpieza interna.

Todas las superficies de transmisión de calor pierden eficiencia rápidamente cuando se deposita sobre ellas alguna materia extraña. Como el gas del conducto de humos ( gases de escape ) está siempre sucio, se instalan ventiladores de hollín al economizador, para limpiar internamente el exterior de los tubos.

Cuando se utilizan economizadores individuales ( uno por caldera ), éste por lo general se coloca antes del calentador de aire. Constituyen un medio para recuperar el calor perdido y mejora grandemente la eficiencia de las calderas.

#### 4.6.6 CONDENSADORES

Son aparatos en los cuales se condensa el vapor de escape procedente de máquinas y turbinas. Dentro de sus ventajas que se obtienen con su instalación tenemos: a) disminución de la presión de escape, con el consiguiente aumento de energía utilizable, y b) recuperación del condensado para utilizarlo como agua de alimentación para las calderas.

Dentro de los condensadores utilizados tenemos: 1) el de superficie, que tiene la característica de proporcionar una baja presión de escape y al mismo tiempo permite recuperar el condensado y 2) de contacto directo, que sólo proporciona una baja presión de escape, pues el condensado se mezcla con el agua refrigerante.

Un condensador **de superficie consiste generalmente** en un cilindro de hierro colado o de chapa de hierro, con una chapa portatubos en cada extremo, las cuales unen entre sí una multitud de tubos que forman la superficie de enfriamiento. El vapor de escape entra por un orificio situado en la parte superior de la envolvente, y el agua de refrigeración pasa por el interior de los tubos. Puede ser de paso único de manera que el agua circula en un solo sentido a través de los tubos, o de dos pasos en los cuales el agua circula en un sentido a través de la mitad de los tubos y vuelve a través de los restantes. Generalmente los de gran

tamaño están equipados con una bomba centrífuga para evacuar el condensado líquido y un eyector de aire de tipo chorro para evacuar el aire y los gases.

Los condensadores **de superficie** pueden recuperar el condensado porque no se mezcla con el agua de refrigeración. El vapor a condensar, normalmente circula por fuera de los tubos, mientras que el agua de enfriamiento o circulante por el interior de los mismos. Esto se hace principalmente porque el vapor limpio no ensucia la superficie externa de los tubos, la cual es difícil de limpiar. El agua de refrigeración frecuente está sucia y deja sedimentos en el interior de los tubos.

Los condensadores **de contacto directo** pueden ser de tipo chorro, barométrico y el de eyector. El de tipo chorro consiste en un cilindro en el cual la boca de entrada tiene una serie de boquillas en las que se rocía el agua de enfriamiento; también se le llama de mezcla y tiene la desventaja de que el condensado no se recupera pues es enviado al desagüe. El de tipo barométrico consta de un cilindro y además tiene una columna o tubo sumergido en depósito llamado pozo y teniendo la particularidad de que no tiene que ser mayor de 10.33 metros. Las principales ventajas del tipo barométrico son: provoca un vacío elevado, maniobra grandes cantidades de aire, son compactos, ausencia de partes móviles, funcionamiento simple y de gran rendimiento. El de tipo eyector consiste en un tubo convergente divergente en el cual se hace pasar vapor a gran velocidad y por una abertura lateral al inicio de la convergencia succiona el aire y los gases (sirve para la creación de vacío).

El agua necesaria para enfriamiento en los condensadores puede ser utilizada de fuentes tales como mares, lagos o ríos; es muy importante su tratamiento, que puede ser con sulfato de cobre, cloro, fenoles clorados y compuestos arsenicales o mercuriales.

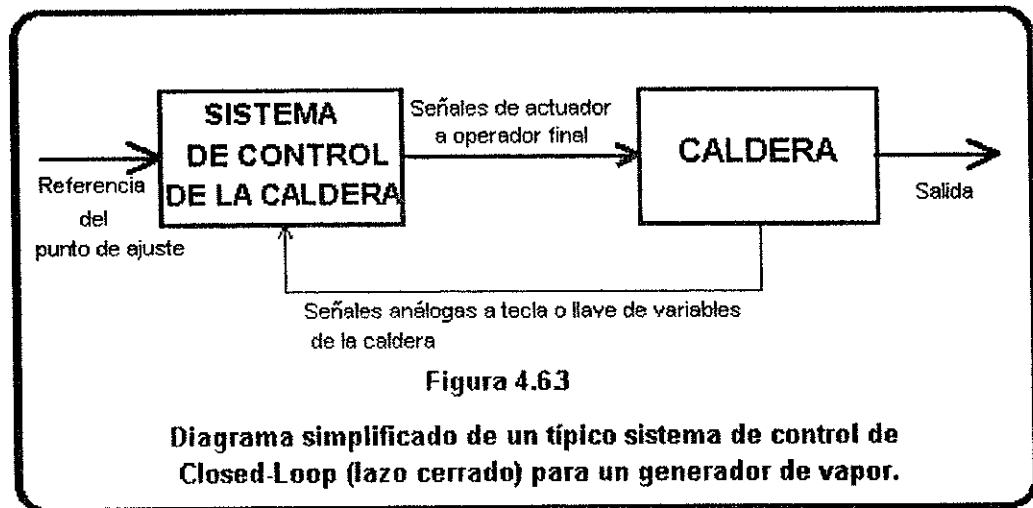
Otra parte importante consiste en el enfriamiento del agua que sale de los condensadores para su posterior uso e incluso para no contaminar las fuentes de agua. Se puede realizar por medio de estanques difusores o por medio de torres de enfriamiento.

Existen industrias como la azucarera, en la cual no se utilizan condensadores como los utilizados en las centrales térmicas, ya que el vapor de escape se utiliza en el proceso de fabricación, de manera que el vapor se condensa en intercambiadores de calor tales como calentadores de jugo, evaporadores y tachos.

#### 4.6.7 SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTION Y AGUA DE ALIMENTACION EN CALDERAS

Estos sistemas de control en las calderas regulan la transferencia de calor. El sistema de control es un lazo cerrado, con un sistema automático para determinar ciertas condiciones ya sean bajas o altas, que son usadas por instrumentos con un computador analógico para mantener seguro y eficiente el uso de aire, combustible y agua en la generación de vapor.

Básicamente, el sistema monitorea las variables de proceso ( presión del vapor, flujo, temperatura, nivel, etc., ) y genera señales análogas a esas variables. Estas señales que son primero medidas, alineadas e integradas, cuando son requeridas, son luego transmitidas a controles en donde son comparadas y seteadas manulamente o con valores remotos. Los controladores depués generan una señal al actuador que la envía a la posición final del operador a reducir el error de la estación reguladora a cero. De esta manera, el sistema de control responde a los cambios de carga en la caldera y controla la demanda para producir el flujo energético para un rendimiento de la caldera a los valores deseados mientras mantenga seguro y eficiente el funcionamiento de la planta. En la figura 4.6.3, se muestra un diagrama de un control de una caldera.



El control de transferencia de energía para el sistema que diseña Faxboro S.A. incluye:

- a- Control de combustión,
- b- Control de alimentación de agua,
- c- Control de la temperatura del vapor sobrecalentado.

#### CONTROL DE COMBUSTION:

El sistema de control de combustión monitorea el flujo de combustible, flujo de aire, el valor pico de la presión del vapor y controles del flujo de combustible y aire en el hogar para:

- 1- Mantener la presión pico del vapor a un valor preestablecido,
- 2- Mantener una relación aire/combustible.

Una deficiencia de aire puede ser causa de riesgo, que da como resultado una rica dosificación de combustible que se acumula en el hogar. Estas condiciones las impide el sistema de control de combustión en la forma siguiente:

- 1- Incrementa el flujo de aire antes del flujo de combustible cuando la carga de la caldera se incrementa.
- 2- Disminuye el flujo de combustible antes de flujo de aire cuando la carga disminuye.
- 3- Disminuye el flujo de combustible en proporción a una parcial o completa pérdida de flujo de aire.

En la figura 4.6.4, se muestra el esquema simplificado de un sistema de un sistema de control de combustión.

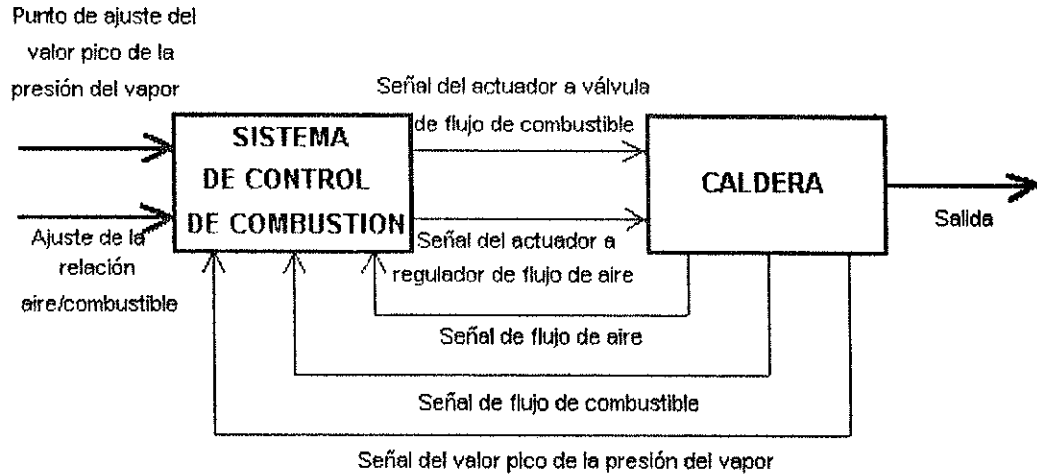


Figura 4.6.4

**Diagrama simplificado de un típico sistema de control de combustión.**

Los sistemas de control regulan la cantidad de flujo de combustible y aire en la caldera. Los propósitos principales de estos controles son:

- a- Suministrar el calor necesario para satisfacer la demandas de vapor.
- b- Proteger al personal y al equipo.
- c- Reducir al mínimo la contaminación.
- d- Minimizar el empleo de combustible.

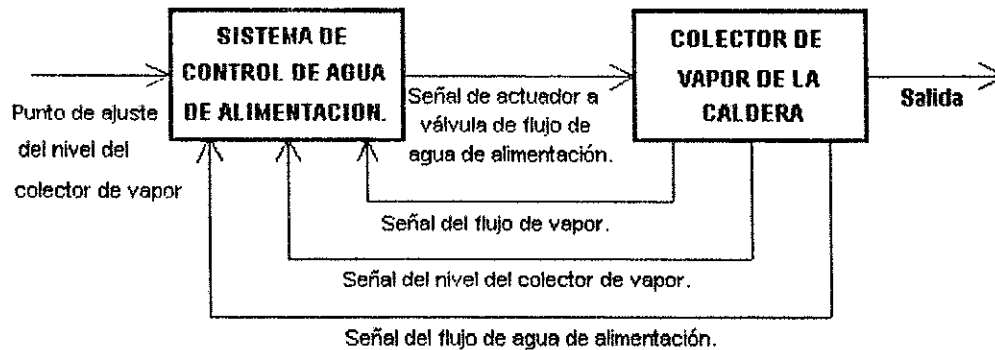
El primero de estos objetivos se cumple mediante suficiente alimentación de combustible, mientras que los tres últimos dependen de mantener el flujo debido al aire respecto al flujo de combustible.

Existen varios tipos de sistemas de control de combustión para unidades que emplean un solo combustible y son: el control de posición fija, el control de posición paralela con ajuste por operador, el control por relación de presiones, el control por medio de la medición de combustible y aire, el control por medición cruzada-limitada y el control por corrección de oxígeno.

#### CONTROL DEL AGUA DE ALIMENTACION

El sistema de control de agua de alimentación mantiene al domo de vapor o colector de vapor a un nivel con un valor ajustado manualmente por accesorios; existe balance de ese modo entre flujo de vapor y flujo de agua de alimentación en el domo de vapor.

Ambos controladores ( de agua y vapor ); en el sistema, tienen proporciones a cerca del proceso de ajuste, que permite transmisiones individuales de los controladores a iguales características específicas dinámicas de cada uno de los lazos de control, y de ese modo probablemente responde más rápidamente y mejora la estabilidad. En la figura 4.6.5, se muestra un diagrama de un control de agua de alimentación.



**Figura 4.6.5**

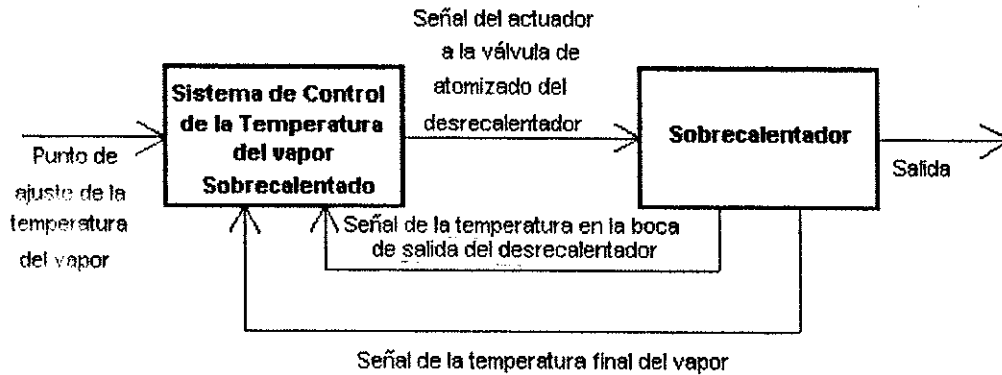
**Diagrama simplificado de un típico sistema de control de agua de alimentación.**

### CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO

El sistema de control de la temperatura del vapor sobrecalentado se realiza controlando o monitoreando la temperatura de la boca de salida del desrecalentador y la temperatura final del vapor (en el final de la boca de salida del sobrecalentador), y se ajusta el atomizado en el desrecalentador hasta mantener la temperatura final del vapor a un valor ajustado manualmente.

En la figura 4.6.6, se muestra el diagrama de un control de la temperatura del vapor sobrecalentado.





**Figura 4.6.6**

**Diagrama simplificado de un típico sistema de control de la temperatura del vapor.**

## 4.7 CALENTAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION DE CALDERAS

### 4.7.1 CALENTAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION

Para producir económicamente energía, se necesita utilizar la máxima cantidad de calor que pueda obtenerse a partir de un combustible dado. Muchas calderas no presentan un aumento en el rendimiento al ser alimentadas con agua caliente; otras muestran un aumento o disminución de rendimiento debido a la variación de la cantidad de calor transmitido. La economía debida al calentamiento del agua de alimentación se manifiesta en la disminución de consumo de combustible y en el aumento del rendimiento total de la instalación.

La cantidad de combustible ahorrado en una caldera en la cual se utilizan las pérdidas de calor para calentar el agua de alimentación, depende de las temperaturas inicial y final del agua y del calor total contenido en el vapor producido.

Cuando el suministro de calor de un calentador de agua procede de los gases calientes que van a la chimenea, el calentador recibe el nombre de **economizador** y cuando el calor utilizado se deriva del escape, sangrado o chorro de vapor directo se denomina **calentador de agua de alimentación**. La descripción del economizador fue dada en la sección anterior.

Los calentadores de agua se clasifican en: de contacto directo o tipo abierto y los de superficie o cerrados.

Los de contacto directo pueden ser verticales u horizontales. Están constituidos generalmente por un envolvente de hierro fundido o de acero, control de agua, purgador de agua de condensación, grifos de evacuación, purgadores de vapor o de aire. Para poner en contacto el agua con el vapor, pueden utilizarse dispositivos a base de artesas u otros recipientes, sobre los cuales se derrama el agua o bien pulverizadores de agua dispuestos convenientemente. El tipo más común de calentador de contacto directo utilizado en la industria azucarera es el **calentador deareador**.

En los calentadores del tipo superficie o cerrados, el vapor y el agua nunca están en contacto. En consecuencia, éstos pueden trabajar a presiones muy diversas. Sus partes principales son: una coraza envolvente en cuyo interior se encuentran los tubos o serpentines, entre los cuales circula el agua o el vapor. Los tubos pueden ser rectos, helicoidales, en espiral o en forma de U. Los calentadores en los cuales el agua circula por el interior o serpentines se les llama comúnmente calentadores de tubos de agua y si lo que circula por el interior de los tubos es vapor, se llaman calentadores de tubos de vapor. Son los más corrientes los de tubos de agua por razones de limpieza y en los cuales el agua puede circular en el mismo sentido o en contra del vapor.

#### 4.7.2 ACONDICIONAMIENTO DE AGUA DE ALIMENTACION DE CALDERAS

El agua cruda o corriente ( no tratada) contiene impurezas en cantidades variables que dependen del origen de la misma. En algunos casos, el agua cruda puede utilizarse directamente como agua de alimentación sin que afecte el funcionamiento de la caldera. En otro caso, el agua que sea satisfactoria para una caldera pequeña que funcione a baja capacidad, puede producir perturbaciones en otra que funcione a una capacidad alta.

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR LAS IMPUREZAS DEL AGUA :** las impurezas del agua pueden ser la causa de los siguientes efectos perjudiciales para la caldera y para el funcionamiento de la industria que la utiliza. Los efectos causados son:

- a) Reducción de la cantidad de calor transmitido debido a la formación de incrustación sobre la superficie de caldeo.
- b) Averías en los tubos y planchas, producidos por la disminución de la cantidad de calor transmitido a través de ellos.
- c) Corrosión y fragilidad del acero de la caldera.
- d) Mal funcionamiento, formación de espumas y arrastres de agua en cierta cantidad por el vapor.
- e) Costos elevados en limpieza, reparación e inspección.

f) Mal rendimiento de los equipos que utilizan el vapor a causa de que éste sea sucio.

g) Costo adicional en el equipo de condensación a causa de los gases que lleva el vapor.

**OBJETO DEL ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA:** los fines se centran en dos aspectos fundamentales que son el de quitar las materias solubles y en suspensión, y por otro lado la eliminación de gases dañinos. Esto se hace para evitar los inconvenientes descritos con anterioridad.

Existen varios procedimientos o métodos utilizados para el tratamiento de agua de calderas, y se mencionan de acuerdo a la función que realiza:

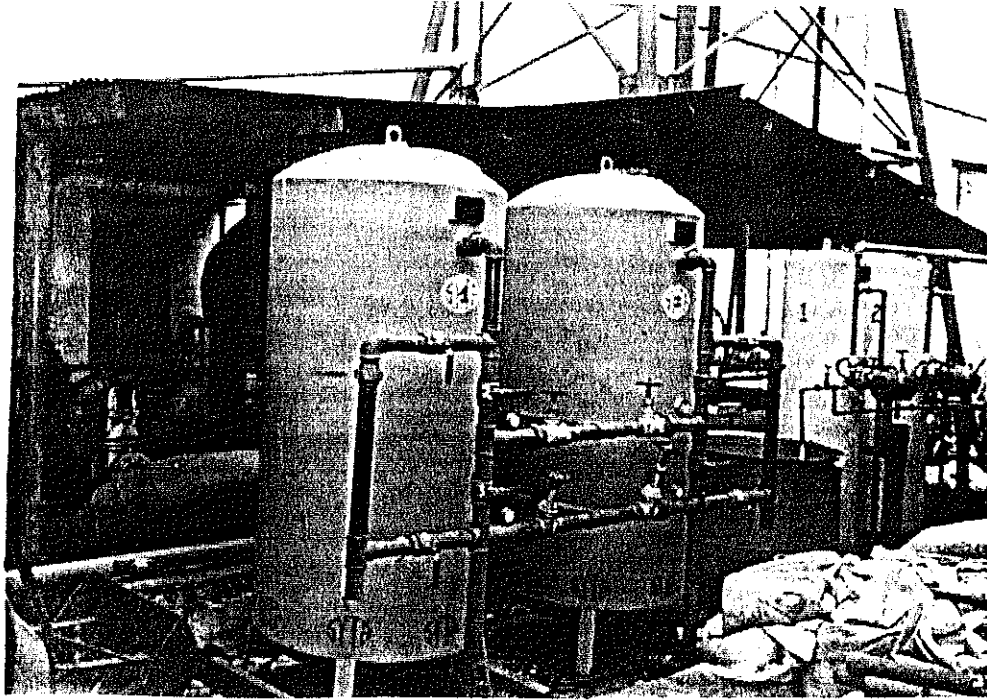
**REMOCION DE MATERIAL SUSPENDIDO:** se pueden aplicar tres métodos conocidos. El de sedimentación, que consiste en dejar reposar el agua un tiempo determinado. El de coagulación y floculación que consiste en aplicar productos químicos (como el sulfato de aluminio) para sedimentar las impurezas. El filtrado, realizado ya sea con filtros mecánicos o de presión (de arena), que consiste en hacer pasar el agua por un medio granular el cual atrapa el material suspendido.

**REMOCION DE GASES:** se conocen dos métodos para la eliminación de gases. El realizado mecánicamente por medio de un calentador deaerador, ó llamado también desgasificador (se describe en el capítulo 5), que se encarga de eliminar gases como el oxígeno, aire, anhídrido carbónico y otros. El tratamiento es por medio de productos químicos como la Hidracina.

**REMOCION DE LODOS Y PREVENCIÓN DE INCRUSTACIONES:** se puede realizar por medio de suavizadores de zolita y por la adición de cal y soda cáustica.



En la figura 4.7.2, el conjunto de suavizadores utilizado por el ingenio para el tratamiento adecuado del agua de calderas.



**Figura 4.7.2**  
**Cojunto de suavizadores del agua de calderas del Ingenio Los Tarros.**

#### **4.7.3 EQUIPO DE BOMBEO PARA ALIMENTACION DE CALDERAS**

Uno de los equipos más importantes que debe tomarse en cuenta en una caldera es en seleccionar el equipo de bombeo de acuerdo con el régimen de trabajo.

El término bomba se aplica a aquel dispositivo que puede transformar un tipo de energía a otro. Toman energía mecánica procedente de motor eléctrico u otra fuente, y lo comunica en forma de energía de presión y velocidad al fluido con el cual está trabajando.

Existen diversidad de tipos de bombas y cada una de ellas puede ajustarse al tipo de fluido, condición de trabajo y otros factores.

En los ingenios azucareros, se utilizan los bombas de tipo centrífugo accionadas ya sea por medio de un motor eléctrico o por medio de una turbina de vapor. Debe de ser capaz de dar un gasto de por lo menos **50% mayor a la producción media** de vapor de las calderas a las que sirve.

Debe poder bombear contra una presión manométrica por lo menos **25 % mayor a la presión de trabajo** de las calderas. Debido a que la temperatura del agua de alimentación se encuentre 90 y 95°C ( 194 y 203°F ), el tanque de alimentación debe estar por lo menos a 1 ó 2 metros sobre la bomba, preferentemente a 2.50 metros.

En la salida de la bomba, debe instalarse una válvula de no retorno, con el objeto de evitar que al pararse el agua regrese de la caldera al tanque de alimentación, si la válvula de salida no cierra correctamente.

## 4.8 PRODUCCION DE TIRO, CHIMENEAS Y VENTILADORES

Al sistema encargado del suministro de aire y evacuación de gases de combustión del horno se llama  **tiro** . También se aplica a la diferencia entre la presión atmosférica y alguna otra presión que exista en el horno y los pasajes conductores de aire o gases. Generalmente suele medirse en milímetros o pulgadas de agua. De acuerdo a la fuente motriz de presión que lo origina puede ser: de tipo  **natural y forzado** .

Las resistencias opuestas al paso del aire y gases quemados, las cuales hacen necesario el tiro son: las de los conductos, chimeneas, lechos de combustibles, pantallas deflectoras, registros, precalentadores de aire, economizadores, acumulación de hollín y ceniza en el paso de los gases y la velocidad de combustión requerida.

### 4.8.1 TIRO NATURAL

Es creado por el efecto de chimenea, que se da debido a que el aire es más denso que los gases calientes dándose un flujo para la evacuación( por diferencia de densidades ). El efecto de chimenea provoca una diferencia de presión que da origen al tiro. Dentro de los factores de los cuales depende, se tienen: la presión barométrica o atmosférica, las temperaturas (densidades), la altura de la chimenea.

El tiro natural no consume energía mecánica y está indicada para servir en pequeñas centrales o industrias cuando la carga no varía considerablemente, o en donde las calderas no han de desarrollar grandes producciones de vapor con gran rapidez. La velocidad de los gases debe ser de 4 a 5 m/seg.

Las principales ventajas que se obtienen la instalación de un tiro natural son : a) las chimeneas tienen una larga vida, b) seguridad, pues no existe ningún riesgo por la ruptura de un ventilador, c) economía en la operación, ya que no se necesita ningún motor o turbina, no consume potencia.

Las desventajas que presentan son: a) necesita una buena cimentación, por el peso de la chimenea, b) ocupa un espacio considerable, por las dimensiones de la base de la chimenea, c) puede producir sólo un tiro limitado, a menos que se dé una altura muy grande, d) no tiene flexibilidad cuando acurren cargas inesperadas.

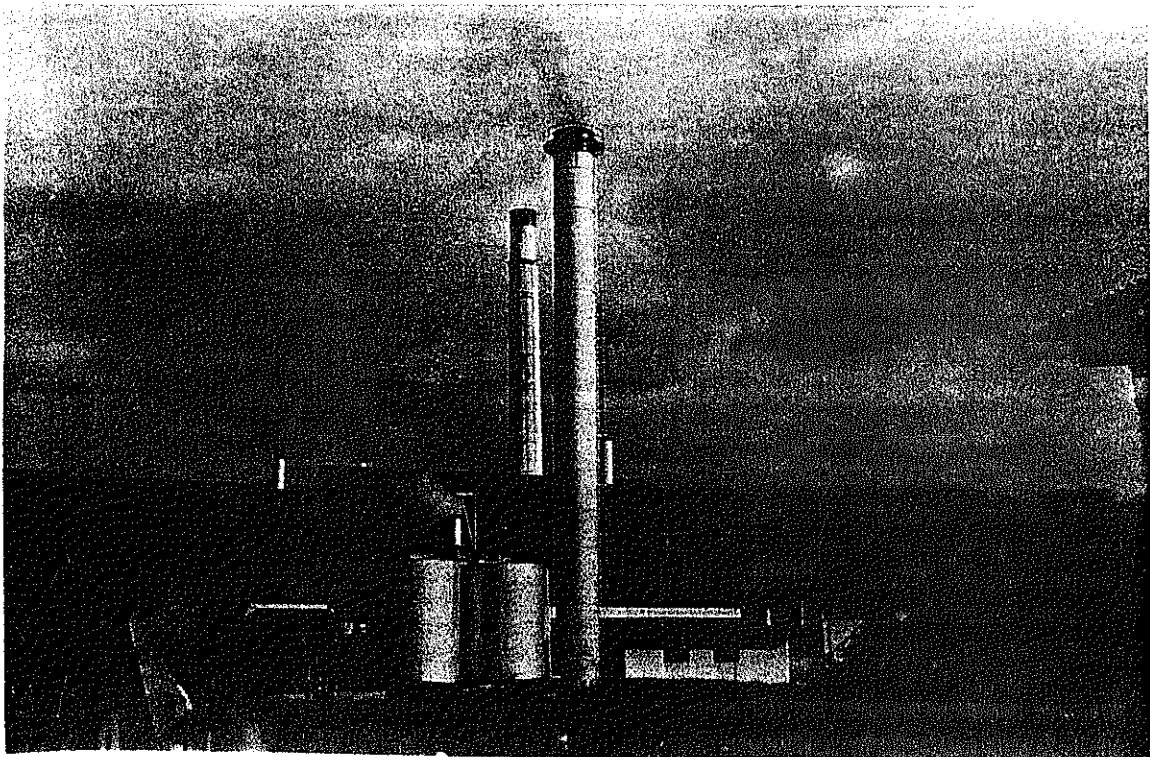
## 4.8.2 CHIMENEAS

Para evacuar los gases quemados o humos a una altura reglamentaria y para crear el tiro se emplean **chimeneas**, ya sean de ladrillo o de plancha de hierro. Las chimeneas construidas de plancha ligera hay que afianzarlas.

Las chimeneas de ladrillo tienen propensión a tener fugas, debido a la falta de adherencia de los materiales, así como también grietas ocasionadas por el asentamiento de la estructura. Las chimeneas de hormigón también están sujetas a la formación de grietas. Las fugas de aire en las chimeneas destinadas a producir tiro natural reducen el valor del tiro.

Las chimeneas construidas de acero, de no pintarse (pintura para alta temperatura), son corroidas por la acción del aire y de la atmósfera. Asimismo si no se revisten internamente y son corroidas por los componentes de los gases quemados, con lo cual su duración es mucho más corta que la de una chimenea de ladrillo u hormigón.

En la figura 4.8.1 se muestra las chimeneas utilizadas en el ingenio.



**Figura 4.8.1**  
**Fotografía de las chimeneas del Ingenio.**

## 4.8.3 TIRO MECANICO

El tiro creado por la acción de inyectores de aire o vapor, o mediante ventiladores, se conoce como **tiro mecánico**, el cual se requiere cuando debe mantenerse un determinado tiro con independencia de las condiciones atmosféricas y del régimen

de funcionamiento de la caldera. Asimismo es necesario cuando resulta insuficiente el tiro natural proporcionado por la chimenea. Los equipos auxiliares de las calderas, tales como economizadores y precalentadores de aire, reducen la temperatura de los gases, con lo cual la chimenea para crear el tiro requerido, puede resultar de altura y costo excesiva, que tiene como consecuencia recurrir al tiro mecánico.

En términos generales, el tiro mecánico está indicado cuando las calderas tengan que trabajar a un régimen más grande del normal, o cuando tengan que abastecer rápidamente demandas de vapor repentinas.

Las calderas equipadas con tiro mecánico no necesitan chimeneas tan altas y costosas como las exigidas con tiro natural. Sin embargo, algunas veces se instalan con altas chimeneas por cuestiones reglamentarias, o para que los humos, gases y cenizas sean expulsadas lejos de áreas pobladas. El costo inicial, conservación, depreciación y costos de funcionamiento del equipo de tiro mecánico deben compararse con los correspondientes a una chimenea que por tiro natural crea el mismo efecto, antes de seleccionar un sistema.

La chimenea obedece a razones reglamentarias, y tiene que ser más alta que el edificio más alto.

Los tipos de tiro mecánico más comunes son: el forzado y el inducido.

**TIRO FORZADO:** se obtiene soplando aire en el interior de los hogares herméticos debajo de las parrillas y hogares mecánicos, o en su caso a través de los quemadores. El aire es introducido a presión y atraviesa el lecho de combustible o quemador para llegar hasta la cámara de combustión del hogar. Tratándose de tiro forzado, el procedimiento que debe seguir consiste en evacuar los productos de la combustión de la caldera propiamente dicha por tiro natural, por inducido, o combinación de los dos.

**TIRO INDUCIDO:** se consigue con un ventilador de chorro o con un ventilador centrífugo colocado en los humerales, entre las calderas y la chimenea, o en la base de ésta. En el caso de haber economizador, el equipo de tiro inducido se instala en la salida del recuperador y la chimenea. El efecto de tiro inducido consiste en reducir la presión de los gases de la cámara de la caldera por debajo de la presión atmosférica y descargar los gases a la chimenea con una presión positiva.

El tiro inducido puede crear una depresión en el hogar de valor apropiado para que el aire del exterior atravesase en suficiente cantidad el lecho del combustible. Los hogares mecánicos con alimentación por la parte inferior requieren tiro forzado.

Cuando se emplea una combinación de tiros inducido y forzado, de manera que sobre el fuego del hogar la presión es prácticamente la atmosférica, se dice que el tiro es equilibrado.

#### 4.8.4 VENTILADORES

Cuando es preciso mover los gases venciendo presiones entre 0 y 38 cm de agua se recurre a ventiladores, los cuales se emplean en gran extensión en centrales térmicas, instalaciones de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire.

En esencia un ventilador consiste en una rueda o impulsor giratorio rodeado de un envolvente estática o carcasa. En los ventiladores, se comunica energía al gas trasegado mediante el impulsor o rodete, con el cual se crea una diferencia de presión y se produce la corriente de gas.

Los ventiladores también se conocen con el nombre de extractores. La diferencia entre un ventilador y un extractor consiste en que el primero descarga los gases venciendo una cierta presión en su boca de salida; el segundo, saca los gases de un recinto por aspiración y los descarga con una ligera presión. Ciertos tipos de ventiladores que trabajan entre determinados límites de presión pueden servir como aspiradores y ventiladores.

Los dos tipos de ventiladores que se utilizan son: los ventiladores de **flujo axial** que se subdivide en de hélice, tubo-axial y con deflector axial, y los de **flujo radial o centrífugo**.

### 4.9 PRINCIPIOS BASICOS PARA LA EFICIENCIA DE CALDERAS

Uno de los aspectos de mayor importancia en el funcionamiento adecuado de los equipos de una industria es la conservación de la energía. En un generador de vapor, la alternativa más viable en la conservación de la energía consiste en aumentar la eficiencia del mismo.

Teóricamente la eficiencia de una caldera se define como la relación del calor absorbido por el agua de alimentación, con relación al calor producido en el horno. Pero debido a las dificultades para obtener medidas exactas de esos aspectos, se acostumbra definirla como: la relación entre el calor en el vapor de salida y el calor contenido en el combustible de alimentación.

#### 4.9.1 PRUEBAS QUE DETERMINAN LA EFICIENCIA DE UNA CALDERA

Dentro de las pruebas o parámetros que sirven para determinar la combustión y eficiencia de una caldera, se pueden mencionar: el análisis de gases de combustión o escape, medición de la temperatura de la chimenea, la medición del humo y medición del tiro.

##### ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION

Se utiliza para indicar la relación entre el aire de combustión y el grado de perfección de la combustión. Los componentes del gas medidos usualmente son :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{O}_2$ . Los porcentajes de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  son indicadores de la cantidad de aire de la combustión perfecta. El porcentaje de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  son indicadores de la cantidad de aire en exceso. Con una buena mezcla, se obtiene una combustión



perfecta cuando el análisis de gases de escape o de combustión no muestran CO o O<sub>2</sub> y un valor máximo de CO<sub>2</sub>. El análisis de gases de combustión se realiza mediante el auxilio de un instrumento llamado medidor de ORSAT.

#### MEDIDA DE LA TEMPERATURA DE LA CHIMENEA

La temperatura neta en la chimenea se obtiene restando la temperatura ambiente de la temperatura de los gases de combustión. Una elevada temperatura en la chimenea indica que el calor está siendo desperdiciado a la atmósfera. Una buena medida que se debe tomar es que la temperatura de la chimenea debe ser mantenida tan baja como sea posible sin causar corrosión de extremo frío.

Cuando las temperaturas en la chimenea son muy elevadas( 400°C = 750°F o superiores ), se indican afecciones como las siguientes: exceso de tiro, superficies de calefacción sucias, diseño pobre de las superficies de intercambio de calor, fogón demasiado reducido, cámara de combustión defectuosa, sobre-calefacción de la caldera, deficiente regulación de tiro.

#### MEDICION DEL HUMO

La cantidad de humo en los gases de la chimenea puede ser utilizada para estimar la limpieza de la combustión. Una combustión humeante puede indicar una o más de las siguientes condiciones: inadecuada alimentación del aire, tiro insuficiente, regulación inadecuada de combustible-aire, fugas excesivas de aire, precalentamiento inadecuado.

Cuando las condiciones de combustión se ajustan, la cantidad máxima de CO<sub>2</sub> deberá ser controlada a un nivel que no cause excesivo humo. Mediciones simples de humo pueden efectuarse empleando una variedad diferente de métodos.

#### MEDICION DEL TIRO

El tiro determina la ruta a la que los gases de combustión pasan a través de la caldera. El tiro excesivo puede producir un aumento de temperatura en la chimenea y también reducirá el porcentaje de CO<sub>2</sub> en los gases de combustión. El tiro inadecuado puede dar como resultado insuficiente aire de combustión y una operación humeante. Con un tiro perfecto, la llama se expandirá, proyectándose en tal forma de casi llenar el hogar, y proporcionan un tiempo máximo para una combustión completa y limpia.

Las lecturas del tiro se toman normalmente en el fogón y en la chimenea. Un tiro bajo en el fogón, puede dar como resultado escape de humo y otros productos de combustión a las áreas circundantes. El tiro de la chimenea debe ser suficientemente elevado para prevenir presión positiva en la cámara de combustión.

## 4.9.2 PRINCIPALES PERDIDAS DE CALOR EN CALDERAS

### PERDIDAS EN CHIMENEA

La fuente más importante de pérdida de calor en una caldera es a través de la chimenea. Todas las demás pérdidas son pequeñas comparadas con las pérdidas en la chimenea. Calor adicional se pierde por **radiación** de las paredes del fogón y por la **purga** del colector de vapor.

La pérdida térmica en la chimenea es igual al calor requerido para aumentar la temperatura del gas de salida de la temperatura ambiente a la temperatura de la chimenea, medida después de la última superficie de transferencia de calor de la caldera. Las pérdidas en la chimenea pueden oscilar desde un **30%** en las calderas diseñadas, mantenidas u operadas deficientemente, hasta un **7%** en las calderas grandes y eficientes, equipadas con **economizadores y calentadores de aire**, para extraer todo el calor posible.

Las pérdidas en la chimenea pueden ser reducidas, ya sea disminuyendo la temperatura o volumen de los gases de salida o ambos. La temperatura de los gases de salida se reduce mejorando la transferencia de calor o reduciendo la cantidad de aire de combustión en exceso.

Una cierta cantidad de exceso de aire es necesaria para completar la combustión dentro de la cámara. Únicamente debe proporcionarse la cantidad de aire suficiente para evitar la combustión incompleta o que la llama choque contra los tubos. Dentro de los requerimientos adicionales de exceso de aire tenemos: para controlar la temperatura del vapor, compensar demoras en los controles de mezcla de combustible-aire durante las cargas fluctuantes.

Otras pérdidas de calor de menor importancia son:

- a) Pérdida de calor debido a combustible no quemado.
- b) Pérdida debida al hidrógeno contenida en el combustible.
- c) Pérdida de calor en los gases por la humedad del combustible.

En las fábricas de azúcar que utilizan calderas utilizando el bagazo como combustible, la eficiencia de las calderas varía generalmente entre **50 y 65%**. Se tienen como factores que determinan la producción de vapor y la cantidad de energía generado: la humedad del bagazo, el exceso de aire, la combustión imperfecta y la temperatura de gases. El nivel óptimo de exceso de aire utilizando en esta caso como combustible el bagazo de la caña por medio de un alimentador, que es del **40 al 60%**, siendo  $O_2$  entre **6 a 8%** por volumen equivalente.

### 4.9.3 POSIBLES SOLUCIONES PARA MEJORAR EFICIENCIA EN CALDERAS

Cuando el problema es el exceso de aire, puede ser debido a factores como: fugas, inadecuado control de tiro y operación defectuosa del quemador. La solución consiste en que si el exceso es debido a fugas, hay que reemplazar empaquetaduras y compuertas deformadas; en el caso del control inadecuado del tiro se debe ajustar la válvula o compuerta reguladora de tal forma que la presión de los tubos de convección sea de 2 mm columna de agua menores que la presión atmosférica.

#### LIMPIEZA

Un factor importante para la eficiencia de una caldera es el estado de limpieza de las superficies de transferencia de calor, tanto del lado de fuego como el de agua. Toda la tubería debe mantenerse limpia debido a que: la ceniza, el hollín y los depósitos minerales son pobres conductores del calor. Si los depósitos se acumulan dentro o fuera de la tubería, se tardará la transferencia de calor del flujo de gases calientes al vapor, agua o flujo de aire. El calor que debería calentar el vapor termina perdiéndose en la chimenea.

El bloqueo de los pasajes, por los depósitos de la sección de convección, impedirá el tiro. Si un volumen total de aire no se introduce al fogón, un volumen normal de combustible no podrá ser quemado. Esta combustión incompleta resultará en una disminución de la **producción de vapor** o un aumento de la producción de humo o ambos. El grado de limpieza de la sección de convección podrá ser estimado mediante la pérdida de tiro entre el fogón y la chimenea. Una alta pérdida de tiro indicará restricciones en las vías de paso.

Los depósitos que se forman en los lados de la llama se controlan por sopladores de hollín. La ubicación de los sopladores y la frecuencia de su funcionamiento afectará su eficiencia. Los producidos por el agua deberán controlarse por un programa de tratamiento de agua. Manteniendo el agua limpia y suave, ayudará a eliminar la formación de incrustaciones que disminuyen, por lo tanto, la frecuente necesidad de purgar la caldera, con la consiguiente pérdida de calor.

A manera de resumen, las pérdidas de eficiencia de una caldera se originan debido a cinco factores que son:

- a) El calor arrastrado en la chimenea por los gases calientes, lo cual se conoce normalmente como pérdidas en gases secos de chimenea.
- b) El calor latente del vapor de agua presente en los gases calientes de chimenea, es resultado de la combustión del hidrógeno que contiene el combustible, la humedad presente y en el aire que alimenta.
- c) Combustible no quemado y producto de combustión incompleta.
- d) El calor perdido por la caldera a través de su aislamiento.
- e) El calor que transportan las purgas de la caldera.

## **CAPITULO No. 5**

### **5. DESCRIPCION GENERAL DE LOS EQUIPOS ANALIZADOS EN EL BALANCE ENERGETICO**

#### **5.1 CONDICIONES Y ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO EXISTENTE**

En esta sección, se menciona cada uno de los equipos con que cuenta el ingenio para su operación. Se darán algunos datos tomados de los catálogos del fabricante de determinado equipo. Primero se describen los equipos consumidores de vapor que dejan en la parte última al generador.

##### **5.1.1 TURBINAS DE VAPOR**

Son máquinas que utilizan el vapor para la realización de un trabajo útil. La forma en que se produce o genera el trabajo en una turbina de vapor se efectúa de la siguiente forma : primero, el fluido de trabajo se expande en una tobera, durante lo cual se genera energía cinética; a continuación , el chorro de alta velocidad pasa por las paletas o álabes de la turbina que están diseñadas para cambiar la cantidad de movimiento de la corriente. Dicho cambio produce una fuerza impulsora que puede ser aprovechada para el accionamiento de algún equipo, por ejemplo: un generador eléctrico.

La potencia es proporcional a la velocidad para una fuerza impulsora particular, de manera que hay probabilidad de obtener una gran potencia con una máquina de volumen razonable, cuando se trata de una turbina. Las pequeñas turbinas son bastante comunes, especialmente cuando su velocidad de rotación es ventajosa como en el caso de la impulsión de bombas rotatorias de alta velocidad.

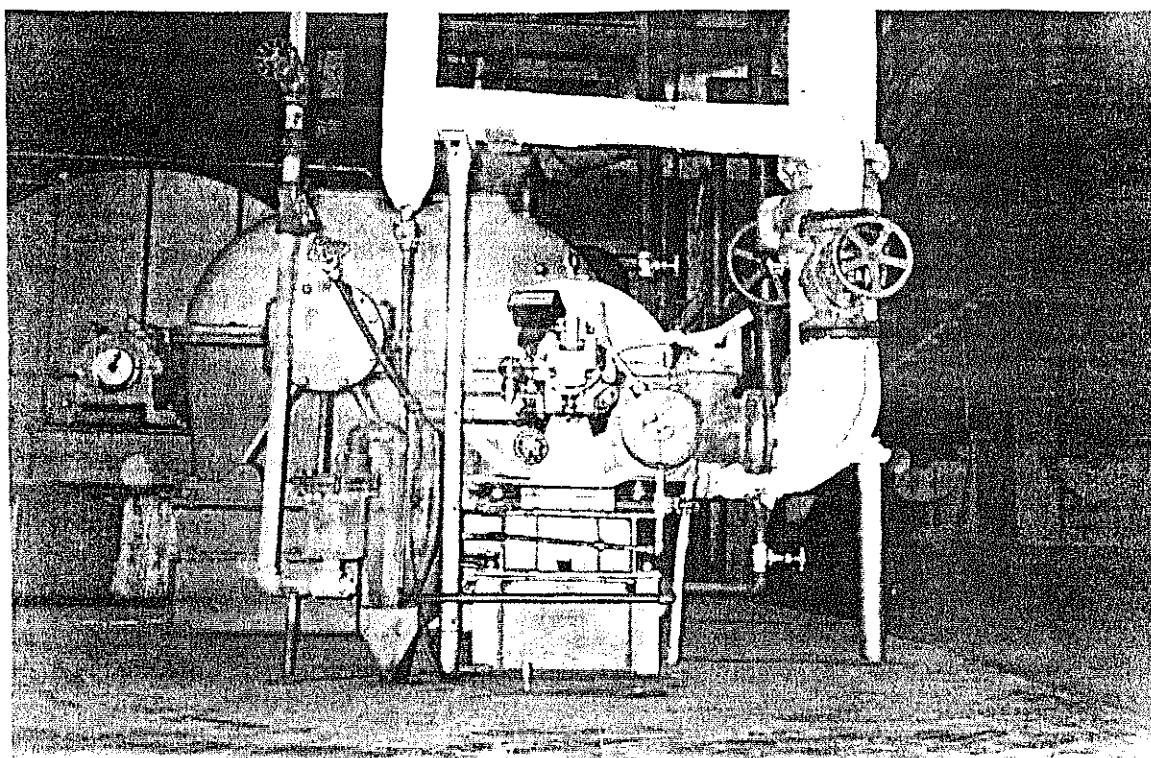
Los tipos de turbinas que existen de acuerdo con el tipo de rodete o álabe que utiliza son: de acción o impulso y de reacción. En las turbinas de impulso, la expansión del vapor se efectúa en las toberas de la turbina y no en el rodete. Pueden estar compuestas por uno o más pasos ( móviles ) o etapas, a la que se llama arreglo o escalonamiento de presión. Existe una variante en las turbinas de impulso y es la que está compuesta por una serie de etapas con unos rodetes fijos y otros móviles, que se le llama comúnmente escalonamientos de velocidad (pasos de Curtis ).

Hay dos tipos básicos de turbinas que dependen de las condiciones de salida del vapor: las de condensación, en las cuales el vapor sale a una presión inferior a la atmosférica y las de contrapresión, que se caracterizan en que el vapor de escape sale a una presión superior a la atmosférica.

En muchas industrias ( como en el caso de la azucarera ), se necesita disponer de vapor de baja presión para procesos de fabricación como el calentamiento, evaporación y cocción de guarapo en la elaboración de azúcar de caña. Para las aplicaciones descritas anteriormente a baja temperatura, está indicado en expandir el vapor parcialmente en una turbina, que genera la máxima energía posible antes de enviarlo a los procesos de fabricación.

Este sistema tiene grandes ventajas desde el punto de vista termodinámico, debido a que los procesos de fabricación sirven de condensador para la turbina, utilizando de esta manera la energía calorífica que de otra forma serviría para calentar el agua de refrigeración del calentador. El vapor condensado puede ser recuperado en forma de agua de alimentación de las calderas como es el caso de la empresa.

En figura 5.1.1.1, se muestra la figura de una de las turbinas existente en el ingenio, y en la tabla 5.1.1.2, las principales características del conjunto de turbinas, según catálogos del fabricante.



**Figura 5.1.1.1**  
**Fotografía que muestra una de las turbinas utilizada en el departamento de molinos.**

TABLA 5.1.1.2

### CARACTERISTICAS DEL CONJUNTO DE TURBINAS SEGUN CATALOGOS DEL FABRICANTE

EQUIPO QUE ACCIONA	MARCA	RPM	POTENCIA		DATOS DE ENTRADA			DATOS DE SALIDA	
			HP		PRESION PSIG	TEMPERATURA °F	TEMPERATURA °F	PRESION PSIG	TEMPERATURA °F
PICADORA No. 1	WORTHINGTON	4400	275.00		160.00	370	10.00	243	
PICADORA No. 2	TERRY	3800	350.00		150.00	359	15.00	215	
MOLINO No. 1	TURBODYNE (*)		400.00						
MOLINO No. 2	TURBODYNE	4400	350.00		200.00	368	15.00	251	
MOLINO No. 3	TURBODYNE	4000	250.00		200.00	368	15.00	250	
MOLINO No. 4	ELLIOT	4000	300.00		160.00	410	20.00	**	
MOLINO No. 5	ELLIOT	4000	300.00		180.00	410	20.00	**	
TURBOGENERADOR 1500 KW	WESTINGHOUSE	3600	2011.50		150.00	416	15.00	**	
TURBOGENERADOR 800 KW	TURBODYNE	4993	1072.00		170.00	375	15.00	259	
TURBOGENERADOR 800 KW	WORTHINGTON	4993	1072.00		170.00	375	15.00	259	
BOMBA DE CALDERAS	TURBODYNE	3550	100.00		160.00	371	15.00	250	

\* NO TIENE PLACA.

\*\* NO APARECE EN LA PLACA.

## 5.1.2 TURBOGENERADOR

### DATOS DE LA TURBINA

Es una turbina de impulsión recta, diseñada para operar con alta eficiencia pero dando un mínimo consumo de vapor. Como el vapor de escape será utilizado para el proceso de fabricación, debe de ser del tipo de contrapresión. Está compuesta de un escalonamiento tipo Curtis y cuatro de tipo Rateau.

Marca de la turbina	WESTINGHOUSE.
Presión de entrada	150 PSIG.
Temperatura inicial	416°F.
Presión de salida	15 PSIG.
RPM	3,600
Potencia nominal	1,500 kW.
Potencia máxima	1,875 kW.

### DATOS DEL GENERADOR

Es un generador de corriente alterna del tipo trifásico conectado en estrella o en serie. Con los siguientes datos:

Marca del generador	WESTINGHOUSE.
Potencia aparente	1,875 KVA.
Voltaje	4,160 VOLTIOS.
Amperaje	261 AMPERIOS.
Factor de Potencia	0.80
Fases	3
Ciclos	60 Hz.

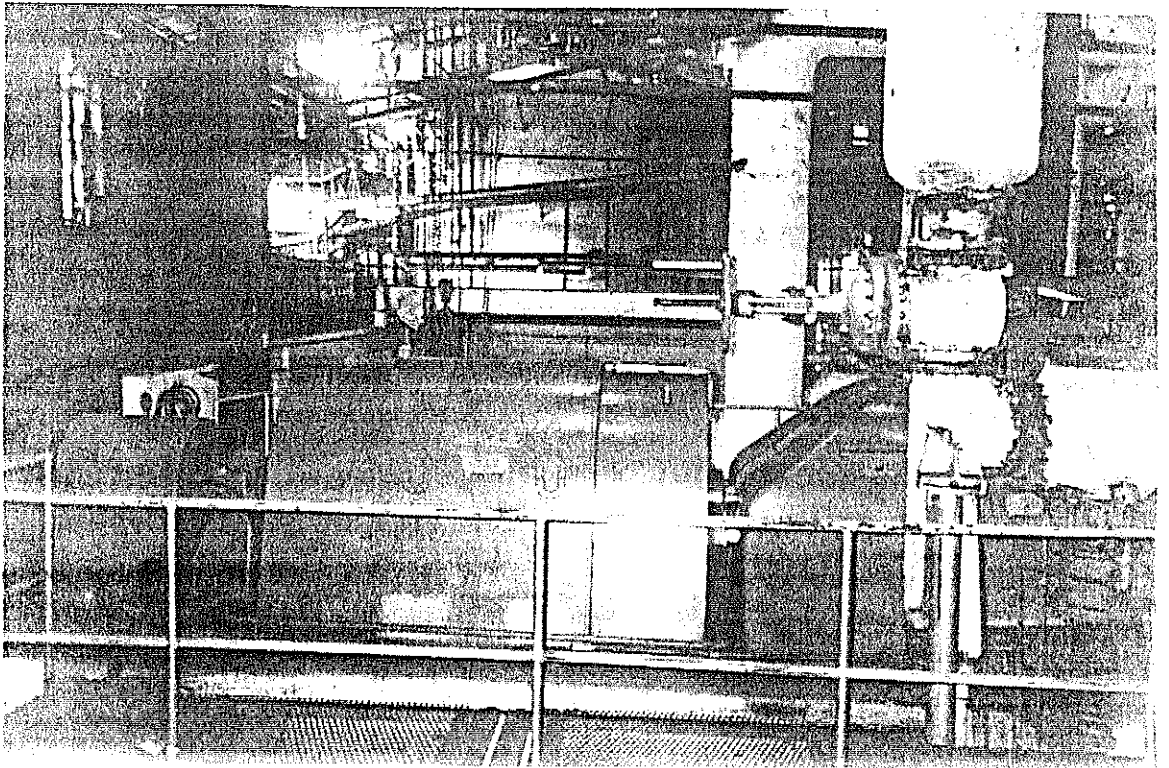
### DATOS DE LA EXCITATRIZ

Está constituida por un generador de corriente continua o directa con los siguientes datos de fabricación y operación:

Marca	WESTINGHOUSE.
-------	---------------

Potencia	18 Kw.
Voltaje	125 VOLTIOS.
Amperaje	144 AMPERIOS.
RPM	3,600
Arrollamiento	DERIVACION.

En la figura 5.1.2, se muestra la fotografía del turbogenerador de 1,500 Kw que utiliza el ingenio para el suministro de energía eléctrica.



**Figura 5.1.2**  
**Fotografía del turbogenerador de 1,500 kW utilizado en el ingenio.**



### 5.1.3 SECADORA DE AZUCAR

El azúcar comercial ( ya sea blanca o cruda ) que sale de las centrifugas y que debe envasarse para su venta o exportación tiene cierto porcentaje de humedad, con lo cual es necesario realizarle un proceso de secado por medio de aire caliente, para preservar el azúcar en buenas condiciones y evitar su deterioro al mantenerla durante determinado tiempo en bodegas para ese fin.

El procedimiento para secar azúcar con aire caliente consiste en calentar a éste con vapor directo, para aumentar su capacidad de absorción de humedad y ponerlo en contacto con el azúcar de la cual evaporará agua. El aire puede circular en dos sentidos:

- a) en contracorriente en el cual el aire circula en dirección opuesta al azúcar;
- b) en paralelo de manera que el aire y azúcar circulan en la misma dirección.

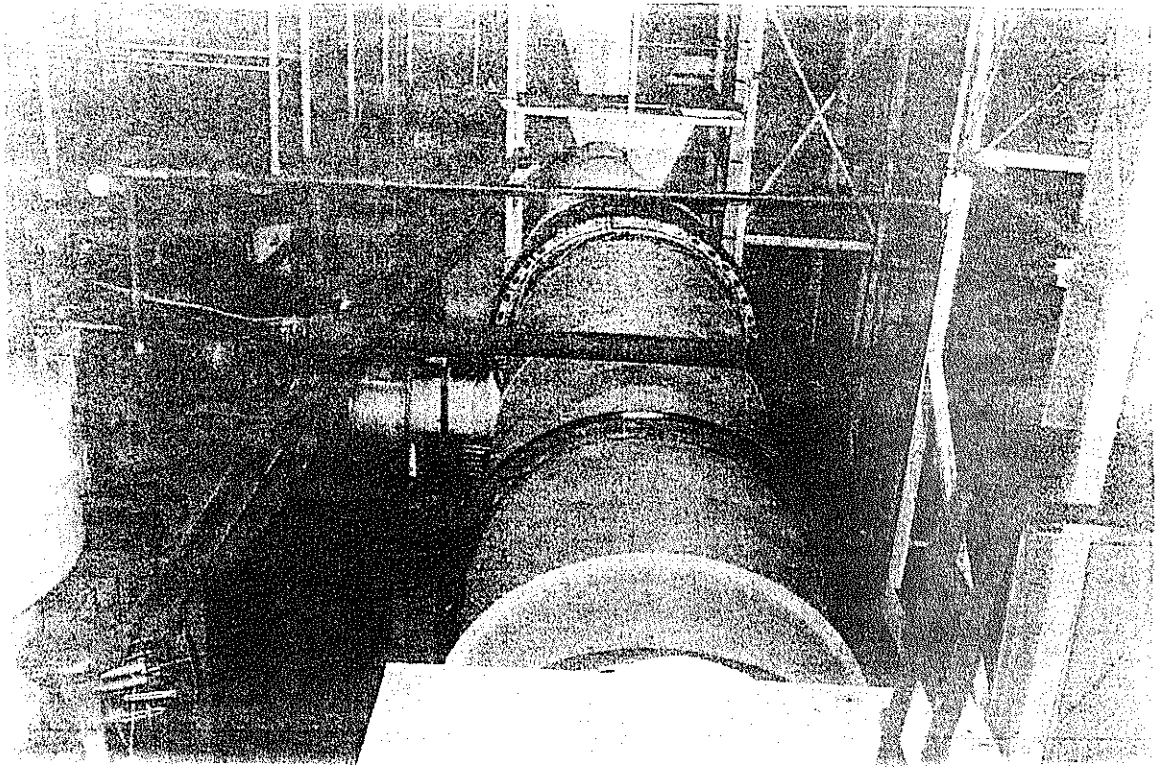
El calentador de aire está generalmente compuesto de tubos con o sin aletas, de fundición o de aluminio que se alimentan de vapor de alta presión. El aire no debe calentarse a más de 203 - 212°F ( 95 - 100°C ); según el autor Tromp ( pág. 545 ) considera que la temperatura no debe pasar de 230°F ( 110°C ) para evitar el daño que sufre el azúcar a altas temperaturas. Generalmente se trabaja de manera que la temperatura del aire al salir del calentador, se encuentre entre 158 y 203°F ( 70 y 95°C ). La velocidad del aire debe ser de unos 16 a 17 pies/seg.

Puede haber una parte en el secador que funciona como enfriador que debe de disminuir la temperatura del azúcar entre 95 y 104°F. Debido a que el polvillo de azúcar si es muy fino se torna explosivo, es necesario tomar precauciones para que no llegue a la cámara de secado. Para ese fin, debe instalarse un ventilador de corriente inducida y no forzada.

El secador más común de los países tropicales es el horizontal giratorio y es el que posee el ingenio en la actualidad. Las especificaciones generales para este tipo de secador (Venton , ISJ (1953) , pág. 246 ) son:

- temperatura máxima del aire caliente 109.40°F,
- velocidad máxima del aire 3.28 pies/segundo,
- longitud máxima del secador 30 pies,
- inclinación del eje del tambor de 15 a 20 grados.

En la figura 5.1.3, se muestra el secador utilizado en el ingenio para el proceso de secado de azúcar.



**Figura 5.1.3**  
**Fotografía del secador de tambor horizontal utilizado en el Ingenio Los Tarros.**

#### **5.1.4 CONDENSADORES- EYECTORES DE VAPOR**

Son utilizados como un método para eliminar el uso de las bombas (de vacío) en la producción de la presión de vacío, aparte que los condensadores de chorro, es el método por excelencia. El vacío se logra con la evacuación del aire por medio de un condensador-eyector que trabaja con vapor de alta presión.

Funcionan de la forma siguiente: se admite vapor de 200 psig a una boquilla, el que arrastra al aire por fricción hacia el pozo del pie de la columna y a la atmósfera o a un segundo condensador pequeño, y se produce así una presión negativa (menor que la atmosférica ) o de vacío.

El condensador-eyector tiene ciertas ventajas sobre la bomba de vacío las cuales son:

- a) el espacio que ocupa es menor y prácticamente nulo;
- b) no necesita ninguna cimentación;
- c) no tiene ninguna pieza en movimiento por lo cual no necesita lubricación ni se desgasta.

En el ingenio, existen cinco jet o eyectores distribuidos así: dos en el Departamento de Evaporación ( evaporadores cinco y siete ), dos en el Departamento de Tachos (tachos dos y cinco ) y el último en el filtro de cachaza del departamento de clarificación.

Se ha tratado de eliminar el uso de los jet o eyectores con la instalación de bombas de vacío pero debido a los altos valores de presión de vacío, que se necesitan y desajustes en las mismas bombas ha sido necesario trabajarlas en forma conjunta.

Las aplicaciones de un eyector se centran cuando:

- a) las entradas de aire son pequeñas;
- b) el valor del vacío no es muy alto;
- c) espacio muy pequeño para instalar una bomba;
- d) se dispone de exceso de vapor.

#### 5.1.5 DEAREADOR O DESGASIFICADOR

**FUNCIONES BASICAS Y OPERACION:** los calentadores deareadores elevan la temperatura del agua de alimentación de las calderas por medio de contacto directo con vapor eliminando también todo el oxígeno disuelto en exceso. Para la remoción de gases disueltos y gases incondensables es preciso alcanzar temperaturas de ebullición en el deareador, agitando el agua internamente, tan vigorosamente como sea factible y presentando así la mayor superficie posible para eliminar el gas y absorber calor condensado del vapor. Esencialmente, una deareación correcta sólo se puede conseguir teniendo la temperatura correcta, la presión correcta y suficiente ventilación ( capacidad de salida de gases disueltos e incondensables ). Una temperatura deseable es 227°F y una presión de trabajo de 19.70 PSIA.

**COMPONENTES PRINCIPALES DEL CALENTADOR DEAREADOR:** éstas son el deareador o sección de atomización, la sección de almacenamiento y el condensador de las purgas de gases. La sección de atomización es simplemente el área donde el agua de alimentación atomizada se introduce en el espacio lleno de vapor, se calienta y limpia de gases (incondensables).

El vapor que fluye entonces contra la corriente de agua atomizada recoge las fracciones más pequeñas de gases disueltos y ayuda a su expulsión a través de la salida provista para los mismos.

La sección de almacenamiento es una parte integral del calentador y sirve como tanque para suministrar a las bombas de alimentación de las calderas. La temperatura del agua dentro de la sección de almacenamiento no puede tener más de 2°F menos que la sección de atomización.

El condensador de gases purgados es esencialmente un pequeño intercambiador de calor que aumenta todavía más la eficiencia de operación, que recobra parte del calor de los gases expulsados comunes a este tipo de operación por medio del agua de alimentación que se pasa a través del mismo para el enfriamiento de tales gases.

**TIPOS DE CALENTADORES DEAREADORES:** se conocen tres tipos de calentadores deareadores: el de tipo de atomización, el de tipo bandeja y la combinación atomización-bandeja. La diferencia de estos tipos se debe principalmente a la física y vigorosa agitación y mezcla que toma lugar.

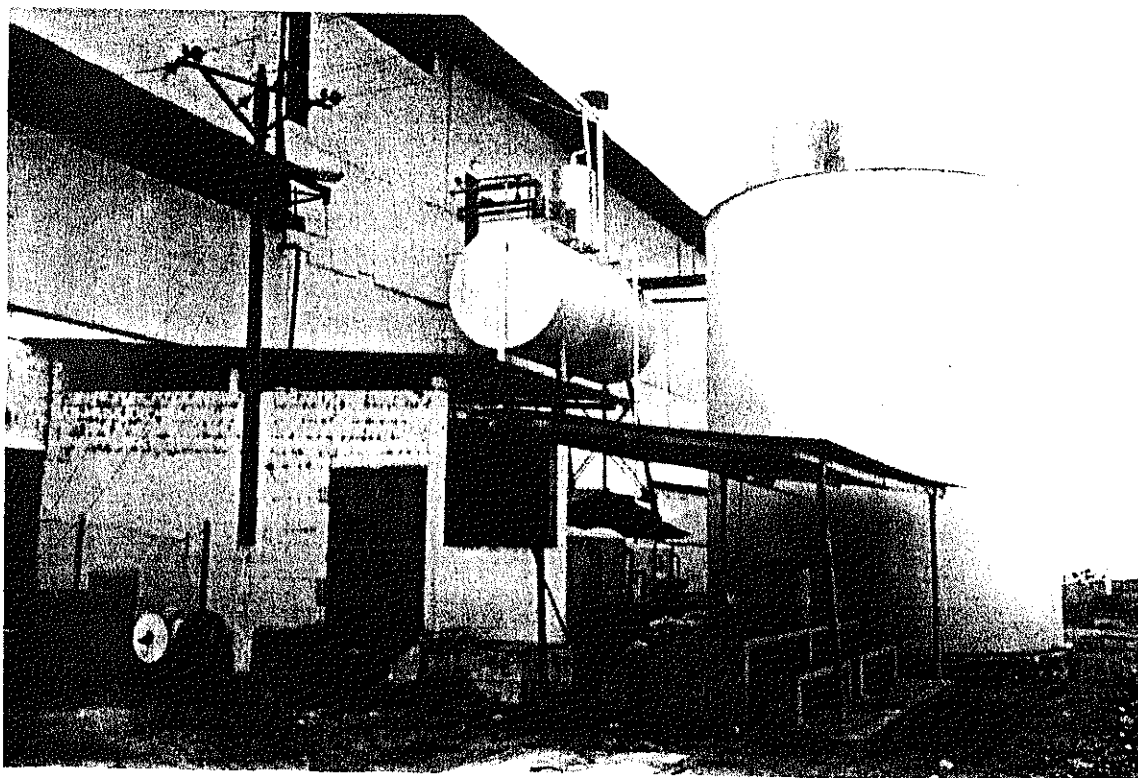
El de tipo bandeja suministra un elemento de tiempo para asegurar un contacto adecuado del vapor y el agua, y las bandejas además ayudan a distribuir el agua en películas delgadas para que así se liberen los gases, y la elevada temperatura a su vez desprende esos gases a través de la película delgada, obteniendo así un efecto de agitación mayor.

El deareador de tipo atomización satisface los requisitos básicos de deareación, ya que eleva la temperatura del agua hasta su ebullición a la presión de trabajo correspondiente y suministra tremenda agitación ya que presenta la superficie mayor del líquido al vapor expulsándola en forma de una neblina o llovizna muy fina. Finalmente utiliza suficiente vapor para remover los gases liberados en la unidad.

El mayor agente que produce picaduras y corrosión en una sistema de caldera es el oxígeno. Una buena operación del calentador deareador vigilando su temperatura, presión y gases expulsados, además de alimentar el mejor removedor de oxígeno ( sustancia química ) en el lugar más apropiado para su alimentación, pueden reducir casi totalmente las picaduras y los efectos de corrosión.

El Ingenio cuenta con un calentador deareador de forma cilíndrica, elevado a 20 pies de altura. Tiene una longitud de 18 pies y un diámetro de 9 pies, con lo cual tiene una capacidad máxima de almacenaje de 1,145.11 pie<sup>3</sup> de agua.

En la figura 5.1.4, se muestra el calentador deareador del ingenio.



**Figura 5.1.4**  
Fotografía del calentador deaerador existente en El Ingenio.

### 5.1.6 CALENTADORES DE JUGO

El calentamiento del guarapo alcalizado se realiza en una serie de cilindros conectados en serie llamados: calentadores de jugo, que no son más que intercambiadores de calor de tipo cerrado; el más sencillo y utilizado es el de coraza y tubo. El calentamiento se realiza con dos finalidades:

- a) Mejora el proceso de clarificación con el objeto de sedimentar la mayor cantidad de impurezas contenidas en el jugo.
- b) Eleva la temperatura del jugo al punto de ebullición, con el objeto de mejorar el rendimiento de los evaporadores.

Un calentador está formado por una calandria tubular: el jugo circula por una serie de tubos colocados en paralelo y el vapor alrededor o en forma anular en ellos. El de tipo convencional, ya sea vertical u horizontal, tiene celdas en cada cabeza por cada una de las cuales queda encerrado un número definido de tubos, de modo que pasa sucesivamente por cada celda. Estas cabezas o cabezales tienen tapas

con visagras que se fijan por medio de pernos. En las unidades horizontales, es costumbre colocar placas de desvío para guiar la trayectoria del vapor. Los tubos que componen cada unidad son generalmente de cobre.

Cada calentador ( ya sea el primario o secundario ) tiene en la unidad inmediata inferior una salida para condensado, ya que el vapor al realizar la transferencia de calor con el jugo cambia de estado gaseoso a líquido. Este condensado sí procede del calentador primario que es utilizado para el proceso de imbibición en el departamento de molinos; si es del calentador secundario, se bombea hacia el deareador ( tanque elevado ) para que se utilizado como agua de alimentación de calderas.

Además tienen unos tubos que sirven de respiradero para evacuar ( hacia la atmósfera ) cierto tipo de gases que no se pueden condensar (gases incondensables) y que disminuyen el rendimiento de transferencia de calor de la unidad.

La circulación del jugo se realiza por la acción de bombas de jugo alcalizado de manera que éste circule con velocidades de 5 a 7 pies/segundo, ya que si la velocidad es demasiado baja la transmisión de calor no será la adecuada e incluso ocurrirán de forma rápida incrustaciones ( suciedad que se adhiere a las paredes de la tubería ) de las superficies calóricas.

La circulación del vapor y del jugo se realiza en contraflujo, de manera que el vapor ingresa en la unidad superior y sale en forma de condensado por una tubería en la unidad inferior en cada calentador. El jugo ingresa por la parte inferior realizando su trayectoria y saliendo en la parte inferior, para luego volver a entrar en la unidad inferior del calentador rectificador que realiza el mismo recorrido.

Cuando los calentadores pierden eficiencia provocadas por las incrustaciones, es necesario realizar una limpieza en la tubería. Esta puede ser química por la acción de una solución de sosa o soda cáustica en el camino recorrido por el jugo, y mecánica en la cual se hace pasar por cada tubo cepillos de metal con el objeto de remover el material adherido a las superficies.

El calentador primario funciona con vapor de vegetal generado en el proceso de evaporación del primer efecto. De mediciones realizadas durante la zafra 94-95, se tiene que: el jugo ingresa a éste con una temperatura de 99.19°F y logra elevar la temperatura hasta 199.94°F. El calentador secundario al que generalmente se le llama rectificador utiliza vapor de escape que proviene de la expansión del vapor directo en su paso por las diferentes turbinas, realizando el calentamiento del jugo de 199.94°F hasta 217.88°F. El vapor que ingresa al calentador secundario se dosifica por medio de una válvula automática. La temperatura de calentamiento es muy importante, por lo cual un controlador por medio de un sensor, se encarga de enviar una señal a la válvula para que dosifique el vapor, que es enviado al calentador rectificador.

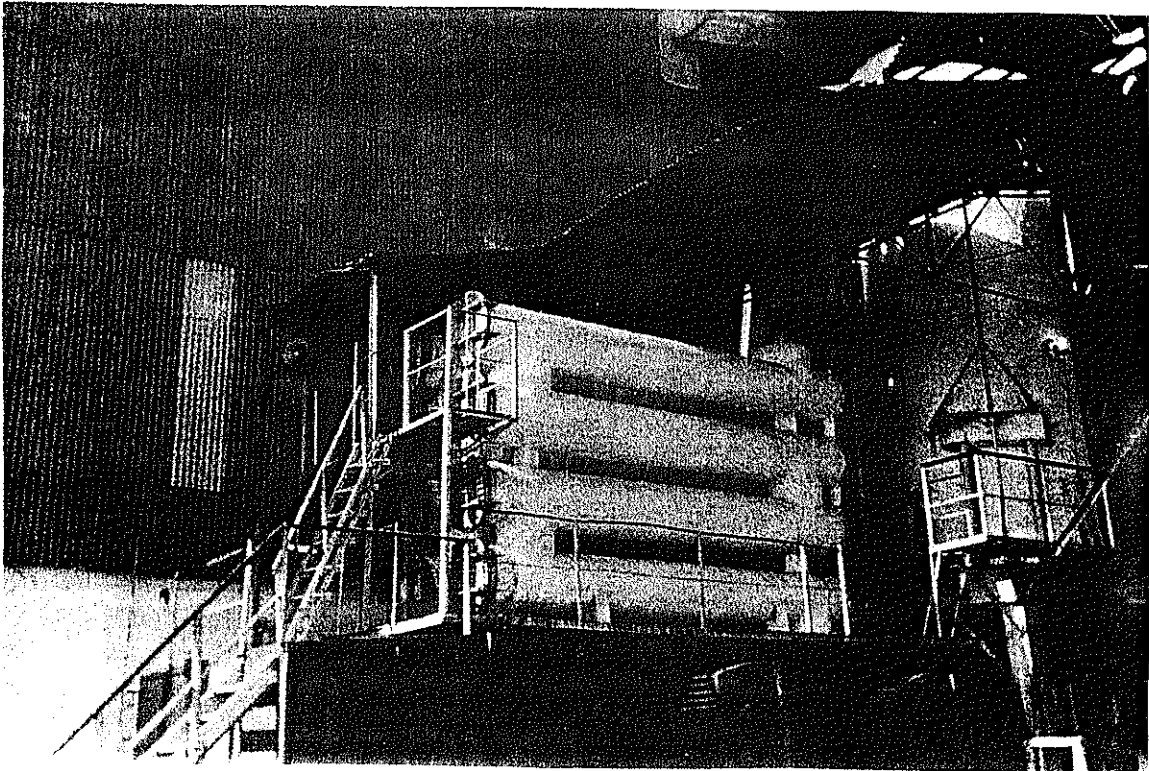
El ingenio cuenta para el proceso con una batería de tres calentadores tipo Webre. La superficie calórica de cada calentador es de 2000 pie<sup>2</sup>. Se tienen tres unidades con el objeto de que mientras dos están operando, una se encuentra en limpieza.

El calentador número 1 siempre funciona como calentador primario; el número dos puede trabajar como primario o como rectificador y el número 3 sólo puede operar como rectificador o secundario.

Cada calentador está compuesto por cuatro unidades cilíndricas horizontales en las cuales se alojan 80 tubos de cobre con un diámetro de 1½" por 16 pies de largo. El número de tubos por paso es de 20, de manera que realiza 4 pasos por unidad, realizando 16 pasos en total en el recorrido por cada calentador.

Para una operación eficiente, los calentadores deben auxiliarse con una serie de instrumentos como manómetros, termómetros, etc.

En la figura 5.1.5, se muestra la batería de calentadores existente en el Ingenio.



**Figura 5.1.5**  
**Fotografía de la batería de calentadores de jugo del Ingenio Los Tarros.**

### 5.1.7 EVAPORADORES

La operación de evaporación consiste en extraer la mayor cantidad de agua de una solución por medio de la aplicación de calor. Esto se realiza en aparatos llamados evaporadores, los cuales están compuestos por un cuerpo vertical cilíndrico y cerrado, cuya parte inferior tiene un fondo cónico, bastante llano y del diámetro del envolvente. Está dotado de un registro para la entrada de un hombre y aberturas para la alimentación, purga, extracción de condensados y algunos detalles más.

Sobre el fondo está la calandria, recinto de vapor o elemento calefactor. Es de forma cilíndrica, con placas para tubos en sus extremos superior e inferior dotados de un tubo central grande. Las placas están llenas de tubos, que generalmente son de cobre con diámetros de 1¼" a 2½" y con paredes de determinado espesor. Estos tubos constituyen la superficie de calefacción.

La calandria se dota de una entrada de vapor grande situada en un costado, las placas llevan tuberías en el fondo para drenaje y en la parte superior para la salida de gases. Estas tuberías de gases llegan hasta la parte exterior del cuerpo y finalmente se conectan al condensador. Encima de la calandria se dispone del espacio para la evaporación con una altura determinada. El cilindro que rodea este espacio se dota de mirillas o lucetas, un termómetro, una entrada de hombre, un manómetro y en su caso un vacuómetro ( medidor de vacío ). Arriba de este cilindro viene el domo o cubierta superior, a la cual se fija un separador con el fin de atrapar las gotas de jugo que puedan ser arrastradas por las corrientes rápidas de vapor. Este separador tiene una purga y una salida de vapor situadas a un lado.

El separador de cada vaso está conectado con la calandria del siguiente por grandes tuberías de vapor, y el separador del último está conectado al condensador de la misma forma. El aire se extrae del condensador por medio de una bomba de vacío, y el vacío se mantiene con el uso de agua fría de inyección.

El vapor entra a la calandria del primer efecto y hace que el jugo hierva dentro de los tubos. La evaporación sale de este jugo y pasa a través del domo, separador y la tubería de vapor, entrando en la calandria del segundo cuerpo donde se produce un efecto equivalente al que tuvo el vapor en la primera calandria.

La evaporación del segundo efecto sirve de vapor al tercero y así sucesivamente, hasta llegar al último efecto cuya evaporación va al condensador. El guarapo clarificado o jugo claro alimenta al primer efecto y de allí pasa al segundo, tercero, cuarto, quinto, etc., por tuberías de alimentación apropiadas y dotadas de válvulas de control; el jarabe concentrado que sale del último efecto se manda por medio de bombas al departamento de tachos. El vapor que se va condensando en las calandrias al ceder su poder calorífico tiene que ser extraído por medios adecuados debido a que su acumulación disminuye la superficie calorífica y por consiguiente el rendimiento del evaporador.



Todas las funciones en el múltiple efecto son continuas y las controla el operador, que ajusta la alimentación de vapor a la calandria del primer cuerpo a la concentración ( °Brix ) que se desea.

Para la obtención de vacío, los vapores que libera el evaporador a la temperatura que le corresponda tienen que ser condensados. Un condensador es un recipiente cilíndrico y cerrado en cuya parte superior entra agua fría. Después de haber sido dividida en chorros finos, el agua entra en contacto con el vapor caliente, lo condensa y así aumenta su propia temperatura. El agua caliente sale del condensador por una tubería que lo descarga en el drenaje del ingenio, aunque generalmente se utiliza para el lavado de caña.

La extracción de todo el aire y de los gases incondensables en los cuerpos evaporadores para la creación de vacío es también realizada por bombas de vacío.

En la industria azucarera, se usan tres diseños de condensadores:

- a) el condensador en contracorriente, en los cuales los vapores están cerca del fondo;
- b) el condensador de corriente paralela en los que el vapor entra por arriba,
- c) el condensador-eyector que es una modificación del corriente paralela, en el cual el agua entra en forma de chorros finos que convergen en la salida del agua y no necesita de bomba de vacío.

En el Ingenio Los Tarros, se ha utilizado el sistema de condensador-eyector, aunque recientemente se implementaron las bombas de vacío, pero debido a desajustes de estas bombas no se mantiene la cantidad de vacío necesaria por lo cual se auxilian del sistema condensador-eyector. Estos eyectores o jet para su operación necesitan vapor directo o de alta presión por lo cual necesario determinar la cantidad que necesitan para tomarlo en cuenta en el balance de energía.

## CAPACIDAD DE LOS CUERPOS EVAPORADORES

Norbert Rillieux, a quien se atribuye la invención del múltiple, efecto menciona las bases fundamentales de sus investigaciones sobre el cálculo de evaporadores y las describe en los tres siguientes principios:

Primer principio: en un evaporador de múltiple efecto por cada libra de vapor que se use se lograrán tantas libras de evaporación como efectos haya en el equipo.

Segundo principio: si se extraen vapores de cualquier unidad de un evaporador de múltiple efecto para sustituir vapor en un proceso concurrente, el ahorro de vapor logrado equivaldrá a la cantidad de vapor extraído dividido el número de unidades que contenga el sistema y multiplicada por la posición que ocupe en el grupo la unidad de la cual se extrae el vapor.

Tercer principio: en todo aparato en el cual se condense vapor o evaporaciones, es necesario extraer continuamente la acumulación de gases incondensables atrapados en el compartimiento que contiene la superficie calórica.

De manera ideal, la superficie calórica necesaria en el proceso de evaporación debe expresarse en forma de un coeficiente de transmisión de calor, pero es más fácil dar la capacidad en términos de libras de agua evaporada por pie cuadrado por hora bajo condiciones normales de operación.

La mayoría de fabricantes han normalizado estas capacidades de la forma siguiente: con vapor a no menos de 5 Lbs por manómetro, vacío o no menos de 26" de mercurio, jarabe o meladura o no más de 65 a 70°Brix y el evaporador en condiciones normales de limpieza.

La evaporación por pie cuadrado es:

En triple - efecto -----	10.5 Lbs.
En cuádruple - efecto -----	8.0 Lbs.
En quintuple - efecto-----	6.0 Lbs.

## INCRUSTACIONES EN EVAPORADORES

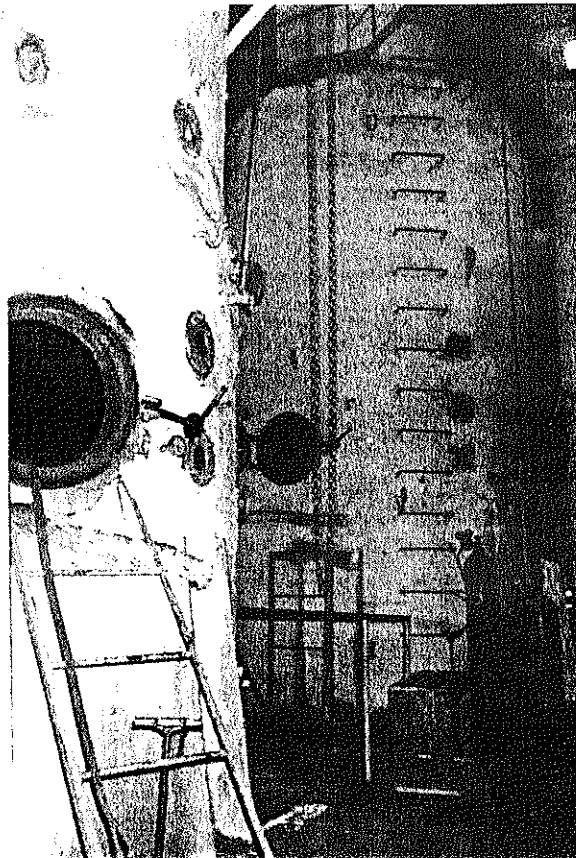
El mayor factor limitante en la operación normal de los evaporadores lo constituye la suciedad progresiva que adquieren las superficies calóricas. Cuando el metal está limpio, siempre hay amplia capacidad de transferencia de calor pero pronto comienzan a ensuciarse las superficies y la capacidad disminuye: muy rápidamente al principio y después más lentamente, hasta que al final de cierto período es necesario sacar de operación el evaporador para limpiarlo, ya que la capacidad ha quedado a un nivel que resulta inadecuado su trabajo.

Estas suciedades llamadas incrustaciones se generan debido a las cenizas que contiene el jugo crudo. Existen muchos métodos para la remoción de incrustaciones; las más conocidas son: el procedimiento químico con la ayuda de ácido sulfámico y soda o sosa caústica, y el método mecánico por medio de cepillos de metal.

En el ingenio, se utiliza como método para la evaporación el Quintuple efecto. Se tiene en existencia siete cuerpos evaporadores y funcionando normalmente seis, así: el primer efecto lo conforman el primer y segundo evaporador y normalmente se les llama pre-evaporadores. El segundo efecto lo compone el tercer cuerpo y que también puede funcionar como pre-evaporador en el caso de que alguno de los anteriores se encuentra en limpieza. El tercer efecto lo compone el cuarto cuerpo o evaporador número cuatro que siempre funcionará como evaporador. El cuarto efecto lo compone el evaporador número cinco que sólo puede funcionar como evaporador o el evaporador número seis, el cual puede funcionar como evaporador o como melador según el caso, y el quinto efecto lo conforma el llamado vaso melador, ya sea que funcione el evaporador número seis o el número siete.

Algunos de los evaporadores fueron hechos en el extranjero y otros construidos en el ingenio. Una de las marcas con que cuenta la empresa es la Nadler, construida por la Faundry & Machine CO. INC. en los Estados Unidos de Norteamérica .

En la figura 5.1.6, se muestra uno de los cuerpos evaporadores con que cuenta del ingenio.



**Figura 5.1.6**  
**Fotografía del Departamento de Evaporadores del Ingenio Los Tarros.**

### 5.1.8 TACHOS

La función de un tacho es la producción y desarrollo de cristales satisfactorios de azúcar a partir del jarabe o meladura del que se alimenta, así como evaporar cierta cantidad de agua proveniente del lavado de mieles. La operación de cristalización

se lleva en un solo efecto y con equipos que se adapten para manejar productos viscosos a los que debe concentrar.

Entre los tachos más conocidos tenemos el de calandria, el cual no es más que un evaporador de simple efecto de diseño especial, dotado de tubos de gran diámetro y un tubo grande central para facilitar la circulación de la masa-cocida pesada y viscosa que se elabora en las llamadas templeas. El jarabe y las mieles en ciertas proporciones desarrollan cristales de azúcar. Se comienza con la cobertura de la superficie calórica a un nivel apenas suficiente para lograr que haya circulación y se termina con la carga completa que constituye la templea, cuyo volumen es el triple del volumen con que se comienza.

Entre los accesorios más importantes de un tacho de calandria tenemos:

- a) Una válvula de descarga situada al fondo, con un diámetro de la octava a la sexta parte del diámetro del tacho.
- b) Un separador en el extremo del tacho, situado en el domo o en la cúpula, o entre el domo y el condensador. Este separador frena la velocidad de los vapores y disminuye el arrastre de gotas de jarabe.
- c) Un condensador del tipo adecuado, abastecido de agua fría para condensar los vapores y mantener el vacío.
- d) Una bomba de vacío conectada al condensador. Esta bomba crea vacío para comenzar la templea y elimina los gases incondensables durante la cocción.
- e) Una válvula para sacar el vacío conectada al cuerpo del tacho por cierto tramo de tubería o montada sobre el mismo. El vacío es eliminado precisamente antes de descargar el tacho.
- f) Mirillas de observación, a través de las cuales se podrá observar el proceso de la templea, una sonda para tomar muestras de masa-cocida, un manómetro de vacío o vacuómetro, un termómetro y un manómetro de presión de vapor.

El operador del tacho llamado comúnmente tachero, puede variar la temperatura de la masa en ebullición mediante el aumento o disminución de la inyección de agua que la produce.

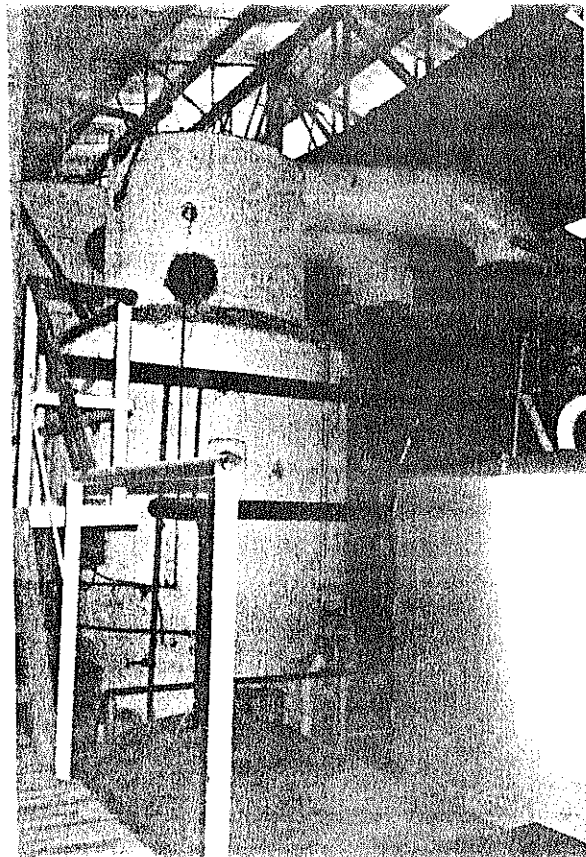
El ingenio cuenta con la existencia de seis tachos de distintas capacidades. El vacío es mantenido en cada uno de ellos por medio de la acción conjunta de condensador y bomba de vacío. Se tiene la variante de que en los tachos números dos y cinco se recurre al sistema condensador-eyector para mantener el vacío a cierto nivel, ya que la bomba por desajustes no lo puede mantener.

El tacho número uno se utiliza para el desarrollo de grano y trabaja a base de meladura o jarabe. El número dos es utilizado para trabajar templeas de tercera (masa-cocida "C"). El número tres se usa para templeas de segunda (masa-cocida "B"). Los tachos cuatro y cinco son para trabajar templeas de primera (masa-

cocida "A" ), y por último el número seis sirve para desarrollo de grano a base de meladura.

Algunos de los tachos fueron construidos y embarcados del extranjero como los tachos de marca Nadler fabricados en Estados Unidos y otros fueron construidos en el ingenio por los trabajadores.

En la figura 5.1.7, se muestra parte del conjunto de tachos del Ingenio.



**Figura 5.1.7**  
**Fotografía del Departamento de Tachos del Ingenio Los Tarros.**

#### **5.1.9 GENERADOR DE VAPOR**

Para el funcionamiento de las diferentes turbinas, así como el turbogenerador y demás equipos necesarios para el proceso de fabricación del azúcar de caña, el ingenio dispone de un generador de vapor que fue diseñado para una capacidad nominal de generación de vapor de 120 000 lb/hora

Con objeto de mejorar su eficiencia y rendimiento en la producción de vapor, se le harán implementaciones tales como: paredes de agua, hogar integral con pararrilla de agujeros de espiga ( Pin Hole Grate ); el abastecimiento de combustible (bagazo ) en forma automática, con lo cual se espera que el generador de vapor tenga la capacidad de suministrar un flujo de vapor de 140,000 a 145,000 Lb/hora.

#### DATOS DE PLACA

Marca de la Caldera	ALPHA .
Presión de diseño	300 PSIG.
Presión de operación	250 PSIG.
Número de domos	3
Número de hornos	5
Tipo de hogar	BIGELOW.
Capacidad	120,000 Lb/hora.
Tipo de separador de agua	Centrífugo, tipo Andersson.

#### DATOS SOBRE SUPERFICIES DE CALENTAMIENTO

Superficie de la caldera	18,170 ft <sup>2</sup> .
Superficie del sobrecalentador	997 ft <sup>2</sup> .
Superficie del pre-calentador	15,490 ft <sup>2</sup> .

#### DATOS GENERALES

Tipo de pre-calentador	TUBULAR.
Tipo de sobrecalentador	CONVECCION.
Potencia para el tiro inducido	300 H.P.
Potencia para el tiro forzado	150 H.P.
Control de alimentación de agua	AUTOMATICO.
Control de tiro en el Hogar	AUTOMATICO.

Número de sopladores de hollín 8

### **APARATOS DE MEDICION EN LA CASA DE CONTROL**

Manómetro para la presión del vapor.

Manómetro para la presión de agua de alimentación.

Indicador del tiro inducido.

Indicador del tiro forzado.

Indicador del nivel de agua.

Registrador del flujo de vapor generado.

Registrador múltiple para la presión del vapor, nivel de agua y nivel del tanque deareador.

Controladores para el control del flujo, presión y temperaturas tanto del vapor como del agua de alimentación.

### **APARATOS DE MEDICION EN LA CALDERA**

Manómetro para la presión del domo.

Manómetro para la presión en la línea de distribución.

### **SISTEMA DE PURGADO**

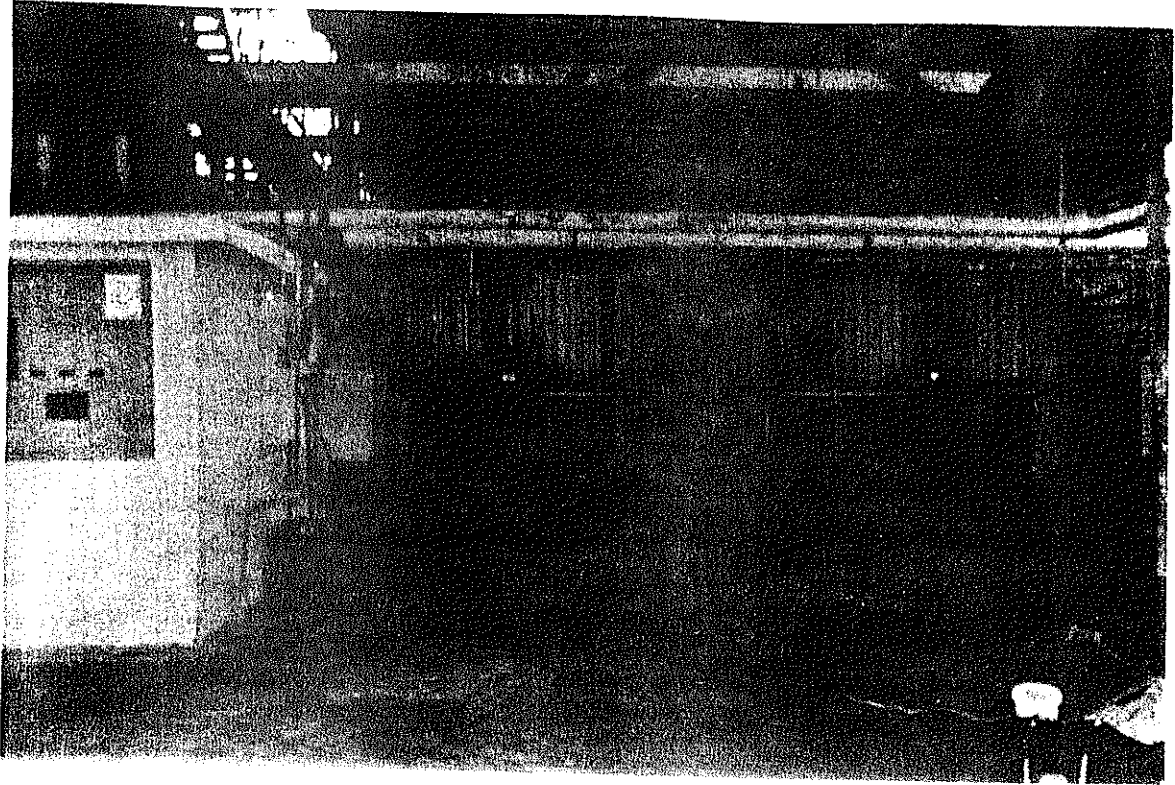
Se dan los dos tipos de purgado necesarios: el continuo con el objeto de extraer los gases que se realiza en el cabezal, y el purgado de lodos que se realiza en el domo inferior. Se realiza de 1 a 3 veces por turno, de manera que durante las 24 horas se purga de de 3 a 9 veces.

### **VALVULAS DE SEGURIDAD**

Se dispone de tres válvulas de seguridad que son las reguladas por la ASME, de la siguiente manera: 2 en el domo de vapor y 1 en la salida a la alimentación de la línea general. Están calibradas de la siguiente forma:

- La válvula No. 1 se dispara a 265 PSIG, y tiene la capacidad de desalojar hasta el 30% del flujo generado o sea 36,000 Lb/hora .
- La válvula No. 2 se dispara a 297.95 PSIG, y desaloja hasta el 35% del flujo generado o sea 42,000 Lb/hora.
- La válvula No. 3 se dispara a 306.89 PSIG, y desaloja el resto del flujo generado que es igual a 42,000 Lb/hora de vapor.

En la figura 5.1.8, se muestra la parte frontal de la caldera ALPHA # 1.



**Figura 5.1.8**  
**Fotografía de la caldera ALPHA # 1.**

## 5.2 REQUERIMIENTOS DE VAPOR

El vapor es el medio más económico y eficiente para transferir calor a las unidades consumidoras, debido a que no es más que agua en estado gaseoso, lo que lo hace fácilmente transportable y de contener una gran capacidad calorífica. Debido a las ventajas antes descritas, el vapor no ha sido desplazado y sigue siendo uno de los medios más utilizados para la generación de energía en la industria en general.

La cantidad de vapor requerida para la operación del ingenio es la consumida por los diferentes equipos que participan en el proceso de fabricación de azúcar de caña. Se dividen en tres tipos o calidades:

**1) VAPOR DIRECTO O DE ALTA PRESION:** es el vapor generado por la caldera a una presión de 247.70 PSIA y a una temperatura de 579°F. Un aspecto muy importante, el cual hay que considerar es la existencia de pérdida o caída de presión del vapor



el equipo generador hasta los aparatos o equipos consumidores. Entre los equipos que utilizan este tipo de vapor se tienen:

- El turbogenerador.
- El conjunto de turbinas.
- La secadora de azúcar.
- Los eyectores para la producción de vacío.
- El utilizado en lavado y soplado de diferentes equipos.

**2) VAPOR DE ESCAPE:** éste se genera en la expansión del vapor de alta presión en el turbogenerador y las turbinas. Circula a una presión de 29.70 PSIA. Si existe una alta demanda de vapor de escape y no es suficiente el suministrado por el conjunto de turbinas, entonces se realiza un inyección de vapor directo a escape por medio de una válvula automática que a su vez es operada por un controlador de vapor.

Entre los equipos que utilizan vapor de escape para su operación tenemos:

- El calentador secundario o rectificador.
- El primer efecto del proceso de evaporación o pre- evaporadores lo utiliza para lograr la primera evaporación del múltiple efecto.
- El calentador deareador.

**3) VAPOR VEGETAL:** es llamado así por que resulta de la evaporación del agua del jugo claro. Se genera en el proceso de evaporación en el múltiple efecto, circula en presiones entre 17.70 y 21.70 PSIA.

Entre los equipos que utilizan este tipo de vapor tenemos:

- Calentador primario
- Evaporadores a partir del segundo, tercer, cuarto y quinto que componen el múltiple efecto.
- En el departamento de tachos para el proceso de cocción. Dependiendo de la demanda de vapor o por razones de conservación de energía, hay una válvula automática de la línea de vapor de escape a vegetal que inyecta de acuerdo con la situación existente. Esta válvula es operada por medio de un controlador.

En la figura 5.2. se muestra un esquema de los equipos que generan y consumen energía en un ingenio azucarero.

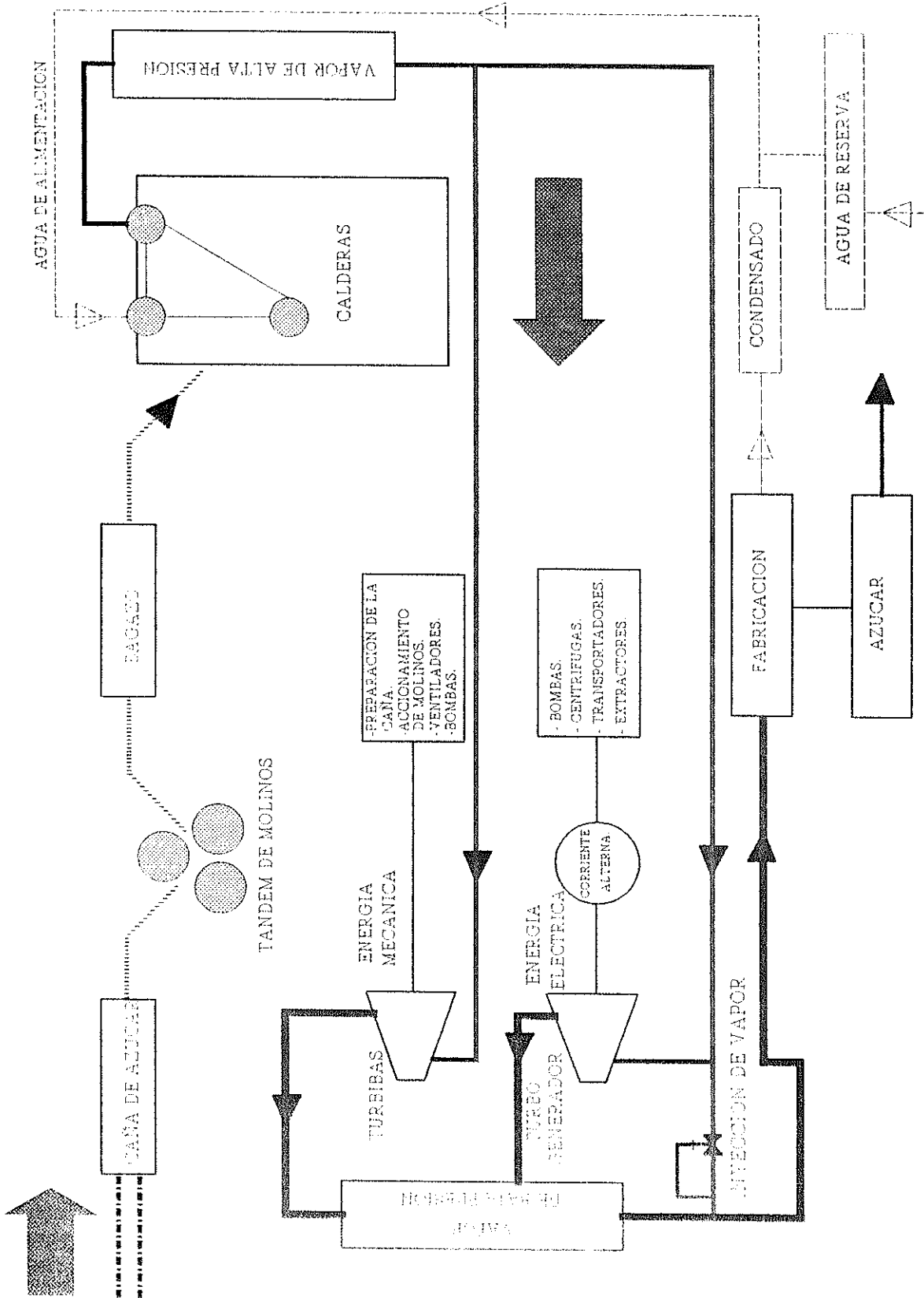


Figura 5.2  
Esquema de energía de un Ingenio azucarero.

## 5.3 PERDIDAS DE ENERGIA

En forma general, se da una breve descripción de las principales pérdidas de energía en los equipos utilizados en el balance energético.

### 5.3.1 PERDIDAS DEBIDAS A DEFECTOS O FALTA DE AISLAMIENTO TERMICO

El aislamiento térmico tiene como función principal la conservación de la energía. Para este efecto, se utiliza el material aislante. Este material provee resistencia al flujo de calor, lo que reduce estas pérdidas en los elementos que integran el sistema de vapor, tales como: calderas, tuberías, tanques, calentadores, evaporadores, tachos, etc.

Antes de aislar un sistema, se estudian dos aspectos relevantes: el tipo de aislamiento a utilizar y la cantidad necesaria. Una parte muy importante es que con la instalación del aislamiento se ahorran gastos de inversión, ya que se reduce el tamaño y la capacidad del equipo de calentamiento.

El aislamiento térmico se utiliza para:

- Mantener la temperatura del sistema.
- Controlar la condensación en las tuberías de vapor.
- Protección del personal.

Dos factores que deben tomarse en cuenta en el aislamiento del sistema son : un buen aislamiento y un diseño adecuado.

Para aislar un sistema de forma adecuada, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Eficiencia de la caldera.
- Temperatura de la operación.
- Localización.
- Diámetro de la tubería.
- Largo de la tubería.

Otro factor de importancia, que debe de tomarse muy en cuenta, es la **eficiencia del aislamiento**, la cual aparece especificada en los catálogos de los fabricantes. Se define como la diferencia entre la pérdida de calor a través del tubo desnudo, y la que tiene el mismo tubo aislado que divide la pérdida de calor a través del tubo sin aislar.

**AISLAMIENTO DE TUBERIA:** se pierden grandes cantidades de calor en tuberías sin aislar; el aislamiento de estas superficies puede evitar la pérdida térmica, que depende de la temperatura del fluido que transporte y de la fase de éste.

**AISLAMIENTO DE SUPERFICIES:** se pierden grandes cantidades de calor en procesos térmicos por falta de aislante. El aislante en superficies puede evitar hasta un 90 % de la pérdida térmica sin involucrar grandes inversiones.

**TAPAR TANQUES ABIERTOS:** los tanques destapados que contienen líquido caliente, frecuentemente tienen altas pérdidas de calor por convección y radiación. Tapando y aislando estos tanques, se pueden reducir estas pérdidas significativamente.

**AISLAR TUBERIA DE VAPOR Y ACCESORIOS:** en tuberías de vapor sin aislante se pierde una cantidad considerable de energía; el aislamiento de estas superficies puede evitar del 85 al 95% de la pérdida térmica.

### **5.3.2 PERDIDAS EN SISTEMAS DE VAPOR**

En esta sección se mencionan varios aspectos en los cuales existen pérdidas de energía dando la solución para poder conservarla.

**PURGADO:** se denomina así a la remoción de agua con un alto contenido de sólidos y su reemplazo con agua de alimentación con bajo contenido de sólidos efectuado en los domos de las calderas. Existen dos tipos de purga: la purga de fondo ( llamada también de lodos) y la continua que es tomada en el punto más alto de concentración de sólidos, generalmente en la parte superior del domo de separación de vapor o del cuerpo de la caldera. El calor perdido a través de la purga es aproximadamente del 3%. Para mantener el nivel aceptado de sólidos disueltos ( 3,000 ppm ) en el agua de la caldera, es necesario purgarla. Parte de la energía que se desecha en esta operación se puede aprovechar utilizando el calor de la purga indirectamente a través de un intercambiador de calor.

**FUGAS DE VAPOR:** que se dan en tubos, válvulas y accesorios representan una considerable pérdida de energía que se podría eliminar sellándolas o reparando los accesorios.

**TRAMPAS DE VAPOR:** son dispositivos automáticos que eliminan el condensado, aire y otros gases incondensables de las tuberías de vapor y equipos que trabajan con el mismo, impidiendo simultáneamente la pérdida de vapor en sistema de distribución. Se considera que en malas condiciones de operación, representan del 10 al 20% de consumo de vapor en una planta, por lo cual es recomendable la implementación tanto de un mantenimiento preventivo como correctivo para que su funcionamiento se realice con la mínima cantidad de pérdidas de energía .

**PRESION DE OPERACION EN EQUIPO GENERADOR:** generalmente, el vapor se produce a la presión mayor requerida en el sistema de consumo de acuerdo a los requerimientos de presión y temperatura. Algunas veces, se genera a una presión mayor de la requerida por los diferentes equipos de consumo. En estos casos,

existe la posibilidad de bajar la presión, para disminuir las pérdidas por radiación y convección en tuberías y accesorios, así como pérdidas por vapor instantáneo (flasheo).

### 5.3.3 PERDIDAS EN SISTEMAS DE COMBUSTION

**RELACION AIRE-COMBUSTIBLE:** el sistema debe suministrar las cantidades de aire y combustible adecuados para el funcionamiento correcto del equipo (horno, caldera, etc. ), a distintas cargas de trabajo. Si el aire suministrado es insuficiente, algunas materias combustibles se eliminan sin quemarse, y reducen así el rendimiento del proceso. Tales materias son hidrógeno monóxido de carbono, hollín, etc .

Si se suministra demasiado aire, el rendimiento disminuye en proporción al exceso de aire, ya que se consume calor para elevar el exceso de aire a la temperatura de los gases de combustión y la transferencia de calor en el equipo disminuye, de manera que la eficiencia de combustión se puede mejorar mediante un ajuste de la relación aire-combustible.

Una relación aire-combustible óptima puede obtenerse: ajustando los controles o instalando un controlador de oxígeno.

**TEMPERATURA DEL AIRE DE COMBUSTION:** el calentamiento del aire mejora la eficiencia de la caldera, ya que al entrar al hogar a un valor elevado acelera el secado del bagazo y su combustión .

### 5.3.4 PERDIDAS DE CALOR EN EL EXTERIOR DE LA CALDERA

Estas se dan por convección y por radiación, y causan una pérdida de eficiencia grande en el generador de vapor. Son difíciles de reducir desde el punto de vista económico. Tienden aumentar con la reducción de la carga, y alcanzan valores del 3%.

## **CAPITULO No. 6**

### **6. DESARROLLO PRACTICO**

#### **6.1 TOMA DE DATOS POR MUESTREO DE LOS DIFERENTES PARAMETROS UTILIZADOS EN EL BALANCE DE ENERGIA**

Esta parte muestra todas las lecturas o mediciones de las diferentes variables que serán de utilidad para realizar los cálculos de los distintos equipos analizados en el balance energético. Esto se realizó durante el desarrollo de la zafra, y los aspectos y equipos a considerar son: todo lo concerniente a la molienda diaria; es relevante la cantidad de caña molida, humedad del bagazo, porcentaje de agua de imbibición, porcentaje de fibra; todo esto tomado de datos realizados en el laboratorio; el generador de vapor, al cual se le hicieron análisis de gases de combustión para determinar su eficiencia y la cantidad de energía que generaba, siendo algunas de las variables la presión del vapor, temperatura del vapor, porcentaje de exceso de aire; la secadora de azúcar en la cual el aspecto analizado es la temperatura; los calentadores de jugo y evaporadores en los que se consideran las presiones del vapor, así como las temperaturas del jugo a la entrada y la salida.

Cada una de las tablas contiene una serie de datos de cada una de las variables y en la parte final aparece su promedio, el cual será utilizado para los cálculos que en el presente capítulo se desarrollan.

TABLA 6.1.1

## DATOS DE MOLIENDA Y BAGAZO

MOLIENDA					BAGAZO		
TONELADAS DE CAÑA MOLIDA	% DE FIBRA	% IMBIBICION	% BAGAZO	% FIBRA	% POL	% HUMEDAD	
2441,91	12,29	18,59	27,68	44,41	3,93	50,97	
2472,21	12,71	19,66	27,64	45,98	3,84	49,45	
2524,05	12,52	20,95	27,73	45,16	3,56	50,67	
2533,05	12,60	20,57	27,70	45,48	3,65	50,33	
2440,99	12,51	20,75	27,75	45,09	3,24	51,13	
2559,48	12,59	21,10	27,72	45,52	3,47	50,48	
2462,00	12,56	21,62	27,74	45,26	3,70	50,40	
2460,00	12,58	21,96	27,75	45,32	3,65	50,37	
2495,00	12,50	20,67	27,72	45,08	3,75	50,47	
2571,00	12,64	20,13	27,72	45,60	3,79	49,93	
2441,32	13,07	23,32	27,75	47,08	3,56	48,73	
2477,95	12,60	21,05	27,71	45,48	3,75	50,12	
2520,20	12,65	19,33	27,75	45,59	3,84	49,90	
2537,01	12,58	19,60	27,76	45,32	3,84	50,13	
2459,90	12,59	20,73	27,72	45,52	3,61	50,28	
2512,08	12,70	22,96	27,74	45,76	3,61	49,97	
2535,28	12,32	19,43	27,74	44,42	3,97	50,80	
2512,34	12,47	19,94	27,76	44,92	3,97	50,47	
2497,54	12,58	20,69	27,73	45,39	3,71	50,26	

TABLA 6.1.2 a

ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN DE LA CALDERA ALPHA # 1										
GASES DE COMBUSTIÓN EN LA ENTRADA DEL PRECALENTADOR DE AIRE										
FECHA	TEMP. °F	PPM CO	% DE O <sub>2</sub>	% EXCESO DE AIRE	% DE EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN	% DE CO <sub>2</sub>	PRESIÓN DE VAPOR	TEMP. VAPOR SOBRECALENTADO	FLUJO DE GASES DE COMBUSTIÓN FPM	
29/11/94	813	598	7,20	36,00	60,00	12,60	220 PSIG	574°F	500	
30/11/94	597	415	12,10	132,00	56,60	9,20	240 PSIG	580°F	500	
02/12/94	608	601	8,30	59,00	62,50	13,00	220 PSIG	570°F	700	
05/12/94	615	830	11,40	102,00	57,50	10,10	230 PSIG	561°F	500	
06/12/94	619	480	9,20	61,00	63,40	13,10	240 PSIG	610°F	700	
07/12/94	597	218	10,10	93,00	61,20	11,60	230 PSIG	570°F	2000	
08/12/94	620	102	7,30	80,00	64,00	12,30	230 PSIG	590°F	600	
09/12/94	660	781	8,40	85,00	66,00	11,90	240 PSIG	605°F	500	
11/12/94	558	337	7,70	39,00	65,80	15,30	250 PSIG	615°F	700	
13/12/94	642	1429	9,30	36,00	66,10	15,00	240 PSIG	590°F	500	
14/12/25	614	226	8,90	16,50	63,20	12,20	230 PSIG	580°F	900	
25/01/95	644	2165	5,00	30,00	64,70	15,60	250 PSIG	550°F	600	
27/01/95	554	1751	9,60	83,00	63,10	11,10	225 PSIG	554°F	500	
29/01/95	552	1690	14,10	20,30	53,10	6,40	225 PSIG	580°F	600	
03/02/95	572	1055	12,70	152,00	62,70	8,70	225 PSIG	557°F	700	
PROMEDIO	617,67	845,2	9,42	66,32	61,99	11,87	233 PSIG	579°F	700	



TABLA 6.1.2 b

ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION DE LA CALDERA ALPHA # 1										
GASES DE COMBUSTION EN LA SALIDA DEL PRECALENTADOR										
FECHA	TEMP. °F	PPM CO	% DE O <sub>2</sub>	% EXCESO DE AIRE	% DE EFICIENCIA	% DE CO <sub>2</sub>	FLUJO DE GASES DE COMBUSTION			
29/11/94	516	575	11,80	127,00	61,50	8,90	2.500			
30/11/94	560	346	10,50	103,00	62,50	10,50	6.400			
02/12/94	420	388	12,40	122,00	67,80	10,70	4.700			
05/12/94	402	1.002	14,40	218,00	62,90	6,80	3.500			
06/12/94	416	335	15,20	172,00	61,60	10,80	3.500			
07/12/94	470	398	11,30	12,20	64,30	8,90	4.500			
08/12/94	459	308	11,00	93,00	66,40	10,20	4.200			
09/12/94	476	334	11,40	17,60	62,20	8,80	4.400			
11/12/94	442	349	13,90	15,20	62,70	8,20	3.400			
13/12/94	417	420	13,00	15,20	65,00	8,20	3.600			
14/12/94	425	346	14,10	22,80	61,50	6,80	3.400			
25/01/95	470	2.251	19,50	99,00	65,70	10,20	7.400			
27/01/95	455	2.004	14,80	238,00	56,90	6,00	4.000			
29/01/95	476	1.136	14,80	23,80	57,20	6,10	7.200			
03/02/95	436	234	12,30	141,00	64,60	8,40	6.800			
PROMEDIO	456	695	13,36	94,65	62,85	8,63	4.633			

TABLA 6.1.3

**DATOS DE LA SECADORA DE AZUCAR  
TEMPERATURAS EN °F**

TEMPERATURA AMBIENTE	TEMP. DEL AIRE CALIENTE	TEMP. DEL AZUCAR AL ENTRAR A SECADORA	TEMP. DEL AZUCAR AL SALIR DE SECADORA	TEMP. DEL AIRE AL SALIR DE SECADORA
87,80	192,20	101,84	116,35	93,20
80,60	219,20	102,20	110,57	93,20
80,60	199,40	99,68	112,57	91,94
84,20	212,00	102,38	111,41	91,40
80,60	199,40	98,60	115,09	96,80
86,00	203,00	95,00	113,77	91,40
86,00	233,60	100,00	105,51	91,40
86,90	207,50	102,56	112,58	96,08
82,40	192,20	93,20	113,83	93,20
86,00	210,20	102,20	113,13	93,20
87,80	201,20	105,62	113,20	96,80
86,00	194,00	102,20	113,72	95,00
82,40	201,20	100,40	108,66	91,40
80,60	289,40	100,40	112,17	91,40
82,40	257,00	102,20	109,18	91,40
84,02	214,10	100,57	112,12	93,19

TABLA 6.1.4

DATOS DE LOS CALENTADORES DE JUGO											
TEMPERATURAS EN °F - 1ER. CALENTADOR			TEMPERATURAS EN °F - 2DO. CALENTADOR			TEMPERATURAS EN °F - 2DO. CALENTADOR			PRESIONES EN PSIA		
JUGO QUE ENTRA	JUGO QUE SALE	VAP. VEGETAL QUE ENTRA	CONDENSADO QUE SALE	JUGO QUE ENTRA	VAPOR ESCAPE QUE ENTRA	CONDENSADO QUE SALE	JUGO QUE SALE	VAPOR ESCAPE QUE ENTRA	CONDENSADO QUE SALE	1ER. VAPO. VEGETAL	2DO. VAPO. VEGETAL
102,20	199,44	219,20	219,20	221,00	235,30	235,30	221,00	235,30	235,30	19,04	29,35
97,52	208,40	213,80	213,80	215,60	234,05	234,05	215,60	234,05	234,05	21,20	29,70
94,75	208,00	215,60	215,60	217,40	230,15	230,15	217,40	230,15	230,15	19,70	29,00
96,60	201,20	219,20	219,20	219,20	229,47	229,47	219,20	229,47	229,47	19,70	29,40
104,18	188,60	213,80	213,80	215,60	237,00	237,00	215,60	237,00	237,00	18,20	25,30
97,70	207,86	215,60	215,60	215,60	233,13	233,13	215,60	233,13	233,13	18,90	29,35
99,14	202,28	211,82	211,82	215,60	236,45	236,45	215,60	236,45	236,45	19,70	29,50
100,76	217,40	222,80	222,80	219,20	236,58	236,58	219,20	236,58	236,58	22,20	30,10
103,28	195,98	215,60	215,60	222,80	236,88	236,88	222,80	236,88	236,88	20,70	29,10
95,45	201,20	210,20	210,20	219,40	234,99	234,99	219,40	234,99	234,99	19,70	28,82
94,39	198,00	212,00	212,00	217,40	236,42	236,42	217,40	236,42	236,42	20,70	29,20
109,40	206,78	215,60	215,60	219,20	237,00	237,00	219,20	237,00	237,00	19,70	29,20
95,63	186,80	210,20	210,20	217,40	234,80	234,80	217,40	234,80	234,80	17,70	26,70
93,86	185,00	213,80	213,80	215,60	235,56	235,56	215,60	235,56	235,56	19,90	28,70
102,92	192,20	213,80	213,80	217,40	237,22	237,22	217,40	237,22	237,22	18,00	26,70
99,19	199,94	214,87	214,87	217,89	235,00	235,00	217,89	235,00	235,00	19,67	28,67

TABLA 6.1.5 a

## PRESION EN EVAPORADORES (PSIA) - QUINTUPLE EFECTO

PRE-EVAPORADORES		2DO. EFECTO		3ER. EFECTO		4TO. EFECTO		5TO. EFECTO		
CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	
33,20	26,70	31,93	23,09	22,85	18,20	16,00	10,03	11,26	4,38	2,42
29,90	21,20	26,92	25,30	24,45	18,20	16,45	9,88	9,78	6,15	1,92
30,20	22,90	23,05	27,40	24,65	17,90	16,95	9,55	8,80	7,33	1,92
35,20	25,70	32,70	31,40	27,85	19,35	17,90	9,79	9,54	7,62	1,92
30,10	27,60	31,70	25,10	24,30	19,20	20,00	12,24	12,24	8,06	2,42
28,25	24,70	30,70	22,06	20,85	19,25	17,90	9,68	11,89	7,33	2,42
28,25	26,20	28,70	21,70	20,25	18,35	17,95	9,80	8,89	5,36	2,42
29,20	25,40	29,20	22,20	21,20	19,15	16,05	9,88	11,75	5,36	2,42
30,54	25,05	29,36	24,78	23,30	18,70	17,40	10,11	10,52	6,45	2,23

TABLA 6.1.5 b

TEMPERATURAS EN EVAPORADORES ( °F ) - QUINTUPLE EFECTO													
PRE-EVAPORADORES			2DO. EFECTO		3ER. EFECTO		4TO. EFECTO		5TO. EFECTO				
CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO	CALANDRIA	CUERPO		
243.00	231.00	248.00	231.00	221.62	210.20	210.20	200.64	200.64	170.50	170.50	123.66		
236.85	225.00	239.00	218.39	225.43	212.32	212.32	199.84	199.84	175.42	175.42	122.69		
237.75	225.00	242.60	219.45	225.00	209.22	209.22	197.58	197.58	173.00	173.00	122.78		
240.23	234.00	245.30	218.76	227.00	200.85	200.85	189.66	189.66	169.86	169.86	125.00		
243.00	223.25	240.80	232.00	228.25	206.88	206.88	188.88	188.88	183.00	183.00	124.33		
240.80	222.00	239.00	230.00	226.12	205.37	205.37	200.08	200.08	172.22	172.22	125.00		
242.80	230.00	237.20	228.05	228.00	205.77	205.77	196.57	196.57	172.15	172.15	120.67		
241.70	217.60	234.85	227.28	225.00	215.82	215.82	199.54	199.54	166.28	166.28	119.89		
240.77	225.98	240.84	225.62	225.80	208.30	208.30	196.60	196.60	172.80	172.80	123.00		

TABLA 6.1.5 c

BRIX EN EVAPORADORES - QUINTUPLE EFECTO						
JUGO CLARO	JUGO 1ER. EFECTO	JUGO 2DO. EFECTO	JUGO 3ER. EFECTO	JUGO 4TO. EFECTO	JUGO 5TO. EFECTO	
16,23	23,84	29,04	35,55	44,45	61,67	
17,00	24,61	29,81	36,35	45,15	63,33	
16,97	24,58	29,78	36,52	45,38	61,21	
16,47	24,05	29,33	36,12	45,08	61,13	
16,93	24,48	29,65	36,25	45,58	61,32	
17,02	24,85	30,10	36,58	44,63	61,75	
17,77	25,33	30,05	36,60	45,88	63,45	
17,30	24,74	29,79	36,33	45,32	60,09	
17,63	25,02	29,92	36,40	45,85	63,88	
17,25	24,54	29,75	36,49	45,39	61,72	
17,63	25,09	29,98	36,37	45,46	63,22	
16,95	24,43	29,71	36,22	45,40	60,66	
17,10	24,63	29,74	36,32	45,30	61,95	

TABLA 6.1.6

## PRODUCCION DE VAPOR CALDERA ALPHA #1

FECHA	TEMP. GASES °F	BAGAZO LB/MIN	PRODUCCION VAPOR/BAGAZO	PRODUC. ESTIM. Lb. de Vapor/min.	PRODUC. TOTAL Lb/hora
29/11/94	516	913,81	1,795656918	1640,889248	98453,355
30/11/94	560	913,81	1,792626307	1638,119846	98287,191
02/12/94	420	913,81	1,962604732	1793,447830	107606,870
05/12/94	402	913,81	1,805182940	1649,594222	98975,653
06/12/94	416	913,81	1,830800876	1673,004148	100380,249
07/12/94	470	913,81	2,149741859	1964,455608	117867,337
08/12/94	459	913,81	1,951906863	1783,672010	107020,321
09/12/94	476	913,81	2,096620572	1915,912845	114954,771
11/12/94	442	913,81	2,126742209	1943,438298	116606,298
13/12/94	417	913,81	2,174713295	1987,274756	119236,485
14/12/94	425	913,81	2,159671472	1973,529388	118411,763
25/01/95	470	913,81	1,963506555	1794,271925	107656,316
27/01/95	455	913,81	1,652150495	1509,751644	90585,099
29/01/95	476	913,81	2,104682207	1923,279648	115396,779
03/02/95	436	913,81	1,908215946	1743,742837	104624,809
-----	456	913,81	1,964988216	1795,625617	107737,553

## 6.2 EQUIPOS CONSUMIDORES DE VAPOR DIRECTO O DE ALTA PRESION

### 6.2.1 VAPOR REQUERIDO POR TURBINAS

El cálculo de la cantidad de vapor utilizado por el conjunto de turbinas se realiza con base en datos proporcionados en los catálogos de operación suministrados por los fabricantes. El consumo se da generalmente en Lb/hp-hora, de manera que conociendo su potencia, así como las características de operación se tiene: velocidad, presión y tipo de turbina; el cálculo se realiza de forma directa.

En la tabla 6.2.1, se da el consumo de vapor de cada una de las turbinas utilizadas en el Ingenio Los Tarros.



Tabla 6.2.1

## CONSUMO DE VAPOR EN TURBINAS

EQUIPO QUE ACCIONA	MARCA DE LA TURBINA	POTENCIA HP	STEAM - RATE LBS/HP-HORA	CONSUMO DE VAPOR LBS/HORA
PICADORA No. 1	WORTHINGTON	275,00	46,10	12,677.50
PICADORA No. 2	TERRY	350,00	40,00	14,000.00
MOLINO No. 1	TURBODYNE	400,00	30,17	12,068.00
MOLINO No. 2	TURBODYNE	350,00	32,60	11,410.00
MOLINO No. 3	TURBODYNE	250,00	34,11	8,527.50
MOLINO No. 4	ELLIOT	300,00	32,00	9,600.00
MOLINO No. 5	ELLIOT	300,00	32,00	9,600.00
TURBOGENERADOR 1500 KW	WESTINGHOUSE	2010,72	22,50	45,241.20
TURBOGENERADOR 800 KW	TURBODYNE	1072,38	36,00	38,605.68
TURBOGENERADOR 800 KW	WORTHINGTON	1072,38	36,00	38,605.68
BOMBA DE AGUA (CALDERAS)	TURBODYNE	100,00	64,80	6,480.00

\* Nota: el consumo de vapor del conjunto de turbinas se toma para este caso al 100% de operación .

- envasado.
13. Al llenar, verificar que el contenido sea el que se indica en las especificaciones, y si no es así consultar con el jefe de Control de Calidad.
  14. Durante el proceso de llenado, se realiza un muestreo con ayuda de la hoja de chequeo en líneas y el plan de muestreo, conforme el cual se acepta o rechazan unidades defectuosas, o bien lotes si fuese necesario.
  15. El producto es empacado en cajas de cartón y se coloca en el interior de las cajas de llenado material de relleno para retardar el deterioro del producto, causado por el peso. Las cajas son rotuladas con el nombre del producto, código, fecha, firma de quien empaca, y son colocadas en el área de prebodega.
  16. Al terminar de llenar, se cuenta el material sobrante y se devuelve con los documentos respectivos, al área de material de empaque.
  17. Si el envase tiene defecto de impresión debe despintarse y devolverlo a la bodega de material de empaque.
  18. El producto envasado es mandado a la bodega con una orden de producción.

#### 7.5.5.3 Responsabilidad

1. Los operarios de manufactura son los responsables de cumplir con el procedimiento.
2. El supervisor de producción verificará el cumplimiento de este

4. Colocar las papeletas de áreas aprobadas en la ventana del área.
5. Las sub-áreas en el área de llenado, deben permanecer ordenadas.
  - Area de material de empaque en tránsito
  - Area de Bulk para llenar
  - Area de tolvas y utensilios de trabajo
  - Area de jabones
  - Area de cajas vacías
  - Area de pre-bodega
6. No debe permanecer sobre las mesas de trabajo, ni debajo ningún utensilio que no sea necesario en la manufactura.
7. El material de empaque es solicitado por el jefe de departamento de envasado, al jefe de bodega de material de empaque y se coloca en el área correspondiente.
8. Solamente el producto autorizado por el jefe de control de Calidad puede ser envasado, por lo que si no contiene las papeletas que lo aprueban no debe llenarse.
9. Al comenzar el proceso de llenado, asegurar la identidad del producto, y del material de empaque.
10. Limpiar y revisar el material de empaque antes de llenar, a fin de detectar posibles errores.
11. Asegurarse de que su equipo de trabajo y de seguridad esté completo y sea el apropiado.
12. Unicamente el jefe de Control de Calidad puede autorizar la alteración del material de empaque utilizado durante el

## 6.2.2 CALCULOS REALIZADOS AL TURBOGENERADOR

### a) CONSUMO TEORICO DE VAPOR

Determina la cantidad de libras de vapor necesarias para producir un kwh. Para realizar el cálculo, se vale de la fórmula:

$$m_t = (3,413)/(h_1-h_2),$$

donde:

$m_t$  = consumo teórico o ideal de vapor; Lb/kWh

3,413 = equivalente en BTU/hora a 1 kW

$h_1$  = entalpía del vapor a la entrada de la turbina; BTU/Lb

$h_2$  = entalpía del vapor a la salida de la turbina ; BTU/Lb

Para encontrar  $h_1$ , se utiliza la información de la tabla 6.1.2 a, tomando en cuenta una caída para la presión y la temperatura del 12 y 10%. De manera que se tiene una presión a la entrada de la turbina de 219.74 PSIA a una temperatura de 521.10°F, con el auxilio de las tablas de vapor en la sección de sobrecalentamiento e interpolando, se obtiene:

## TEMPERATURA

PRESION	500°F	521.10°F	600°F
200 PSIA	1269.00		1322.60
219.74 PSIA	1,266.83	1,278.30	1,321.1787
250.00 PSIA	1,263.50		1,319.00

Con lo cual el valor es,  $h_1 = 1,278.30$  BTU/Lb.

Para encontrar  $h_2$ , se toma como punto de partida que la descarga será a una presión de 29.70 PSIA, y partiendo de que en en la turbina se realiza un proceso isoentrópico o sea  $s_1=s_2$ , donde  $s$  es la entropía;  $s_1$  se dermina en las tablas de vapor sobrecalentado, y mediante la utilización de la ecuación:

$$s = s_f + (x)(s_{fg}) ,$$

donde:

$s$  = entropía de acuerdo a las condiciones del vapor; BTU/Lb°R

$s_f$  = entropía del líquido; BTU/Lb°R

$s_{fg}$  = entropía de vaporización; BTU/Lb°R

$x$  = título del vapor en la descarga de la turbina; fracción decimal.

De acuerdo con las condiciones de entrada y salida del vapor en la turbina y con el auxilio de las tablas de vapor e interpolando, se obtiene:

$$s_1 = s_2 = 1.624082026 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{R}$$

$$s_f = 0.367228 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{R}$$

$$s_{fg} = 1.333247 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{R}.$$

Sustituyendo en la ecuación, se tiene:

$$x = (1.624082026 - 0.367228) / (1.333247)$$

$$x = 0.94270$$

La ecuación para encontrar  $h_2$  es :

$$h_2 = h_f + (x)(h_{fg}) ,$$

donde:

$h_2$  = entalpía total del vapor ; BTU/Lb

$h_f$  = entalpía del líquido ; BTU/Lb

$h_{fg}$  = entalpía de vaporización; BTU/Lb.

Los valores de  $h_f$  y  $h_{fg}$  se encuentran con la ayuda de las tablas de vapor saturado; interpolando:

$$h_f = 218.2211 \text{ BTU/Lb}$$

$$h_{fg} = 945.6470 \text{ BTU/Lb.}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$h_2 = 218.2211 + (0.94270) * (945.647)$$

$$h_2 = 1,109.68 \text{ BTU/Lb .}$$

Como ya se tiene los valores de todas las variables :

$$m_t = (3,413) / (1,278.30 - 1,109.68)$$

$$m_t = 20.24 \text{ Lb/kWh.}$$

## b) CONSUMO REAL DE VAPOR

Como lo que se utiliza es el valor real, se recurre a la siguiente fórmula para determinar el consumo del turbogenerador:

$$m_T = [(m_t) / ((\epsilon_g) * (n))] + \text{perdidas,}$$

donde:

$m_T$  = consumo real de vapor; Lb/kWh

$m_t$  = consumo teórico de vapor; Lb/kWh

$\epsilon_g$  = rendimiento termodinámico de la turbina, que varía entre 0.70 ~ 0.75.

$n$  = eficiencia del generador, que varía entre los valores de 0.91 ~ 0.94.

pérdidas por condensación = 3% ~ 5%, por fugas = 2% ~ 3%.

Sustituyendo en la ecuación y tomando 5% de pérdidas, se obtiene:

$$m_T = [(20.24)/((0.75)*(0.94))] * (1.05)$$

$$m_T = 30.15 \text{ Lb/kwh .}$$

El turbogenerador tiene una capacidad máxima de 1,500 kW y la carga con la que funcionará es de 1,400 kW, de manera que la carga de operación está en el 93.33% de la capacidad de generación , con lo cual el consumo real es de :

$$(30.15 \text{ Lb/kw-h}) * (1,400 \text{ kw}) = 42,210.00 \text{ Lb de Vapor/hora.}$$

c) EFICIENCIA O RENDIMIENTO TERMICO (  $e_t$  )

Establece la relación entre el calor útil y el suministrado a la máquina para generarlo. El rendimiento con base en un kw se calcula mediante la expresión:

$$e_t = [(3,413)/(m_T(h_1 - h_{f2}))] * (100) , \text{ donde:}$$

$e_t$  = se da en porcentaje,

$h_{f2}$ =entalpía del líquido a la presión absoluta del vapor de escape;BTU/Lb .

Mediante la utilización de las tablas de vapor saturado y con la presión absoluta del vapor en la descarga e interpolando, se tiene:

$h_{f2}$ = 218.22 BTU/Lb, y sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$e_t = [(3413)/((30.15)*(1,278.30 - 218.22))] * (100)$$

$$e_t = 10.68\%.$$

d) RAZON DE CALOR( HEAT-RATE)

Determina la cantidad de energía que necesita la unidad o turbina para desarrollar determinada potencia de salida o kWh; se puede expresar en términos de BTU/kwh o kcal/kwh. Se encuentra mediante la expresión:

$$\text{Heat-Rate} = (m_T (h_1 - h_2))/(P),$$

donde:

P= potencia de salida del generador,

Sustituyendo:

$$\text{Heat-Rate} = [(42,210) * (1,278.30 - 1,109.68)] / (1,400)$$

$$\text{Heat-Rate} = 5,083.90 \text{ BTU/kWh .}$$

### 6.2.3 VAPOR REQUERIDO POR LA SECADORA DE AZUCAR

Primero se determina la cantidad de aire que utiliza el secador, con la utilización de la expresión siguiente:

$$A = [1,500 * (p * h)] / (H_1 - H_2),$$

donde:

A= cantidad de aire requerido por el secador; Lb/h

p= peso del azúcar por secarse; Lb/h

h= humedad del azúcar, con relación a la unidad

H<sub>1</sub>=peso del vapor de agua contenido en el aire saturado a la temperatura ambiente t<sub>0</sub> , dado en Lb/1,000 Lb,

H<sub>2</sub>=peso del vapor de agua contenido en el aire saturado a la temperatura de salida del secador t<sub>2</sub> , dado en Lb/1,000 Lb.

De datos de la tablas 6.1.1 y 6.1.3, de acuerdo a las condiciones del azúcar y mediante el auxilio de las gráficas 327 y 328 del Manual de Azúcar de Hugot, se tiene:

$$p = 23,500 \text{ Lb/h}$$

$$h = 0.023$$

$$H_1 = 0.0250 / 1,000 = 25.0 \text{ Lb} / 1,000 \text{ Lb}$$

$$H_2 = 0.0380 / 1,000 = 38.0 \text{ Lb} / 1,000 \text{ Lb}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$A = (1,500 * 23,500 * 0.023) / (38.00 - 25.00)$$

$$A = 62,365.38 \text{ Lb/h.}$$

Con la siguiente expresión, se determina el volumen necesario para la cantidad de aire calculada anteriormente:

$$V = (A) / (a_0 - e_0),$$

donde:

a<sub>0</sub> y e<sub>0</sub> se dan en Lb/pie<sup>3</sup> , se encuentran en las gráficas 327 y 328 de Hugot.

$$a_0 = 0.078 \text{ Lb} / \text{pie}^3$$

$$e_0 = 0.0015 \text{ Lb} / \text{pie}^3$$

Sustituyendo :

$$V = (62,365.38) / (0.078 + 0.0015)$$

$$V = 784,470.19 \text{ pie}^3 / \text{hora.}$$

La cantidad de energía o calor necesario para el proceso de secado se determina de la siguiente forma:



a) Calor necesario para calentar el aire ( $q_1$ ):

Se utiliza la expresión siguiente:

$$q_1 = A * c * (t_2 - t_0),$$

donde:

$q_1 =$  BTU/hora

$c = 0.24$  , calor específico del aire.

$t_0 = 84.02$  °F ,  $t_2 = 214.10$ °F, se obtienen de la tabla 6.1.3,

Sustituyendo :

$$q_1 = 62,365.38 * 0.24 * (214.10 - 84.02)$$

$$q_1 = 1,946,997.27 \text{ BTU/h.}$$

b) Calor necesario para evaporar el agua que contiene el azúcar ( $q_2$ ):

La ecuación que se va a utilizar es la siguiente:

$$q_2 = p * h * [1,093 + 0.3 * (t_2 - 32) - (t_0 - 32)]$$

Sustituyendo :

$$q_2 = 23,500 * 0.023 * [1093 + 0.3 * (214.10 - 32) - (84.02 - 32)]$$

$$q_2 = 592,177.205 \text{ BTU/h.}$$

c) Calor necesario para calentar el vapor contenido en el peso de A , suponiéndolo saturado ( $q_3$ ):

La expresión necesaria para el cálculo es la siguiente:

$$q_3 = A * H_1 * c * (t_2 - t_0),$$

donde:

$c = 0.475$ , es el calor específico del vapor,

Sustituyendo valores:

$$q_3 = 62,365.38 * 0.00175 * 0.475 * (214.10 - 84.02)$$

$$q_3 = 6,743.506 \text{ BTU/h.}$$

El calor total se determina de la siguiente forma ( $Q_t$ ):

La expresión necesaria es:

$$Q_t = 1.25 * (q_1 + q_2 + q_3)$$

Tomando un factor de seguridad de 1.25, y sustituyendo:

$$Q_t = 1.25 * (1,946,997.27 + 592,177.205 + 6,743.506)$$

$$Q_t = 3,182,397.478 \text{ BTU/h.}$$

Como se utiliza vapor directo a una presión de 219.74 PSIA (tomando en cuenta la caída de presión debido a la distancia), asumiendo un vapor saturado seco y recurriendo a las tablas de vapor se tiene que  $h_g = 1,199.405 \text{ BTU/Lb}$ , con lo cual la cantidad de vapor requerida es de:

$$(3,182,397.478 \text{ BTU/h}) / (1,199.405 \text{ BTU/Lb}) = 2,653.31 \text{ Lb/hora de Vapor Directo.}$$

#### 6.2.4 VAPOR UTILIZADO POR JET DE VACIO Y OTROS ACCESORIOS

En este tipo de accesorio utilizado en evaporadores, tachos y filtro de cachaza no se tiene información sobre la cantidad de vapor necesaria para su funcionamiento, por lo cual se acude a la fórmula de Babcock para determinar el flujo máximo de vapor que circula en cada una de las tuberías de alimentación de cada eyector.

La expresión que se va a utilizar es la siguiente:

$$w = (87) * [(P * d * D^5) / ((1 + (3.6/D)) * L)]^{1/2},$$

donde:

w= libras de vapor fluyendo por minuto,

P= pérdidas de presión en Lb/pulg<sup>2</sup>,

d= peso de un pié<sup>3</sup> de vapor( masa específica),

D= diámetro interior del tubo, en pulgadas,

L = longitud equivalente del tubo, en pies.

Debido a la complejidad de la fórmula anterior, se ha preparado la tabla No. 1 con el objetivo de simplificar los cálculos; la tabla No. 2 la se utiliza de acuerdo con las características de la tubería; se encuentran localizadas en el anexo.

Con lo cual la fórmula es:

$$w = \text{Col 1} * \text{Col 2} * \text{Col 3} * \text{Col 4}$$

##### a) JET - EVAPORADOR No. 5

Datos de la tubería:

Longitud equivalente = 431.00 pies

Diámetro de tubería = 2 ½ pulgadas

Presión manométrica del vapor = 200 PSIG

Pérdida de presión = 1 Lb/pulg<sup>2</sup> por cada 100 pies de tubería.

Entonces:

Col 1 = pérdida de presión =  $1 * 4.31 * 16 = 68.96$  onzas/pulg<sup>2</sup>, de tabla No. 1  
 Col 1 = 17.94  
 Col 2 = tamaño de tubo = 2 ½", de tabla No. 1, Col 2 = 6.109.  
 Col 3 = presión del vapor = 200 PSIG, de tabla No. 1, Col 3 = 0.6850  
 Col 4 = longitud equivalente = 431 pies, de tabla No. 1, Col 4 = 0.48574.

Sustituyendo:

$w = 17.94 * 6.109 * 0.6850 * 0.48574$   
 $w = 36.4659$  Lb/min \* 60 min /1 hora, con lo cual:

$w = 2,187.95$  Lb/hora de Vapor.

b) JET - EVAPORADOR No. 7

Datos de tubería:

Longitud equivalente = 315.40 pies  
 Diámetro de tubería = 2 ½ pulgadas  
 Presión manométrica del vapor = 200 PSIG  
 Pérdida de presión = 1Lb/pulg<sup>2</sup>.

Acudiendo a la tabla No. 1 del anexo:

Col 1 = 15.407  
 Col 2 = 6.109  
 Col 3 = 0.6850  
 Col 4 = 0.56568.

Sustituyendo:

$w = 15.407 * 6.109 * 0.6850 * 0.56568$   
 $w = 36.47$  Lb/min \* 60 min/1 hora, con lo cual:

$w = 2,188.27$  Lb/hora de Vapor.

c) JET - TACHO No. 2

Datos de tubería:

Longitud equivalente = 256.19 pies  
 Diámetro de tubería = 2 ½ pulgadas  
 Presión manométrica del vapor = 200 PSIG  
 Pérdida de presión = 1 Lb/pulg<sup>2</sup>.

Acudiendo a la tabla No. 1 del anexo:

Col 1 = 13.92

Col 2 = 6.109  
 Col 3 = 0.6850  
 Col 4 = 0.625315.

Sustituyendo:

$w = 13.92 * 6.109 * 0.6850 * 0.625315$   
 $w = 36.425 \text{ Lb/min} * 60 \text{ min/1 hora}$ , con lo cual:

$w = 2,185.50 \text{ Lb/hora de Vapor Directo}$ .

d) JET - TACHO No. 5

Datos de tubería:

Longitud equivalente = 227.83 pies  
 Diámetro de tubería = 2 ½ pulgadas  
 Presión manométrica del vapor = 200 PSIG  
 Pérdida de presión = 1 Lb/pulg².

Acudiendo a la tabla No. 1 del anexo:

Col 1 = 13.112  
 Col 2 = 6.109  
 Col 3 = 0.6850  
 Col 4 = 0.66658.

Sustituyendo:

$w = 13.112 * 6.109 * 0.6850 * 0.66658$   
 $w = 36.5748 \text{ Lb/min} * 60 \text{ min/1 hora}$ , con lo cual:

$w = 2,194.49 \text{ Lb/hora de Vapor}$ .

e) JET - FILTRO DE CACHAZA

Datos de tubería:

Longitud equivalente = 312.46 pies  
 Diámetro de tubería = 2 ½ pulgadas  
 Presión manométrica del vapor = 200 PSIG  
 Pérdida de presión = 1 Lb/pug².

Acudiendo a la tabla No. 1 del anexo:

Col 1 = 15.343  
 Col 2 = 6.109  
 Col 3 = 0.6850  
 Col 4 = 0.568038.

UNIVERSIDAD CARLOS DE CEBALLOS  
 Centro

Sustituyendo:

$$w = 15.343 * 6.109 * 0.6850 * 0.588038$$

$$w = 36.4710 \text{ Lb/min} * 60 \text{ min/1 hora, con lo cual:}$$

$$w = 2,188.26 \text{ Lb/hora de Vapor.}$$

f) TORRES DE AZUFRAO No. 1 y No. 2

Datos de tubería:

Longitud equivalente = 146.54 pies

Diámetro de tubería = 1 pulgada

Presión manométrica del vapor = 200 PSIG

Pérdida de presión = 1 Lb/pulg<sup>2</sup>.

Acudiendo a la tabla No. 1 del anexo:

$$\text{Col 1} = 10.5265$$

$$\text{Col 2} = 0.5360$$

$$\text{Col 3} = 0.6850$$

$$\text{Col 4} = 0.825304.$$

Sustituyendo:

$$w = 10.5265 * 0.5360 * 0.6850 * 0.825304$$

$$w = 3.190 \text{ Lb/min} * 60 \text{ min/1 hora, con lo cual :}$$

$$w = 191.38 \text{ Lb/hora de Vapor, c/u de las torres.}$$

g) SOPLADO DEL POLVILLO

Datos de tubería:

Longitud equivalente = 91.97 pies

Diámetro de tubería = 1 pulgada

Presión manométrica del vapor = 200 PSIG

Pérdida de presión = 1 Lb/pulg<sup>2</sup>.

Acudiendo a la tabla No. 1 del anexo:

$$\text{Col 1} = 8.3389$$

$$\text{Col 2} = 0.5360$$

$$\text{Col 3} = 0.6850$$

$$\text{Col 4} = 1.04818.$$

Sustituyendo:

$$w = 8.3389 * 0.5360 * 0.6850 * 1.04818$$

$$w = 3.20922 \text{ Lb/min} * 60 \text{ min/1 hora}, \text{ con lo cual:}$$

$$w = 192.55 \text{ Lb/hora de Vapor.}$$

### 6.2.5 VAPOR REQUERIDO PARA LAVADO DE EQUIPOS Y PERDIDAS

Este consumo se obtiene de acuerdo con la cantidad de caña molida, tomando datos estandarizados para ingenios azucareros, según Manual de Ingenieros Azucareros de Hugot (página 688).

Lavado de centrifugas -----> 20 kg/tonelada de caña

Sopladores de hollín, lavado de filtros,  
calentamiento de mieles, etc. -----> 25 kg/tonelada de caña

Pérdidas por condensación, fugas,  
trampas de vapor, válvulas, etc. -----> 40 kg/tonelada de caña

+ \_\_\_\_\_

TOTAL ----- 85 kg/tonelada de caña .

De la tabla 6.1.1, se tiene que la cantidad de caña molida es de:

$$2,497.54 \text{ toneladas/día} * 1 \text{ día/24 horas} = 104.064 \text{ toneladas de caña/hora.}$$

Con esto, la cantidad de vapor requerida es:

$$85.00 \text{ kg/tonelada de caña} * 2.2 \text{ Lb/1 kg} * 104.064 \text{ toneladas de caña/hora} =$$

$$19,459.97 \text{ Lb de vapor/hora de Vapor.}$$

### 6.3 CALCULO DE LA CANTIDAD DE JUGO PRODUCIDO

Para su realización, se recurre a la información obtenida de la tabla 6.1.1; el resultado obtenido es de gran utilidad, ya que mediante la cantidad de jugo generada en el departamento de molinos y que circula por las fases de calentamiento, evaporación y cristalización, se puede determinar la cantidad de vapor requerida por cada uno de ellos.

#### - MOLIENDA (Tomando el promedio de una serie de datos)

Toneladas de caña molida :	2,497.54 Ton/día
Porcentaje de fibra :	12.58%
Porcentaje de imbibición :	20.69%
Porcentaje de bagazo :	27.73%

#### - BAGAZO ( Tomando el promedio de una serie de datos )

Porcentaje de fibra :	45.39%
Porcentaje de Pol :	3.41%
Porcentaje de humedad :	50.26%
Indeterminados :	0.64%.

#### DEPARTAMENTO DE MOLINOS

En el esquema 6.3.1, se presenta el balance de materiales en el departamento de molinos.

Tomando el proceso como un ciclo cerrado, el cual enuncia que lo que entra tiene que salir. Se representa mediante la expresión:

$$\text{Ton. caña/día} + \text{Imbibición} = \text{Bagazo} + \text{Ton. jugo/día.}$$

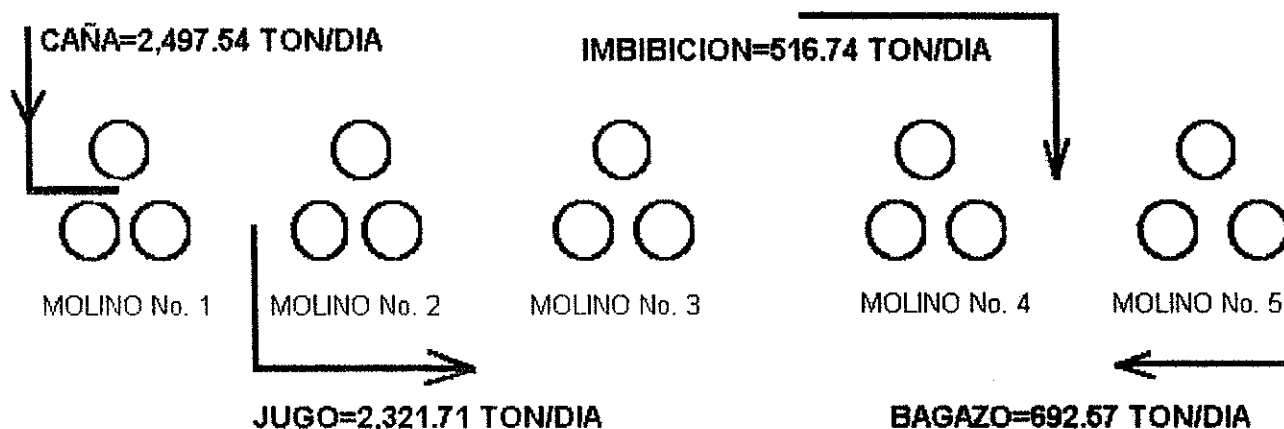


FIGURA 6.3.1

## BALANCE DE MATERIALES DEL DEPARTAMENTO DE MOLINOS

Sustituyendo:

$$\text{Imbibición} = (2,497.54) * (0.2069) = 516.74 \text{ Ton/día}$$

$$\text{Bagazo} = (2,497.54) * (0.2773) = 692.57 \text{ Ton/día} .$$

De manera que:

$$\text{TON. JUGO/DIA} = ( \text{CAÑA} + \text{IMBIBICION} - \text{BAGAZO} ) \text{ TON/DIA}$$

$$\text{TON. JUGO/DIA} = ( 2,497.54 + 516.74 - 692.57 ) \text{ Ton/día}$$

$$= 2,321.71 \text{ Ton/día.}$$

Como se necesita el dato calculado anteriormente en Libras de jugo extraída por hora, entonces:

$$2,321.71 \text{ Ton. jugo/día} * 1 \text{ día/24 horas} * 2,000 \text{ Lb/1 ton.} = 193,475.83 \text{ Lb./hora.}$$



## 6.4 CALCULO DEL VAPOR REQUERIDO POR LOS CALENTADORES DEJUGO

Se dispone de una batería de tres calentadores, dos en operación y uno en limpieza. Los tres calentadores son tipo WEBRE. El calentador primario utiliza vapor generado en el múltiple efecto, y el calentador secundario, al cual se le llama generalmente rectificador, utiliza vapor de escape. A continuación se detallan los cálculos necesarios :

### 6.4.1 CALOR ESPECIFICO DE LAS SOLUCIONES AZUCARADAS ( c )

El cálculo se realiza de acuerdo a datos de la tabla 6.1.5 c y con el auxilio de la ecuación siguiente:

$$c = 1 - 0.0056 * B \text{ , donde:}$$

B= Brix de la solución .

Para el jugo que entra al múltiple efecto; B = 17.10

$$c = 1 - 0.0056 * (17.10)$$

$$c = 0.90424 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F.}$$

Para el jugo que sale de los pre-evaporadores; B = 24.63

$$c = 1 - 0.0056 * (24.63)$$

$$c = 0.862072 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F.}$$

Para el jugo que sale del segundo efecto; B= 29.74

$$c = 1 - 0.0056 * (29.74)$$

$$c = 0.833456 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F.}$$

Para el jugo que sale del tercer efecto; B = 36.32

$$c = 1 - 0.0056 * (36.32)$$

$$c = 0.796608 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F.}$$

Para el jugo que sale del cuarto efecto; B = 45.30

$$c = 1 - 0.0056 * (45.30)$$

$$c = 0.74632 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F.}$$

Para el jugo que sale del quintuple efecto; B = 61.95

$$c = 1 - 0.0056 * (61.95)$$

$c = 0.65308 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F}$ .

#### 6.4.2 CALOR NECESARIO EN LOS CALENTADORES ( $Q_c$ )

Es la cantidad de calor utilizada para la elevación de la temperatura del jugo alcalizado hasta una temperatura cercana a la de ebullición.

De datos de la tabla 6.1.4, se ve que la elevación de la temperatura es de  $99.19^\circ\text{F}$  hasta  $217.89^\circ\text{F}$ .

El cálculo para el calor se encuentra mediante la expresión:

$$Q_c = M_j * (T_{jsal} - T_{jent}),$$

donde:

$Q_c$  = Calor a los calentadores; BTU

$M_j$  = Peso del jugo por hora ; Lb/hora

$T_{jent}$  = Temperatura del jugo crudo;  $^\circ\text{F}$

$T_{jsal}$  = Temperatura del jugo caliente;  $^\circ\text{F}$ .

De los datos obtenidos de la tabla 6.1.4, y el cálculo del jugo producido realizado en la sección 6.3, se tiene:

$$Q_c = 193,475.83 * (217.89 - 99.19)$$

$$Q_c = 22,695,581.02 \text{ BTU}.$$

#### 6.4.3 CANTIDAD DE VAPOR QUE NECESITAN LOS CALENTADORES ( $M_v$ )

El calentador primario consume vapor generado en los evaporadores, el cual circula a presiones entre 3 y 7 PSIG; el calentador rectificador utiliza vapor de escape con presiones entre 13 y 15 PSIG.

En el esquema 6.4.3.1, se muestran las diferentes variables que participan en el proceso de calentamiento del jugo crudo.

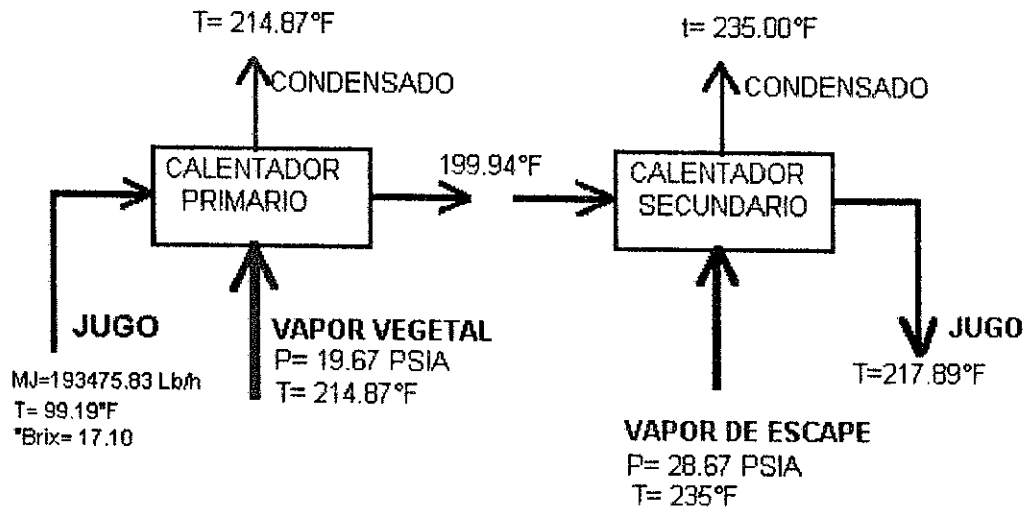


FIGURA 6.4.3.1

### VARIABLES PARTICIPANTES EN EL CALENTAMIENTO DEL JUGO

a) Primer calentador:

La cantidad de vapor requerida en el primer calentamiento, se obtiene con la ecuación :

$$Q_v = Q_j,$$

donde:

$Q_v$  = Energía producida por el vapor; BTU.

$Q_j$  = Energía ganada por el jugo; BTU.

Seguidamente se tiene:

$$Q_v = M_v * h_v$$

y

$$Q_j = M_j * C_j * AT,$$

donde:

$M_v$  = Libras de vapor requerido; Lb/hora.

$h_v$  = Entalpía de condensación del vapor a 19.67 PSIA; BTU/Lb.

$M_j$  = Libras de jugo por hora que entran en el primer calentador; Lb/hora.

$C_j$  = Calor específico del jugo; BTU/Lb°F.

AT = Diferencia de temperatura lograda por el calentamiento; °F.

Como para el cálculo se necesita la entalpía de condensación del vapor, se recurre a las tablas de vapor saturado para una presión de 19.67 PSIA e interpolando:

$$h_v = 960.73 \text{ BTU/Lb,}$$

sustituyendo:

$$M_v * 960.73 = 193,475.83 * 0.90424 * ( 199.94 - 99.19 )$$

Despejando:

$$M_v = 18,346.54 \text{ Lb/hora de Vapor.}$$

b) Segundo Calentador o Rectificador:

Para el cálculo, se utiliza el mismo procedimiento del primer calentador, auxiliándose de las tablas de vapor para determinar la entalpía de condensación del vapor a una presión de 28.67 PSIA, interpolando:

$$h_v = 947.18 \text{ BTU/Lb,}$$

sustituyendo:

$$M_v * 947.18 = 193,475.83 * 0.90424 * ( 217.89 - 199.94 ).$$

Despejando:

$$M_v = 3,315.45 \text{ Lb/hora de Vapor de Escape.}$$

c) Cantidad de calor transmitido ( Q ):

Se determina mediante la expresión:

$$Q = PC ( T - t_1 ) ( 1 - \exp(-ks/PC) ),$$

donde:

Q = Cantidad de calor transmitido al jugo, BTU

P = Peso del jugo por calentar, Lb/hora

C = Calor específico del jugo , BTU/Lb°F

T = Temperatura del vapor caliente. °F

k = coeficiente de transmisión de calor, BTU/ft<sup>2</sup>/°F/hora

s = superficie de calentamiento del calentador, ft<sup>2</sup>

t<sub>1</sub> = temperatura del jugo frío.

La información para realizar el cálculo se obtiene de la tabla 6.1.4, exceptuando los valores de k y s, lo cuales se calculan de la siguiente forma:

El valor de s se obtiene de los catálogos del fabricante; el valor es igual para cada uno de los tres calentadores, s = 2,000.00 ft<sup>2</sup>.

El valor de k se obtiene mediante la expresión:

$$k = 900 * (V)^{1/2},$$

donde:

V = velocidad del jugo en los tubos.

De la información obtenida en el ingenio, para un caudal de 450 galones/min, la velocidad es de 5.72 pies/seg.

Sustituyendo:

$$k = 900 * (5.72)^{1/2}$$

$$k = 2,152.49 \text{ BTU/ft}^2\text{/}^\circ\text{F/hora.}$$

Sustituyendo toda la información:

Para el primer calentador:

$$Q = 193,475.83 * 0.90424 * (217.87 - 99.19) * (1 - \exp(-2152.29 * 2000)) / (193475.83 * 0.90424)$$

$$Q = 20,238,052.26 \text{ BTU.}$$

Para el segundo calentador:

$$Q = 193,475.83 * 0.90424 * (235 - 199.94) * (1 - \exp(-2152.29 * 2000)) / (193475.83 * 0.90424)$$

$$Q = 6,783,262.60 \text{ BTU.}$$

## 6.5 CALCULO DEL VAPOR REQUERIDO EN EL PROCESO DE COCCION O CRISTALIZACION ( TACHOS )

Generalmente se calcula primero el vapor requerido por el múltiple efecto. Pero, como para el proceso de cocción se necesita vapor vegetal y éste es generado en el múltiple efecto; se calcula la cantidad de vapor vegetal utilizado en el departamento de tachos y ese resultado se determina la cantidad de vapor requerida en los primeros cuerpos del múltiple efecto.

El trabajo que se realiza en los tachos es tan variable que no se puede establecer un método exacto para la determinación del consumo de vapor en cada cocimiento. Esto se debe a que en algunas ocasiones se alimenta el tacho con miel de características determinadas, pero luego se hace necesario diluirla con agua o con otra miel con diferentes características de la anterior. Las cantidades no siempre son las mismas y esto hace difícil la determinación exacta del agua que se va a evaporar. Por otro lado, los tiempos de los cocimientos tampoco son los mismos.

Sin embargo, se ha comprobado que los siguientes datos empíricos son representativos como cantidades de agua a evaporar en cada una de las masas ( A, B, y C ), lo mismo para desarrollo de grano o semillamiento y son generalmente los utilizados para los cálculos de calor en tachos.

### Cantidad de agua a evaporar en templeas ( Lb/ Tonelada de caña molida/hora)

	<u>Mínimo</u>	<u>Máximo</u>
Masa "A"	167.20	250.80
Masa "B"	61.60	92.40
Masa "C"	47.30	70.95
Desarrollo de grano	14.30	21.45

Nota: la cantidad máxima se calcula utilizando 1.5 veces el valor mínimo.

Para una molienda de 2,497.54 Toneladas/día = 104.0641 Toneladas/hora, la cantidad de evaporación será:

	<u>Mínimo</u>	<u>Máximo</u>
Masa "A"	17,399.52	26,099.28
Masa "B"	6,410.35	9,615.52
Masa "C"	4,922.23	7,383.35
Desarrollo de grano	1,488.12	2,232.17

En la práctica, se ha comprobado que la cantidad de vapor vegetal que se necesita para la evaporación del agua y el cocimiento de acuerdo con el tipo de templa es de:

Masa "A"	1.15 Lb de vapor/ Lb de agua a evaporar
Masa "B"	1.20 Lb de vapor/ Lb de agua a evaporar
Masa "C"	1.25 Lb de vapor/ Lb de agua a evaporar
Desarrollo de grano	1.20 Lb de vapor/ Lb de agua a evaporar

De manera que las cantidades mínimas y máximas necesarias para el cocimiento y evaporación de las templeas es la siguiente:

	<u>Mínimo</u>	<u>Máximo</u>
Masa "A"	20,009.45	30,014.172
Masa "B"	7,692.42	11,538.63
Masa "C"	6,152.79	9,229.18
Desarrollo de grano	1,785.74	2,678.62
	+ _____	+ _____
	35,640.40	53,460.602.

Tomando el valor máximo, en el departamento de tachos para la realización del proceso de cocción, se requiere la cantidad de: 53,460.602 Lb/hora de Vapor.

## 6.6 CALCULO DEL VAPOR UTILIZADO POR EL DEAREADOR

Para realizar el cálculo se recurre al método utilizado en el conjunto de Eyectores realizado anteriormente. Este tipo de equipo también es llamado desgasificador, y utiliza vapor de escape para su operación.

Datos de tubería:

Longitud equivalente =	190.00 pies
Diámetro de tubería =	5.0 pulgadas
Presión del vapor =	15.0 PSIG
Pérdidas de presión =	1.0 Lb/pulg. <sup>2</sup> .

Acudiendo a la tabla No.1, del anexo:

Col 1 =	11.986
Col 2 =	43.719
Col 3 =	0.269
Col 4 =	0.7255.

Sustituyendo:

$$w = 11.986 * 43.719 * 0.269 * 0.7255$$

$$w = 102.27 \text{ Lb/min} * 60 \text{ min/ 1 hora, con lo cual;}$$

$$w = 6,136.20 \text{ Lb/hora de Vapor de Escape.}$$

## 6.7 CALCULO DEL VAPOR REQUERIDO EN EL MULTIPLE EFECTO O EVAPORADORES

Para determinar la cantidad de vapor requerida en el múltiple efecto, son de utilidad las tablas 6.1.5 (a), 6.1.5 (b) y 6.1.5 (c) , en las cuales aparecen las presiones tanto de la calandria como del cuerpo, temperaturas del jugo como del vapor y °Brix del jugo al salir de cada uno de los efectos. Para eso es necesario recurrir a los datos de la tabla 6.1.4.

A las presiones y temperaturas en los pre-evaporadores, se le realiza un promedio para que el cálculo sea más exacto.

$$\text{Presión en calandria} = ( 30.54 + 29.36 )/2$$

$$\text{Presión en calandria} = 29.950 \text{ PSIA.}$$

$$\text{Presión en el cuerpo} = ( 25.05 + 24.78 )/2$$

$$\text{Presión en el cuerpo} = 24.915 \text{ PSIA.}$$

$$\text{Temperatura en calandria} = ( 240.77 + 240.84 )/2$$

$$\text{Temperatura en calandria} = 240.80^\circ\text{F.}$$

$$\text{Temperatura en el cuerpo} = ( 225.98 + 225.62 )/2$$

$$\text{Temperatura en el cuerpo} = 225.80^\circ\text{F.}$$

En el esquema 6.7.1, se muestran todas las variables con sus valores que se utilizarán para el cálculo del proceso de evaporación realizado en el múltiple efecto.



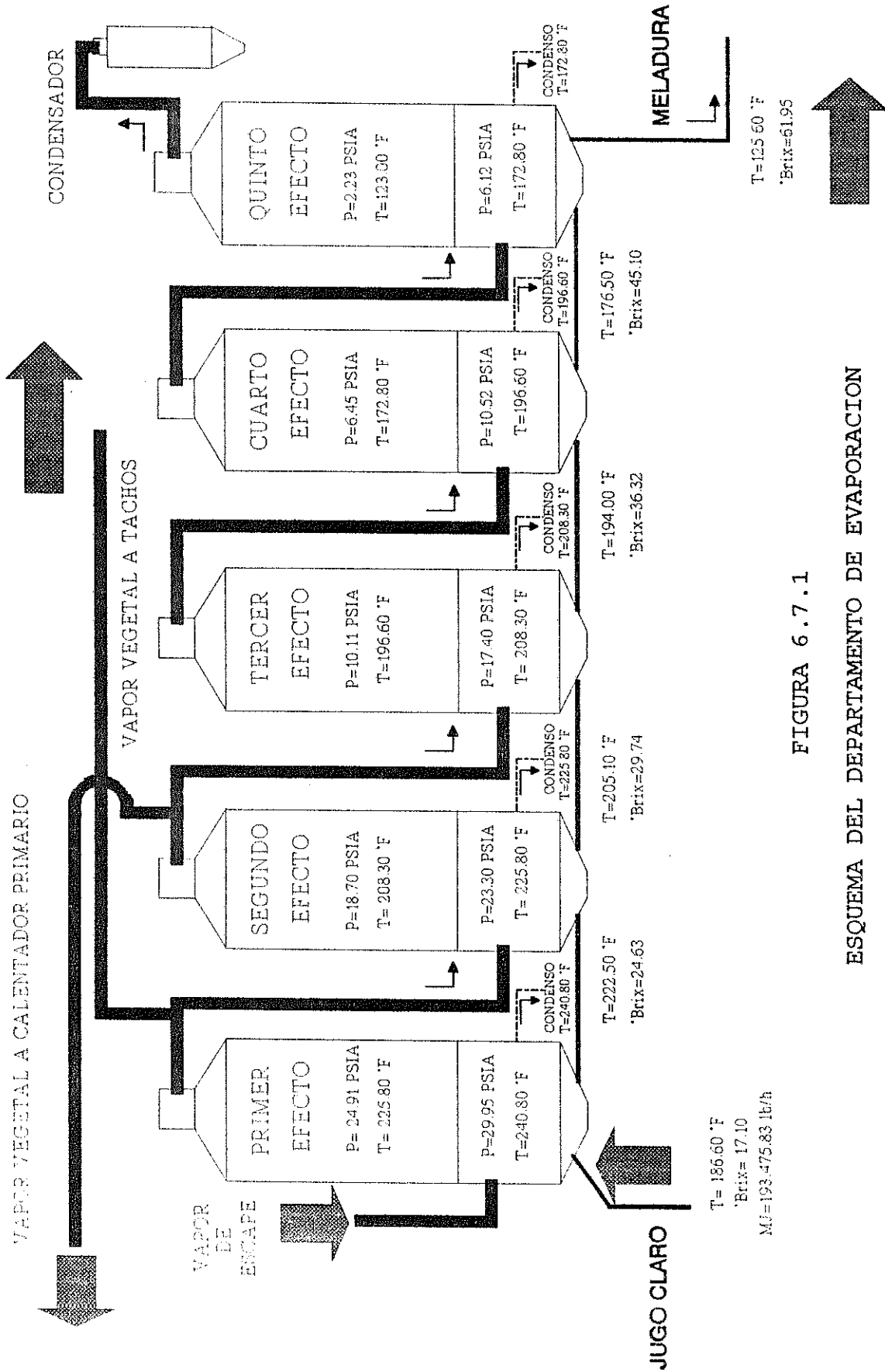


FIGURA 6.7.1

ESQUEMA DEL DEPARTAMENTO DE EVAPORACION

Partiendo de un sistema cerrado, se tiene:

$Q_{\text{entra}} = Q_{\text{sale}}$ , de manera que :

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5,$$

donde:

$Q_1$  = Energía del vapor que entra , BTU/hora

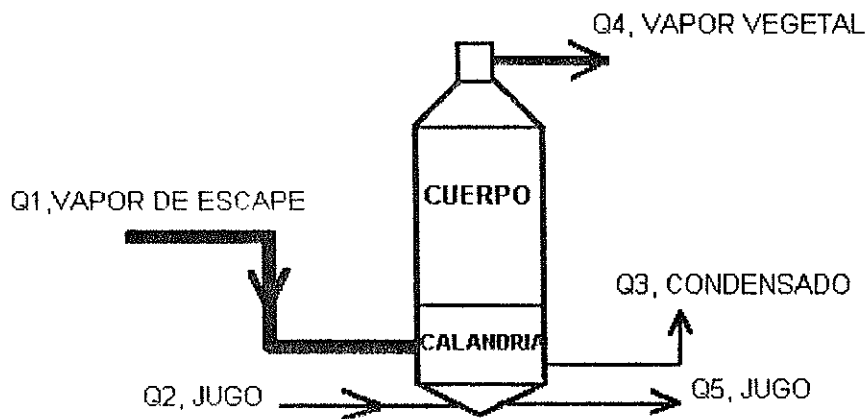
$Q_2$  = Energía del jugo que entra , BTU/hora

$Q_3$  = Energía del condensado que sale , BTU/hora

$Q_4$  = Energía de la evaporación (agua evaporada ) que sale , BTU/hora

$Q_5$  = Energía del jugo que sale , BTU/hora.

En el esquema 6.7.2, se muestra la participación de cada una de las variables anteriores en un evaporador.



**FIGURA 6.7.2**  
**BALANCE DE ENERGIA EN UN EVAPORADOR**

**PRIMER EFECTO**

$$Q_1 - Q_3 = (W) * (h_{fg}),$$

donde:

$h_{fg}$  = Entalpía del fluido-gas a la presión de la calandria,

$P = 29.95$  PSIA

$W$  = Cantidad de vapor de escape que necesita el primer efecto.

De las tablas de vapor saturado a una presión de 29.95 PSIA e interpolando:

$h_{fg} = 945.271$  BTU/Lb, por lo tanto:

$$Q_1 - Q_3 = (945.271) * (W),$$

$$Q_2 = (M_j) * (c_{17.10}) * (T_{JE}),$$

donde:

$M_j$  = Cantidad de jugo por hora, Lb/hora

$T_{JE}$  = Temperatura del jugo que entra (°F)

$$Q_2 = (193,475.83) * (0.90424) * (186.80)$$

$$Q_2 = 32,680,395.59 \text{ BTU/Lb} .$$

$$Q_4 = (x) * (h_g),$$

donde:

$x$  = Evaporación del primer vaso, en Lb.

$h_g$  = Entalpía de evaporación del primer vaso, BTU/Lb

De las tablas de vapor saturado a una temperatura de 225.80°F e interpolando, se tiene que:

$$h_g = 1,155.5465 \text{ BTU/Lb}$$

$$Q_4 = (1,115.546) * (x) .$$

$$Q_5 = (A - x) * (c_{24.63}) * (T_{JS}),$$

donde:

$T_{JS}$  = Temperatura del jugo que sale

$A - x$  = Jugo que sale del primer cuerpo

$A$  = Cantidad de jugo por hora =  $M_j$ , Lb/hora

$$Q_5 = (193,475.83 - x) * (0.862072) * (222.50)$$

$$Q_5 = (37,110,796.30) - (191.8110)(x).$$

Sustituyendo en la primera ecuación ( sistema cerrado ):

$$Q_{entra} = Q_{sale}$$

$$Q_1 - Q_3 + Q_2 = Q_4 + Q_5$$

$$(945.27)(W) + 32,680,395.59 = (1,155.546)(x) + (37,110,796.30) - (191.81)(x)$$

simplificando:

$$(945.27)(W) - (963.74)(x) = 4,430,400.71$$

dividiendo entre 945.27,

$$W - (1.019539)(x) = 4,686.915 \quad (\text{Ecuación No. 1}).$$

## SEGUNDO EFECTO

$$Q_1 - Q_3 = (h_{fg}) (x - M_c),$$

donde:

$h_{fg}$  = Entalpía del fluido-gas a una temperatura de 225.80°F

$M_c$  = Vapor vegetal requerido por los tachos , Lb/hora,

Del cálculo efectuado para el vapor necesario para los tachos tenemos:

$$M_c = 53,460.602 \text{ Lb/hora,}$$

De las tablas de vapor saturado e interpolando:

$h_{fg} = 961.43 \text{ BTU/Lb}$  , de manera que:

$$Q_1 - Q_3 = (961.43)(x - 53,460.602)$$

$$Q_1 - Q_3 = (961.43)(x) - 51,398,636.58$$

$$Q_2 = (M_j - x)(C_{24.63})(T_{JE})$$

$$Q_2 = (193,475.83 - x)(0.862072)(222.50)$$

$$Q_2 = 37,110,796.30 - (191.81)(x).$$

$$Q_4 = (Y)(h_g),$$

donde:

Y = Evaporación del segundo efecto, en Lb.

De las tablas de vapor saturado para una temperatura de 208.30°F e interpolando:

$h_g = 1,149.07$  BTU/Lb, sustituyendo:

$$Q_4 = (1,149.07) (Y).$$

$$Q_5 = (A - x - Y) (c_{29.74}) (T_{js})$$

$$Q_5 = (193,475.83 - x - Y) (0.833456)(205.00)$$

$$Q_5 = 33,056,986.24 - (170.86)(x) - (170.86)(Y)$$

entonces:

$$Q_{entra} = Q_{sale}$$

$$Q_1 - Q_3 + Q_2 = Q_4 + Q_5$$

$$(961.43)(x) - 51,398,626.58 + 37,110,796.30 - (191.81)(x) = (1,149.07)(Y) + 33,056,986.24 - (170.86)(x) - (170.86)(Y)$$

simplificando:

$$(940.48)(x) - (978.21)(Y) = 47,448,816.52$$

dividiendo entre 940.48 , se obtiene:

$$(x) - (1.0401178) (Y) = 50,341.12 \quad (\text{Ecuación No. 2}).$$

### TERCER EFECTO

$$Q_1 - Q_3 = (h_{fg})(Y - M_v),$$

donde:

$M_v$  = vapor vegetal requerido por el primer calentador, Lb/hora.

De cálculo anterior efectuado para el vapor necesario para el calentador primario, se tiene:

$M_v = 18,346.58$  Lb/hora de vapor vegetal.

De las tablas de vapor saturado a una temperatura de 208.30°F e interpolando:

$h_{fg} = 972.67$  BTU/Lb, entonces:

$$Q_1 - Q_3 = (972.67)(Y - 18,346.54)$$

$$Q_1 - Q_3 = (972.67)(Y) - 17,845,129.06.$$

$$Q_2 = (A - x - Y)(c_{29.74})(T_{JE})$$

$$Q_2 = (193,475.73 - x - Y)(0.833456)(205.00)$$

$$Q_2 = 33,056,986.24 - (170.86)(x) - (170.86)(Y).$$

$$Q_4 = (Z)(h_g),$$

donde:

Z = Evaporación del tercer efecto, en Lb .

De la tablas de vapor saturado a una temperatura de 196.60°F e interpolando:

$h_g = 1,114.67$  BTU/Lb , sustituyendo tenemos:

$$Q_4 = (1,114.67)(Z).$$

$$Q_5 = (A - x - Y - Z)(c_{36.32})(T_{JS})$$

$$Q_5 = (193,475.83 - x - Y - Z)(0.796608)(194.00)$$

$$Q_5 = 29,900,132.43 - (154.54)(x) - (154.54)(Y) - (154.54)(Z),$$

entonces:

$$Q_{entra} = Q_{sale}$$

$$Q_1 - Q_3 + Q_2 = Q_4 + Q_5$$

$$(972.67)(Y) - 17,845,129.06 + 33,056,986.24 - (170.86)(x) - (170.86)(Y) = (1,114.67)(Z) + 29,900,132.43 - (154.54)(x) - (154.54)(Y) - (154.54)(Z)$$

simplificando:

$$(956.35)(Y) - (16.32)(x) - (990.13)(Z) = 14,688,275.25$$

dividiendo entre 16.32:

$$(58.60)(Y) - (x) - (60.67)(Z) = 900,016.8658 \quad (\text{Ecuación No. 3}).$$

#### CUARTO EFECTO

$$Q_1 + Q_3 = (h_g)(Z)$$

De las tablas de vapor saturado a una temperatura de 196.60°F e interpolando:

$h_{fg} = 980.01 \text{ BTU/Lb}$  , entonces:

$$Q_1 - Q_3 = (980.01)(Z).$$

$$Q_2 = (A - x - Y - Z)(c_{36.32})(T_{JE})$$

$$Q_2 = (193,475.83 - x - Y - Z)(0.796608)(194.00)$$

$$Q_2 = 29,900,132.43 - (154.54)(x) - (154.54)(Y) - (154.54)(Z) .$$

$$Q_4 = (U)(h_g),$$

donde:

U = Evaporación del cuarto efecto, en Lb.

De las tablas de vapor saturado para una temperatura de  $172.80^\circ\text{F}$  e interpolando :

$h_g = 1,135.32 \text{ BTU/Lb}$  , entonces:

$$Q_4 = 1,135.32)(U).$$

$$Q_5 = (A - x - Y - Z - U)(c_{45.30})(T_{JS})$$

$$Q_5 = (193,475.83 - x - Y - Z - U)(0.74632)(176.50)$$

$$Q_5 = 25,485,696.58 - (131.725)(x) - (131.725)(Y) - (131.725)(Z) - (131.725)(U)$$

De manera que:

$$Q_{entra} = Q_{sale}$$

$$Q_1 - Q_3 + Q_2 = Q_4 + Q_5 , \text{ sustituyendo:}$$

$$(980.01)(Z) + 29,900,132.43 - (154.54)(x) - (154.54)(Y) - (154.54)(Z) = \\ (1,135.32)(U) + 25,485,696.58 - (131.725)(x) - (131.725)(Y) - (131.725)(Z) - \\ (131.725)(U).$$

simplificando:

$$(957.195)(Z) - (22.815)(x) - (22.815)(Y) - (1003.60)(U) = -4,414,435.84.$$

dividiendo entre 22.815:

$$(41.95)(Z) - x - Y - (43.99)(U) = -193,488.31 \quad (\text{Ecuación No. 4}).$$

#### QUINTO EFECTO

$$Q_1 - Q_3 = (h_{fg})(U)$$

De las tablas de vapor saturado a una temperatura de 172.80°F e interpolando :

$h_{fg} = 994.52$  BTU/Lb , entonces:

$$Q_1 - Q_3 = (994.52)(U).$$

$$Q_2 = (A - x - Y - Z - U)(c_{45.30})(T_{JE})$$

$$Q_2 = (193,475.83 - x - Y - Z - U)(0.74632)(176.50)$$

$$Q_2 = 25,485,696.58 - (131.725)(x) - (131.725)(Y) - (131.725)(Z) - (131.725)(U).$$

$$Q_4 = (V)(h_g),$$

donde:

V = Evaporación del quinto efecto, Lb.

De las tablas de vapor saturado a una temperatura de 123°F e interpolando :

$h_g = 1,114.86$  BTU/Lb , entonces:

$$Q_4 = (1,114.86)(V).$$

$$Q_5 = (A - x - Y - Z - U - V)(c_{61.95})(T_{JS})$$

$$Q_5 = (193,475.83 - x - Y - Z - U - V)(0.65308)(125.60)$$

$$Q_5 = 15,870,212.50 - (82.027)(x) - (82.027)(Y) - (82.027)(Z) - (82.027)(U) - (82.027)(V)$$

Entonces:

$$Q_{entra} = Q_{sale}$$

$$Q_1 - Q_3 + Q_2 = Q_4 + Q_5$$

$$\begin{aligned} & (994.52)(U) + 25,485,696.58 - (131.725)(x) - (131.725)(Y) - (131.725)(Z) - (131.25)(U) \\ & = (1,114.86)(V) + 15,870,212.50 - (82.027)(x) - (82.027)(Y) - (82.027)(Z) - (82.027)(U) \\ & - (82.027)(V) \end{aligned}$$

simplificando:

$$(944.822)(U) - (49.698)(x) - (49.698)(Y) - (49.698)(Z) - (1,032.833)(V) = -9,615,484.08$$

dividiendo entre 49.698:

$$(19.01)(U) - x - Y - Z - (20.78)(V) = -193,478.29 \quad (\text{Ecuación No. 5}).$$

Si la masa no se destruye:



$$x + Y + Z + U + V = (B) * (A) ,$$

donde:

B = Razón de evaporación.

De la sección 6.4 tenemos que B= 72.40%

Sustituyendo los datos en la ecuación:

$$x + Y + Z + U + V = (193,475.83) * (0.7240)$$

$$x + Y + Z + U + V = 140,076.501 \quad (\text{Ecuación No. 6}).$$

Planteando en un sistema las seis ecuaciones anteriores:

$$W - (1.019539)(x) + 0 + 0 + 0 + 0 = 4,686.915$$

$$0 + x - (1.0401178)(Y) + 0 + 0 + 0 = 50,341.12$$

$$0 - x + (58.60)(Y) - (60.67)(Z) + 0 + 0 = 900,016.8658$$

$$0 - x - Y + (41.95)(Z) - (43.99)(U) + 0 = -193,488.31$$

$$0 - x - Y - Z + (19.01)(U) - (20.78)(V) = -193,478.29$$

$$0 + x + Y + Z + U + V = 140,076.501$$

Resolviendo el sistema tenemos:

$$W = 84,392.40 \text{ Lb/hora de Vapor de Escape,}$$

$$x = 78,178.00 \text{ Lb/hora de Vapor Vegetal, ( Evaporación del Primer Efecto )}$$

$$Y = 26,763.20 \text{ Lb/hora de Vapor Vegetal, ( Evaporación del Segundo Efecto )}$$

$$Z = 9,726.87 \text{ Lb/hora de Vapor Vegetal, ( Evaporación del Tercer Efecto )}$$

$$U = 11,288.70 \text{ Lb/hora de Vapor Vegetal, ( Evaporación del Cuarto Efecto )}$$

$$V = 14,119.70 \text{ Lb/hora de Vapor Vegetal, ( Evaporación del Quinto Efecto ).}$$

En la figura 6.7.3, se muestra el balance de masa del proceso de evaporación:

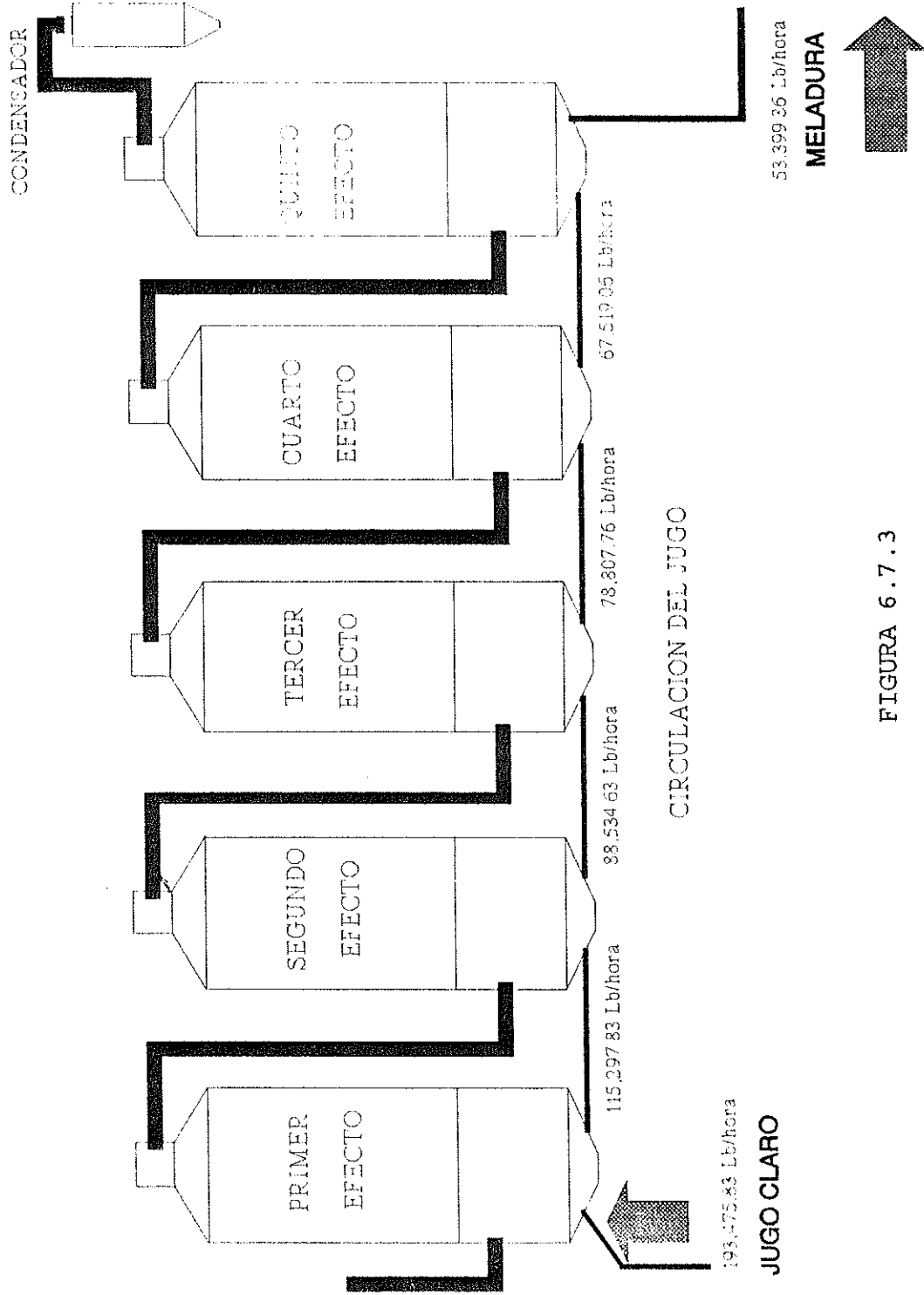


FIGURA 6.7.3

BALANCE DE MASA EN EVAPORADORES

## 6.8 CALCULOS CONCERNIENTES A LA CALDERA ALPHA # 1

Los cálculos se realizan con la ayuda de las tablas 6.1.1, 6.1.2 (a) y 6.1.2 (b), tomando como referencia los datos promedios.

El generador de vapor fue diseñado por el fabricante para una producción máxima de 120,000 lb/hora de vapor, fue analizado en los muestreos para esa capacidad, pero cuando se realice el traslado e instale en el ingenio, se le harán modificaciones para mejorar su eficiencia y producción de vapor con lo cual tendrá una capacidad de producción de 140,000 lb/hora de vapor.

De la tabla 6.1.2 (b), obtenemos la presión y temperatura de operación que se utilizan en los cálculos del generador de vapor.

### 6.8.1 PRODUCCION DE VAPOR ( Q )

Los fabricantes de calderas generalmente dan la capacidad de producción de los generadores de vapor en Lb/hora (según el sistema utilizado); es más recomendable darlo en BTU/hora, debido a que la generación se da a distintas presiones y temperaturas.

Para la realización del cálculo, se necesitan los datos siguientes: temperatura del agua de alimentación para determinar la entalpía del fluido ( $h_f$ ), la presión y la temperatura del vapor producido para encontrar la entalpía total del vapor ( $h$ ), la cantidad de vapor generado, el cual se determina por un medidor de flujo de vapor ( $m_s$ ), pero en el proyecto se realiza de acuerdo con el análisis de gases de escape y características del bagazo (humedad y porcentaje de fibra).

La ecuación para realizar el cálculo es la siguiente:

$$Q = m_s \cdot (h - h_f)$$

donde:

- Q = Producción de la caldera; BTU/hora
- $m_s$  = Peso del vapor producido o generado; Lb/hora
- h = Entalpía del vapor producido; BTU/Lb
- $h_f$  = Entalpía del agua de alimentación; BTU/Lb.

El valor de  $m_s$  se lee directamente en el controlador de vapor, existiendo otra forma para determinarlo siendo ésta: con los datos proporcionados por las tablas 6.1.1, 6.1.2 (a) y 6.1.2 (b), y con el auxilio de una serie de ecuaciones tomadas del manual de azúcar de Hugot y de cálculos realizados en la sección 6.3. Como se realizaron varios análisis de gases de combustión en diferentes fechas, se efectúa el cálculo de producción de vapor sólo para el primero, ya que el procedimiento es el mismo para las restantes. La producción de cada uno de las fechas mencionadas se muestra en la tabla 6.1.6.

Datos necesarios en el cálculo:

Fecha = 29/11/94

Molienda = 2,497.54 Ton/día

Bagazo Total = 692.57 Ton/día

Bagazo Quemado = 657.9415 Ton/día

Bagazo Ahorrado = 5% = 34.6285 Ton/día

Humedad de bagazo = 50.26%

Temperatura del agua de alimentación = 201.20°F

Presión de operación en caldera = 234.70 PSIA

Temperatura del vapor sobrecalentado = 574°F

Exceso de aire = 127%

Temperatura de gases a la entrada de chimenea = 516°F

Coefficientes característicos del rendimiento de la producción de vapor (tomados de la página 633 de Hugot):

$\mu$  = Coeficiente que incluye las pérdidas en sólidos no quemados ----- 0.99  
 $\beta$  = Coeficiente que incluye las pérdidas debidas a la radiación ----- 0.95  
 $\&$  = Coeficiente que incluye las pérdidas debidas a la combustión  
 incompleta----- 0.95

Con la utilización de la ecuación siguiente (ecuación 570, página 623 de Hugot), se determina el valor calorífico neto del bagazo humedo:

$$V.C.N. = 7,650 - (8,730) \cdot (w) \quad , \quad \text{BTU/Lb.}$$

donde:

w = humedad del bagazo

sustituyendo tenemos:

$$V.C.N. = 7,650 - (8,730) \cdot (0.5026)$$

$$V.C.N. = 3,262.302 \text{ BTU/Lb.}$$

La pérdida de calor sensible en los gases de combustión se determina con la ecuación que se muestra a continuación ( ecuación 594, página 632 de Hugot):

$$q = ( t - 32 ) \cdot ( 1 - w ) \cdot [ 1.4 \cdot m + ((0.5)/(1.w)) - 0.12 ]$$

donde:

q = pérdidas en calor sensible BTU/Lb. de bagazo

t = temperatura de los gases finales (°F)

w = humedad del bagazo en %

$m$  = exceso de aire empleado en la combustión ( Tabla No. 3 del anexo).

sustituyendo:

$$q = (516 - 32) * (1.05026) * [(1.4) * (2.27) + ((0.5)/(1-0.5026)) - 0.12]$$

$$q = 978.19 \text{ BTU/Lb.}$$

La cantidad de vapor recuperado en el vapor se determina con la ecuación (ecuación 595, página 633 de Hugot) :

$$M_v = (7650 - (8730)(w) - q) * \mu * \beta * \&$$

donde:

$M_v$  = calor transmitido al vapor por Lb. de bagazo quemado, BTU.

sustituyendo:

$$M_v = (3262.302 - 978.19) * 0.99 * 0.956 * 0.95$$

$$M_v = 2,040.80 \text{ BTU/Lb.}$$

La vaporización de una Lb. de vapor a 234.70 PSIA con una temperatura de sobrecalentamiento de 574°F se encuentra así:

$$H = h_v - h_a$$

donde:

$H$  = BTU necesarios para evaporar 1 Lb. de agua a las condiciones existentes

$h_v$  = entalpía del vapor de acuerdo a las condiciones imperantes

$h_a$  = entalpía del agua de alimentación.

sustituyendo valores tenemos :

$$h_v = 1,305.82 \text{ BTU/Lb} \quad (\text{de tablas de vapor sobrecalentado e interpolando})$$

$$h_a = 169.30 \text{ BTU/Lb} \quad (\text{de tablas de vapor saturado e interpolando})$$

$$H = 1,305.82 - 169.30$$

$$H = 1,136.52 \text{ BTU/Lb.}$$

De manera que en la caldera ALPHA # 1 por cada Lb de bagazo quemado se generaron:

$$M_v / H = (2040.80)/(1136.52)$$

$$= 1.795656918 \text{ Lb de Vapor / Lb de Bagazo.}$$

Entonces , como se sabe aproximadamente la cantidad de bagazo que se quema por hora podemos determinar la cantidad de vapor que se genera en la caldera:

$$1.795656918 \text{ Lb de vapor/Lb Bagazo} * (657.9415 \text{ Ton/dia}) * 2000 \text{ Lb/1 Ton} *$$

$$1 \text{ día/ 24 horas} = 98,453.355 \text{ Lb de Vapor /hora.}$$

De la tabla 6.1.6, se obtiene el promedio de  $m_s = 107,737.55$  Lb. de Vapor/hora que es el valor del flujo de vapor que estuvo generando la caldera en la zafra 94-95, para el balance se utiliza un flujo de  $m_s = 120,000$  Lb/hora, ya que a la caldera se le harán implementaciones para un capacidad máxima de 140,000 a 150,000 Lb/hora de vapor; de las tablas 6.1.2 a y 6.1.2 b se toman los valores promedios de la presión del vapor y de la temperatura de sobrecalentamiento, así como la temperatura del agua de alimentación de la caldera:

$$\text{Temperatura del vapor sobrecalentado} = 579^\circ\text{F}$$

$$\text{Presión del vapor} = 247.70 \text{ PSIA}$$

$$\text{Temperatura del agua de alimentación} = 201.20^\circ\text{F.}$$

De las tablas de vapor sobrecalentado a una presión de 247.70 PSIA y una temperatura de 579 °F e interpolando:

$$h = 1,307.52 \text{ BTU/Lb.}$$

De las tablas de vapor saturado, con una temperatura del agua de alimentación de 201.20°F e interpolando:

$$h_f = 169.30 \text{ BTU/Lb.}$$

Sustituyendo los valores en la fórmula de producción:

$$Q = 120,000 * (1307.52 - 169.30)$$

$$Q = 136,586,400.00 \text{ BTU/hora.}$$

### 6.8.2 FACTOR DE VAPORIZACION ( F.V. )

Resulta ser la relación entre el calor absorbido por una libra de agua de alimentación y el absorbido por una libra de agua a 212°F y a una atmósfera de presión (14.70 PSIA).

Se calcula mediante la expresión:

$$F.V. = (h - h_f) / h_{fg}$$

donde:

$h_{fg}$  = Entalpía del fluido-gas a una temperatura de 212°F y una atmósfera de presión.

De las tablas de vapor saturado  $h_{fg} = 970.30$  BTU/Lb.

Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$F.V. = (1,307.52 - 169.30) / (970.30)$$

$$F.V. = 1.1730$$

### 6.8.3 VAPORIZACION EQUIVALENTE ( V.E. )

Se determina mediante el producto del factor de vaporización y el peso del vapor generado.

La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$V.E. = ( F.V. ) * (m_s),$$

Sustituyendo:

$$V.E. = (1.1730) * (120,000)$$

$$V.E. = 140,760.00 \text{ Lb/hora}$$

### 6.8.4 RENDIMIENTO ( $e_b$ )

Es la relación entre la energía que produce la caldera contra la energía que proporciona el combustible.

La expresión que se va a utilizar es:

$$e_b = [( m_s * (h - h_f) ) / ( m_f * F )] * 100 , ( \% ) .$$

donde:

$m_f$  = peso del combustible quemado, Lb/hora

F = poder calorífico del bagazo

Tomando un consumo aproximado de combustible y que la dosificación será automática:

$$m_f = 54,828.2875 \text{ Lb/hora}$$

$$F = V.C.N = 3,262.302 \text{ BTU/Lb.}$$

Sustituyendo:

$$e_b = ((120,000 * (1,307.52 - 169.30)) / (3,262.302 * 54,828.2875)) * 100$$

$$e_b = 76.36\%$$

## 6.9 BALANCE DE ENERGIA TOMANDO EN CUENTA LA ENERGIA GENERADA

El balance se hace de acuerdo al tipo y característica del vapor que es utilizado por cada uno de los diferentes equipos analizados.

### 6.9.1 VAPOR DIRECTO O DE ALTA PRESION

Las turbinas que no se toman en cuenta en el balance como en el caso de las que operan las picadoras de caña No. 1 y No. 2 (operando con motores eléctricos) y los turbos de 800 kW, están disponibles para entrar en operación cuando lo requiera el ingenio.

a) Conjunto de turbinas:

Turbina molino No. 1-----	12,068.00
Turbina molino No. 2-----	11,410.00
Turbina molino No. 3-----	8,527.50
Turbina molino No. 4-----	9,600.00
Turbina molino No. 5-----	9,600.00
Turbina de agua de alimentación de calderas-----	6,480.00
	+
Total ( 100% de operación )-----	57,685.50 Lb/hora.
Operando a las turbinas al 95 %, tenemos que consumen-----	
	54,801.225 Lb/hora
Turbogenerador de 1500 kw -----	42,210.00 Lb/hora
	+
Consumo total real -----	<b>97,011.225 Lb/hora.</b>

El vapor al salir de las turbinas se expande, y es corrientemente llamado como vapor de escape. Se recupera casi en su totalidad, pero existen algunas pérdidas tales como:

Pérdidas en turbogenerador-----	5%
Fugas en tuberías -----	3%
	+
Total -----	8%

De manera la cantidad de vapor de escape es de:

$$(97,011.22) * (0.92) = 89,250.327 \text{ Lb/hora.}$$



Vapor perdido -----	7,760.898 Lb/hora.
b) Secadora de azúcar ( operando al 90%)-----	2,387.98 Lb/hora.
c) Conjunto de Jet de vacío y accesorios varios operando al 50% (torres de azufre, soplado de polvillo) -----	5,614.20 Lb/hora
d) Lavado de equipos y pérdidas( 50%)-----	9,729.985 Lb/hora.
	+
<b>Total de vapor directo-----</b>	<b>114,743.39 Lb/hora.</b>

### 6.9.2 VAPOR DE ESCAPE

Entre los equipos analizados que utilizan vapor de escape para operación, se tienen:

Calentador Secundario o rectificador-----	3,315.45 Lb/hora
Primer Efecto en Evaporación-----	84,392.40 Lb/hora
Deareador ( 75% de operación ) -----	4,602.15 Lb/hora
	+
<b>Total de vapor de escape-----</b>	<b>92,310.00 Lb/hora.</b>

Con lo cual para el funcionamiento del ingenio, se necesitan 92,310.00 Lb/hora de vapor de escape.

Como se dispone de 89,250.327 Lb/hora de vapor de escape se necesita expandir vapor directo a Escape por medio de una válvula automática.

Entonces se tiene que:

$$92,310.00 \text{ Lb/Hora} - 89,250.327 \text{ Lb/hora} = 3,059.673 \text{ Lb/hora de vapor Directo.}$$

Es necesario entonces la inyección de 3,059.673 Lb/hora de vapor directo a la línea de vapor de escape para que los equipos que funcionan con ese vapor operen eficientemente. Existe otra válvula automática para la inyección de vapor de escape a la línea de vapor vegetal, pero en este caso no es necesaria.

En total, el ingenio necesita para su operación de acuerdo con la cantidad de caña molida descrita anteriormente:

**117,803.063 Lb/hora de Vapor Directo.**

En la figura 6.9, en cuyo esquema se muestra el balance de vapor de los equipos del Ingenio Los Tarros :

**NOMENCLATURA DEL DIAGRAMA DEL BALANCE ENERGETICO**

M1 = Molino # 1

M2 = Molino # 2

M3 = Molino # 3

M4 = Molino # 4

M5 = Molino # 5

B.C = Bomba de Calderas

P1 = Picadora # 1

P2 = Picadora # 2

TG1 = Turbonerador # 1

TG2 = Turbogenerador # 2

TG3 = Turbogenerador # 3

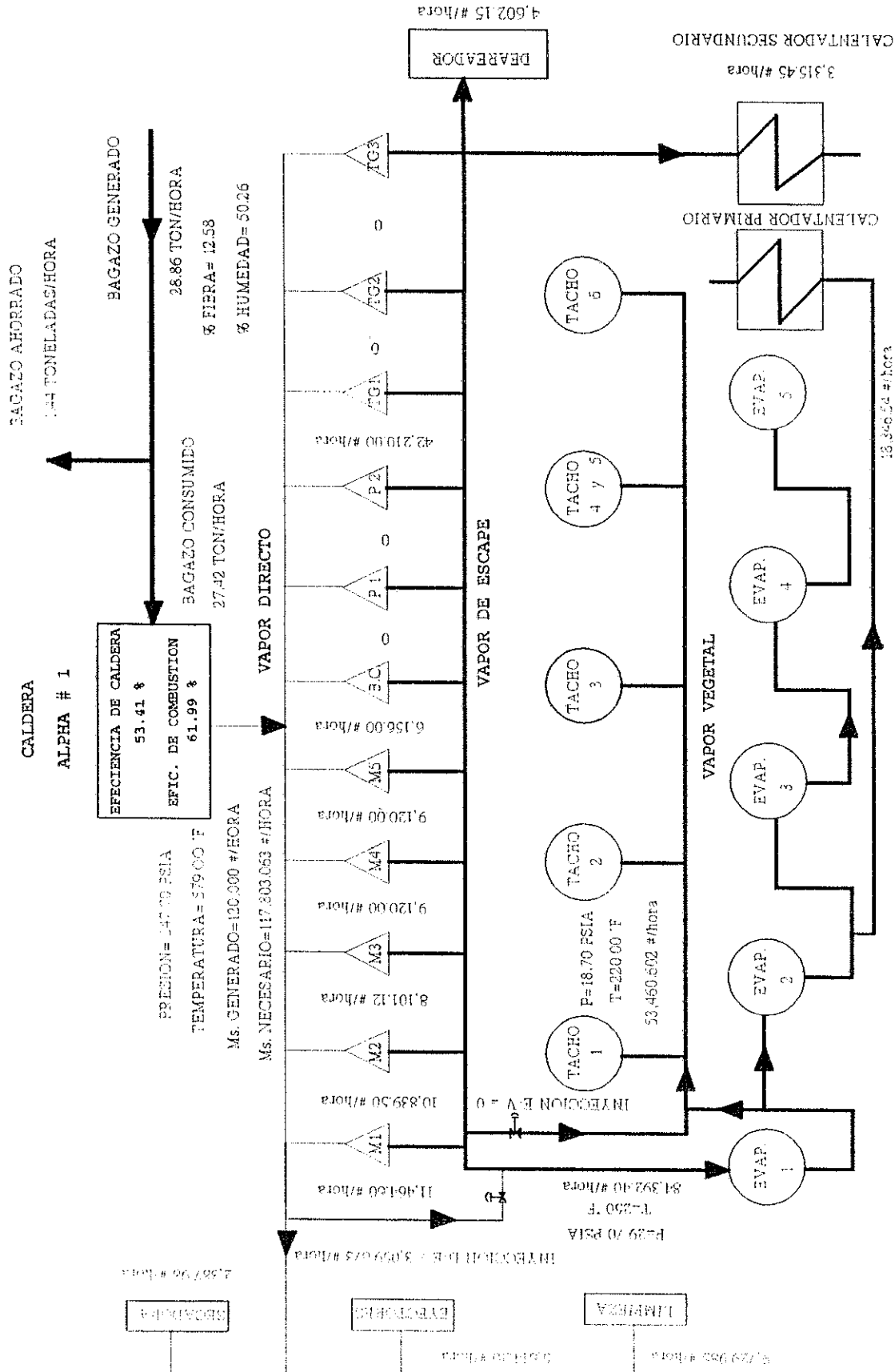


FIGURA 6.9

BALANCE DE VAPOR DEL INGENIO LOS TARRS

## 6.10 BALANCE TERMICO Y PERDIDAS DE ENERGIA

### Datos de molienda:

Caña molida = 2,497.54 Ton/día  
 Bagazo total = 692.57 Ton/día  
 Bagazo quemado = 657.94 Ton/día  
 Humedad del bagazo = 50.26%  
 V.C.N = 3,262.302 BTU/Lb  
 Bagazo ahorrado = 34.63 Ton/día ( 5%)

Energía del bagazo (consumida) =  $657.94 \text{ Ton/día} * 1 \text{ día/24 horas} * 2000 \text{ Lb/1 Ton} * 3,262.302 \text{ BTU/Lb}$ .

Energía del bagazo (consumida) = 178.866 MBTU/hora.

### Datos de la caldera alpha # 1:

Flujo de vapor: 120,000.00 Lb/hora.  
 Area = 3,500 pies<sup>2</sup>.  
 Temperatura de pared = 158°F  
 Presión = 247.70 PSIA , Temperatura del Vapores = 579°F  
 Temperatura ambiente = 100°F, Temperatura de gases = 456°F  
 Eficiencia de Combustión = 61.99%

Primero se calculan los tipos de energía de acuerdo a los datos anteriores:

### Energía disponible

Es la energía que da origen la cantidad total de bagazo que se genera en un día.

$692.57 \text{ Ton/día} * 1 \text{ día/24 horas} * 2,000 \text{ Lb/1 Ton} * 3,262.302 \text{ BTU/ 1 Lb} =$   
 188.28 MBTU/Lb.

### Energía consumida

Este tipo de energía ya fue dado en los datos de molienda y tiene el valor de:

178.866 MBTU/Lb.

### Energía generada

Para este cálculo, se necesita la entalpía del vapor a la presión y temperatura de operación y es  $h = 1,307.52 \text{ BTU/Lb}$  y conociendo el flujo generado, se tiene que:

$1,307.52 \text{ BTU/Lb} * 120,000 \text{ Lb/hora} = 156.9024 \text{ MBTU/hora}$ .

### Pérdidas por condensación

Se determinan mediante la ecuación:

$$PC = 100 \cdot (562 - 4.82) \cdot (\% \text{ Hum. Bagazo}) / (V.C.N)$$

Sustituyendo:

$$PC = 100 \cdot (562 - 4.82) \cdot (0.5026) / (3,262.302)$$

$$PC = 8.58\%$$

### Pérdidas por convección y radiación

Este tipo de pérdida se encuentra con la expresión :

$$PCR = \{0.94 (0.174) [ ((T_{pared} + 460)/100)^4 - ((T_{amb} + 460)/100)^4 ] + 0.296 (T_{pared} - T_{amb})^{1.25} \} \cdot (AREA) (hrs)$$

Sustituyendo:

$$PCR = \{0.94 (0.174) [ ((158+460)/100)^4 - ((100 + 460)/100)^4 ] + 0.296 (158-100)^{1.25} \} \cdot (3,500)(24) = 9.8348 \text{ MBTU.}$$

$$PCR = (9.8348) / (178.866 \cdot 24)$$

$$PCR = 0.00229.$$

Ya teniendo las pérdidas y la eficiencia de combustión, se puede determinar la eficiencia de la caldera:

$$\text{Eficiencia de la caldera} = \text{eficiencia de combustion} - (PC + PCR)$$

Sustituyendo:

$$\text{Eficiencia de la caldera ALPHA \#1} = 61.99 - (8.58 + 0.00229)$$

$$\text{Eficiencia de la caldera ALPHA \# 1} = 53.41\%.$$

## CONCLUSIONES

1. La alta demanda de vapor de escape que necesita el Departamento de Fabricación se soluciona operando el turbogenerador a un valor alto de su potencia nominal, y aumentar la cantidad de caña procesada en el Departamento de Molinos, para evitar las inyecciones de vapor directo a escape.
2. El generador de vapor para producir el flujo demandado por la fábrica con un valor constante de presión, necesita de una operación máxima con una pérdida de tiempo mínima, y que las características de fibra y humedad del bagazo combustible se encuentren entre los valores de 12 a 13% y 48 a 50%.
3. El Ingenio Los Tarros necesita un flujo de vapor de alta presión de 117,803.063 Lb/hora para el funcionamiento normal y eficiente de los equipos, que intervienen en el proceso de elaboración de azúcar de caña.
4. Con la instalación del quinto molino en el tándem actual, el ingenio tiene la capacidad de aumentar la cantidad de caña procesada por día, y por la tanto mayor producción de azúcar.
5. El Departamento de Tachos, para realizar el proceso de cocción, necesita un flujo de vapor de baja presión de 53,460.602 Lb/hora generado en el primer efecto del proceso de evaporación, sin necesidad de realizar una inyección de vapor de escape a vegetal.



## RECOMENDACIONES

1. Es conveniente la instalación del generador de vapor con capacidad para 140,000 Lb/hora de vapor, debido al bajo y oscilante flujo de las calderas actuales, que son de baja capacidad y operadas manualmente.
2. Se debe automatizar los equipos principales y auxiliares del generador de vapor, con el objeto de realizar una producción eficiente de energía.
3. Hay que realizar una fase de secado del bagazo, previo a utilizarlo como combustible del generador de vapor con el objeto de aumentar su poder calorífico.
4. Es necesario revisar y corregir la falta de aislante en las tuberías que conducen vapor, para reducir la pérdidas de energía.
5. Se debe instalar un turbogenerador de mayor capacidad que el actual, con el objeto de electrificar un alto porcentaje del ingenio, que aproveche el excedente de energía del generador de vapor.
6. Se recomienda instalar instrumentos de medición con el objeto de controlar en forma más eficiente cada una de las fases del proceso de fabricación del azúcar de caña.





13. RIVAS AUERBACH, RENE OCTAVIO. Demanda y Distribución de Vapor en El Ingenio El Angel. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas). El Salvador: s.p.i 1,979. p.p. 111-114.
14. SEVERNS W. H. Energía Mediante Vapor Aire o Gas. México: Editorial Reverté. 1,982. p.p. 126-200, 208-288, 307-319.
15. WELTY, James R. Transferencia de Calor Aplicado a la Ingeniería. México: Editorial Limusa, 1,981. p.p. 1-14, 395-399.
16. WESTINGHOSE ELECTRICAL CORPORATION. Instructivo de Operación del Turbogenerador de 1500 KW. Puerto Rico: s.p.i. 1947.

## REFERENCIAS

1. ATAGUA. Memoria del Segundo Congreso Centroamericano de Técnicos Azucareros. Guatemala:s.p.i. 1,975. p.p. 359-362.
2. CIFUENTES VILLATORO, Carlos René. Intercambiadores de Calor Usados en Ingenios Azucareros: Calentadores de Jugo. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala: 1,980. p.p. 7-26.
3. EFICIENCIA DE CALDERAS, PRINCIPIOS FUNDAMENTALES. Folleto. p.p 8-12 .
4. FIRES VIRGIL, Moring. Termodinámica. México: Editorial U.T.E.H.A. 1,973. p.p. 18, 44, 76-78, 148, 350-365.
5. FOXBORO S. A. Actualización sobre Generadores de Vapor y sus Sistemas de Control. México: s.p.i. 1,993. p.p.290-295.
6. GASTEAZORO E, José Francisco. Estudio de Alternativas para Satisfacer la Ampliación de la Demanda de Energía Eléctrica en un Ingenio Azucarero. ( tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala: 1,975. p.p. 11-26, 53-56.
7. GRANET, Irving. Termodinámica. México: Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 1,985. p.p. 188-234, 245-452, 389-453.
8. HUGOT, E. Manual para Ingenieros Azucareros. México: Compañía Editorial Continental, S.A. 1,964. p.p. 21-22, 265-555, 601-685, 718.
9. ICAITI. Recuperación Máxima de Energía en la Industria. Guatemala: s.p.i , 1,983. p.p 40-66, 72-92, 105-122.
10. PROYECTOS DE INSTALACION DE EQUIPOS DE HOSPITALES OPERACION Y MANTENIMIENTO. (manual: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala: s.p.i 1968. p.p. 233-236.
11. MONTEJO RIVAS, Walter francisco. Mejoramiento en la Producción de Vapor en un Ingenio Azucarero. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala: 1,979. p.p. 17-47.
12. RAND, DRESSER. Manual de Operación y Mantenimiento de Turbinas. Ingenio Los Tarros. Guatemala: 1,990.

## BIBLIOGRAFIA

1. IBAÑES GARCIA, Jorge Arturo. Enfoque de un Análisis Termodinámico Sobre un Ciclo Cerrado Utilizado en la Industria Azucarera. (tesis: Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala: 1,994. p.p. 177-222.
2. MEADE, George. Manual de Azúcar de Caña. España: Editorial Montaner y Simón S.A. 1,967. p.p. 43-49, 77-90.
3. MELGAR SAMAYOA, Ennio Hugo. Eficiencia de Calderas Acuatubulares del Ingenio La Unión. ( tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala: 1,994. p.p.53-70.
4. NORIEGA, Francisco G. Equipos Industriales. ( Guía Práctica para Reparación y Montaje). México: Editorial Mc Graw Hill, 1,988. p.p. 2-52.
5. PERRY, Robert H. Manual del Ingeniero Químico, tomo II. México: Editorial Mc Graw Hill, 1,992. p.p. 9.72-9.103.
6. ROSALES, Robert C. Manual de mantenimiento Industrial, tomo II. México: Editorial Mac Graw Hill, 1,989. p.p. 4.1-4.127.
7. SET OLIVA, Oscar Rolando. Conducción de Vapor a Través de Tuberías. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San carlos de Guatemala). Guatemala: s.p.i. 1977. p.p. 39.
8. SHIELD, Carl D. Calderas Tipos, Características y funciones. México: Editorial C.E.C.S.A., 1,965. p.p. 20-196.



## ANEXOS

1. Tabla de flujo de vapor por la fórmula de BABCOCK ----- A
2. Tabla de longitud equivalente de algunos accesorios----- B
3. Tabla de temperaturas de combustión en hornos de bagazo --- C



B

TABLA No 2

RESISTENCIAS RELATIVAS DE UNIONES DE TUBERIAS, CALDERA Y  
RADIADOR EN TERMINOS DE CODOS EQUIVALENTES.

Nombre de la parte	Codos equivalentes	
	Tubo de hierro	Tubería de cobre
Caldera.....	3,00	4,00
Radiador.....	3,00	4,00
Válvula de ángulo del radiador.....	2,00	3,00
Válvula de globo abierta .....	12,00	17,00
Válvula de compuerta abierta.....	0,50	0,70
Te con derivación de		
100 % .....	1,80	1,20
50 % .....	4,00	4,00
33 % .....	9,00	11,00
25 % .....	16,00	20,00
Codo de 90° .....	1,00	1,00
Codo de 90° con curva grande .....	0,50	0,50
Codo de 45° .....	0,70	0,70
Retorno ( U ) abierto .....	1,00	1,00
Unión de reducción .....	0,40	0,40

( Un codo equivalente = resistencia de codo de 90° )



TABLA No 1

FLUJO DE VAPOR EN TUBERIAS POR LA FORMULA DE BABCOCK							
Pérdidas de presión. (onzas/pulg <sup>2</sup> )	Col. 1 $87((P/100)^{1/2})$	Tamaño nominal del tubo. (pulg)	Col. 2 $((D^5)/(1+3.6/D))^{1/2}$	Presión manométrica del vapor. (Lb/pulg <sup>2</sup> )	Col. 3 $((d)^{1/2})$	Longitud equivalente del tubo. (pies)	Col. 4 $((100/L)^{1/2})$
0,25	1,088	1	0,536	-1,0	0,187	20	2,240
0,50	1,538	1 1/4	1,178	-0,5	0,190	40	1,580
1,00	2,175	1 1/2	1,828	0,0	0,193	60	1,290
2,00	3,076	2	3,710	1,0	0,200	80	1,120
3,00	3,767	2 1/2	6,109	2,0	0,205	100	1,000
4,00	4,350	3	11,183	3,0	0,210	120	0,912
5,00	4,863	3 1/2	16,705	5,0	0,221	140	0,841
6,00	5,328	4	23,631	10,0	0,246	160	0,793
7,00	5,755	4 1/2	32,134	15,0	0,269	180	0,741
8,00	6,152	5	43,719	20,0	0,289	200	0,710
10,00	6,878	6	71,762	30,0	0,325	250	0,632
12,00	7,354	7	106,278	40,0	0,357	300	0,578
14,00	8,138	8	149,382	50,0	0,387	350	0,538
16,00	8,700	9	201,833	60,0	0,414	400	0,500
20,00	9,727	10	272,592	75,0	0,451	450	0,477
24,00	10,655	12	437,503	100,0	0,506	500	0,447
28,00	11,509	14	566,693	125,0	0,556	600	0,407
32,00	12,304	16	816,872	150,0	0,602	700	0,378
40,00	13,756	...	...	175,0	0,644	800	0,354
48,00	15,069	...	...	200,0	0,685	900	0,333
80,00	19,454	...	...	...	...	1000	0,316
160,00	27,512	...	...	...	...	1200	0,289
320,00	38,908	...	...	...	...	1500	0,258
480,00	47,652	...	...	...	...	2000	0,224

Nota: La tabla no considera conducción de agua en el vapor, condensación en la tubería y rugosidad en tuberías comerciales como en la práctica se encuentran.

C

TABLA No 3

TEMPERATURAS DE COMBUSTION EN LOS HORNOS DE BAGAZO ( °C )

Humedad del bagazo	Exceso de Aire		
	56 % ( m = 1.50 )	75 % ( m = 1.75 )	100 % ( m = 2.0 )
40 % ( w = 0.40 ).....	1,200°	1,100°	1,010°
45 % ( w = 0.45 ).....	1,150°	1,050°	970°
50 % ( w = 0.50 ).....	1,090°	1,000°	925°

