

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESCRIPCIÓN, PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD
UTILIZADOS EN TURBINAS DE VAPOR DE BAJA POTENCIA
PARA IMPULSIÓN MECÁNICA. CASO INGENIO LA UNIÓN.

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS RAMÓN LÓPEZ DE LEÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 1,997

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DESCRIPCIÓN, PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD
UTILIZADOS EN TURBINAS DE VAPOR DE BAJA POTENCIA
PARA IMPULSIÓN MECÁNICA. CASO INGENIO LA UNIÓN.**

Tema que fue aprobado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Con fecha 23 de noviembre de 1,994


Carlos Ramón López De León

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL PRIMERO	Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra
VOCAL SEGUNDO	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL TERCERO	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL CUARTO	Br. Victor Rafael Lobos Aldana
VOCAL QUINTO	Br. Warner Gustavo López Cáceres
SECRETARIO	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Héctor Alfredo Alarcón Cáceres
EXAMINADOR	Ing. Víctor Eduardo Izquierdo Palacios
EXAMINADOR	Ing. Jorge Raúl Soto Obediente
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López



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 Coordinador del área de Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo titulado Descripción, Principios de Operación y Mantenimiento de los Reguladores de Velocidad Utilizados en Turbinas de Vapor de Baja Potencia para Impulsión Mecánica. Caso Ingenio La Unión, del estudiante Carlos Ramón López De León, recomienda su autorización.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. José Arturo Estrada Martínez

Coordinador de Área

Guatemala, agosto de 1,997.

/behdei.



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 Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador del Area Materiales y Complementaria, al trabajo de tesis titulado Descripción, Principios de Operación y Mantenimiento de los Reguladores de Velocidad Utilizados en Turbinas de Vapor de Baja Potencia para Impulsión Mecánica. Caso Ingenio La Unión, del estudiante Carlos Ramón López De León, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑADA TODOS

Inq. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

DIRECTOR



Guatemala, agosto de 1,997.



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

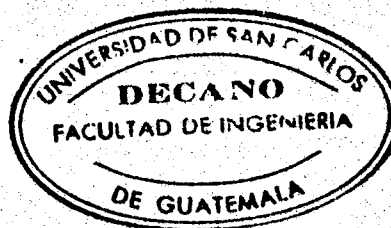
El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Ingeniero Carlos Humberto Pérez Rodríguez, al trabajo de tesis titulado Descripción, Principios de Operación y Mantenimiento de los Reguladores de Velocidad Utilizados en Turbinas de Vapor de Baja Potencia para Impulsión Mecánica. Caso Ingenio La Unión, presentado por el estudiante universitario Carlos Ramón López De León, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE

ING. HERBERT RENE MIRANDA BARRIOS

DECANO

Guatemala, agosto de 1,997.



ACTO QUE DEDICO

A DIOS TODOPODEROSO

A MIS PADRES **Carlos Rodolfo y Nítida Enma**

A MI ESPOSA **María Estela**

A MI HIJA **Enma Marieste**

A MI CIUDAD **Retalhuleu**

A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Carlos René Cifuentes Villatoro por su valiosa colaboración para la elaboración del presente trabajo.

Al Ingenio La Unión, S.A.

Capítulo 3. Reguladores de velocidad utilizados en la industria	
.azucarera para turbinas de vapor de baja potencia.	22
3.1. Definición de un regulador de velocidad	22
3.2. Objetivo de los reguladores de velocidad	22
3.3. Tipos de reguladores	22
3.3.1. Reguladores mecánicos	23
3.3.2. Reguladores hidráulicos	26
3.3.3. Reguladores hidráulico-mecánicos	28
3.3.4. Reguladores electrónicos	29
3.4. Ventajas y desventajas	30
3.5. Beneficios al proceso	30
3.6. Posibilidad de automatización	31
Capítulo 4. Principios de operación del regulador Woodward tipo	
.PgPI	32
4.1. Descripción del regulador Woodward tipo PgPI	32
4.2. Funcionamiento	34
4.2.1. Aumento de velocidad de la turbina	37
4.2.2. Disminución de velocidad de la turbina	37
4.3. Utilización del sistema de operación a control remoto	37
Capítulo 5. Lubricación	38
5.1. Características y propiedades	38
5.1.1. Viscosidad	38
5.1.2. Punto de inflamación y de combustión	39
5.1.3. Punto de fluidez	39
5.1.4. Estabilidad térmica	39
5.2. Aditivos	39
5.2.1. Aditivos protectores de las superficies lubricadas	39
5.2.1.1. Aditivos antidesgaste	39
5.2.1.2. Aditivos inhibidores de la corrosión	40
5.2.1.3. Aditivos inhibidores de la herrumbre	40
5.2.2. Aditivos mejoradores del desempeño del lubricante	40
5.2.2.1. Reductores del punto de fluidez	41
5.2.2.2. Aditivos demulsionantes	41
5.2.2.3. Mejoradores del índice de viscosidad	41
5.2.3. Aditivos protectores del lubricante	41
5.2.3.1. Aditivos antioxidantes	41
5.2.3.2. Aditivos antiespumantes	41

5.2.3.3.	Desactivadores metálicos	42
5.3.	Especificaciones del aceite a utilizar	42
5.3.1.	Viscosidad	42
5.3.2.	Punto de fluidez	42
5.3.3.	Estabilidad térmica	42
5.3.4.	Inhibidores de la corrosión y de la herrumbre	42
5.3.5.	Compatibilidad con sellos	43
5.3.6.	Resistencia a la corrosión	43
5.4.	Intervalos de cambio de aceite	43
5.5.	Filtros	44
Capítulo 6. Mantenimiento		46
6.1.	Instalación	46
6.2.	Calibraciones	46
6.2.1.	Ajustes del varillaje	46
6.2.2.	Ajuste de la válvula de compensación	48
6.2.3.	Ajuste del sistema neumático de control remoto	48
6.3.	Desmontaje	50
6.4.	Inspección	53
6.5.	Análisis y corrección de problemas comunes	53
Conclusiones		v
Recomendaciones		vii
Referencias		viii
Bibliografía		ix

LISTA DE ILUSTRACIONES

FIGURA O TABLA	PÁGINA
figura 1.1 Aceleración instantánea	3
figura 1.2 Explicación del principio del desplazamiento positivo	7
figura 1.3 Bomba de engrane	9
figura 1.4 Sistema hidráulico sencillo	10
figura 1.5 Diversos actuadores hidráulicos	10
figura 1.6 Válvulas principales de un sistema hidráulico	11
figura 2.1 Extracción del jugo en un molino	14
figura 2.2 Sistema de maceración completa	15
figura 2.3 Cuerpo evaporador	18
figura 2.4 Evaporador en cuádruple efecto	18
figura 2.5 Proceso de elaboración del azúcar en el Ingenio La Unión.	20
figura 3.1 Regulador de Watt	23
figura 3.2 Regulador mecánico de una turbina Turbodyne	24
figura 3.3 Turbina Worthington con regulador mecánico	25
figura 3.4 Vista seccionada de un regulador hidráulico	27
figura 3.5 Regulador electrónico	29
figura 4.1 Vista seccionada de un regulador Woodward Pg-pl	33
figura 4.2 Vista esquemática de un regulador Woodward Pg-pl	36
tabla 5.1 Comparativo de viscosidades	43
figura 6.1 Vista exterior de un regulador Woodward Pg-pl	47
figura 6.2 Vista seccionada de un regulador Woodward Pg-pl	49
figura 6.3 Despiece de un regulador Woodward Pg-pl	51
figura 6.4 Despiece de un regulador Woodward Pg-pl	52
tabla 6.1 Soluciones a problemas comunes	54

LISTA DE SIMBOLOS

v	Velocidad
x	Posición
t	Tiempo
a	Aceleración
Δ	Cambio
m	Masa
I	Inercia
F	Fuerza
W	Peso
g	Gravedad (32 pies/seg ²)
θ	Desplazamiento angular
ω	Velocidad angular
α	Aceleración angular
Vt	Velocidad tangencial
r	radio de giro
a_r	Aceleración centrípeta
a_i	Aceleración instantánea
P	presión
Z	Altura de referencia
γ	Peso específico
B	Empuje
V	Volumen
A	Area
Q	Caudal
l	Distancia
D	Desplazamiento
n	Velocidad (rpm)
rpm	Revoluciones por minuto
HP	Potencia en caballos de fuerza
kW	kilowatts
°F	Grados fahrenheit
°C	Grados centígrados
°F.T.T.	Grados fahrenheit de temperatura total
psi	siglas en inglés que significan libras sobre pulgada cuadrada.
plg	Pulgada
lbs/hr	libras por hora
cSt	centiestokes
SSU	Segundos Saybolt Universales
cp	Centipoises
I.V.	Indice de viscosidad

GLOSARIO

AGMA: Sociedad Americana de Fabricantes de Engranajes.

BAGAZO: el es material solido, fibroso que sale del último de los molinos del tándem, despues de haber realizado la extracción del jugo.

CACHAZA: sedimento obtenido en los clarificadores, como resultado de la precipitación de las impurezas del guarapo que provoca el alcalizado.

GRADOS BRIX: concentración en peso de sólidos disueltos en una solución.

GRADOS POL: concentración en peso aparente de azúcar disuelta en una solución.

IMBIBICIÓN: proceso de aplicar agua al bagazo que va a entrar al último molino con la finalidad de disolver el azúcar que lleve para mejorar la extracción en los molinos.

ISO: Organización Internacional de Normas y Estándares.

JUGO MEZCLADO: mezcla de los jugos primario y secundario.

JUGO PRIMARIO: jugo extraído por el primer molino.

JUGO SECUNDARIO: jugo diluido que es extraído por los siguientes molinos al primero en un tándem de molinos.

MACERACIÓN: aplicación de jugo de menor calidad (contenido de azúcar) al bagazo que sale de un molino para disolver el azúcar que ese bagazo lleve.

NEUMÁTICO: que utiliza aire comprimido.

SAE: Sociedad de Ingenieros Automotrices.

SUCCIÓN: lado de una bomba en donde existe presión negativa.

INTRODUCCIÓN

Es frecuente encontrar en la industria azucarera a personas que inician su carrera profesional, o a personal empírico que poseen poco conocimiento teórico sobre la maquinaria existente en ella. Esto motivó a la realización de trabajos como el presente, el cual tiene como finalidad ayudar a dichas personas cuando estén en contacto con equipos que a simple vista parecen ser raros, pero que con una guía dejan de serlo.

El lector, a medida que se involucre en este trabajo, podrá obtener conocimientos sobre los principios de funcionamiento, la operación y el mantenimiento de los reguladores de velocidad que se utilizan en turbinas de vapor de baja potencia.

En el primer capítulo, se presentan los principios básicos en que se basa el funcionamiento de los reguladores de velocidad, los cuales se han clasificado en principios mecánicos y en principios hidráulicos.

En el segundo capítulo, se describen brevemente el proceso de elaboración del azúcar de caña y los equipos con que cuenta el Ingenio La Unión para poder realizar dicho proceso.

Definiciones de un regulador de velocidad, el objetivo que persigue y los tipos de reguladores de velocidad que se utilizan en turbinas de vapor; sus ventajas tanto como sus desventajas se localizan en el capítulo tres.

Continuando con el capítulo cuatro, se presentan los principios de operación del regulador Woodward tipo PGPL.

El contenido del capítulo cinco es un recordatorio de las propiedades y características que deben de tener los lubricantes.

Para finalizar, en el capítulo seis, se presenta una guía para realizar el mantenimiento preventivo en los reguladores Woodward PGPL.

CAPÍTULO 1. PRINCIPIOS BÁSICOS

El control de la velocidad se basa en dos principios físicos: los mecánicos y los hidráulicos.

1.1 PRINCIPIOS MECÁNICOS

1.1.1 VELOCIDAD (V): es la razón de cambio de posición con respecto al tiempo.

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Ec. 1.1

En donde :

Δx = Cambio de posición

Δt = Cambio de tiempo.

1.1.2 ACELERACIÓN (a): es la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo.

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t^2}$$

Ec. 1.2

En donde:

ΔV = Cambio de Velocidad.

1.1.3 MASA (m): físicamente se define como la oposición de un cuerpo a ser acelerado, o cambiar de su estado de movimiento, cuando una fuerza actúa sobre él. En esto se debe tener cuidado, ya que comúnmente se confunde peso con masa. La masa también se considera como una medida cualitativa de la inercia.

1.1.4 INERCIA (I): se le llama así a la propiedad de un cuerpo para permanecer en su estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo en ausencia de fuerzas.

1.1.5 FUERZA (F): básicamente se define como la acción de un cuerpo sobre otro la cual ocasiona una aceleración sobre un segundo cuerpo, a

menos que sobre éste se encuentre actuando una acción igual pero opuesta, que contrarreste el efecto del primer cuerpo.

$$F = m a$$

Ec. 1.3

1.1.6 PESO (W): está definido como la fuerza que la tierra ejerce sobre un cuerpo; dicha fuerza la llamamos fuerza gravitacional y depende de las condiciones gravitacionales del lugar.

$$W = m g$$

Ec. 1.4

En donde:

$$g = \text{Constante gravitacional} \approx 9.81 \text{ m/seg}^2 \approx 32 \text{ pies/seg}^2$$

1.1.7 DINÁMICA ROTACIONAL: es la rama de la física que se encarga del estudio del movimiento circular de las partículas y de los cuerpos rígidos. Ella comprende el estudio del desplazamiento angular, velocidad angular y periférica, aceleración angular, centrípeta, centrífuga e instantánea, fuerza centrípeta y fuerza centrífuga.

El *desplazamiento angular* (θ) se define como el ángulo barrido en una rotación.

La *velocidad angular* (ω) es el desplazamiento angular realizado en determinado tiempo .

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

Ec. 1.5

La *aceleración angular* (α) es el cambio de velocidad angular respecto al tiempo.

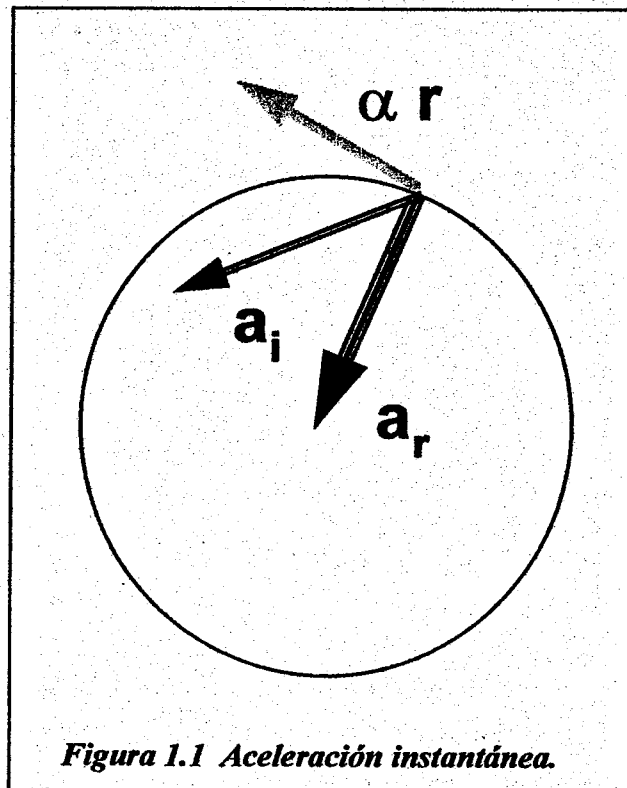
$$\alpha = \frac{\omega}{t}$$

Ec. 1.6

La *velocidad periférica o tangencial* (V_t) es el resultado de multiplicar la velocidad rotacional con la longitud que existe entre el centro de rotación y el punto en donde se quiere medir dicha velocidad.

$$V_t = \omega r$$

Ec. 1.7



La **aceleración centrípeta** (a_r): está ligada a la velocidad periférica, solo que tiene una dirección perpendicular a la dirección de la velocidad periférica, es decir, en lugar de ser tangente a la circunferencia, es radial hacia el centro, por lo que también se llama **aceleración radial**.

$$a_r = \frac{v_t^2}{r} = \omega^2 r \quad \text{Ec. 1.8}$$

La **aceleración instantánea** (a_i): se obtiene cuando un cuerpo que gira y tiene aceleración angular, es decir que $\alpha \neq 0$ y que $a_r \neq 0$, entonces se dice que tiene una aceleración instantánea a_i . Tanto la aceleración angular como la centrípeta, son componentes vectoriales de la aceleración, según se observa en la figura 1.1 y en la ecuación 1.9.

$$a_i = \sqrt{a^2 + a_r^2} \quad \text{Ec. 1.9}$$

1.1.8 FUERZA CENTRÍPETA Y CENTRÍFUGA: la fuerza centrípeta es la responsable de la dinámica rotacional y siempre va estar dirigida radialmente hacia el centro, tal y como lo está la aceleración centrípeta, ya

que su magnitud se define según la ecuación 1.10. De la misma manera, se define la fuerza centrífuga, partiendo del siguiente criterio: para que un cuerpo que gira esté en equilibrio debe existir alguna fuerza que contrarreste el efecto de la fuerza centrípeta, de tal forma que la fuerza centrífuga tiene la misma magnitud y dirección de la fuerza centrípeta, sólo que en sentido contrario.

$$F = m a_c = m \frac{v^2}{r} = m \omega^2 r \quad \text{Ec. 1.10}$$

1.2 PRINCIPIOS HIDRÁULICOS

Hidráulica es la parte de la física que estudia los líquidos, su movimiento y las fuerzas que actúan en ellos. Se divide principalmente en dos partes: *hidrodinámica* e *hidrostática*.

1.2.1 HIDRODINÁMICA ⁽¹⁾: es la parte de la hidráulica que estudia los líquidos en movimiento y se basa principalmente en el teorema de Bernoulli, que dice que si un fluido es de densidad constante y de flujo permanente o estacionario y sin pérdidas, se analiza de la siguiente manera a partir de la ecuación 1.11.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \quad \text{Ec. 1.11}$$

En donde:

- P** = Presión del fluido.
- V** = Velocidad del fluido.
- Z** = Altura de referencia.
- γ** = Peso específico del fluido.

Al observar la ecuación 1.11, se observa que cada uno de los sumandos de cada lado de la igualdad corresponde a una forma de energía.

1.2.2 HIDROSTÁTICA ⁽²⁾: parte de la física que estudia los líquidos en reposo. Se basa en el teorema fundamental de la hidrostática, el cual dice: "*La diferencia de presiones entre dos puntos en un líquido en equilibrio, es igual al peso de una columna de dicho líquido de base, unidad y*

altura igual a la distancia vertical entre ambos puntos". De esto se deduce lo siguiente:

1.2.2.a. Dentro de un líquido en equilibrio, la presión en todos los puntos de un mismo plano horizontal son los mismos.

1.2.2.b. La superficie libre de un líquido en equilibrio es plana y horizontal y la presión entre dos (2) puntos de la superficie libre es la misma. Si analizamos la ecuación 1.11, vemos lo siguiente:

$$Z_1 = Z_2 ; \frac{V_1^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g} ; \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} \quad \text{Ec. 1.12}$$

por lo tanto,

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = P_1 = P_2 = P \quad \text{Ec. 1.13}$$

1.2.2.c. Cuando en un recipiente existen varios líquidos no mezclables, éstos se superponen de acuerdo con su densidad, se colocan en el fondo los más densos, y tienen a la superficie que los separa una forma plana y horizontal.

Por otro lado, del teorema fundamental se deducen los siguientes principios:

1.2.2.d. El *Principio de Arquímedes* ⁽³⁾ o de empuje, el cual dice: "Todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un líquido sufre una fuerza vertical hacia arriba igual al peso del líquido desplazado". Su representación matemática es la siguiente:

$$B = \gamma \times V \quad \text{Ec 1.14}$$

En donde

B = Empuje

γ = Peso específico del líquido

V = Volumen desplazado del líquido.

1.2.2.e El *Principio de Pascal* ⁽⁴⁾, dice: "Toda variación de presión en un punto de un líquido se transfiere íntegramente a todos los otros puntos

del líquido". En otras palabras, dice que en un líquido la presión se transmite con igual intensidad en todas direcciones, que actúa con una fuerza igual sobre áreas iguales y en una dirección que forma ángulos rectos con las áreas del medio en que está encerrada. La expresión matemática del principio de pascal es la siguiente:

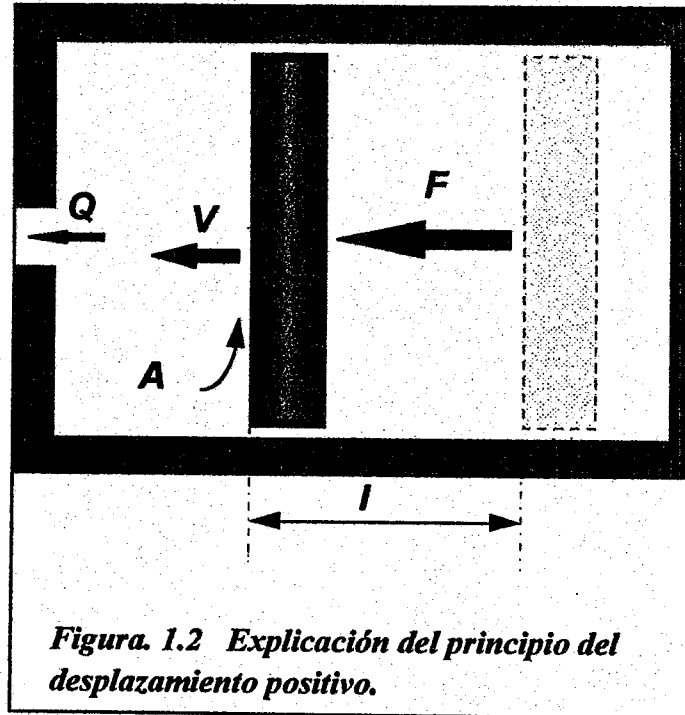
$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} \quad \text{Ec. 1.15}$$

1.2.3 ELEMENTOS HIDRÁULICOS BÁSICOS. Hay cinco componentes básicos que se requieren para un sistema de control hidráulico. los cuales son: *bomba, acumulador, conductores del fluido, válvulas y actuadores.*

1.2.3.1 BOMBA HIDRÁULICA: es la encargada de transformar la energía mecánica a energía hidráulica.

Se clasifican principalmente en *bombas rotodinámicas* y *bombas de desplazamiento positivo* ⁽⁵⁾. Como ejemplo de las primeras, se encuentran las bombas centrífugas, las cuales no son parte de este estudio.

1.2.3.1.1 BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO: son las bombas que generalmente se utilizan en los sistemas hidráulicos. Se basan en el principio del desplazamiento positivo, que consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara.



El principio del desplazamiento positivo ⁽⁶⁾ es el siguiente: en el interior del cilindro de la figura 1.2 en que se mueve un émbolo con movimiento uniforme y velocidad V hay un fluido a la presión P . Suponga que tanto el cilindro como el émbolo son rígidos y que el fluido es incompresible. El movimiento del émbolo se debe a la fuerza aplicada F . El émbolo al moverse desplaza al fluido a través del orificio de la figura. Si el émbolo recorre un espacio l hacia la izquierda, el volumen ocupado por el líquido se reducirá en un valor igual a Al , (en donde A es la sección transversal del émbolo). Como el fluido es incompresible, el volumen del fluido que sale por el orificio será también Al . El tiempo empleado en recorrer la distancia l es:

$$t = \frac{l}{v} \quad \text{Ec. 1.16}$$

El caudal Q , o volumen desplazado en la unidad de tiempo, será:

$$Q = \frac{Al}{t} = Av \quad \text{Ec. 1.17}$$

El desplazamiento D , es el volumen desplazado en una revolución, por lo que el caudal también puede ser:

$$Q = Dn \quad \text{Ec. 1.18}$$

En donde:

n = Velocidad, rpm (Revoluciones por minuto).

1.2.3.1.1.1 CLASIFICACIÓN ⁽⁷⁾: se clasifican de acuerdo con los siguientes criterios:

Primer criterio: es según el tipo de movimiento del órgano desplazador en:

a. Bombas alternativas, entre las que tenemos como ejemplo a las bombas de pistón.

b. Bombas rotativas: éstas se clasifican de la siguiente manera:

Bombas de engranaje, bombas de paletas y bombas de pistones, tanto axiales como radiales.

A continuación, se describirá solamente el funcionamiento de las bombas de engrane, debido a que es la bomba que se usa en la mayoría de los reguladores de velocidad hidráulicos para turbinas de poca potencia.

Consta de dos engranajes que rotan engranados entre sí. El aceite fluye alrededor de ellos, por la periferia de la carcasa de la bomba. Esto se explica de la siguiente manera (Vease figura 1.3): se puede observar que los dientes en el lado de arriba están separándose constantemente, lo que causa un vacío y obliga al aceite a entrar en el sistema, forzado por la presión atmosférica.

Dado que los dientes continúan moviéndose arrastran el aceite entre ellos o atrapan ente la carcasa y lo llevan al lado de abajo de la bomba.

Segundo criterio: según su desplazamiento, consta de *Bombas de desplazamiento fijo*, y *bombas de desplazamiento variable*.

Dado que muchas aplicaciones interesa variar el caudal en las bombas, se puede variar la velocidad n o variar el desplazamiento. La variación del desplazamiento en una bomba es fácil, basta con variar la carrera del pistón (para las bombas de pistones) o con variar la excentricidad del rotor (en las bombas rotativas).

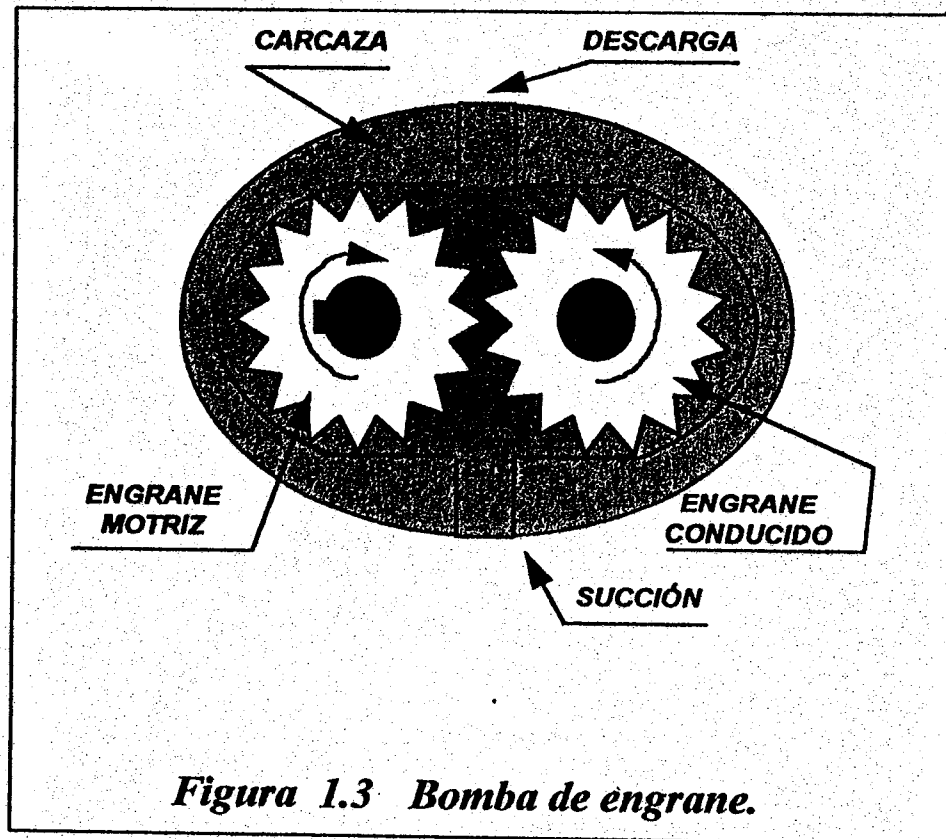
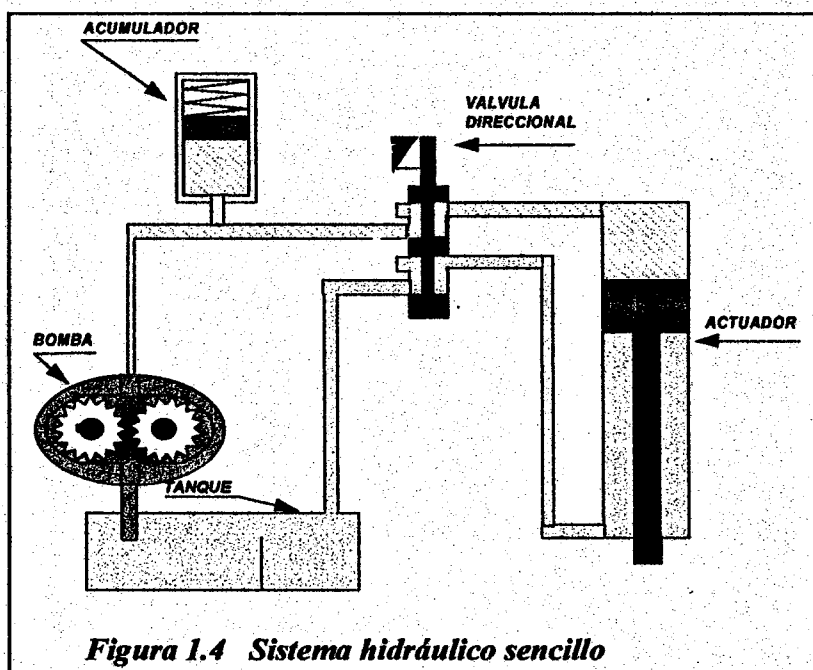


Figura 1.3 Bomba de engrane.

1.2.3.2 ACUMULADORES: tienen dos funciones importantes en un sistema hidráulico; son amortiguadores de golpes y pueden proveer en determinado momento líquido presurizado al sistema. Hay tres tipos de acumuladores usados actualmente: *acumuladores de resorte, de peso y de gas*. Funcionan de la siguiente manera:

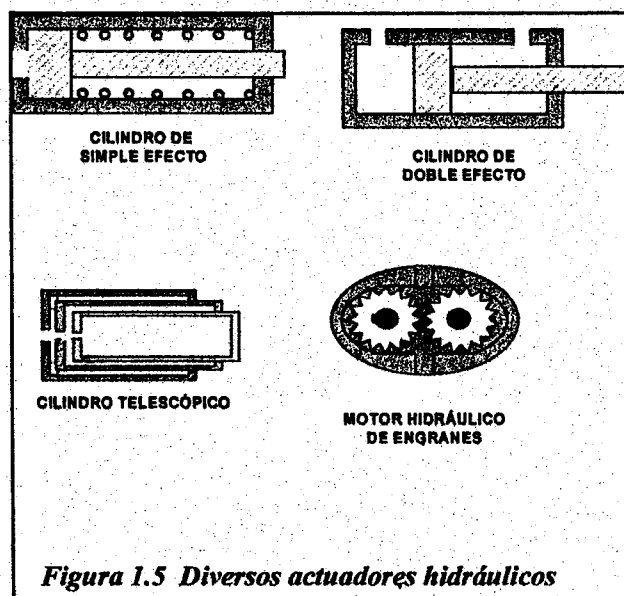
En la figura 1.4, se puede observar un sistema hidráulico, en donde la bomba provee el fluido a alta presión directamente sobre la carga. Cuando la contrapresión, causada por la carga, regresa o le pone un obstáculo al fluido, fuerza a éste a que ingrese al acumulador; en este momento, el pistón se mueve hacia el resorte y lo comprime. Cuando por alguna razón no existe presión por parte de la bomba, entonces la presión almacenada por el acumulador suple a la bomba proveyendo momentáneamente la presión al sistema.

1.2.3.3 CONDUCTORES DEL FLUIDO: estos pueden ser rígidos o flexibles. Los primeros principalmente son hechos de tubería de acero, bronce u otro material rígido, mientras que los segundos son hechos de mangueras, ambos resistentes a la presión que se está manejando.



1.2.3.4 ACTUADORES HIDRÁULICOS: son los elementos que en un sistema hidráulico, transforman la energía hidráulica en mecánica. Pueden ser de dos tipos: los actuadores lineales y los rotatorios.

Entre los actuadores lineales se tienen principalmente los cilindros hidráulicos simples, los de doble efecto, etc. (veáse la figura 1.5). Entre los rotatorios, están los motores hidráulicos, los cuales pueden ser de engrane, paletas o de pistón. Trabajan de manera inversa a las bombas, incluso, muchas bombas hidráulicas pueden trabajar como motores, cuyo nombre es bombas reversibles.

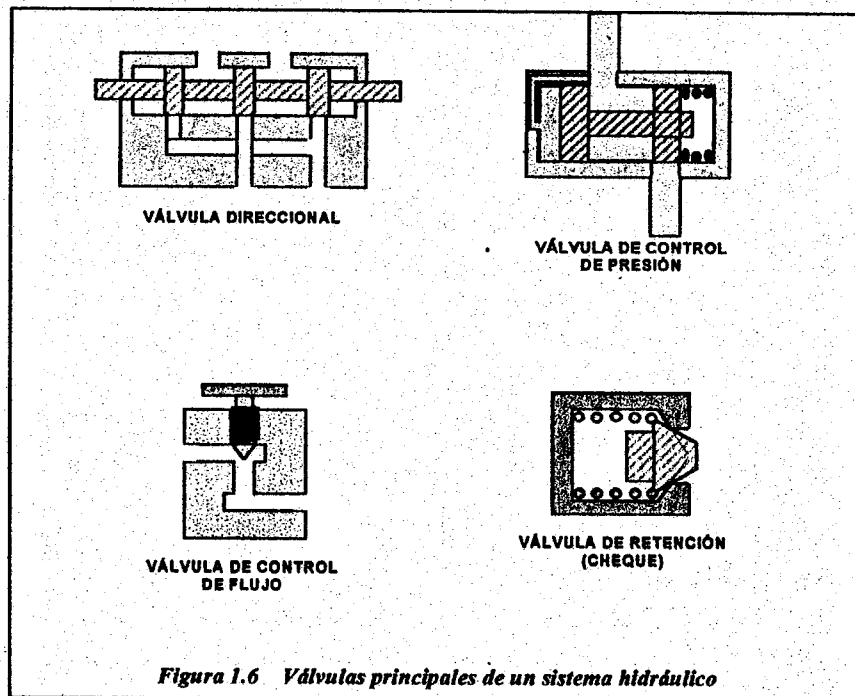


1.2.3.5 VÁLVULAS ⁽³⁾: son los elementos del sistema en los cuales se lleva a cabo el control del sistema. En ellas, se pueden controlar la presión, la dirección y la cantidad de flujo, y se clasifican de la misma manera en que controlan el fluido.

La función principal de las válvulas de control de presión es como su nombre lo dice, controlar la presión que se utiliza en el sistema, y lo protegen de sobrecargas; además, limita la fuerza de los actuadores lineales o el movimiento de torsión de los motores hidráulicos.

Las válvulas direccionales, como su nombre lo indica, sirve para controlar la dirección del fluido dentro del sistema.

La velocidad con que trabaja un actuador, ya sea este un lineal o un motor, se controla variando el desplazamiento o la cantidad de fluido. Para variar la cantidad de fluido, se utilizan las válvulas de control de flujo, las cuales restringen la cantidad de flujo en el sistema.



CAPÍTULO 2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL AZÚCAR DE CAÑA EN EL INGENIO LA UNIÓN.

Para poder comprender la utilización de los reguladores de velocidad, por qué se utilizan turbinas de vapor en ciertas áreas y en otros otro tipo de accionamiento, se presenta a continuación, en forma breve, el proceso de elaboración del azúcar. También se hará mención breve de las capacidades de los equipos que se utilizan en el Ingenio La Unión.

2.1 PATIO DE CAÑA: los objetivos del patio de caña son la preparación de la caña para que en los molinos se facilite la extracción del jugo, y el aumento de la densidad del colchón de caña que ingresa a molinos para aumentar la capacidad en ellos. La preparación de la caña consiste en lavar la caña y romper sus fibras.

En esta área, se recibe la caña que viene del campo. La caña es transportada en su mayoría (85 a 95%) por equipos cañeros llamados "Jaulas" en donde viene caña a granel (cosecha mecanizada), y el resto en plataformas en donde viene caña maleteada (cosecha manual).

Con el objetivo de eliminar el polvo que trae la caña, en primer lugar, los camiones pasan por una estación de prelavado. Seguidamente la caña se descarga de los camiones por grúas fijas llamadas malacates o descargadores hidráulicos en las mesas alimentadoras de caña (actualmente dos grupos de dos mesas cada uno). Las mesas de caña son conductores de caña anchos y cortos en donde se dosifica la caña a los conductores de caña y se procede a lavar la caña. El lavado se hace con la intención de eliminar por completo las impurezas que trae la caña del campo (tierra, piedras, basura de tamaño pequeño, etc.)

Los conductores de caña son bandas formadas por tablillas de metal y por cadena especial de arrastre. Están accionados cada uno por un grupo de bomba y motor hidráulico con velocidad variable, de tal forma que se puede variar la velocidad de ellos desde 0 pies/min hasta su máximo de alrededor de 40 pies/min. Existen en la actualidad dos conductores de caña. Ellos son los encargados de trasladar la caña desde el patio hasta los molinos. En ellos, se encuentran localizadas las picadoras de caña.

2.2.1 Picadoras de caña: el objetivo de las picadoras de caña es romper las fibras de las cañas. Esto se hace para mejorar la extracción del

jugo e incrementar la capacidad de molienda cuando aumenta la densidad de la caña al romper las fibras.

Las picadoras son máquinas accionadas por motores eléctricos de 1250 HP a 1750 rpm y 2400 voltios. Entre el motor y la picadora, existe un reductor de velocidad de 1250 HP y una reducción de 6 a 1. Las picadoras son ejes montados sobre dos cojinetes en cada extremo. A lo largo del eje, entre los dos cojinetes, están fijos varios brazos en los que cada uno lleva 2 hojas llamadas machetes o cuchillas colocados simétricamente con relación al eje.

Anteriormente las picadoras de caña eran accionadas por turbinas de vapor, pero debido a la gran demanda de vapor a que eran sometidas las turbinas de las picadoras por la variación existente en la alimentación de caña al molino desde las mesas de caña al conductor de caña, provocaban una variación de la producción de vapor en las calderas, así como inestabilidad en el proceso de evaporación del jugo de caña. Con los motores eléctricos, el vapor que la turbina utilizaba para producir el movimiento a las picadoras (picos de demanda de hasta 40,000 libras de vapor por hora) se utiliza en turbogeneradores de vapor más eficientes los cuales con flujos de vapor de alrededor de 20,000 libras de vapor por hora que producen la potencia necesaria utilizada por el motor eléctrico para mover las picadoras, dejando un excedente aproximadamente de 20000 libras de vapor por hora que, se pueden comercializar energía eléctrica en excedente, que cogeneran los turbogeneradores de vapor eficientes, normaliza las demandas de las calderas y estabiliza los procesos siguientes en la elaboración del azúcar, sin dejar a un lado la preparación de la caña.

2.2 MOLINOS: es en esa área donde se realiza la extracción del jugo que trae la caña. No está de más decir que en promedio la caña trae un 87.5 % de jugo y un 12.5 % de fibra leñosa. El jugo de la caña trae una concentración de sólidos disueltos (grados ° BRIX) de alrededor de 18 % y una concentración de sacarosa aparente (grados ° POL) de alrededor de 16 %, y una pureza (relación entre ° BRIX y ° POL) de 88.89 %. La pureza indica que tanta azúcar disuelta existe en los sólidos disueltos en el jugo.

Los molinos son máquinas de gran tamaño, de tres o cuatro rodillos compuestos de un eje y una camisa de hierro fundido llamados mazas (maza cañera, maza superior, maza bagacera y cuarta maza) con una dimensiones de 78" de largo y un diámetro entre 36" y 39"; las mazas se

soportan en dos estructuras verticales con alojamientos para cada maza llamadas vírgenes.

El tren o el tándem de molinos del Ingenio La Unión consta de 6 molinos; el primer molino es de tres mazas y los restantes cuatro mazas.

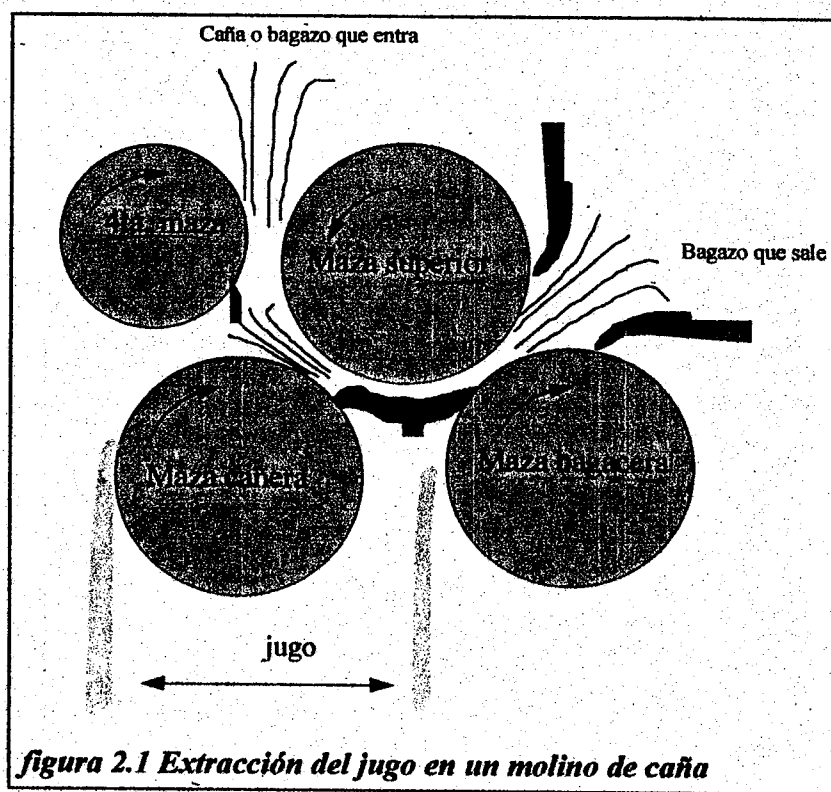
Para darle movimiento a los molinos, se utilizan turbinas de vapor de impulso de un escalonamiento Curtis, que giran entre 3300 a 4500 rpm, con potencias requeridas entre 500 y 1000 HP, y depende del molino del cual se trate.

Dado que los molinos deben de girar entre 5 y 7 rpm, existen en cada molino entre la turbina y el molino tres reductores de velocidad, llamados según el rango de velocidad en que trabajan, de la siguiente manera: reductor de alta, reductor intermedio, y reductor de baja.

El proceso de extracción del jugo es el siguiente:

Después de que la caña es preparada por las picadoras, debe de ingresar al área de molinos, en donde se le extrae el jugo que trae consigo.

La caña ingresa al primer molino en donde se realiza la primera extracción de jugo. En la gráfica 2.1, se puede observar cómo la caña pasa por las mazas.



Para obtener una adecuada extracción de jugo en el tándem y mantener una demanda estable de vapor en las calderas, entre otras cosas, la carga de caña (colchón), que tiene cada molino, debe de ser lo más constante posible. Cuando los molinos trabajan con poca carga, no logran hacer un buen trabajo; es entonces cuando se necesita tener control sobre la velocidad de la máquina para que cuando el molino tenga una variación de la altura de su colchón de caña, también responda a una variación de la velocidad del mismo, lo cual se logra variando la velocidad de la turbina por medio del regulador de velocidad de la turbina.

La caña pasa de molino en molino, con un proceso similar al de lavar ropa, es decir, aplicar agua o jugo de menos calidad, y exprimir hasta agotar el contenido de azúcar que tenga el bagazo. Para lograr esto, se utiliza en el Ingenio La Unión el sistema llamado de maceración completa, mostrado en la figura 2.2.

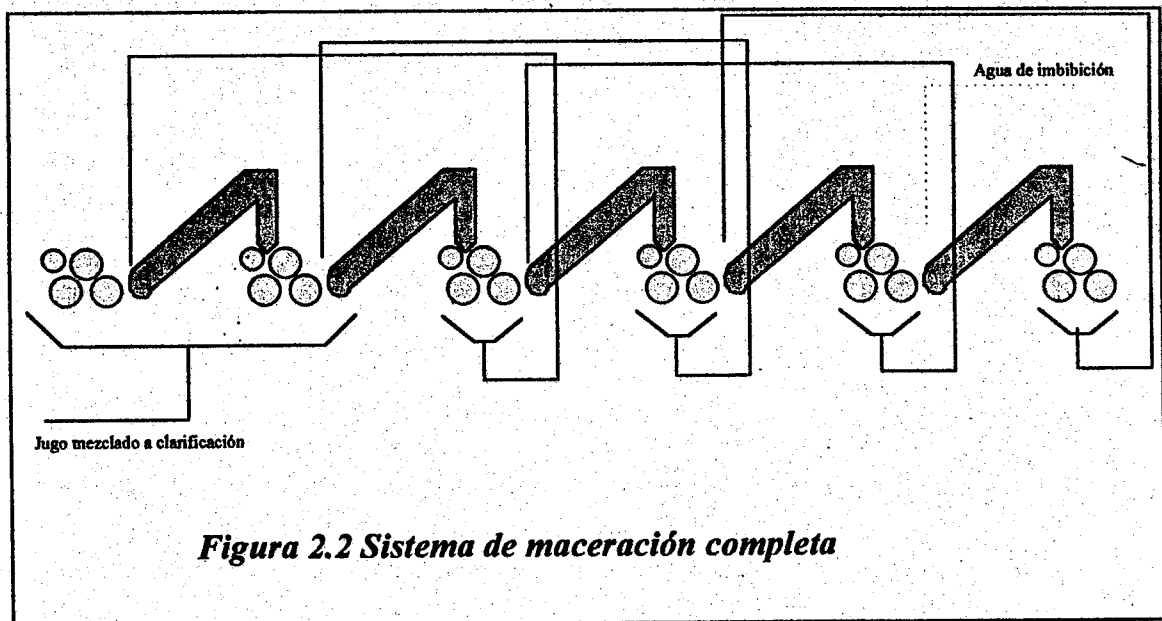


Figura 2.2 Sistema de maceración completa

Al salir del último molino, el bagazo sale hacia las calderas, que lo queman como combustible, y el jugo de que se extrae se manda a clarificación.

Las razones por la que se utilizan turbinas de vapor para el accionamiento de los molinos son principalmente dos, una es la exigencia de vapor en los procesos de calentamiento, evaporación y cocción de la materia prima, y la otra es que con una turbina de vapor se puede obtener una variación de velocidad.

2.3 CLARIFICACIÓN: en este departamento, es donde las impurezas no solubles que viene junto con el jugo extraído en los molinos se separa del mismo. Existen dos etapas en este proceso: la **sulfitación** y la **clarificación** misma o sedimentación.

En la sulfitación, se hace pasar en contracorriente al jugo gases de ácido sulfídrico en una torre parecida a una torre de enfriamiento con la finalidad de aclarar el jugo además de que actúa como bactericida. Al salir de la torre de sulfitación, el jugo cae a un tanque (llamado tanque de jugo sulfitado) en donde se le agrega una lechada de cal.

Después el jugo, ahora llamado jugo alcalizado, éste se pesa en unas romanas de jugo por volumen. Inmediatamente después de ser pesado, pasa por unos intercambiadores de calor llamados calentadores de jugo los cuales utilizan vapores producidos por los mismos jugos en la etapa de evaporación para calentarlo y llevarlo casi a la temperatura de ebullición del jugo de caña que es de 102.5 °C.

La temperatura alta del jugo, junto con la lechada de cal y otros agentes sedimentadores son, los elementos químicos para que el jugo pueda clarificarse bien, y lograr así separarse de sus impurezas no solubles en los clarificadores.

Los clarificadores son aparatos sedimentadores de jugo en donde entra jugo que sale de los calentadores y sale jugo clarificado (de un color Ambar) y la cachaza, que son las impurezas no disueltas que vienen con el jugo.

La cachaza lleva azúcar, disuelta en el jugo no clarificado que ésta lleva, por lo que dentro del área de clarificación hay unos filtros que trabajan por medio de succión, y le sacan el jugo, y son llamados filtros de cachaza.

En el Ingenio La Unión, el departamento de clarificación tiene 5 clarificadores de jugo, dos precalentadores de jugo, 3 calentadores rectificadores de jugo, dos torres de sulfitación y 5 filtros de cachaza.

2.4 EVAPORACIÓN: aquí es en donde se le quita al jugo la mayor cantidad de agua posible al jugo clarificado. (Entra con un contenido de agua del 85% y sale de los evaporadores con un contenido del agua aproximado del 35%).

La evaporación se realiza por medio de un grupo de evaporadores o cuerpos colocados en serie, tal como se muestra en la figura 2.4. La disposición en serie es para que el sistema sea termodinámicamente

económico, ya que una libra de vapor del escape de las turbinas evapora "x" libras de agua del jugo que depende del número de efectos o cuerpos de la serie. Por ejemplo, si hay dos cuerpos (dos efectos), se evaporan dos libras de agua que lleva el jugo por libra de vapor de escape; si hay 3 efectos, se evaporan 3 libras de vapor de jugo por libra de vapor de escape. Por las condiciones de diseño de vapor, se recomienda no trabajar más de 5 efectos.

Un estación de evaporación típica se puede observar en la figura 2.3.

El jugo clarificado cuando sale de los evaporadores, después de que se le eliminó la mayoría de agua, se le denomina meladura. La meladura es el material que se utiliza en la etapa siguiente llamada cristalización o tachos.

En el Ingenio La Unión, existen 10 cuerpos de evaporación; trabajan los 3 primeros como primer efecto, 3 como segundos efectos, 1 como tercer efecto, 1 como cuarto efecto, y un último como quíntuple efecto, mantienen un evaporador limpieza o están en espera cuando se saca cualquiera, para proceder a su limpieza.

2.5 CRISTALIZACIÓN: esta se lleva a cabo en un evaporador de simple efecto llamado *Tacho*, en donde la meladura se termina de concentrar (evaporar el agua que lleva), y se controlan las condiciones de presión (vacío) y temperatura.

La meladura que se suministra a los tachos es por lo general de 60 a 65° Brix; los tachos se encargan de convertir esa meladura en una mezcla de cristales de azúcar y miel llamada "*Masa cocida*".

Actualmente el proceso de cristalización en los tachos se lleva a cabo en tres etapas, llamado también sistema de tres templas y doble magma, tratando de que los cristales de azúcar que se suministran al tacho de terceras en una cristalización, crezcan de una manera uniforme en las etapas siguientes.

En el Ingenio La Unión, existen en la actualidad 7 tachos. El uso del primer tacho se ocupa para la cristalización del azúcar, y sirve para continuar la primera etapa llamada templas de tercera. Para las templas de segunda, existe un tacho. Para las de primera, se utilizan los otros cuatro tachos restantes.

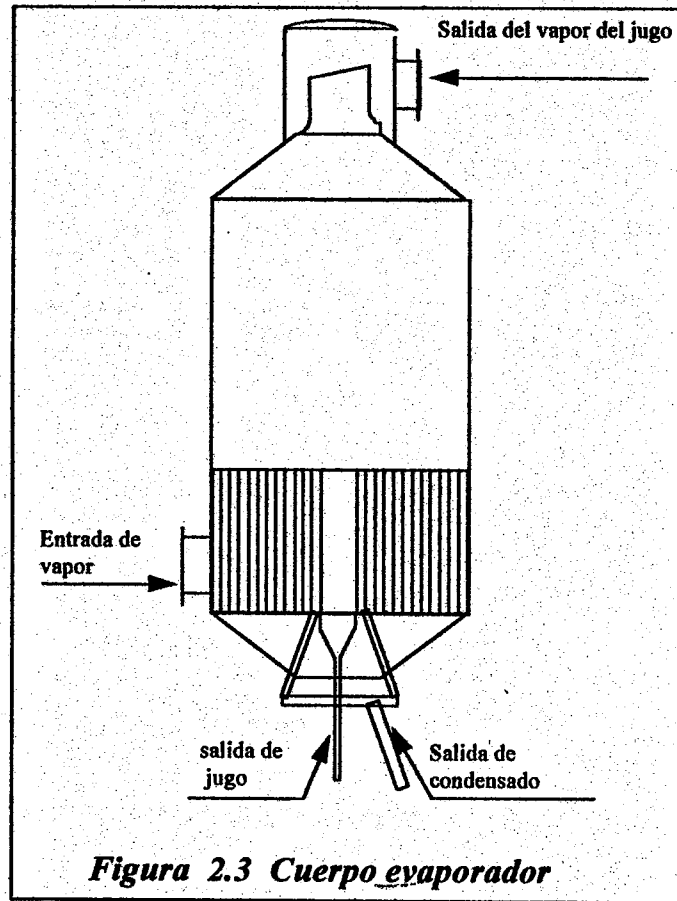


Figura 2.3 *Cuerpo evaporador*

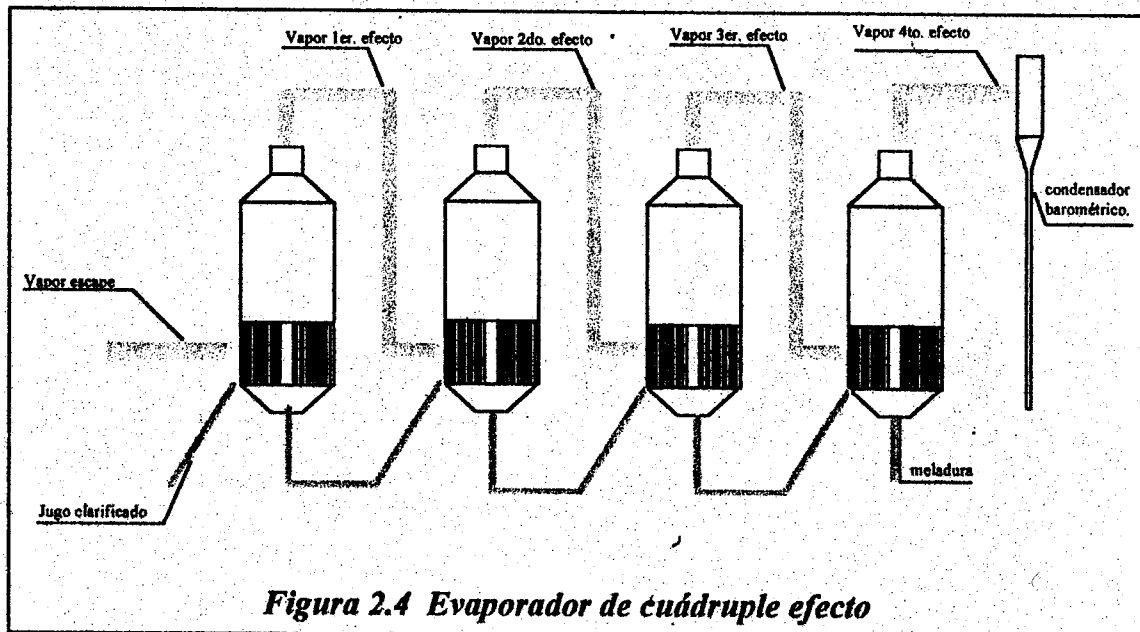


Figura 2.4 *Evaporador de cuádruple efecto*

⁽⁹⁾En el sistema de tres templas y doble magma, existe un tacho de primera que se encarga de preparar semilla, tomando magma de segunda y meladura desarrollando un poco los granos. Después los otros tachos de primera se encargan de terminar de desarrollar los cristales. Cuando los cristales tienen un tamaño adecuado, se detiene el proceso, y la templa de primera pasa a los cristalizadores de primera y después al mezclador de producción o de primera, para luego separar los cristales de la miel (que es de lo que está compuesta una "Templa") en las centrífugas de producción. De esta forma, se obtiene el azúcar comercial y además por la separación centrífuga, una miel llamada "miel A".

Seguidamente el tacho de segundas toma miel A como materia prima juntamente con magma de tercera para desarrollar el grano que se encuentra presente en la magma de tercera. El producto final del tacho de segundas se llama templa de segunda. Ésta, al salir del tacho de segunda, pasa por un cristizador (aparato que por medio de enfriamiento a la masacosida de segunda ayuda al crecimiento y uniformidad del grano y al agotamiento de las mieles - agotamiento es eliminarle los sólidos disueltos a las mieles que son cristalizables-) y después a la batería de centrífugas de segunda, en donde se separa la miel que viene juntamente con el azúcar de segunda o también llamado magma de segunda en la masa cocida. El producto de la centrifugación es magma de segunda y miel B.

Por último, el tacho de terceras toma la miel B y cierta cantidad de grano que se empezó a desarrollar anteriormente en ese tacho, a partir de miel A y de meladura juntamente con semilla de azúcar molida pulverizada con alcohol etílico. El producto de este tacho es la masa cocida de tercera que después que sale del tacho pasa a los cristalizadores de tercera (7 cristalizadores colocados en serie), luego es centrifugado, y se obtiene magma de tercera y miel final o melaza. La miel final contiene gran cantidad de azúcares no cristalizables, cenizas, compuestos orgánicos no azúcares y agua.

En la página siguiente, se presenta la figura 2.5 en donde se describe en forma gráfica el proceso de elaboración del azúcar.

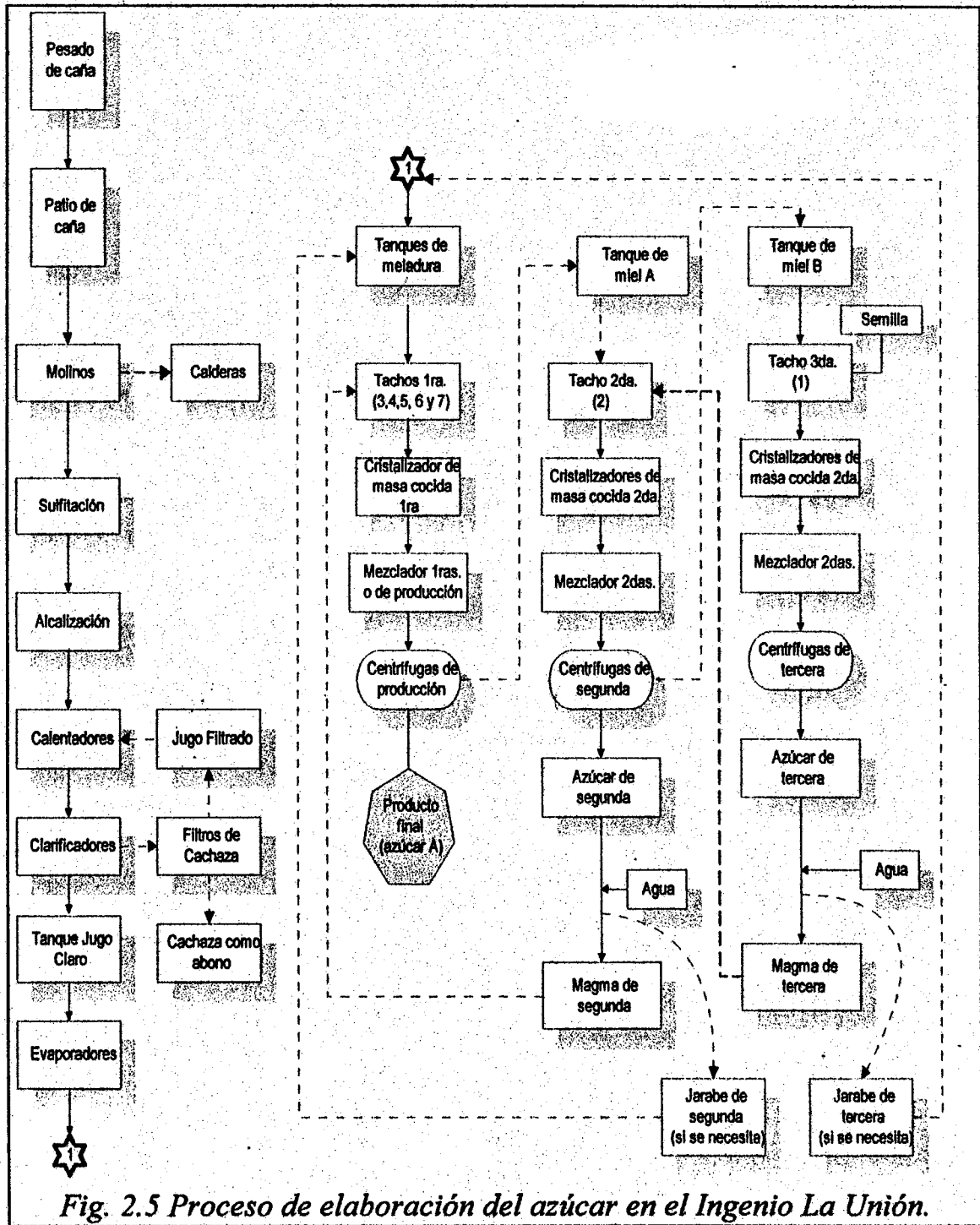


Fig. 2.5 Proceso de elaboración del azúcar en el Ingenio La Unión.

2.6 CALDERAS: se ha dejado de último esta parte de la fábrica, por que no forma parte del diagrama de flujo del proceso de elaboración del azúcar, puespero si no existen calderas, no se puede dar movimiento mecánico ni vapor para cocimiento y eliminación del agua que trae el jugo de caña.

En el Ingenio La Unión, se tienen 6 calderas acuatubulares, que se describen a continuación.

Las calderas 1 y 2 son calderas con una capacidad de generación de vapor de 120,000 lbs/hora a una presión de 200 psig y 450°F de temperatura total del vapor (° F.T.T). Son calderas con hornos tipo herradura, automatizadas parcialmente (les falta el control de la alimentación de bagazo, debido al tipo de alimentación que tienen).

La caldera 3 tiene una capacidad de producción de 150,000 lbs/hora de vapor a 400 psig y 650 °F.T.T. Es una caldera con paredes de agua y con parrilla móvil. Su automatización es total.

Las calderas 4 y 5, al igual que la caldera 3 son totalmente automatizadas, que además de quemar bagazo, pueden quemar combustible Bunker C. Sus capacidades son : 130,000 lbs/hora de vapor a 600 psig y 750 °F.T.T.

Y por último en montaje se encuentra la caldera 6. Esta caldera se utiliza para operar el turbogenerador de 26 megavatios en un ciclo Rankine con extracción. Su capacidad de producción de vapor es de 250,000 lbs/hora, a una presión de 850 psig y 900° F.T.T.

CAPÍTULO 3. REGULADORES DE VELOCIDAD UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA PARA TURBINAS DE VAPOR DE BAJA POTENCIA.

En la industria azucarera, se utilizan turbinas de vapor para el movimiento de máquinas tales como: picadoras de caña, molinos, bombas de agua de alimentación para calderas, ventiladores de tiros inducidos en calderas y para generadores de electricidad de baja potencia. Dichos equipos deben de mantener una velocidad predeterminada. Para lograr esto, se utiliza un elemento de control llamado *gobernador de velocidad o regulador de velocidad*.

3.1 DEFINICIÓN DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD: un regulador es un dispositivo para el control automático o para la limitación de algún parámetro como presión, temperatura, voltaje, corriente, velocidad, etc.

Para nuestro caso, un regulador es aquel dispositivo que controla la velocidad en la máquina, independientemente de la carga a la que esté trabajando dicha máquina, y se hace el control en función del suministro de combustible, que para nuestro caso es *Vapor de agua*.

Normalmente se dice que un regulador de velocidad debe incluir al menos dos componentes, que son: un elemento sensor de velocidad y un dispositivo actuador para operar la válvula de regulación.

3.2 OBJETIVO DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD: el objetivo de los reguladores de velocidad es mantener constante la velocidad prefijada en la turbina. Para lograr esto, abre o cierra el paso de vapor, siempre que disminuya o aumente la carga o potencia requerida, de tal manera que la turbina siempre gira a velocidad constante.

3.3 TIPOS DE REGULADORES: un regulador puede ser razonablemente simple, sin embargo, cuando los requerimientos de la máquina que se va a gobernar comienzan a ser más complejos y estrictos (por ejemplo: turbinas de generadores de electricidad mayores de 1500 Kw), un sistema de regulación puede llegar a ser muy complicado. Es ahí donde ha surgido la necesidad de crear sistemas cada vez más complicados para realizar ese trabajo.

Tomando en cuenta lo anterior, los reguladores de velocidad se han dividido según su sistema de trabajo, estos son: *mecánicos, hidráulicos, mecánico-hidráulicos y electrónicos*.

3.3.1 REGULADORES MECÁNICOS: los reguladores mecánicos utilizan el principio llamado *regulador de Watt o de pesos centrífugos*; éste es el elemento sensor preferido por su sensibilidad, robustez y utilidad de salida. Probablemente es el mecanismo más antiguo y uno de los dispositivos más simples para sentir la velocidad, y como se describe a continuación, depende para su operación de una fuerza que contrarreste a la gravedad, y que fuerce a una masa a seguir un patrón de fuerza circular.

En la figura 3.1, se muestra el regulador de Watt en su forma más conocida. La cabeza de bolas consiste en un par de pesos generalmente esféricos en los extremos de dos brazos pivoteados cerca del eje de rotación, de manera que dichos pesos se puedan mover radialmente. Se colocan los eslabones adicionales a los brazos y un collar que se desliza longitudinalmente al eje de rotación, para configurar un paralelograma, de manera que cuando los pesos se muevan hacia afuera, el collar se mueve hacia arriba.

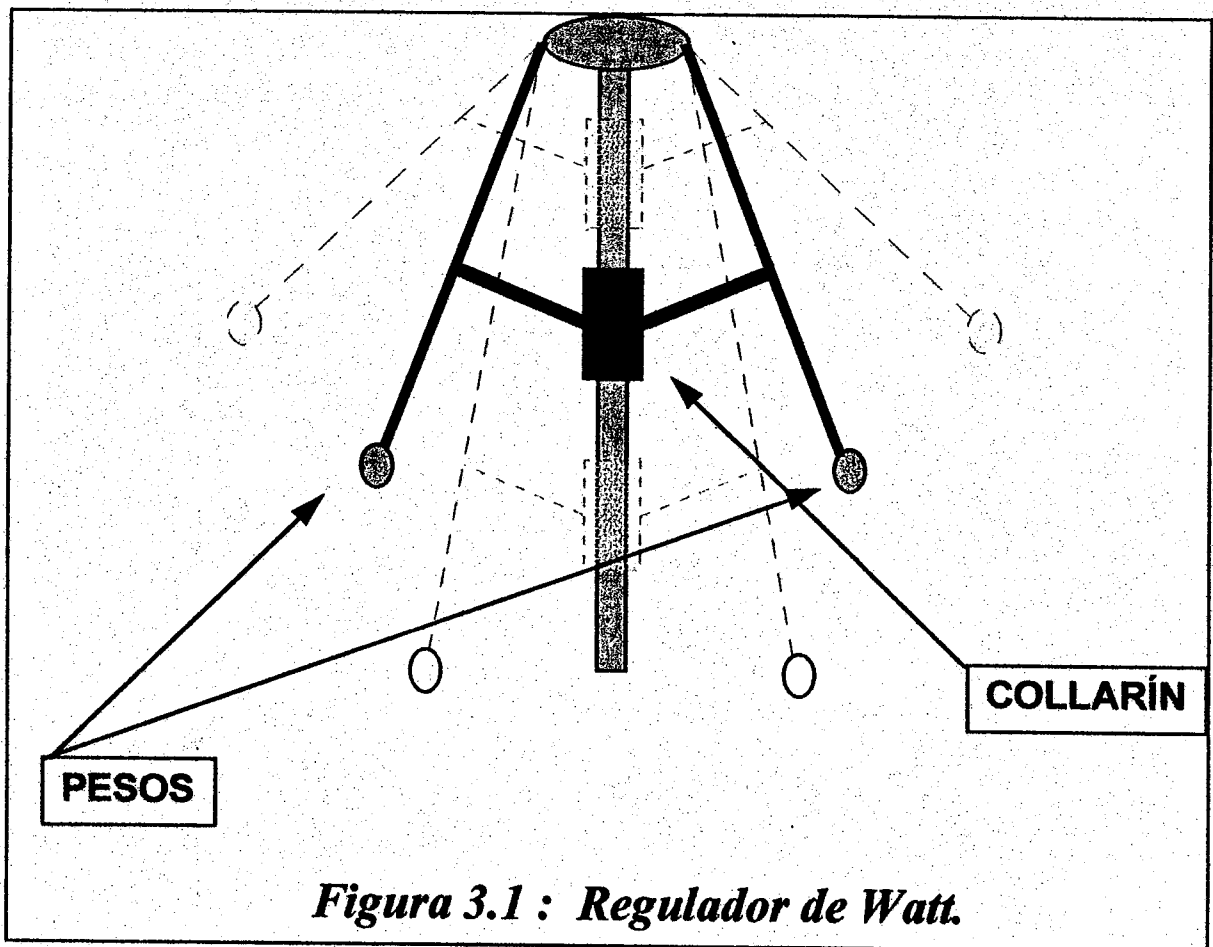


Figura 3.1 : Regulador de Watt.

Cuando la velocidad aumenta, la fuerza centrífuga se incrementa, y los pesos se mueven hacia afuera, y así disminuye el torque debido a la fuerza centrífuga y se incrementa debido a la fuerza de gravedad, hasta que el equilibrio se alcanza. Esto resulta en una posición única de equilibrio de los pesos y del collar para cada velocidad de rotación.

En la figura 3.2, se puede observar una turbina con un regulador mecánico acoplado directamente al eje de la turbina. Se pueden observar los contrapesos, y el collarín.

En este tipo de regulador⁽¹⁰⁾, la fuerza que contrarresta a la fuerza centrífuga es la fuerza que produce la tensión del resorte, el cual calibra el rango de operación del regulador. Al posicionar este resorte con menos tensión de la adecuada, la turbina mantendrá una velocidad relativamente baja, lo que quiere decir que la fuerza centrífuga de los contrapesos accionará el collarín a más baja velocidad, si el resorte se tensa más.

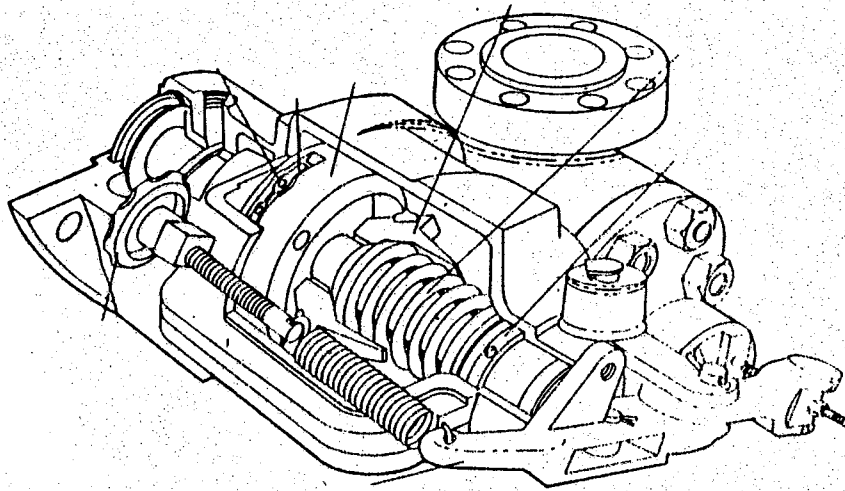


Figura 3.2 Regulador mecánico de una turbina turbodyne

El regulador funciona de acuerdo con el principio de la fuerza centrífuga que actúa sobre los contrapesos, y está opuesta a la compresión del resorte principal del regulador. El movimiento de los contrapesos es transmitido al eje del regulador por medio del collarín, el cual abre o cierra la entrada de vapor a la turbina por medio de la palanca del regulador.

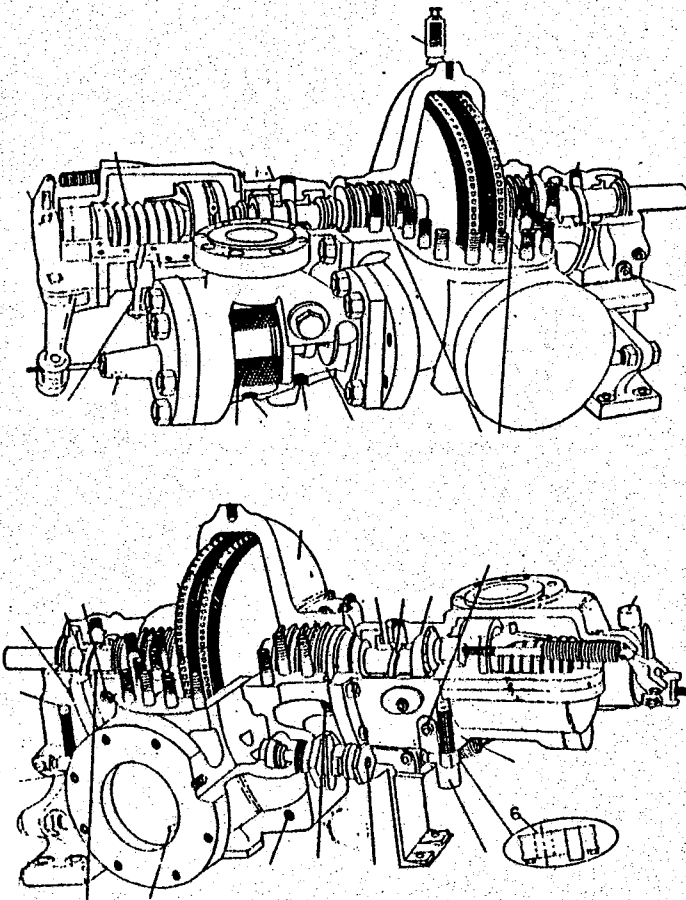


Figura 3.3 Turbina worthington con regulador mecánico

Una disminución de la carga subirá la velocidad de la turbina, lo cual provoca un incremento de la fuerza centrífuga sobre los contrapesos, y los mueve hacia afuera del eje. El movimiento de los contrapesos hace que el eje del regulador se desplace hacia afuera, y mueva la palanca, de tal manera que cierra la válvula de admisión de vapor de la turbina, y mantiene la velocidad de la turbina.

De manera similar, ocurre cuando la carga aumenta, lo que lleva a una disminución de la velocidad de la turbina; a una disminución de la fuerza centrífuga, el eje del regulador se desplaza hacia el centro de la turbina y abre la válvula de admisión de la misma.

Existe un rango de operación, el cual es dado por el resorte principal. Si se requiere cambiar este rango, hay que apretar o aflojar la tuerca que mantiene comprimido el resorte.

También existe un resorte que restringe el rango de velocidad de la turbina, que ajusta el movimiento del eje del regulador, de tal forma que la mantiene girando una velocidad fijada, la cual puede variar, si se comprime o se afloja dicho resorte.

En el Ingenio la Unión, actualmente existen en operación dos turbinas Worthington con regulador mecánico, y se utilizan cuando hay falla en el sistema eléctrico, para el movimiento de los ventiladores del tiro inducido de dos calderas de 120,000 lbs/hr. de vapor a 200 psig y 450 °F.T.T. cada una.

3.3.2 REGULADORES HIDRÁULICOS: estos reguladores son los que se utilizan en los grandes turbogeneradores. Básicamente su funcionamiento se basa en el principio de que una bomba hidráulica de desplazamiento positivo, que al variar su velocidad, varía su caudal, o sea, la cantidad de fluido que puede bombear, y a su vez la presión de descarga de la bomba.

Para su operación, el regulador depende de las variaciones de la presión de aceite producidas por los cambios de velocidad de la bomba de aceite, que por lo general está acoplada directamente al eje de la turbina.

Cuando se incrementa la carga, normalmente la velocidad del impulsor de la bomba disminuye y la presión de aceite también disminuye, de tal manera que el actuador del sistema, en este caso es un pistón hidráulico que abre la entrada de vapor de la turbina para admitir más vapor y mantener la velocidad de la misma.

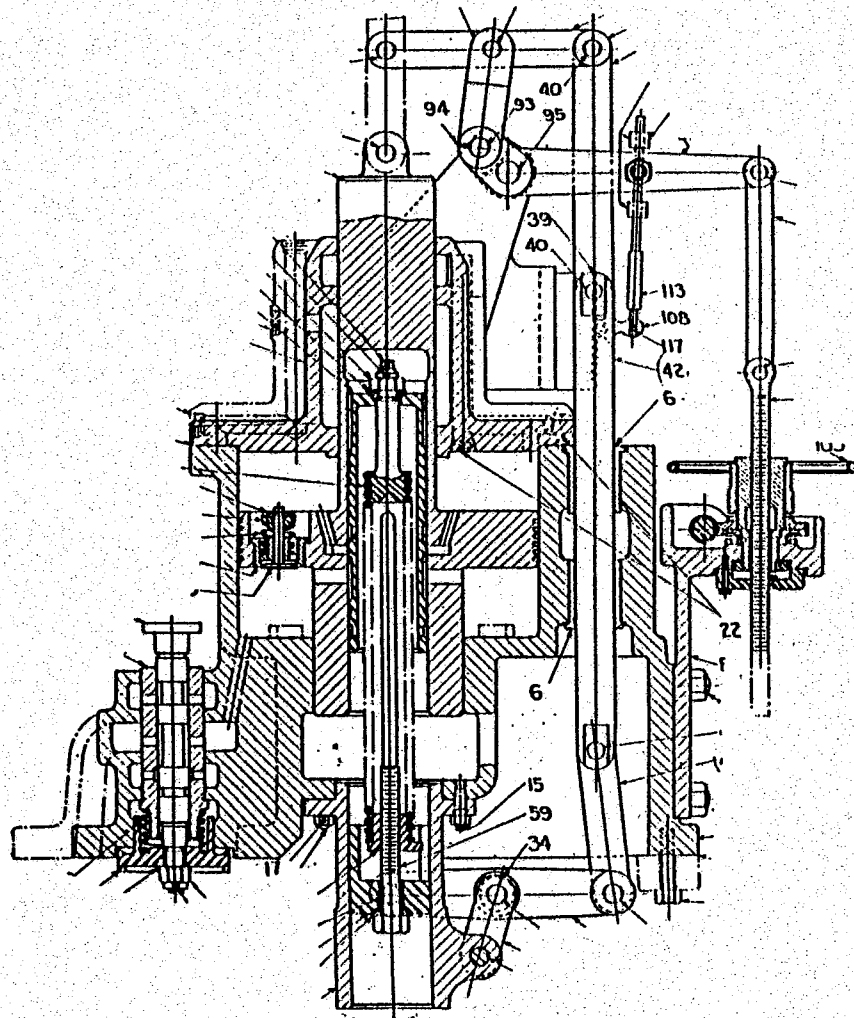


Figura 3.4: Vista seccionada de un regulador hidráulico.

Lo contrario ocurre cuando la carga disminuye, aumenta la velocidad de la bomba, aumenta también la presión para que el actuador cierre la entrada de vapor de la máquina.

En el Ingenio la Unión, existen tres turbogeneradores que cuentan con ese tipo de regulador, y son: un turbogenerador Westinghouse de 5 megavatios, que opera a una presión de 400 psig y a una temperatura de 650°F.T.T. Un turbogenerador Westinghouse de 7.5 megavatios, el cual opera a una presión de entrada de 600 psig y una temperatura de 750°F.T.T. El vapor de escape de estos dos turbos, que es alrededor de 18 psig y 240°F.T.T. se utiliza como energía calorífica en parte del proceso de elaboración del azúcar, específicamente en evaporar el jugo.

El otro turbogenerador, que se encuentra en etapa de construcción, es un turbogenerador condensing General Electric de 26 megavatios que opera a una presión de entrada de 850 psig con una temperatura de 900 °F.T.T., el cual trabajará en un Ciclo Rankine con extracción para calentamiento de agua de alimentación.

3.3.3 REGULADORES MECÁNICO-HIDRÁULICOS: estos reguladores utilizan como elemento sensor los contrapesos del regulador mecánico (principio del regulador de Watt), y como actuador un cilindro hidráulico. Como medio de comunicación entre el elemento sensor y el elemento actuador, se utiliza aceite hidráulico y un sistema hidráulico, es decir, bomba, válvulas, acumuladores, etc.

Los reguladores Woodward PG-PL son de este tipo. Por esa razón, no se profundizara mucho respecto de ellos, ya que en el siguiente capítulo se amplía mas este tema.

En los reguladores mecánico-hidráulicos, los puntos de contacto de los contrapesos (que forman ángulos rectos contra ellos), convierten el movimiento hacia adelante y hacia atrás de los contrapesos en un movimiento axial de una válvula piloto (una válvula direccional).

Este movimiento axial de la válvula piloto es realizado dentro de un buje rotativo, el cual forma parte íntegra de un grupo de contrapesos centrífugos. La válvula piloto sube o baja, depende si los contrapesos abren o cierran, y descubre los puertos de control en el buje rotativo. Es en estos puertos de control donde se dirige el flujo de aceite hacia cualquiera de las dos entradas del actuador, tanto para abrir como para cerrar la válvula de admisión de vapor de la turbina.

3.3.4 REGULADORES ELECTRÓNICOS: los reguladores electrónicos utilizan un captador magnético como sensor de la velocidad, un control de velocidad que recibe la señal de la velocidad procedente del captador magnético, la compara con una señal de referencia, y genera una señal de control la cual envía al actuador, que recibe la señal procedente del control, y sitúa su propio eje de salida de acuerdo con esta señal.

En el eje de la turbina, por lo general en el lado de la entrada de vapor, se coloca un engranaje (que debe de ser fabricado de un material que reaccione al campo magnético), en donde se acerca el sensor magnético, y se ajusta a una distancia entre 0.010" a 0.040" (0.25 a 1.0 mm).

Este sensor mide la frecuencia con que pasan cerca de él los dientes del engranaje.

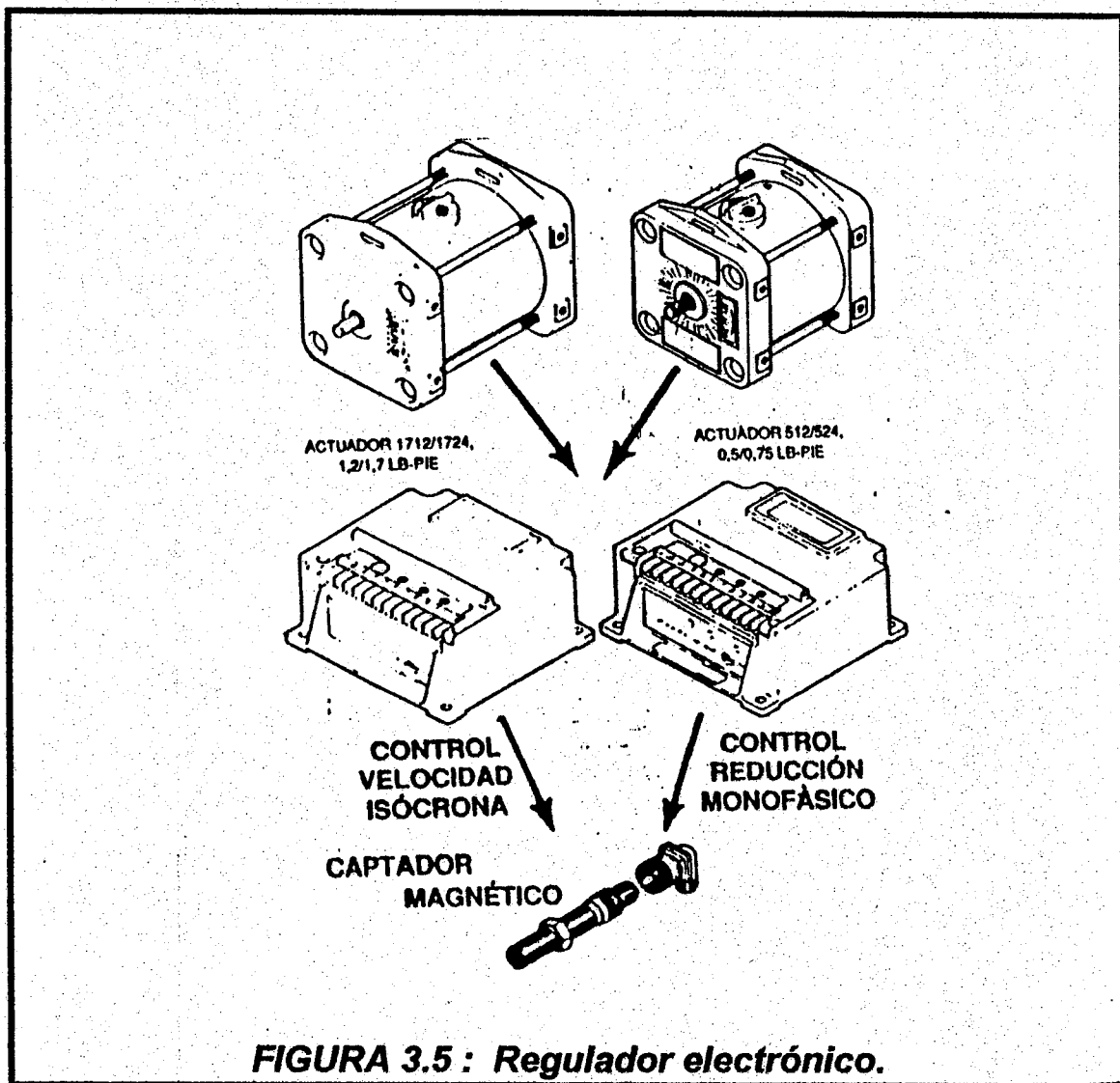


FIGURA 3.5 : Regulador electrónico.

La unidad de control se puede colocar en un lugar remoto, preferiblemente en una área con acondicionamiento del aire. Cuando está operando, él compara la señal que le llega del sensor con la velocidad prefijada. Luego, calcula una señal de error y manda una señal al actuador en dirección del aumento o disminución del flujo de vapor para corregir la velocidad.

El actuador se coloca, por lo general, sobre la válvula de admisión de vapor, de tal forma, que pueda accionarla mecánicamente.

3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS: es difícil describir las ventajas y desventajas entre cada uno de los reguladores, ya que su utilización depende en gran medida del equipo por gobernar que éste mueve.

Si la máquina que va a mover la turbina, no requiere mantener una velocidad que sea independiente de la carga, tal como se usa en el ingenio la Unión para mover un ventilador de un tiro inducido en una caldera, se recomienda utilizar una turbina que tenga un regulador mecánico.

Por lo general, es el fabricante de la turbina el que selecciona el tipo de regulador que le suministrará con el equipo.

3.5 BENEFICIOS AL PROCESO: un regulador de velocidad en las turbinas de vapor nos permiten poder tener variaciones de velocidad en las máquinas conducidas, lo que hace que el proceso se mantenga con menos fluctuaciones de demandas de vapor, flujos de bagazo y de jugo, que en determinado momento pueden afectar la continuidad del mismo.

Si se observa las picadoras de caña, éstas tienen una gran variación de carga debido a la alimentación de caña en las mesas. Si las picadoras de caña son accionadas por turbinas de vapor, éstas producen una gran variación de la demanda de vapor hacia las calderas, y provocan inestabilidad en el proceso, y si se observa el regulador de éstas turbinas, estará en todo momento corrigiendo la velocidad de la turbina, que provoca desgaste de sus partes y aumenta la probabilidad de falla del regulador de velocidad y causa paros en el proceso.

Si la alimentación de caña hacia los conductores se puede controlar, de tal forma que las turbinas no tengan mucha variación de la demanda de vapor, el proceso se puede estabilizar. Esto se puede lograr haciendo modificaciones al equipo del patio de caña (colocar troceadoras de caña en las mesas de caña, colocar niveladores prepicadores de caña antes de la primera picadora). Estas mejoras también pueden mejorar el desempeño de

los motores eléctricos que están instalados en las picadoras de caña (véase capítulo 2, sección 2.2.1).

3.6 POSIBILIDAD DE AUTOMATIZACIÓN: en los molinos, un regulador que tenga disposición de poder realizar incrementos o disminuciones de velocidad a control remoto, puede ser de gran ayuda para lograr automatizar los molinos.

Si la carga de los molinos aumenta, es decir, si la cantidad de caña que se acumula en la entrada (chute) del molino aumenta, y la velocidad del molino no aumenta proporcionalmente a dicha carga, el molino puede, en determinado momento obstruirse de caña, provocar un paro o dañar cualquier parte del molino. También si la carga del molino aumenta o disminuye, en la turbina va a aumentar o disminuir el consumo de vapor, que da como resultado demandas de vapor con gran variación en calderas, y en los evaporadores que utilizan el escape de las turbinas para evaporar el jugo de la caña.

Para poder corregir esto, se pueden instalar sensores de altura de caña en el Chute del molino, y por medio de un controlador retroalimentado se puede corregir la velocidad de la turbina, que actúa sobre el sistema remoto del regulador de velocidad de la turbina. También, si se puede medir exactamente la demanda de vapor de la turbina, (que está en función de la potencia requerida a la turbina) en lugar de instalar sensores de altura en los chutes, se podría controlar la velocidad de la misma.

CAPÍTULO 4. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL REGULADOR WOODWARD TIPO PGPL.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL REGULADOR WOODWARD TIPO PGPL⁽¹⁾: este regulador se comenzó a utilizar en compresores y estaciones de bombeo de gasoductos (de ahí su nombre, que viene del inglés *Pressure Compensated governor-pipe line*), pero debido a su flexibilidad, operación *Isócrona* (es decir, mantiene la velocidad constante de la turbina indiferentemente de la carga) , tuvo gran aceptación en todos los tipos de turbinas de vapor, gas, etc.

Los componentes básicos del regulador PG-PL son :

1. Una bomba hidráulica, una área de almacenamiento de aceite a presión y una válvula de alivio para limitar la máxima presión, la cual no debe pasar las 100 libras sobre pulgada cuadrada (psi).
2. Un ensamble de contrapesos centrífugos, una válvula piloto que regula el flujo hidráulico de y hacia el pistón de fuerza.
3. Un pistón de fuerza (algunas veces llamado servomotor), que posiciona la válvula de admisión de vapor de la turbina.
4. Un sistema de compensación para la estabilidad del sistema.
5. Un mecanismo de ajuste neumático de la velocidad.

La presión normal de aceite es de 100 psi. Se puede aumentar graduándose la válvula alivio hasta una presión máxima de 200 psi para aumentar la capacidad del servomotor.

El rango normal de velocidad del regulador es de 250 a 1000 rpm, aunque se permiten rangos que van desde 200 hasta 1600 rpm y se ajustan los tornillos mostrados como tornillos de ajuste de velocidad que se muestran en las figuras 4.1 y 4.2.

El mecanismo de ajuste de velocidad neumático controla a velocidad determinada por cada unidad de presión en la señal de aire. Normalmente el rango de operación en la señal de aire es de 3 a 15 psi.

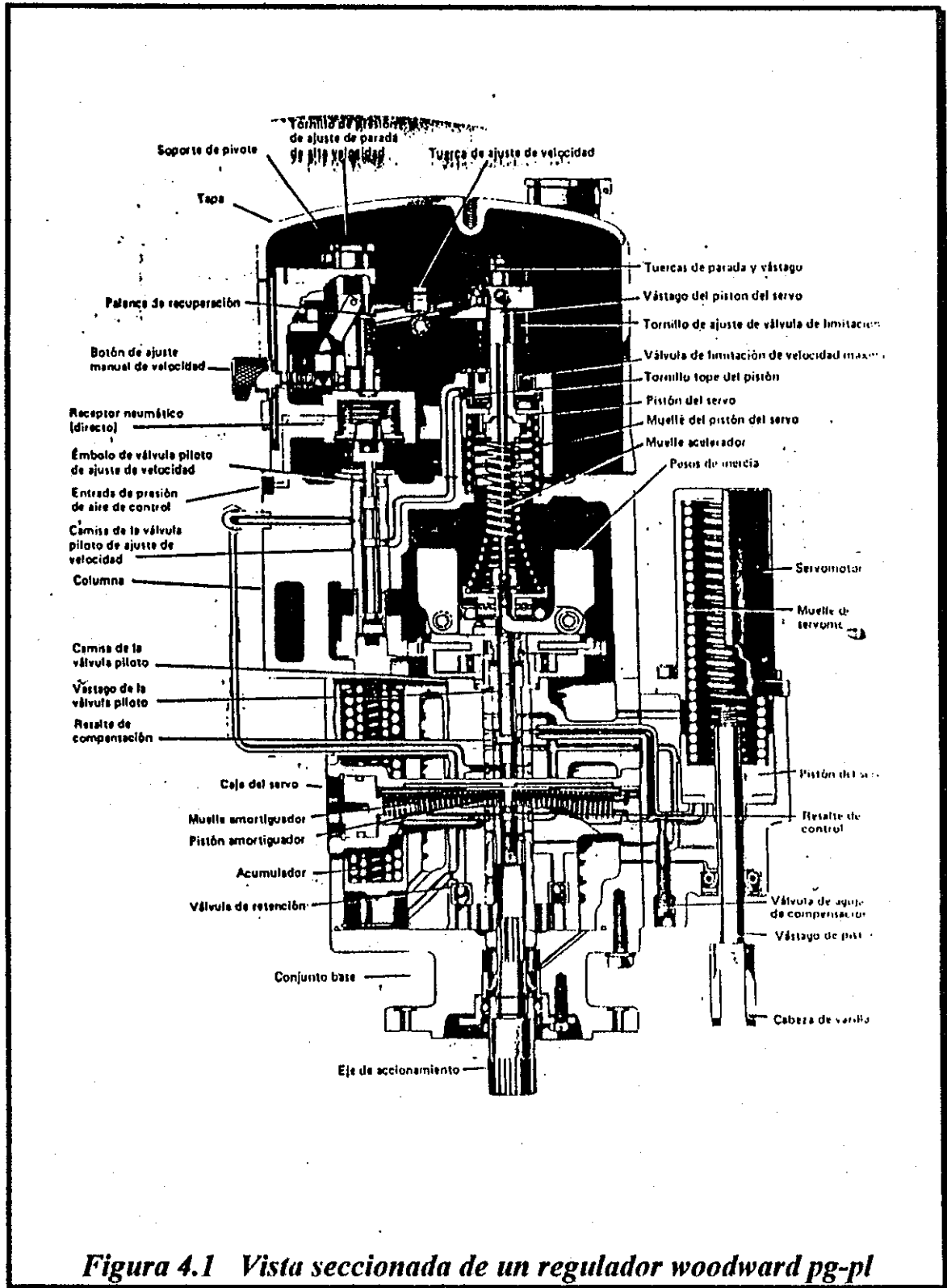


Figura 4.1 Vista seccionada de un regulador woodward pg-pl

4.2 FUNCIONAMIENTO: en la figura 4.2, se puede apreciar una vista esquematizada en donde se ilustran las partes principales del regulador y del mecanismo de ajuste de velocidad que se utilizan para la regulación de la admisión de vapor.

Su funcionamiento es el siguiente:

1. La bomba suministra aceite con presión de 100 psi al buje rotativo de la válvula piloto, al buje de la válvula de ajuste de velocidad, y a los acumuladores. El exceso de aceite sale por la válvula de alivio hacia el tanque de aceite. La bomba trae un sistema de válvulas de retención (cheques), el cual hace posible que pueda bombear cuando el regulador gira en cualquier sentido.
2. Cuando se realiza un ajuste de la velocidad (ya sea por medios mecánicos o por control remoto por medio de una señal de aire), se produce un movimiento en el émbolo de la válvula de ajuste de velocidad, y da como resultado un incremento o disminución en la presión de aceite de control en el pistón de ajuste de velocidad. Al momento de realizar el ajuste de velocidad, una palanca de recuperación, que conecta a la válvula con el pistón del mecanismo de ajuste de velocidad, vuelve a situar al émbolo a la posición neutra, y produce un cierre en el flujo de aceite entre la bomba y el pistón de ajuste para mantener una presión de control. Este movimiento mantiene la compresión del resorte acelerador del regulador, aumentando o disminuyendo la fuerza del resorte que la fuerza centrífuga tiene que vencer para mantener el sistema en equilibrio.
3. El eje de accionamiento del regulador mueve el engranaje motriz de la bomba, el buje rotativo de la válvula piloto, el cabezal de los pesos centrífugos que está fijo al buje rotativo, y el pistón de ajuste de velocidad.
4. El émbolo de la válvula piloto se mueve hacia arriba si la fuerza centrífuga es la mayor, o se mueve para abajo si la fuerza del resorte es la mayor. Cuando se equilibran las fuerzas, el émbolo queda inmóvil, y se controla el flujo de aceite hacia el cilindro de potencia (el que acciona la válvula de admisión de vapor en la turbina). Cualquier cambio de las dos fuerzas mueve el émbolo de su posición neutra. El émbolo baja si ocurre cualquiera de estas dos situaciones: aumenta la carga a la turbina (por lo que disminuye la velocidad de

la turbina y del regulador), y disminuye la fuerza centrífuga de los pesos, o si aumenta la fuerza del resorte acelerador para elevar la velocidad de la turbina, por medio de un incremento de velocidad. Asimismo el émbolo sube si: disminuye la carga de la turbina (aumentando la velocidad tanto de la turbina y del regulador), y aumenta la fuerza centrífuga de los pesos, o si disminuye la fuerza del resorte acelerador por bajar la velocidad de la turbina.

El cabezal de pesos centrífugos tiene un cojinete de empuje que permite que el buje de la válvula piloto gire, mientras que el émbolo no gira, y así mantener un menor rozamiento entre las partes de la máquina

5. Entre la camisa de la válvula piloto y el servo pistón de potencia, se encuentra el sistema de compensación que se compone de un cilindro con su pistón y sus resortes de amortiguación, y una válvula compensatoria.

Cuando el émbolo de la válvula piloto baja, permite un flujo de aceite a presión hacia el sistema de compensación y hacia el servo pistón de potencia, y abre la entrada de vapor a la turbina. Cuando sube hace que el flujo de aceite del servo pistón y del sistema amortiguador vaya al tanque de aceite del regulador, y provoca que el resorte del servo cierre la admisión de vapor de la turbina.

Ese flujo de aceite en el sistema de compensación mueve el pistón amortiguador en el sentido del flujo, y comprime uno de los resortes amortiguadores y suelta el otro. Esta acción provoca una pequeña diferencia de presión de aceite en los lados opuestos del pistón. Estas presiones diferenciales se transmiten a los espacios que se encuentran por arriba y por abajo del resalte de compensación que tiene el émbolo de la válvula piloto, y produce una fuerza hacia arriba o hacia abajo en el resalte que ayuda al émbolo de la válvula piloto que va a centrarse, siempre que se corrija la alimentación de vapor en la turbina.

4.2.1 AUMENTO DE LA VELOCIDAD DE LA TURBINA. Para poder realizar esto el regulador sigue los siguientes pasos:

1. Se mueve la perilla de ajuste manual en el sentido de las agujas del reloj.
2. Esto le provoca un movimiento hacia abajo al émbolo de la válvula piloto.
3. El aceite fluye hacia la parte superior del pistón de ajuste de velocidad, lo empuja hacia abajo y comprime el resorte acelerador.
4. Al bajar el pistón de ajuste de velocidad, la válvula piloto vuelve a su posición centrada por la acción de la palanca de recuperación.
5. A medida que se incrementa el ajuste de velocidad, también se incrementa la compresión del resorte acelerador, lo que hace que los contrapesos se cierren y simultáneamente baje el émbolo de la válvula piloto, se abra el puerto de control admitiendo aceite en el sistema amortiguador, mueva el pistón hacia la derecha y haga subir el servo pistón a la posición de aumento de vapor.
6. Simultáneamente con el movimiento del servo y del pistón amortiguador, se produce una fuerza hacia arriba en el resalte de la válvula piloto principal, que se equilibra con la fuerza del resorte de velocidad, y hace que los contrapesos recuperen su posición vertical normal.
7. La igualación de las presiones en el sistema amortiguador permite que los amortiguadores se posicionen al centro de su cilindro.

4.2.2 DISMINUCIÓN DE VELOCIDAD DE LA TURBINA. Se realizan casi todos los pasos anteriores, sólo que en forma contraria.

4.3 UTILIZACIÓN DEL SISTEMA DE OPERACIÓN A CONTROL REMOTO. Se utiliza por lo general cuando se requiere aumentar o disminuir la velocidad de la turbina de manera remota. Por lo general, se realiza desde un panel de control central. Utiliza aire comprimido entre 3 y 15 psi.

Cuando se requiere que la turbina gire a su mínima velocidad, se regula la presión del aire a 3 psi. Cuando se requiere que gire a más velocidad, se aumenta la presión del aire dentro del rango permisible del regulador. En el capítulo, 6 se da una mayor explicación de cómo se realizan los ajustes y calibraciones para el control remoto.

CAPÍTULO 5. LUBRICACIÓN

Este capítulo es una guía para mejorar la selección de aceites usados en los reguladores de velocidad Woodward.

La finalidad de un lubricante es la de reducir la fricción y minimizar el desgaste, separando las superficies lubricadas con una película de aceite y sin imponer una resistencia viscosa innecesaria.

5.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES: las características y propiedades principales que se deben considerar en un aceite son : viscosidad, punto de inflamación y de combustión, punto de fluidez y la estabilidad térmica.

5.1.1 VISCOSIDAD: es probablemente la característica más significativa de un aceite lubricante derivado del petróleo. La viscosidad es una medida de la resistencia de un medio a fluir. Disminuye cuando la temperatura crece y aumenta con grandes aumentos de presión.

La viscosidad se mide de dos maneras: viscosidad cinemática y viscosidad absoluta o dinámica.

La *viscosidad cinemática* se mide por el tiempo que tarda un volumen fijo de aceite para fluir por un tubo capilar. Sus unidades más conocidas son el *Centiestokes (cSt)* y los *Segundos Saybolt Universales (SSU)*.

La *viscosidad absoluta* es la medida de la fuerza tangencial que se requiere para someter un plano paralelo de fluido a un esfuerzo de corte, y se desplaza sobre otro plano paralelo al fluido.

Esta viscosidad, por lo general, se mide en un viscosímetro rotativo. La unidad de medida es el *Centipoise (Cp)*.

La relación que existe entre la viscosidad cinemática y la absoluta es la siguiente:

$$\text{VISCOSIDAD CINEMÁTICA} = \frac{\text{VISCOSIDAD ABSOLUTA}}{\text{DENSIDAD}}$$

EC. 4.1

Independiente del tipo de medición de la viscosidad, hay que indicar las temperaturas de ensayo; éstas son las más comúnmente usadas para las viscosidades cinemáticas: 40° C y 100°C.

Los cambios de viscosidad con las variaciones de la temperatura y el grado de alteración son indicados por el *Índice de viscosidad (I.V.)* .

Cuanto más alto sea el *I.V.*, menor será el cambio de fluidez con las variaciones de la temperatura.

5.1.2 PUNTO DE INFLAMACIÓN Y DE COMBUSTIÓN: el punto de inflamación es aquella temperatura a la cual los vapores que emanan del aceite, que ha sido calentado en forma gradual, enciendan inmediatamente al aplicarles una llama.

El punto de combustión es aquella temperatura un poco mayor que la anterior en la que los vapores se incendiarán y sostengan una combustión continuada. Mientras más alta sea la viscosidad, más altos son los puntos de inflamabilidad y de combustión.

5.1.3 PUNTO DE FLUIDEZ: es la temperatura más baja a la que el aceite puede fluir e indica la fluidez que se puede esperar del aceite, cuando se trabaja en condiciones de temperaturas muy bajas. Mientras más baja sea la viscosidad, más bajo será el punto de fluidez.

5.1.4 ESTABILIDAD TÉRMICA: los cambios de viscosidad en los aceites suelen ocurrir cuando las máquinas trabajan durante tiempos largos de operación a altas temperaturas, que hace que el aceite se adelgace, se oxide y se evapore.

Un aceite que se va usar en un regulador de velocidad, el cual trabaja continuamente durante 24 horas, los 7 días de la semana, en 6 meses del año, va a estar sometido a este tipo de trabajo, y debe de ser estable térmicamente; es decir, que no pierda sus propiedades y características (viscosidad, punto de fluidez, no se oxide y ni se evapore).

5.2 ADITIVOS: los aditivos son aquellos materiales añadidos a un lubricante para impartir o poner de relieve propiedades deseables, o para eliminar o reducir al mínimo las propiedades dañinas.

Pueden estar agrupados en tres zonas funcionales principales: *los protectores de las superficies lubricadas, los que mejoran el desempeño del lubricante y los que protegen al mismo lubricante.*

5.2.1 ADITIVOS PROTECTORES DE LAS SUPERFICIES LUBRICADAS: entre ellos tenemos a los antidesgaste, inhibidores de la corrosión y a los inhibidores de la herrumbre.

5.2.1.1 ADITIVOS ANTIDESGASTE: una de las principales funciones de un lubricante es reducir el desgaste, el cual es el resultado de la

corrosión y la abrasión causada por partículas de sólidos y del contacto de metal con metal.

El desgaste debido al contacto de metal con metal o a la abrasión, se evita normalmente mediante la lubricación hidrodinámica con una película de aceite suficientemente espesa para mantener separadas las piezas en movimiento. La carga elevada, baja velocidad y baja viscosidad del lubricante reducen el espesor de la película a un estado llamado "*lubricación al límite*", en el cual la película se puede romper, y provocar el contacto metal con metal.

Los aditivos antidesgaste impiden el contacto metal con metal, entre las piezas al formar un recubrimiento que cede bajo la tensión de deslizamiento impuesto durante la lubricación de capa límite. El calor procedente de la fricción entre las superficies proporciona energía para la reacción química entre el aditivo y las superficies metálicas que dan como resultado el recubrimiento protector.

5.2.1.2 ADITIVO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN: estos se añaden a los lubricantes para protegerlos contra el ataque químico de las superficies de metal. Funcionan al reaccionar químicamente con los componentes metálicos no ferrosos (cojinetes antifricción de Babbit, Bronce, etc.), para formar una película protectora resistente a la corrosión.

5.2.1.3 ADITIVO INHIBIDOR DE LA HERRUMBRE: aunque la formación de herrumbre es una forma de oxidación, se considera aparte, porque la inhibición de la herrumbre está dedicada principalmente a la protección del equipo mismo, que a impedir la oxidación del lubricante.

La humedad causada por las condiciones de funcionamiento de las máquinas (casi en cualquier caja que encierra un mecanismo, se producen condensaciones como resultado de la ventilación), puede estar presente como agua libre o como agua atrapada dentro del lubricante. Los inhibidores de herrumbre impiden que el agua penetre en la película protectora de aceite. Esto se logra mejorando la capacidad para adherirse tenazmente a las superficies metálicas trabajadas a máquina, o si la cantidad de humedad es pequeña, y emulsiona la humedad en forma que no se ponga en contacto con las superficies metálicas.

5.2.2 ADITIVOS MEJORADORES DEL DESEMPEÑO DEL LUBRICANTE. Entre ellos, están los *reductores del punto de fluidez*, *desmulsionantes* y los *mejoradores del índice de viscosidad*.

5.2.2.1 REDUCTORES DEL PUNTO DE FLUIDEZ: estos productos se agregan a los aceites para obligarlos a mantener su fluidez a temperaturas más bajas de las que podrían fluir con el aceite base únicamente. Estos aditivos retardan o cambian la acción tendente a la formación de cristales de cera en temperaturas bajas, de manera que no interfieran con la fluidez del aceite.

5.2.2.2 ADITIVO DEMULSIONANTE: la emulsificación es indeseable en estos casos, ya que la máquina puede oxidarse debido al agua que puede tener el aceite cuando se está contaminado. Este aditivo afloja y separa las emulsiones estables que se han producido en el aceite, por medio de jabones de metales pesados o sulfonatos de tierra alcalina que antagonizan la formación de emulsión en el sistema.

5.2.2.3 MEJORADORES DEL ÍNDICE DE VISCOSIDAD: los mejoradores de índice de viscosidad se agregan a los aceites para mejorar la relación viscosidad-temperatura, o sea, para obtener el cambio mínimo posible de la viscosidad dentro de los límites de temperatura esperados durante de operación.

5.2.3 ADITIVOS PROTECTORES DEL LUBRICANTE. Entre ellos, están los *antioxidantes*, los *antiespumantes* y los *desactivadores metálicos*.

5.2.3.1 ADITIVOS ANTIOXIDANTES: los aditivos antioxidantes, llamados con frecuencia inhibidores son usados ampliamente para reforzar las características de los aceites para turbinas de vapor, reguladores de velocidad, sistemas hidráulicos y los que se emplean en sistemas circulatorios, con el fin de impedir la oxidación si hay condiciones oxidantes en el correspondiente sistema. Entre sus funciones, están: dar fin a las reacciones de oxidación del aceite mediante la formación de compuestos inactivos o tomando el oxígeno.

5.2.3.2 ADITIVOS ANTIESPUMANTES: estos aditivos son de gran utilidad para los aceites de turbina y aquellos que se emplean en sistemas circulatorios, para impedir a la formación de espuma cuando son agitados con la presencia de aire; los depresores de aceite ayudan también a la extinción de la espuma cuando ésta ha llegado a formarse.

5.2.3.3 DESACTIVADORES METÁLICOS. Metales como el hierro, estaño y cobre catalizan la oxidación; para impedir que se realicen estas reacciones, se utilizan los desactivadores metálicos, que forman un recubrimiento sobre los catalizadores metálicos. Los aditivos inhibidores de la corrosión y de la herrumbre funcionan también como desactivadores metálicos, debido a su capacidad para formar una capa de recubrimiento sobre la superficie metálica.

5.3 ESPECIFICACIONES DEL ACEITE QUE SE VA A UTILIZAR: los siguientes factores son los que hay que considerar en la selección del aceite para la correcta operación del regulador de velocidad Woodward:

5.3.1 VISCOSIDAD: en los reguladores, un cambio de viscosidad puede afectar seriamente el funcionamiento del mismo. Si el aceite es demasiado delgado, el regulador puede volverse inestable. Si el aceite es demasiado grueso, el regulador no responderá a los cambios de velocidad de la turbina, y volverse lento e insensible. Cuanto más alto sea el índice de viscosidad, menos afectará la temperatura sobre los cambios de viscosidad.

Para este tipo de máquina, el rango de viscosidad debe estar entre 50 a 3000 SSU, con una viscosidad nominal de 300 SSU en la temperatura de trabajo de la máquina.

5.3.2 PUNTO DE FLUIDEZ: en el ambiente tropical en que se desenvuelve la industria azucarera, este factor no es de importancia, sin embargo, no está de más decir que se recomienda que el aceite tenga un punto de fluidez que se encuentre entre 15°F a 20°F debajo de la temperatura más fría de arranque del regulador de velocidad.

5.3.3 ESTABILIDAD TÉRMICA: se debe seleccionar un aceite con alta estabilidad térmica, debido a la alta temperatura de operación del regulador; en los lugares en donde existe gran variación de temperaturas ambientales, sobre todo, se recomienda un aceite multigrado, para mantener una adecuada viscosidad durante la operación.

5.3.4 INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN Y DE LA HERRUMBRE: este es otro factor que hay que considerar en la selección del lubricante para la adecuada operación del regulador. La corrosión causa

un problema particular, debido a que el aceite puede estar contaminado con humedad.

5.3.5 COMPATIBILIDAD CON SELLOS: el aceite que se va utilizar debe ser compatible con los materiales de que están hechos los sellos.

5.3.6 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN: cuando se somete a suficiente agitación, todos los aceites atrapan aire produciendo espuma, que hace que el aceite reduzca su eficiencia como lubricante, así como su efecto refrigerante y su comportamiento de fluido hidráulico.

VISCOSIDADES				
CENTISTOKES (Cs)	SEGUNDOS SAYBOLT UNIVERSALES A 38°C (SSU)	GRADOS AGMA	SAE GEAR APROXIMADO	ISO
15	80	-		15
22	106	-		22
32	151	-	75	32
46	214	1	75	46
68	310	2	80	68
100	463	3	80	100
150	696	4	85	150
220	1020	5	90	220
320	1483	6	115	320
460	2133	7 EP	140	460

Tabla 5.1: comparativo de viscosidades.

Para eliminar la espuma, hay que agregar aditivos con una baja tensión superficial y baja solubilidad en el lubricante, que disminuirá y romperá la película de lubricante que circunda a las burbujas de aire.

Existen dos factores esenciales para la adecuada selección del aceite. El primero es el rango de viscosidad y el segundo la temperatura de operación del ambiente donde estará trabajando el regulador.

El rango de viscosidad recomendado para la operación del regulador es de 250 a 350 SSU en condiciones normales de operación.

La tabla 5.1 muestra las equivalencias entre viscosidades.

5.4 INTERVALOS DE CAMBIO DE ACEITE: el mejor tiempo para realizar el cambio de aceite es difícil de determinar. Por supuesto, que el mejor tiempo para realizar el cambio es justo antes que se dañe el aceite y que ocurra daño en el equipo.

La mejor forma de determinar cuándo hay que cambiar un aceite, es por medio de su análisis, para el cuál existen varias compañías petroleras en Guatemala que pueden realizar dichos análisis. Esto sin embargo,

resulta antieconómico, ya que el costo del análisis es mucho más elevado que el valor del aceite que se utiliza en el regulador.

En el momento de observar contaminantes dentro del aceite del regulador, hay que proceder a cambiarlos lo antes posible, ya que las partículas de polvo o de agua en el aceite son los principales causantes de fallas en los reguladores, como en cualquier sistema hidráulico.

La presencia de lodos, barnices, sedimentos o suciedad en el filtro es un buen indicador de que el aceite necesita ser cambiado.

Una concentración de barniz en el aceite es un indicador de que el regulador está operando a temperaturas que exceden la capacidad del aceite, esto se puede solucionar utilizando un aceite con buenas características térmicas o instalando un intercambiador de calor (enfriador de aceite). La formación de lodos, que es lo opuesto a la concentración de barniz, se puede controlar aumentando la temperatura de operación, incrementando la frecuencia del cambio de aceite, o utilizando un aceite con buena resistencia a la formación de lodos.

Existen ciertos criterios para realizar el cambio de aceite, los cuales se presentan a continuación:

- a.* La apariencia del aceite es bastante diferente de cuando es nuevo. (Tener cuidado, ya que algunos aceites tienden a cambiar de apariencia cuando tienen cierto tiempo de uso).
- b.* El aceite se siente arenoso.
- c.* El olor del aceite es diferente de cuando es nuevo (algunos aceites pueden oler diferente después de cierto uso).
- d.* Cualquier contaminación visible de agua o cualquier otro contaminante incompatible con el aceite.
- e.* Cualquier cambio de viscosidad, ya sea, que aumente o disminuya su viscosidad.
- f.* Cuando al desarmar el regulador se observe excesivo desgaste de las piezas.
- g.* Cuando se ha operado el regulador a temperaturas que exceden el límite del aceite.
- h.* Cuando se sospecha que el aceite contribuye a la inestabilidad del regulador.

5.5 FILTROS. Alrededor de un 80% de los problemas que suceden en un regulador hidráulico, son causados por contaminación en el aceite.

Las partículas de suciedad siempre van a existir, pero con una adecuada filtración se logra mantener un control efectivo sobre la contaminación.

CAPÍTULO 6. MANTENIMIENTO

6.1 INSTALACIÓN. A continuación, se presenta un listado que de preferencia se debe seguir para proceder a realizar una correcta instalación y puesta a punto del regulador.

1. Obsérvese la figura 6.1 para conocer las dimensiones físicas completas del regulador y tomarlas en cuenta para tener el espacio libre necesario para la instalación, desmontaje y mantenimiento.
2. No golpear el eje motriz. Apoyarlo sobre su eje, lo podría dañar así como a otros elementos tales como el cojinete central o los engranajes de la bomba de aceite.
3. Realizar el montaje de tal manera que el eje del regulador quede a 90° respecto al eje de la turbina, y que esté alineado correctamente con la conexión de la turbina.,
4. Si el regulador viene con el eje estriado, se debe deslizar libremente en las estrías interiores del acoplamiento de la turbina.

6.2 CALIBRACIONES: existen varias ajustes que se deben de realizar cuando se ha de calibrar un regulador. Entre ellos tenemos: *el ajuste del varillaje, el ajuste de la válvula de compensación y los ajustes para la señal neumática.*

6.2.1 AJUSTES DEL VARILLAJE: éste se debe de realizar con el fin de tener un control adecuado en la alimentación de vapor a la turbina.

Hay que eliminar toda fricción innecesaria del varillaje, es decir, que debe de quedar libertad entre las rótulas (uniones móviles) para que se muevan, pero no deben quedar muy flojos, ya que eso hace que sea irregular el suministro de vapor a la turbina.

Cuando se instala el varillaje, hay que tener cuidado de que cuando el servo pistón del regulador esté al final de su carrera, cierre completamente la válvula de admisión de vapor de la turbina, dado que si no se cierra completamente, provocaría un embalamiento de la turbina.

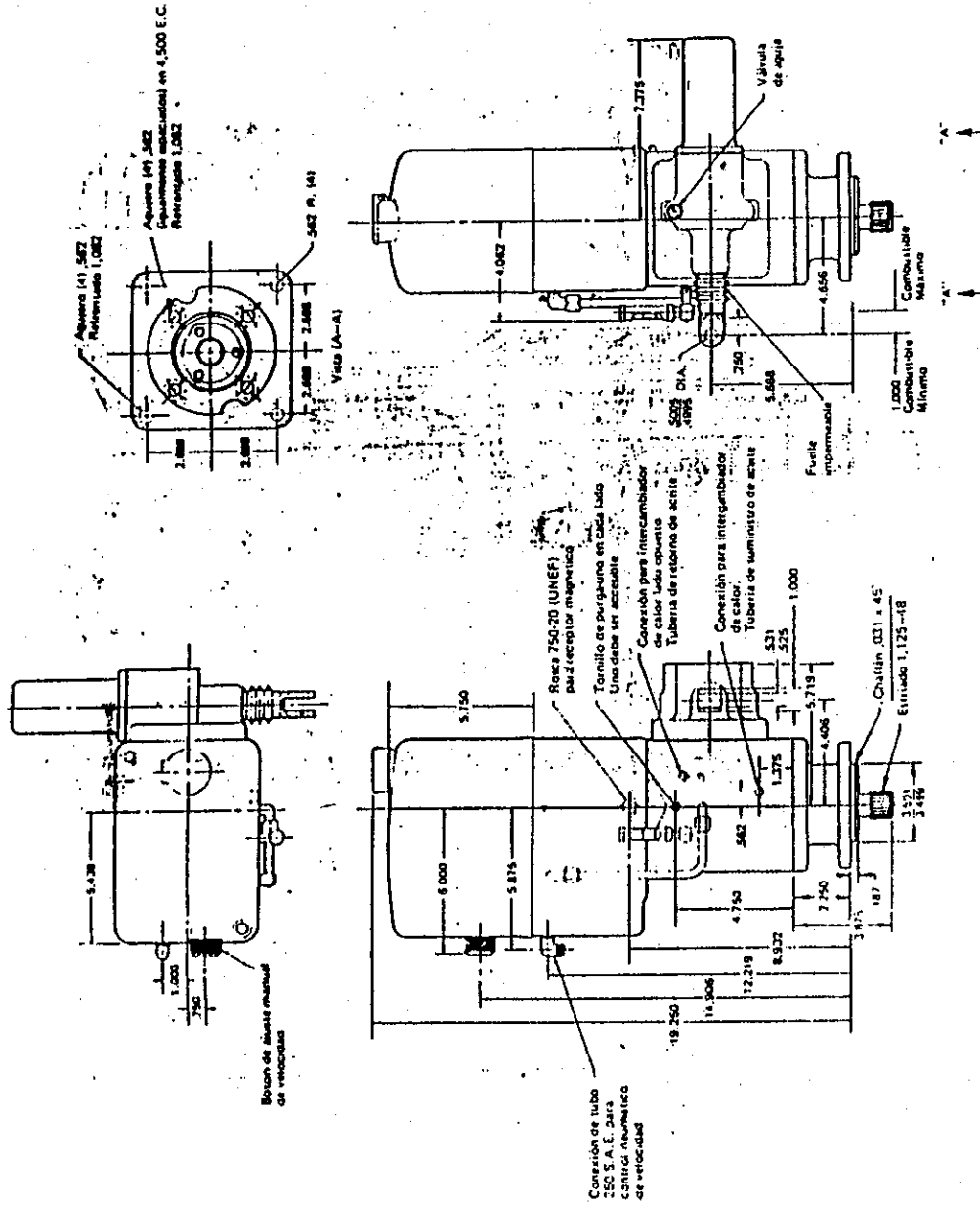


Figura. 6.1 Vista exterior de un regulador Woodward pgpl

6.2.2 AJUSTE DE LA VÁLVULA DE COMPENSACIÓN: esto se debe hacer cuando la turbina se pone en marcha por primera vez, o después de que se ha purgado el aceite; esto quiere decir que, se ha limpiado, y rellenado con aceite nuevo el regulador, para eliminar el aire que puede quedar dentro de las líneas hidráulicas.

Primero hay que dejar rotando la turbina a baja velocidad durante unos 15 minutos para que se caliente el regulador; luego se procede a parar la turbina para añadir aceite al regulador y nivelarlo.

Hay que abrir la válvula de aguja del sistema de compensación, y darle más de 2 vueltas para que exista oscilación en la turbina; después se cierra la válvula hasta que deje de oscilar la turbina. En caso de que se cierre totalmente la válvula y la turbina no haya dejado de oscilar, vuelva a abrir la válvula nuevamente permitiendo que la turbina oscile durante unos 5 minutos. La posición normal en que debe quedar la válvula debe de ser entre $\frac{1}{16}$ a $\frac{1}{8}$ de vuelta abierta.

Si el regulador continúa oscilando afloje el tornillo de purga que se muestra en la figura 6.1 hasta que exista una fuga de aceite. Purga hasta que deje de burbujear (aproximadamente $\frac{1}{2}$ taza de aceite). Vuelva a apretar el tornillo y rellene el regulador con aceite.

Por último, haga que la turbina gira a su máxima velocidad y revise la estabilidad del regulador; puede ser que se necesite cerrar ligeramente la válvula de aguja para lograr la estabilidad.

6.2.3 AJUSTE DEL SISTEMA NEUMÁTICO DE CONTROL REMOTO: este procedimiento se realiza para ajustar la velocidad máxima y la mínima del regulador cuando la turbina va a ser operada a control remoto.

Ponga el botón manual de ajuste de velocidad que se observa en la figura 6.2 en su posición de velocidad mínima (contrario a las agujas del reloj). Luego ajuste el tornillo de presión de ajuste de alta velocidad para nivelar su cabeza con la del tornillo de ajuste de velocidad que se observa en la figura 6.2. Seguidamente aplique la señal de presión mínima de aire en que puede operar el aparato (por lo general el manual de instrucciones de la turbina dice cuál es el rango de presión de aire) al mismo tiempo que se ajusta la tuerca de ajuste de velocidad para obtener la velocidad mínima correspondiente; debe hacerlo en el sentido de las agujas del reloj para disminuir. Tenga mucha precaución de que el tornillo de ajuste neumático de baja velocidad no toque en ese momento la palanca de recuperación.

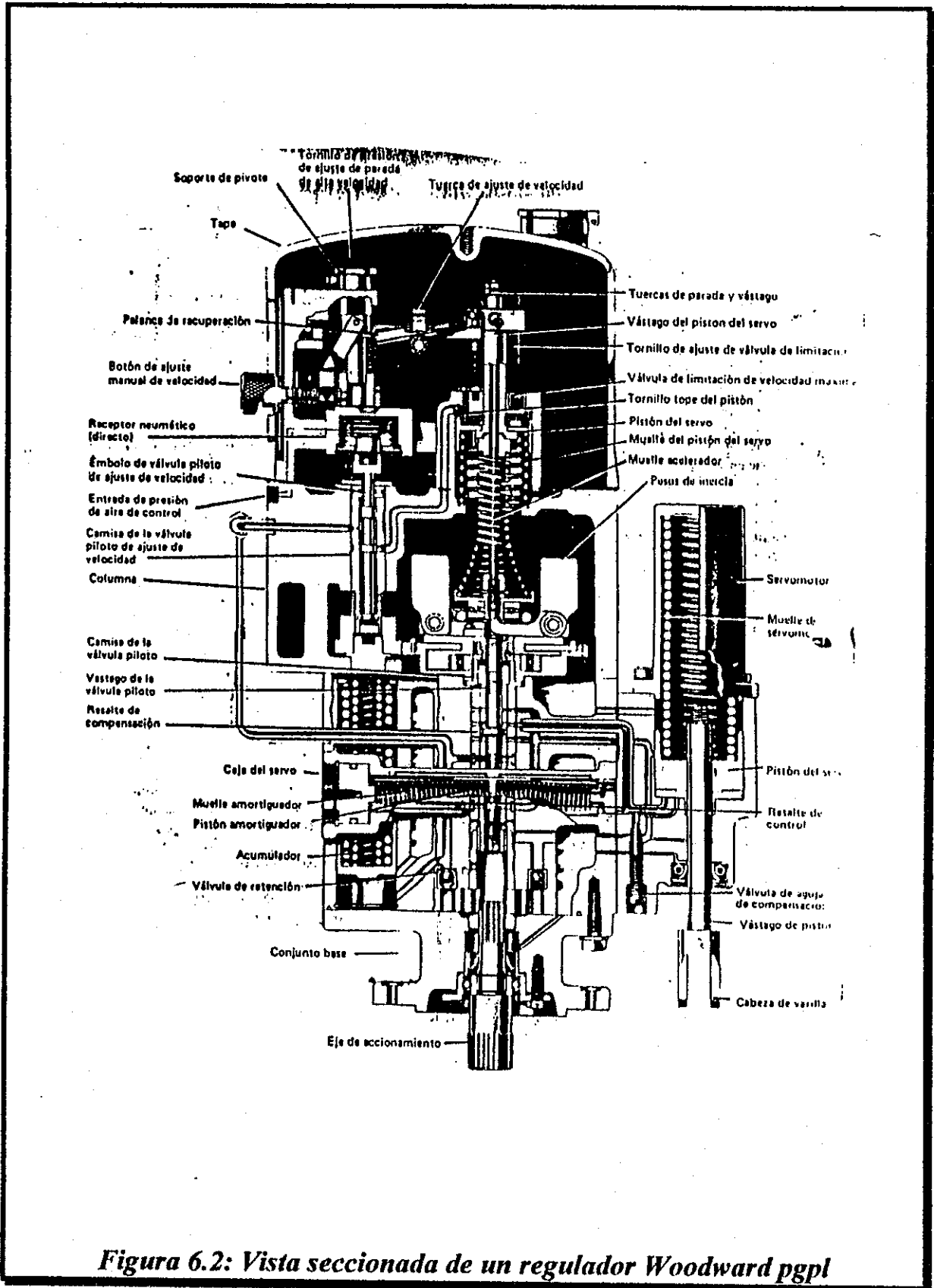


Figura 6.2: Vista seccionada de un regulador Woodward pgpl

Mueva el tornillo de ajuste de la válvula de limitación, de modo que esta válvula siga asentada al aumentar la velocidad.

Los siguientes pasos son para ajustar la escala de velocidad del regulador con la presión del aire de control:

1. Aumentar lentamente la señal de presión del aire, a la máxima. Asegurarse de que que la turbina no sobrepase la velocidad máxima especificada.
2. En caso de que no se obtenga la máxima velocidad que se quiere para que trabaje el regulador, ajuste el soporte pivote mostrado en la figura 6.2 tratando de que el pivote del cojinete se acerque al servomecanismo de ajuste de velocidad.
3. Si no se tiene la velocidad máxima, ajuste nuevamente el pivote tratando de alejar el pivote del cojinete.

El pivote se ajusta aflojando el tornillo situado encima del soporte de pivote y la tuerca moleteada en el lado del soporte y se hace girar para mover el soporte. Luego apriete tanto el tornillo como la tuerca.

6.3 DESMONTAJE: el regulador se desarma siguiendo el orden de los números asignados en las figuras 6.3 y 6.4, teniendo cuidado de que las piezas se desarmen siguiendo la numeración. No es necesario desarmar salvo que se necesiten cambiar dichas piezas.

Primero hay que limpiar la superficie exterior del regulador con un trapo limpio empapado con algún solvente (de preferencia utilice manta cuando le dá mantenimiento a cualquier equipo hidráulico).

De preferencia todos los O-rings, retenedores, anillos de seguridad debe cambiarlos cada vez que desarme el regulador.

Trate de no quitar los componentes que se encuentran a presión, tales como los acumuladores, el cilindro de compensación, etc., a menos que sea necesario cambiarlos.

Si no elimina todos los O-rings, lave las piezas con agua y jabón, para no dañarlos. Si los cambia todos, entonces puede lavar las piezas con cualquier solvente (de preferencia use solvente mineral). Utilice aire comprimido para la limpieza de las ranuras, agujeros o aberturas. Seguidamente después de haber lavado las piezas, séquelas con aire comprimido seco y con un trapo seco y limpio.

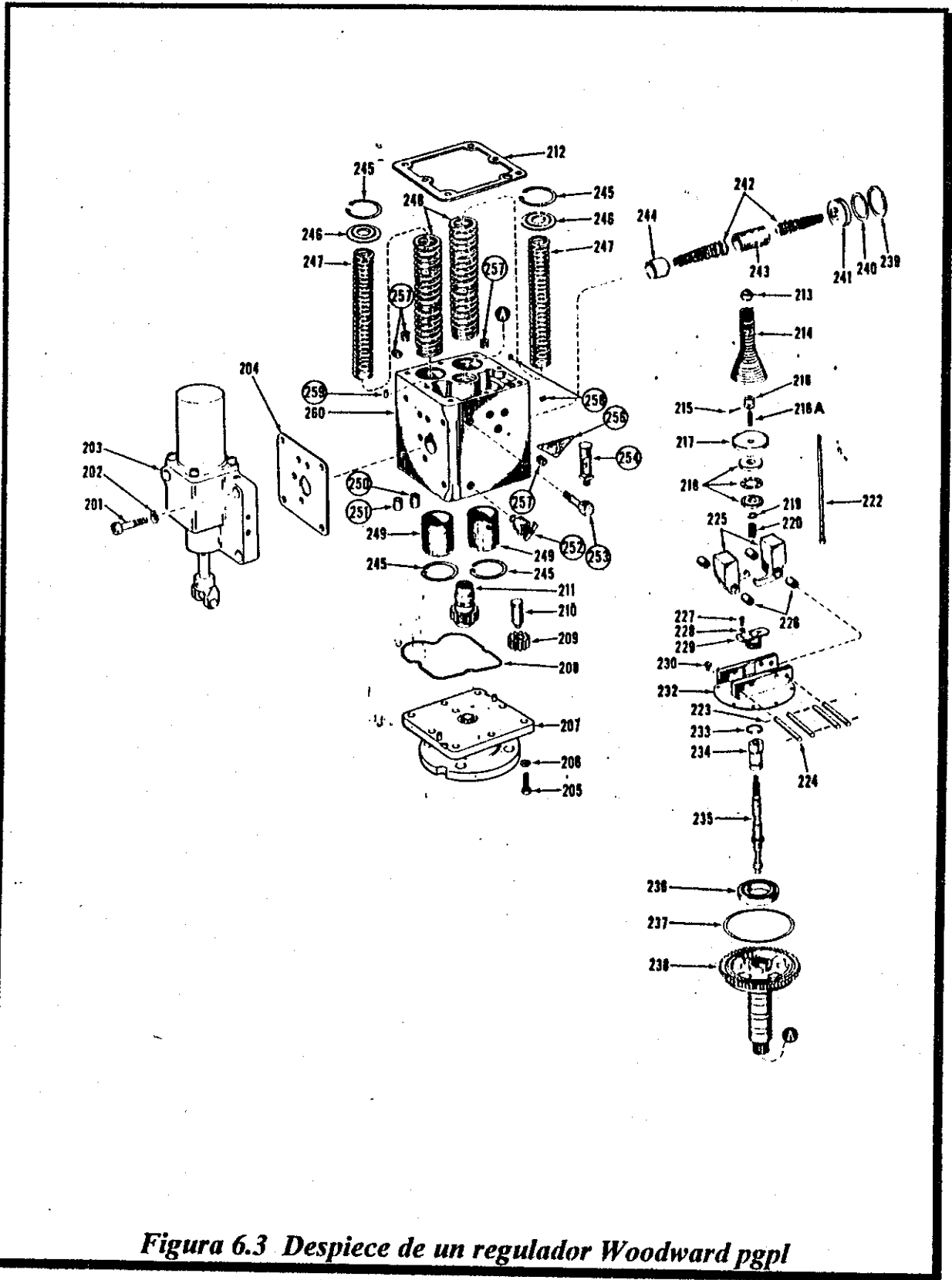


Figura 6.3 Despiece de un regulador Woodward pgpl

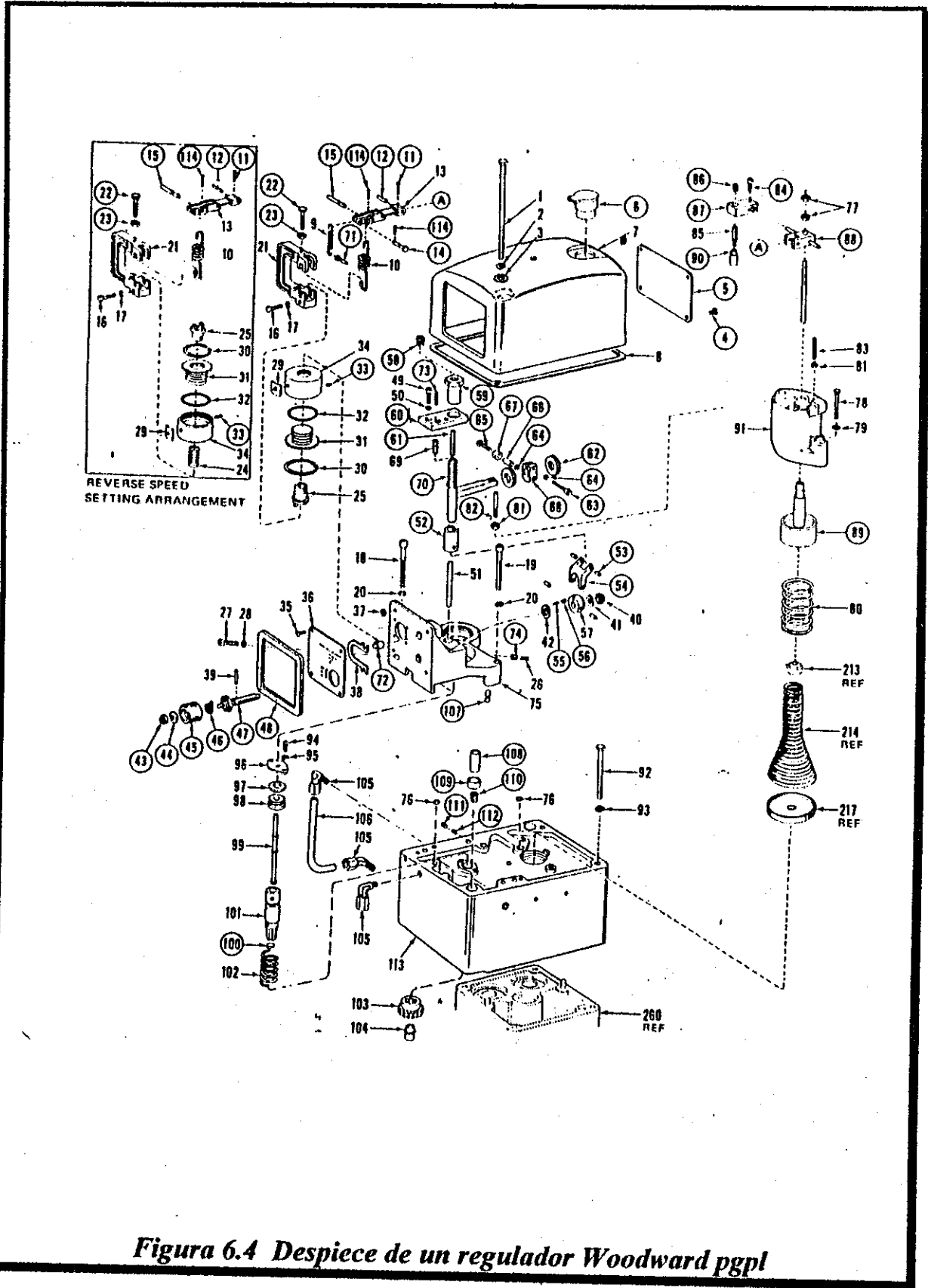


Figura 6.4 Despiece de un regulador Woodward pgpl

6.4 INSPECCIÓN: normalmente cuando se desarma hay que proceder a la inspección de las piezas para poder decidir se hay que cambiar o reparar los elementos.

Visualmente se deben revisar todas las piezas para ver si existe desgaste o daños. Los cojinetes se deben de revisar normalmente. Los pistones, émbolos, varillas y engranajes deben de tener un movimiento libre pero sin juegos excesivos.

Todas superficies ajustadas deben estar libres de rebabas, grietas, u otros daños. Las puntas de los pesos centrifugos se deben revisar para comprobar si existe desgaste en ellas.

Hay que tener cuidado especial con el resorte acelerador, ya que si hay picaduras o tenga cualquier daño, hay que proceder a cambiarlo.

Las reparaciones normales de las piezas se debe limitar generalmente a quitar rebabas y mellas en las zonas ajustadas y pulirlas ligeramente con lija fina (lija de agua No.400) con aceite.

6.5 ANÁLISIS Y CORRECCIÓN DE PROBLEMAS COMUNES: los problemas más comunes del regulador se manifiestan por ser variaciones de velocidad de la turbina, pero dichas variaciones no necesariamente indican que su origen sea el regulador. Por tal razón, hay que seguir el siguiente procedimiento.

1. Revise primero que los cambios de velocidad sean originados por variaciones en la carga de la turbina, por ejemplo, una alimentación irregular a las picadoras de caña hacen que la turbina tenga grandes cambios en la carga y consecuentemente en la velocidad.
2. Revise el varillaje entre el regulador y la turbina para asegurarse de que no exista agarrotamiento ni que estén flojos.
3. Revise que no haya cambios en la presión de vapor.
4. Revise que la válvula de aguja no se encuentre muy abierta.
5. Revise el sistema de señal neumático. A veces los problemas se deben a que existe agua en la línea de aire comprimido, lo que provoca variaciones de velocidad.

El polvo y otras impurezas que se pueden introducir en el aceite, así como cuando el aceite comienza a oxidarse, son la causa principal de los problemas que pueden suceder en un regulador.

A continuación, se presenta una tabla en donde se pueden ver los problemas más comunes y sus posibles soluciones.

PROBLEMA	POSIBLE CAUSA	POSIBLE SOLUCIÓN
1. La turbina presenta variaciones de velocidad	A. Ajuste incorrecto de la válvula de aguja.	Proceda a ajustar la válvula según se explica en la sección 5.2.2.
	B. El resorte del sistema de compensación está muy débil.	Instale un nuevo resorte de mayor capacidad.
	C. El varillaje puede estar mal ajustado. Puede ocurrir cuando se ha desmontado el regulador. (Se debe tomar en cuenta que la relación de salida del servo pistón y la de la válvula de admisión de vapor de la turbina debe de ser lineal.	Reajuste el varillaje del regulador hasta conseguir la relación lineal.
	D. Baja presión de aceite en el regulador. Esta presión debe ser por lo general de 100 psi. Coloque un manómetro para revisar. Las válvulas cheque de la bomba del regulador no deben de acentar bien o los resortes de los acumuladores están débiles.	Cambie el regulador por otro en buen estado y revise las válvulas de retención y los resortes de los acumuladores.
	E. La carrera del servo pistón es demasiado corta.	Rediseñe el varillaje de tal forma que se obtenga la carrera total de la válvula de vapor con la carrera total del servo pistón.
	F. Bajo nivel de aceite.	Añada aceite hasta llegar al nivel visible en el indicador de aceite del regulador.
	G. Alta presión de vapor.	Disminuya la presión de vapor en la turbina.
2. Sacudidas en el eje de salida del regulador	G. Aceite sucio en el regulador formando lodos.	Vacíe el aceite. Limpie el regulador con un aceite de menor viscosidad y vuelva a llenarlo.
	A. Problemas en los engranajes que unen a la turbina con el regulador.	Primero compruebe la alineación de los engranajes. Seguidamente vea si existen problemas entre los engranajes, tales como, desgaste, excéntricos o exceso de Backlash (juego tangencial). Seguidamente revise las chavetas de los engranajes, las tuercas y los tornillos prisioneros que sujetan a los engranajes a los ejes. Revise si el eje de la turbina está doblado en ese extremo.
	B. El accionamiento flexible de los pesos centrifugos falla.	Quite el regulador, desarme el cabezal de pesos centrifugos y lávelos. Si nota que está desgastado proceda a cambiarlo.
3. La turbina se vuelve lenta para responder a una variación de velocidad o de carga.	C. Existencia de aire en la línea de aceite a presión.	Purgue el regulador según se detalla en la sección 5.2.2.
	A. El ajuste de la válvula de aguja del sistema de compensación es incorrecto. (Demasiado cerrado).	Reajuste la válvula. Si es posible, ábrala más si no produce inestabilidad al trabajar sin carga.
	B. El regulador no tiene sensibilidad para medir las variaciones de velocidad.	Puede ser que exista lodo en el aceite, o desgaste en los contrapesos.
	C. Baja presión de aceite en el regulador.	Revise la bomba y sus válvulas cheques.
	D. La turbina puede estar sobrecargada.	Reduzca la carga.
4. La turbina no alcanza su carga nominal.	E. Poco flujo de vapor.	Revise si no hay obstrucciones en la línea de vapor en la entrada de la turbina.
	A. Baja presión de aceite.	Vea parte 3.A.
	B. Presión de vapor demasiado baja.	Aumentar la presión de vapor en la línea de alimentación de la turbina.
	C. Poco flujo de vapor.	Vea 3.E.

Tabla 6.1: soluciones a problemas comunes.

CONCLUSIONES

1. Se obtiene una economía de energía y se estabiliza el flujo de jugo y de vapor hacia los evaporadores, al eliminar los picos de demanda de vapor que se producen en los molinos de caña; al controlar la carga de cada molino por medio de un control sobre la velocidad de la turbina. Este control se puede realizar utilizando el sistema de accionamiento remoto para cambiar la velocidad que tienen los reguladores de velocidad WOODWARD PGPL.
2. La respuesta al cambio de velocidad, debido al cambio de potencia demandada o carga, es mucho más rápida en un regulador hidráulico o mecánico-hidráulico, que en uno mecánico. Es por eso que en turbinas de baja potencia y donde no se requieren respuestas inmediatas a los cambios de potencia, los fabricantes instalan reguladores de velocidad tipo mecánico; en turbinas como las de los molinos, que requieren potencias de 500 a 1000 Hp y como la respuesta al cambio de carga es significativo, se instalan reguladores de velocidad del tipo mecánico-hidráulico, y en turbinas que mueven generadores de electricidad con potencias mayores a 1900 Hp, y donde es indispensable mantener estable la velocidad de la turbina a pesar de los cambios de carga del generador, se utilizan reguladores de velocidad hidráulicos.
3. El regulador de velocidad WOODWARD PGPL es un conjunto mecánico-hidráulico, cuyo elemento sensor son los pesos centrífugos, y utiliza como elemento actuador el sistema hidráulico. Estos reguladores tienen la ventaja de utilizar un sistema a control remoto por medio de un actuador neumático, para poder incrementar o disminuir la velocidad de la turbina.
4. El aceite hidráulico que se debe de utilizar en un regulador WOODWARD PGPL debe tener una viscosidad de 300 SSU; dado que las turbinas giran en un rango de velocidad entre 3600 a 4500 rpm éstas utilizan aceite de grado ISO 68, el cual se puede utilizar también para el regulador de velocidad.

5. El aceite hidráulico que utiliza el regulador WOODWARD PGPL se debe de cambiar cuando ocurra cualesquiera de los siguientes eventos:
- a) La apariencia del aceite es bastante diferente que cuando es nuevo.
 - b) Si el aceite se siente arenoso.
 - c) El olor del aceite es diferente que cuando es nuevo.
 - d) Cualquier contaminación visible de agua o cualquier otro contaminante incompatible con el aceite.
 - e) Cualquier cambio de viscosidad, ya sea en aumento o en disminución.
 - f) Al momento de desarmar el regulador.
 - g) Cuando se ha operado el regulador a temperaturas que exceden el límite del aceite.
 - h) Cuando se sospecha que el aceite contribuye a la inestabilidad del regulador.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar en el Ingenio La Unión el sistema de accionamiento remoto de los reguladores de velocidad WOODWARD PGPL, como respuesta a un control de carga en los molinos. Este debe de tener un elemento sensor del nivel en el chute de alimentación de cada molino, de tal manera que cuando la altura de la caña en el chute sea alta, y por consiguiente el molino tenga una demanda alta de potencia y que incremente la velocidad de la turbina y viceversa. De este modo, se logra un consumo de vapor más uniforme en cada turbina y sin demandas altas.
2. Se recomienda utilizar el mismo aceite de la turbina, el cual por lo general es de viscosidad ISO 68, en el regulador WOODWARD PGPL, dado que este aceite también cumple con las especificaciones de un aceite hidráulico. Como ejemplo se tienen los aceites TERESSO 68 y TURBO 68.
3. Hay que proporcionarle entrenamiento adecuado al personal de mantenimiento para que tenga el conocimiento, y así pueda realizar una reparación de un regulador de velocidad, ya que cualquier persona sin la preparación adecuada puede provocar daños irreparables al equipo.
4. Al terminar la zafra, se recomienda hacer un mantenimiento preventivo en los reguladores de velocidad, ya que si existiesen equipos que resultaran dañados, se pueden reparar y solicitar los repuestos necesarios, si es que no hubiera existencia en bodega, y así se podrá asegurar y tener la confianza de que una turbina no va a presentar problemas en lo que respecta a su regulación de velocidad.

REFERENCIAS

1. **MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.** México. 2da. Edición. Editorial Harla. p. 89.
2. Ibid., p. 45.
3. Ibid., p. 72.
4. Ibid., p. 79.
5. Ibid., p. 369.
6. Ibid., p. 553.
7. Ibid., p. 555.
8. Ibid., p. 588.
9. **CHEN, James. Manual del azúcar de caña.** México .1,991. Editorial Limusa. p. 13.
10. **TURBODYNE. Instrucciones para la instalación, manejo y mantenimiento de turbinas de vapor de una etapa.** Manual de Instrucciones No. 102-G. Turbodyne Division, Dresser Industries. Wellsville, New York, EE.UU. s.p.i. s.f. p. 35.
11. **WOODWARD. Boletín 36694d. Manual de funcionamiento y servicio del regulador PGPL.** Woodward Governor, S.A. (División de Controles de turbinas y motores) Fort Collins, Colorado, EE.UU. s.p.i. s.f. p. 2.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHEN, James. **Manual del azúcar de caña.** México .1,991. Editorial Limusa.
2. DE LA CRUZ MUÑOZ, Jorge Fernando. **Operación de calderas en la planta de fuerza del ingenio La Unión.** (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala. 1994.
3. HUGOT, E. **Manual para ingenieros azucareros.** México. 2da. Edición. Compañíaeditorial continental, S.A. 1,964.
4. IBAÑEZ GARCÍA, 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. 1994.
5. LANDAVERRY VILLEDA, César Adalberto. **Actualización del balance energético del ingenio Los Tarros.** (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala. 1996.
6. MELGAR SAMAYOA, Ennio Hugo. **Eficiencia de calderas acuotubulares del ingenio La Unión.** (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala. 1994.
7. PACHECO DIEGUEZ, Juan Carlos. **Revisión e implementación del sistema de mantenimiento del ingenio trinidad.** (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala. 1993.
8. SUTTER ALEGRÍA, Juan Rodrigo Jordán. **Aplicación de una grasa en chumaceras de los molinos de caña del ingenio La Unión.** (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala. 1995.