

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

**FACTIBILIDAD DEL USO DE VARIADORES DE VELOCIDAD EN VENTILADORES DE AIRE EN
SUSTITUCION DE DAMPERS PARA LA REGULACION DEL FLUJO**

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

POR

LUIS ENRIQUE GUTIERREZ AREVALO

AL CONFERIRSELE EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 1996



08
T(3684)
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San

Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de tesis titulado:

FACTIBILIDAD DEL USO DE VARIADORES DE VELOCIDAD EN VENTILADORES DE AIRE EN

SUSTITUCION DE DAMPERS PARA LA REGULACION DEL FLUJO

tema que me fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con

fecha 11 de Noviembre de 1993.


Luis Enrique Gutiérrez Arévalo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK
VOCAL 1ero.	ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA
VOCAL 2do.	ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO
VOCAL 3ero.	ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ
VOCAL 4to.	BR. FERNANDO WALDEMAR DE LEON CONTRERAS
VOCAL 5to.	BR. PEDRO IGNACIO ESCALANTE PASTOR
SECRETARIO	ING. FRANCISCO GONZALEZ LOPEZ

**TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO**

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK
EXAMINADOR	ING. RONY OTONIEL CASTILLO GARCIA
EXAMINADOR	ING. LUIS ARTURO GONZALEZ LOPEZ
EXAMINADOR	ING. JOSE ARTURO ESTRADA MARTINEZ
SECRETARIO	ING. FRANCISCO GONZALEZ LOPEZ

Guatemala, 10 de Noviembre de 1995

Ingeniero
José Luis Herrera Galvez,
Jefe, Area Básica y Electrotécnia,
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ingeniero Herrera:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he revisado, conjuntamente con el estudiante Luis Enrique Gutiérrez Arévalo, el trabajo de tesis titulado: **Factibilidad del uso de Variadores de Velocidad en Ventiladores de Aire en sustitución de Dampers para la regulación del Flujo**, y luego de hacer las correcciones necesarias, doy la aprobación al mismo por considerar que cumple con los objetivos establecidos.

Por lo tanto, el autor de esta tesis y yo como asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Jorge Maño Guzmán Torre
Colegiado No. 2376
ASESOR



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

Guatemala,
24 de noviembre de 1,995

Señor Director
Ing. Edgar F. Montúfar Urizar
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Estimado Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al trabajo de tesis
titulado: **Factibilidad del uso de variadores de velocidad en
ventiladores de aire en sustitución de dampers para la regulación del
flujo**, desarrollado por el estudiante **Luis Enrique Gutiérrez Arévalo**,
ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Luis Herrera Gálvez
Coordinador de Área de Electrotecnia

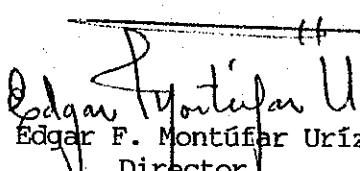


FACULTAD DE INGENIERIA

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 Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante Luis Enrique Gutiérrez Arévalo, titulada: Factibilidad del uso de variadores de velocidad en ventiladores de aire en sustitución de dampers para la regulación del flujo, procede a la autorización del mismo.


Ing. Edgar F. Montúfar Urizar
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Guatemala, 29 de noviembre de 1,995





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

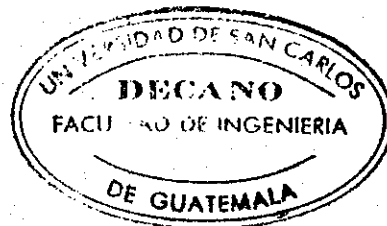
El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesi: **Factibilidad del uso de variadores de velocidad en ventiladores de aire en sustitución de dampers para la regulación del flujo**, del estudiante **Luis Enrique Gutiérrez Arévalo**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Julio Ismael González Podszueck

Decano

Guatemala, 26 de febrero de 1,996.



DEDICATORIA

La carrera la dedico a:

Dios Padre, Hijo y Espiritu Santo

María Madre

**Mis padres Enrique Gutiérrez Rodriguez
 Laura Arevalo de Gutiérrez**

Mis hermanos Ana María, María Laura, Saúl, Jennifer y Juan Carlos.

Mi tía Zolla Gutiérrez

Mi sobrina Laura María Enriquez Gutiérrez

Mis amigos y compañeros

Mi familia

La Universidad de San Carlos de Guatemala, en especial a la Facultad de Ingeniería.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

A **Ing. Jorge Mario Guzmán**

Ing. Guillermo Goshop

Sr. Juan Fernando Figueroa

Por su colaboración y ayuda incondicional.

INDICE

	PAGINA
INDICE.....	1
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....	4
LISTA DE ABREVIACIONES Y SIMBOLOS.....	6
GLOSARIO.....	8
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	13
CAPÍTULO 1 VENTILADORES DE AIRE	
1.1.- Descripción.....	14
1.2.- Ventiladores de flujo axial.....	15
1.3.- Ventiladores de flujo mixto.....	15
1.4.- Ventiladores de flujo transversal.....	15
1.5.- Ventiladores de flujo radial.....	18
1.6.- Aplicaciones.....	20
1.7.- Ventiladores en un sistema.....	21
1.7.1.- Variación de flujo.....	22

CAPÍTULO 2 VARIADORES DE VELOCIDAD

2.1.- Variadores de velocidad de corriente continua.....	25
2.2.- Mecanismo de corriente de Eddy.....	27
2.3.- Variadores de velocidad de corriente alterna.....	27
2.3.1.- Cambio de número de polos.....	28
2.3.2.- Variando la tensión en bornes.....	29
2.3.3.- Variando la resistencia del rotor.....	29
2.3.4.- Mediante el control de deslizamiento rotórico por medio de control reostático del rotor.....	31
2.3.5.- Por medio de procedimientos mecánicos.....	31
2.3.6.- Modificando la frecuencia.....	32
2.4.- El Inversor.....	33

CAPÍTULO 3 DESARROLLO DEL CASO

3.1.- Descripción.....	41
3.2.- Funcionamiento básico.....	41
3.3.- Ventiladores en el sistema.....	43
3.4.- Características particulares.....	46

3.5.- Cálculos.....	51
3.5.1.- Ventilador de tiro inducido.....	51
3.5.2.- Ventilador de tiro forzado.....	53
3.5.3.- Substitución por variador de velocidad electrónico.....	55
CAPÍTULO 4 ANALISIS DE RESULTADOS	
4.1.- Resumen de resultados.....	58
4.2.- Análisis económico.....	59
CONCLUSIONES.....	64
RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA		PAGINA
Fig. 1.1	Elementos de un ventilador a) Ventilador centrífugo b) Ventilador axial	14
Fig. 1.2	Tipos de paletas de ventilador y velocidades del aire resultante	18
Fig. 1.3	Rodete de ventilador centrífugo con paletas curvadas hacia atrás	18
Fig. 1.4	Distintas posiciones de los ventiladores y diversos tipos de accionamiento	20
Fig. 1.5	Características del ventilador y del sistema	21
Fig. 1.6	Características de un ventilador con: a) Compuerta de control b) Control por venas variables de entrada c) Control de velocidad variable	23
Fig. 2.1	Regulación de la velocidad mediante la tensión de alimentación	29
Fig. 2.2	Regulación de la velocidad mediante la resistencia del rotor	30
Fig. 2.3	Inversor de semionda trifásico	34
Fig. 2.4	Inversor de onda completa, en puente o múltiple, trifásico	34
Fig. 2.5	Formas de onda de salida de un inversor trifásico mediante el control de relación de fase	

	a) Tensiones de fase producidas por el control de retardo de fase	
	b) Forma de onda de las tensiones de línea de una salida	35
Fig. 2.6	Control de anchura múltiple del inversor monofásico (en puente)	
	a) Inversor en puente monofásico	36
Fig. 2.7	Control de anchura múltiple del inversor monofásico (en puente)	
	b) Forma de onda MPW	36
Fig. 2.8	Síntesis de la forma de corriente alterna mediante la reducción seleccionada de armónicos	37
Fig. 2.9	Circuito Inversor completo	38
Fig. 2.10	Diagrama electrónico de variador actual	40
Fig. 3.1	Caldera: Diagrama básico y flujo de aire	42
Fig. 3.2	Diagrama lógico de control	45
Fig. 3.3	Ventilador de tiro inducido (vista lateral)	48
Fig. 3.4	Ventilador de tiro inducido (vista frontal)	49
Fig. 3.5	Ventilador de tiro forzado	50
Fig. 3.6	Requerimientos de potencia utilizando dampers	52
Fig. 3.7	Requerimientos de potencia utilizando variadores electrónicos	56
TABLAS		
3.1	Análisis de gases en la salida	46
3.2	Resumen de resultados	58

LISTA DE ABREVIACIONES Y SIMBOLOS

Abreviaciones	
A	Amperios.
CFM	Pies cúbicos por minuto.
cm	Centímetro.
CO	Monóxido de carbono.
CO2	Dióxido de carbono.
Fig.	Figura.
k	Constante.
la	Corriente de armadura.
hp	Caballos de fuerza.
h	Hora.
Hz	Herz.
IGBT	Transistor bipolar con compuerta protegida.
khz	Kiloherz.
kW	Kilovatios.
kWh	Kilovatio-hora.
min	Minuto.
PWM	Ancho de pulso modulado.
N	Eficiencia.
plg	Pulgada.
P	Potencia.
PPM	Partículas por millón.
Q	Quetzales.
Qx	Flujo de aire.
Rx	Radio.
S	Velocidad del motor de corriente continua.
SCR	Rectificador controlado de silicio.
Ra	Resistencia de armadura.
rpm	Revoluciones por minuto.
V	Volto.
Va	Voltaje de armadura.

Vx	Velocidad tangencial.
Wx	Velocidad angular.
Simbolos	
φ	Flujo magnético.
°	Grados.
°F	Grados Farenheit.
"	Pulgadas.

GLOSARIO

- **Álabe:** paleta de una rueda o rodete que impulsa un fluido.
- **Armadura:** compuesto de hierro y de aluminio que componen la parte inducida en un motor de corriente continua.
- **Armónico:** frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental en una onda.
- **Aspa:** véase álabe.
- **Bagazo:** material sobrante del proceso de extracción de fluido de la caña de azúcar.
- **Borne:** terminal de empalme de conductores.
- **Bunker C:** combustible líquido derivado del petróleo.
- **By-pass:** conexión que anula la función de un elemento.
- **Circuito impreso:** circuito electrónico en material aislante.
- **Cogeneración:** proceso de generación de energía eléctrica y su conexión al sistema nacional.
- **Compuerta:** elemento que permite el paso de algún fluido.
- **Corriente continua:** corriente que no cambia su polaridad durante el tiempo.
- **Corriente de Eddy:** dícese a la corriente parásita generada por la magnetización de un material.
- **Corriente eficaz:** medida de la corriente alterna de un medidor.

- **Damper:** pieza de metal móvil para la regulación de flujo de aire en un ventilador.
- **Deflector:** véase damper.
- **Delga:** pieza de cobre sobre el eje de un motor.
- **Deslizamiento:** frecuencia relativa desfasada de la síncrona.
- **Domo:** lugar donde se recolecta el agua o vapor en una caldera.
- **Economizador:** calentador que aprovecha el calor de los gases de escape.
- **Engrane:** conjunto de ruedas dentadas que transmiten movimiento.
- **Entrehierro:** espacio libre entre dos hierros.
- **Erosión:** reacción química del oxígeno con un metal.
- **Estator:** parte de hierro fija y debanada de un motor.
- **Faja:** banda de hule que transmite el movimiento circular de una polea.
- **Flujo:** cantidad volumétrica de alguna sustancia en un tiempo determinado.
- **Fuente controlada:** equipo que proporciona un voltaje deseado el cual se puede variar.
- **Hogar:** lugar dónde ocurre la combustión en una caldera.
- **Impulsor:** véase álabe.
- **Inducido:** parte bobinada de un motor que recibe inducción externa.

- **Jaula de Ardilla:** dícese al nombre de un rotor de un motor de inducción debido al parecido a una jaula de ardilla.
- **Manifold:** tubería con varias aperturas para conexiones.
- **Motor de excitación compuesta:** combinación de conexión serie y derivación en un motor de corriente continua.
- **Motor de inducción:** tipo de motor de corriente alterna que aprovecha el efecto de inducción para generar movimiento.
- **Motor derivación:** tipo de conexión del motor de corriente continua en el cual se conecta en paralelo el inducido y la armadura.
- **Polea:** rueda que transmite movimiento circular en tangencial.
- **Polo:** punto donde se concentran las líneas de campo magnético.
- **Potenciómetro:** dícese a las resistencias variables manualmente.
- **Presión atmosférica:** presión generada por la atmósfera terrestre.
- **Puente rectificador:** elemento semiconductor que transforma la corriente alterna en directa.
- **Red de tierras:** elemento semiconductor que transforma la corriente alterna en directa.
- **Retroalimentación:** información devuelta a una elemento emisor, que sirve de verificación.
- **Rodete:** rueda en un ventilador o turbina que contiene los álabes.
- **Rotor:** parte móvil de un motor montado sobre el eje.
- **SCR:** rectificador controlado de silicio.
- **Tacómetro:** medidor de revoluciones por minuto.

- Tiro forzado: proceso de empuje de aire.
- Tiro inducido: proceso de succionamiento de aire.
- Tola: conducto metálico para transportación de algún producto.
- Torque: fuerza ejercida en alguna distancia.
- Turbulencia: efecto del movimiento descontrolado de un fluido.
- Vapor sobrecalentado: vapor que se ha sometido un calentamiento para eliminar humedad remanente.
- Velocidad sincrónica: velocidad en fase con la frecuencia sincrónica.
- Zafra: tiempo en el cual se cosecha la caña y se procesa para producir azúcar.

INTRODUCCIÓN

En varias aplicaciones de equipos en la industria de Guatemala, se utilizan métodos o procedimientos para el control o variación de parámetros de procesos. Muchos de estos procedimientos pueden ser sustituidos por otros que pueden mejorar sus características de flexibilidad, eficiencia, ahorro en consumo, etc.

En el presente trabajo, se analizará la comparación entre los métodos tradicionales de regulación de flujo de aire, a los que corresponden los dämpers, y la regulación del flujo que controlan la velocidad del motor del ventilador por medio de equipos electrónicos.

Factor importante que se ha de considerar en dicho análisis es el ahorro económico en consumo y mantenimiento que pueden ocurrir con el cambio a equipos electrónicos. También es importante considerar el capital de inversión necesario para poder implementar dichos métodos, ya que esta inversión en muchos casos es la que determina su implementación.

OBJETIVOS**GENERAL**

Analizar profundamente y comprobar que la introducción de un variador de velocidad electrónico, que regula la velocidad del motor de un ventilador radial, en sustitución de los dampers, que regulan directamente el flujo de aire dentro de los ductos de ventilación, da mejores resultados en operación y ahorro en consumo de energía.

ESPECIFICOS

1.- Sugerir un método de análisis para poder estimar la sustitución de un equipo existente a uno que supone una mejora en operación y reducción de los gastos de operación.

2.- Establecer parámetros de selección al implementar un equipo nuevo en un proceso de producción.

CAPÍTULO 1

VENTILADORES DE AIRE1.1. Descripción:

Un ventilador consiste en un equipo capaz de producir una corriente de aire o algún gas. Consiste básicamente en una rueda o impulsor rodeado de un envolvente estático o carcasa.

La siguiente figura ilustra los componentes básicos que componen un ventilador:

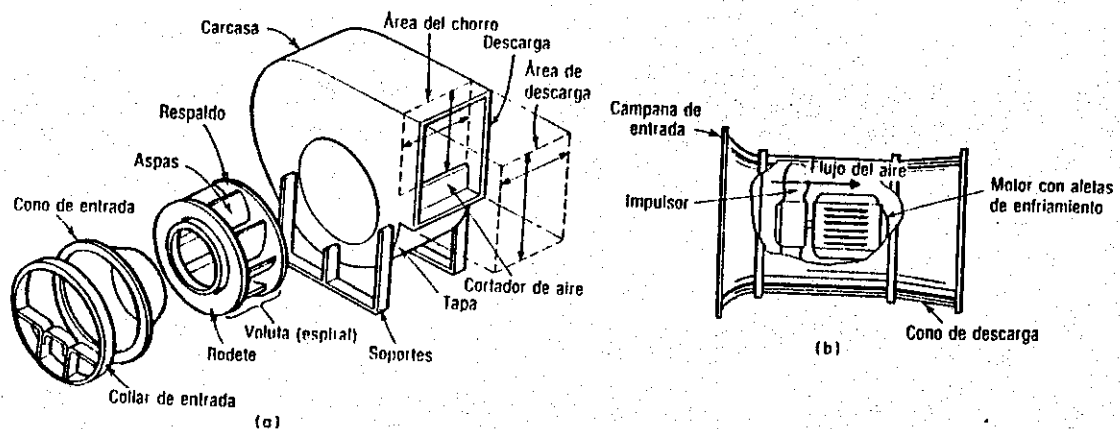


Fig. 1.1 Elementos de un ventilador

a) Ventilador centrífugo

b) Ventilador axial

Se comunica energía al gas circulante por medio de un rodete o impulsor que crea una diferencia de presión produciendo un flujo. Estos aparatos se caracterizan por no aumentar la densidad del gas en un 7% de su condición estática.

La característica que diferencia a los ventiladores es la naturaleza del flujo que pasa a través de las aspas del rodete. Por lo tanto pueden ser de flujo axial, flujo radial, flujo mixto y flujo transversal. Algunos tipos de ventiladores que trabajan entre determinados límites de presión pueden servir como aspiradores y ventiladores.

1.2. Ventiladores de Flujo Axial:

Los elementos que utilizan impulsores de flujo axial son los ventiladores de hélice o propulsores, los tubo-axiales y los veno-axiales, los cuales se caracterizan por la forma de sus carcasas. La diferencia entre los ventiladores tubo-axiales y los veno-axiales radica en que el veno-axial está equipado con aletas o venas guía estacionarias.

La mayor parte de la energía transferida al aire por las máquinas del flujo axial es en forma de energía cinética. Parte de esta energía se transforma en energía potencial por la variación de la dirección de la turbulencia por medio de aletas, o venas, o bien, por variación de la descarga por medio de un deflector o difusor que varía la velocidad de la descarga.

El flujo en estos ventiladores es esencialmente paralelo al eje longitudinal o eje de tiro de la hélice o rodete.

Los elementos que impulsan al gas (impulsores) pueden ser colocados en el eje del motor o la hélice puede montarse con eje propio o cojinetes independientes del motor, el cual se instala fuera de la corriente de los gases en una base sólida en la carcasa del ventilador, y se conectan entre sí por medio de fajas o poleas.

Estos ventiladores usan álabes o aspas con una sección, ya sea de perfil aerodinámico o de espesor uniforme. La disposición de los álabes puede ser fija, ajustable en reposo, o variable en operación y pueden trabajar venciendo resistencias del orden de 22-25 cm de agua.

1.3. Ventiladores de flujo mixto:

Los rodetes de estos tipos de ventiladores pueden utilizarse en carcasses de tipo axial, así como de tipo espiral. Debido a esta característica, el flujo puede ser de tipo axial o radial.

1.4. Ventiladores de flujo transversal:

Para este tipo de ventiladores, el aire pasa dos veces a través de las aspas, entrando por

la punta del aspa más o menos tangencialmente, pasa a través del rodete y sale al extremo opuesto. La carcasa tiene un diseño especial para dicho ventilador. El potencial de presión de dichos ventiladores es bajo.

1.5. Ventiladores de flujo radial:

Los ventiladores que utilizan el flujo radial son los ventiladores centrífugos y los tubulares centrífugos. Están contruidos por una carcasa o envolvente en forma de espiral, la cual permite que el aire sea lanzado de la periferia del rodete con pérdidas reducidas y ligera turbulencia. Los rodetes de los ventiladores centrífugos tienen álabes situados en o cerca del borde del mismo. El efecto producido por un rodete al girar surge de la tendencia del gas, que adyacente a las caras anteriores de las paletas, que se desplaza radialmente hacia afuera como consecuencia de la fuerza centrífuga, y es lanzado desde los bordes de las paletas hacia la envolvente. El resultado de este efecto es la presión inferior a la atmosférica en el centro del rodete y otra presión positiva en la envolvente que la rodea. El gas fluye axialmente hacia adentro del rodete para reemplazar lo descargado por el ventilador. El flujo entra en forma axial y sale de ella en forma tangencial.

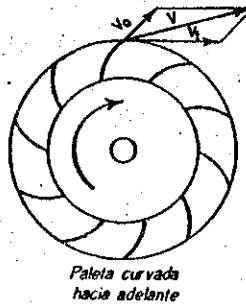
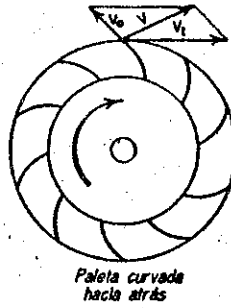
Los ventiladores centrífugos pueden utilizarse en aspiradores de gas y para descargar el mismo a presiones de varios centímetros de agua, en canales unidos a su boca de descarga.

El ventilador tubular centrífugo tiene una carcasa en forma de tubo, por lo que el flujo entra y sale de forma axial.

Gran cantidad de la energía transmitida en estos tipos de ventiladores lo constituye la energía potencial debido a la acción centrífuga. La capacidad para desarrollar presión en un ventilador de este tipo depende de las características de las aspas, como su longitud y altura, velocidad en la punta y ángulo.

Los ventiladores tienen varios tipos de aspas o paletas. Las aspas curvadas hacia adelante tienen curvatura leve, de tal forma que tanto la punta como el talón apuntan en el sentido de la rotación. Las aspas curvadas hacia atrás la punta señala en el sentido de la rotación. El ancho de las aspas está en relación con la razón del diámetro de la entrada de la punta del rodete. Los efectos de la forma de las aspas sobre la velocidad resultante del aire son determinantes. Para ventiladores a la misma velocidad, los rodetes con aspas curvadas hacia adelante producen la mayor velocidad que los de aspas curvadas hacia atrás.

Las aspas curvadas hacia atrás permiten trabajar a velocidades elevadas con grandes rendimientos volumétricos y con amplios límites de capacidad, a velocidad constante, con pequeñas variaciones en la potencia requerida.



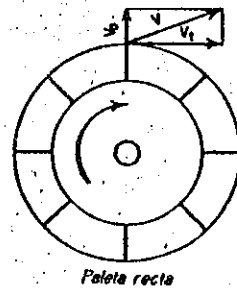


Fig. 1.2 Tipos de paletas de ventilador y velocidades del aire resultantes.

La mayoría de los tipos de rodete está formado por un disco sobre el cual va montado el cubo, y una corona circular o anillo, unida al disco por las aspas repartidas a distancias iguales.

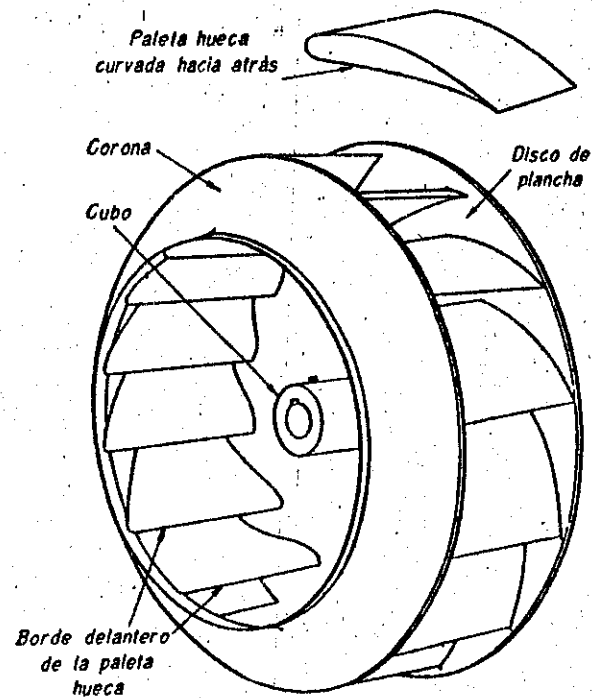


Fig. 1.3 Rodete de ventilador centrifugo con paletas curvadas hacia atrás.

Existen varias clasificaciones para los ventiladores con rodete de disco o de aspas múltiples:

- Según el número de bocas o entradas:

- simples
- dobles.

- Según la anchura del rodete:

- simples
- dobles.

- Según la boca de salida:

- alta
- baja
- vertical
- horizontal
- angular.

- Según la carcasa:

- completa
- siete octavos
- tres cuartos.

- Según el sentido de giro:
(visto de cara al accionamiento)

- a la derecha
- a la izquierda.

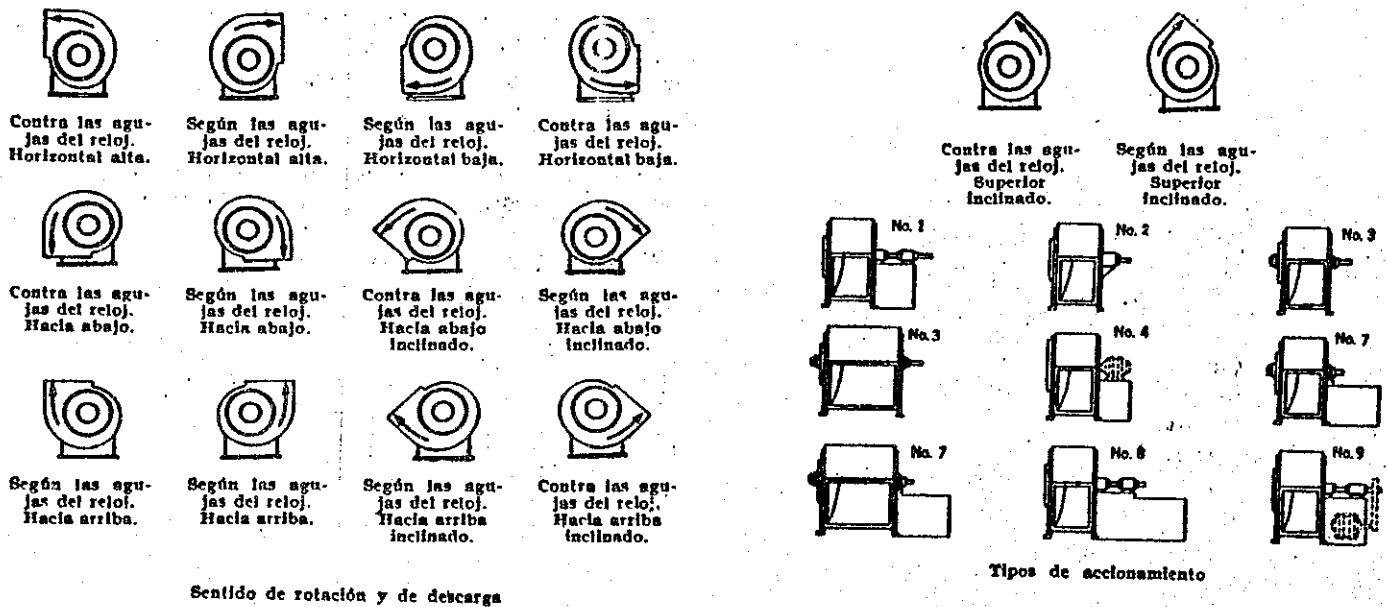


Fig.1.4 Distintas posiciones de los ventiladores y diversos tipos de accionamiento

1.6. Aplicaciones:

Básicamente para la adecuada selección de un ventilador en una aplicación específica, se requiere de un estudio aerodinámico, económico y de adaptabilidad funcional.

Las aplicaciones básicas de un ventilador son las siguientes:

- Calefacción y aire acondicionado
- Sistemas industriales de extracción
- Proceso de flujo de aire industriales
- Sistemas de control ambiental.

1.7. El ventilador en un sistema:

La función del ventilador, en general, puede ser descrito de una mejor manera por medio de sus gráficas. Para un plano de dos dimensiones usualmente se toma como abscisa la capacidad en pies cúbicos por minuto y como ordenada alguna otra variable como eficiencia, potencia y presión.

El ventilador va siempre acoplado a un sistema en donde ejecuta su función. La representación gráfica de un sistema se puede representar en el mismo plano del ventilador con las mismas variables, como se puede observar en la siguiente figura.

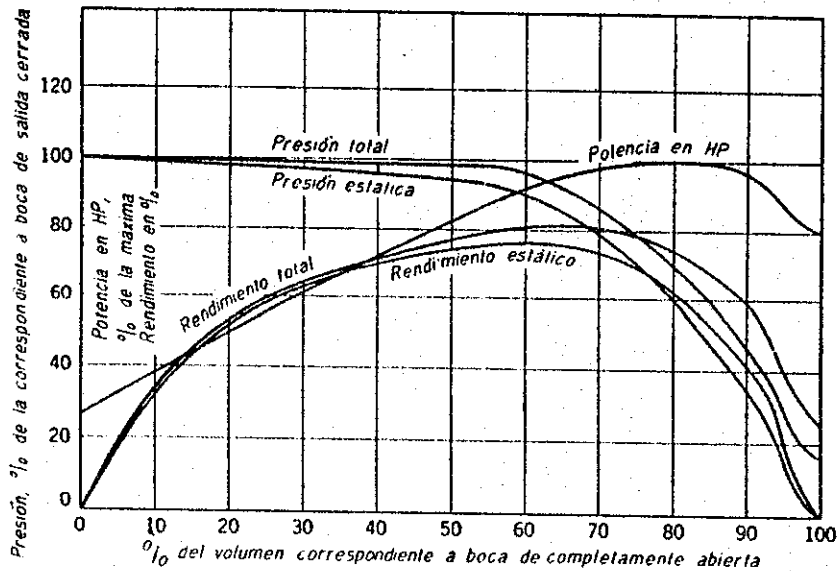


Fig. 1.5 Características del ventilador y del sistema

La curva común de un sistema lo comprende una parábola que pasa a través del origen. Como ejemplo podemos tomar la energía requerida para producir el flujo en un sistema, siendo presión o carga, y se ve variada en forma aproximadamente cuadrada respecto al flujo.

No siempre pasa la curva del sistema por el origen debido a que se debe de controlar en un valor específico la energía requerida para producir el flujo. Para otros casos, no es dicha curva parabólica, debido a que en algunos elementos el flujo es laminar y no turbulento (por ejemplo filtros).

La figura anterior ilustra la curva característica de un sistema tomando como base la presión total junto con la curva característica de la presión estática, que corresponde a la diferencia de a presión de velocidad a la salida del ventilador.

Las figuras ilustran las características de operación de un ventilador con la velocidad constante según tipo y tamaño, así como la densidad y velocidad del aire que se maneja.

El ventilador puede utilizarse en cualquier punto que representa su curva, pero cuando se acopla a un sistema se debe de utilizar en el punto de operación que representa la intersección de la curva del ventilador con la curva del sistema.

1.7.1. Variación del flujo:

Los ventiladores acoplados a algún determinado sistema requieren una variación del flujo de aire. Dicho cambio se representa por medio de las siguientes figuras:

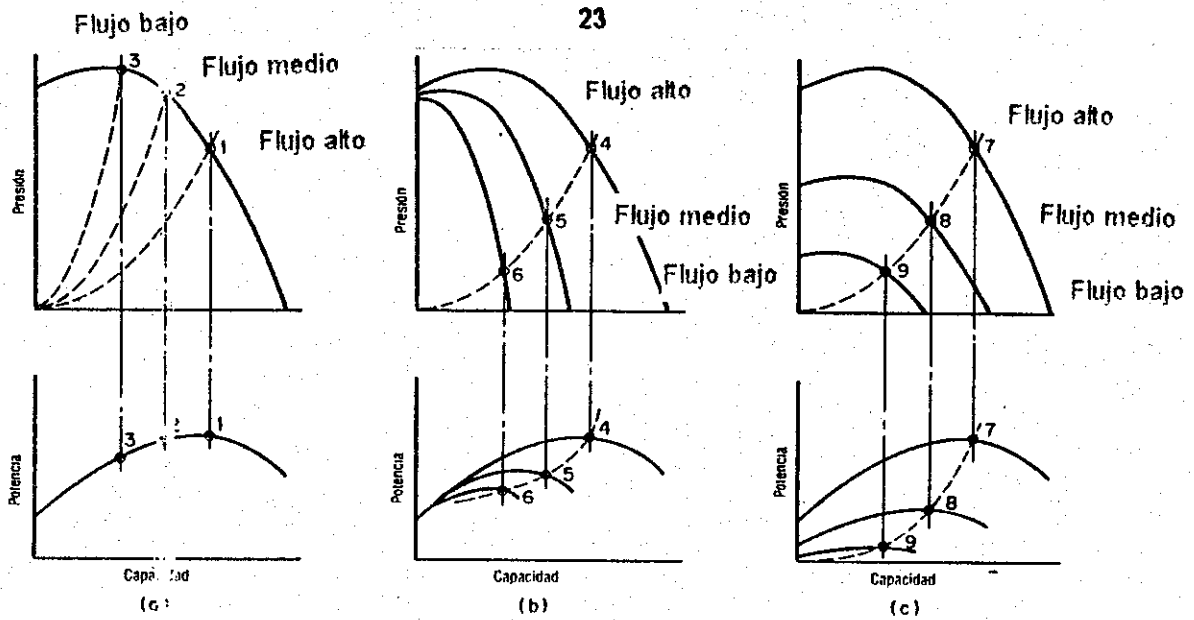


Fig. 1.6 Características de un ventilador con
a) compuerta de control
b) control por venas variables de entrada
c) control de velocidad variable.

Las curvas anteriores corresponden específicamente a un ventilador centrífugo con las aspas curvadas hacia atrás, aunque básicamente se puede aplicar a cualquier ventilador.

En la figura anterior se ven representadas las curvas del ventilador y las del sistema, así como la visualización del punto de operación para los diferentes tipos de variación del flujo.

Para los sistemas de ventilación que utilizan compuertas o dampers para la variación del flujo, fig. 1.6.a., las curvas no se ven afectadas por dichos elementos. Los dampers completamente abiertos se representan con el punto No. 1; esto significa que no se tiene ninguna resistencia al paso del aire. Los demás puntos corresponden a un cerrado progresivo de los dampers. El consumo de potencia se ve reducido a medida que los dampers se van cerrando.

Para los ventiladores que utilizan venas variables, figura 1.6.b., la curva del ventilador se ve afectada, ya que éstas producen un remolino que reducen la capacidad de desarrollar la presión en el ventilador, aunque no afectan la presión. El punto No. 4 representa el estado completamente abierto correspondiente al punto No.1 de la figura anterior. Los demás puntos también corresponden a un cerrado progresivo de las venas de entrada. La curva de potencia

ilustra una reducción gradual del consumo de potencia, y es éste menor que para la utilización de dämpers.

La última figura, figura 1.6.c., representa el comportamiento del ventilador para la utilización de un variador de velocidad en el motor. Se observa que dicha variación afecta tanto el flujo de aire como la presión.

El punto No. 7 representa la máxima velocidad del motor-ventilador teniéndolo para los puntos restantes reducciones progresivas de la velocidad del motor. En la curva de potencia, se observa un ahorro relativamente grande en consumo. Con este método, se obtiene el funcionamiento del ventilador con bajo ruido y bajas pérdidas por erosión.

CAPÍTULO 2**VARIADORES DE VELOCIDAD****2.1. Variadores de velocidad de corriente continua:**

Antes de entrar de lleno a los variadores de velocidad de corriente alterna, se le debe dar cabida a los variadores de velocidad para motores de corriente continua que fueron desarrollados ya hace muchos años.

Existe una mejor regulación de la velocidad en las máquinas de corriente continua que las de alterna. Es ésta característica que hace que las máquinas de corriente continua se sitúen en una posición insustituible.

El sistema de regulación de la velocidad lo constituye un motor de corriente continua y un controlador.

Aplicando un voltaje continuo, se puede operar el motor desde el controlador. La velocidad del motor es directamente proporcional al voltaje aplicado.

Básicamente el controlador se compone de una puente rectificador de fase controlada por medio de circuitos lógicos que controlan el voltaje continuo que es suministrado a la armadura del motor.

Se tienen cuatro métodos para poder regular la velocidad en dichas máquinas que son:

a. La modificación del flujo de excitación:

Por medio de un potenciómetro, el cual se denomina "control de campo".

b. Ajustando las resistencias del circuito del inducido:

Variando la tensión de bornes del inducido y la corriente del inducido mediante la combinación de resistencias en paralelo y en serie con el inducido.

- Con una fase controlada de corriente continua variable:

Modificando la tensión del inducido en bornes de un motor de excitación independiente, que se conoce como "control de la tensión del inducido".

Básicamente la variación de la velocidad de los motores de corriente continua responde a la variación de cualquiera de los parámetros de la siguiente ecuación:

$$S = k (V_a - I_a R_a) / \phi$$

El método más utilizado para la variación de la velocidad es el método de la modificación del flujo de excitación. Corresponde una de las cualidades de los motores de derivación, aunque también es aplicable a los de excitación compuesta.

Las ventajas existentes de estos variadores radican en:

- La tecnología de dicho variador es más simple que las de un variador de corriente alterna.
- La eficiencia es buena durante todo el rango de operación de velocidad.
- Cuentan con un tamaño físico menor, aunque los motores son relativamente más grandes.

Pero también existen ciertas desventajas:

- Son de difícil adquisición los motores y también su eventual reparación.
- El factor de potencia decrece con la velocidad.
- No es posible lograr una función de by-pass, útil para el mantenimiento o reparación del variador, debido a la construcción del motor de corriente continua.
- Se requiere que toda la potencia de entrada en el motor sea convertida, y se tienen que usar dispositivos más grandes.

2.2. Mecanismo de corriente de Eddy:

Consiste de un clutch de corriente de Eddy y un motor de inducción.

Este método cuenta con algunas ventajas respecto al variador de frecuencia:

- Costo inicial muy reducido.
- Menor tamaño y tecnología sencilla.
- Buena función sin sobrecargas cuando se operan con cargas de alta inercia.

Sus desventajas son:

- a. Los clutches de corriente de Eddy son de poco uso en nuestro medio y, por supuesto, de difícil reparación eventual.
 - b. No se puede utilizar la función de by-pass.
 - c. Se necesita de la utilización de un tacómetro para tener retroalimentación en el eje del motor.
- La eficiencia decrece con el aumento de la velocidad, ya que se controla la velocidad con el deslizamiento del clutch.

2.3. Variadores de velocidad de corriente alterna:

Generalmente los motores de inducción no son elementos adecuados para su utilización con amplios rangos de control de velocidad. Los motores de inducción operan con un deslizamiento del 3%.

Existen varios métodos para la variación de la velocidad de un motor de inducción:

- a. Modificando el número de polos.

- b. Variando la tensión en bornes.
- c. Variando la resistencia del rotor.
- d. Mediante el control de deslizamiento rotórico por medio de control reostático del rotor.
- e. Por procedimientos mecánicos.
- f. Variando la resistencia del rotor bobinado.
- g. Modificando la frecuencia.

2.3.1. Cambio de número de polos:

Para el cambio de la velocidad de los motores; con dicho método, se pueden obtener tres diferentes métodos:

a. El método de polos consecuentes

Consiste en la conexión de las bobinas de tal forma que cambia el número de polos en el estator.

b. Estatores de devanados múltiples

Consiste en embobinar el estator con diferentes grupos de bobinas, de tal forma que conformen diferentes números de polos para cada grupo.

c. Modulación de la amplitud polar

Consiste en combinar dos ondas sinusoidales de diferentes frecuencias en un dispositivo denominado mezclador, y tiene como resultado componentes con frecuencias iguales a la suma y a la diferencia de las dos frecuencias originales de entrada.

2.3.2. Variando la tensión en bornes:

Puede existir una variación de la velocidad del motor de inducción con la variación de la tensión en los bornes dado que el par interno es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada en los bornes. Si se tiene una curva de operación como la siguiente,

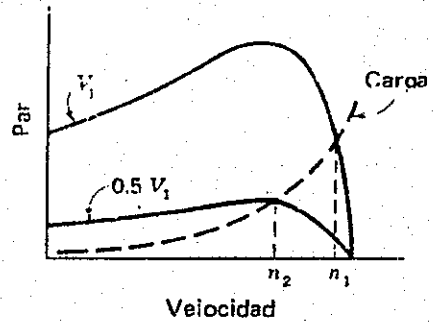


Fig. 2.1 Regulación de la velocidad mediante la tensión de alimentación.

Se puede variar la velocidad con la variación del voltaje. Dicha variación se produce en un rango reducido y sólo es aplicable a motores pequeños, de jaula de ardilla, que activan ventiladores.

2.3.3. Variando la resistencia del rotor

Las bobinas del rotor están conectadas a un control que conecta las resistencias variables en serie con las bobinas, y controla también el torque. Este método es utilizado en aplicaciones donde se requiere un alto torque de arranque tales como: grúas, molinos, trenes de laminación, etc.

Sus ventajas son:

- Bajo costo inicial, en unidades de alta potencia.
- Requiere un control simple, ya que no toda la potencia necesita ser controlada.
- La construcción física del motor es simple, y es fácil su mantenimiento y adquisición.
- Tiene buen funcionamiento con cargas de alta inercia.

Sus desventajas son:

- El rotor utiliza delgas para el contacto con las escobillas, las cuales se dañan con frecuencia y son de difícil reparación.
- No se tiene buena eficiencia a velocidades bajas.
- El rango de velocidad es de dos a uno y su regulación es pobre con ventiladores como cargas.

Con la variación de la resistencia rotórica, la curva de respuesta de par velocidad se ve modificada, y tiene así para una curva de carga específica diferentes velocidades.

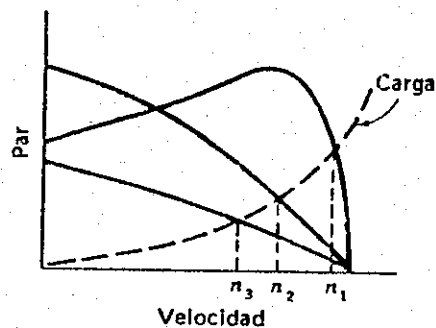


Fig. 2.2 Regulación de velocidad mediante la resistencia del rotor

2.3.4. Mediante el control de deslizamiento rotórico por medio de control reostatórico de rotor:

Para un motor de rotor bobinado, una resistencia adicional en su circuito del rotor lleva a incrementar el deslizamiento.

Este método tiene las siguientes ventajas:

- Mayor rango de operación para velocidades menores a la síncrona.
- Facilidad de uso en control manual y automático.
- Costos de inversión relativamente bajos, así como de su mantenimiento.

Sus desventajas son:

- Rendimiento bajo debido a las pérdidas en la resistencia del rotor y para un valor determinado de resistencia rotórico y tiene baja regulación de la velocidad.

Este método se utiliza para cargas intermitentes con par de arranque elevado con aceleración y desaceleración rápidas, como por ejemplo, grúas de fundiciones y acerías.

2.3.5. Por procedimientos mecánicos:

Se utilizan prácticamente para motores con características de velocidad constantes a tensión nominal. Al igual que los motores de corriente continua, se utilizan poleas cilíndricas y cónicas, engranajes, bombas hidráulicas, embragues de deslizamiento magnético, etc.

La mayoría de los fabricantes proveen el paquete de variador motor y se construyen en un rango de potencia de 5 a 50 hp.

Las ventajas que se encuentran en dichos variadores son:

- Bajos costos de inversión inicial.
- Se tiene un manejo sencillo y fácil de entender.
- El mantenimiento y reparaciones son fáciles.

Las desventajas son:

- No es posible hacer un control remoto de la velocidad.
- Existe mucha dificultad con la utilización de fajas que requieren de una tensión óptima.
- Con las cargas de alta inercia se puede tener ciertos problemas teniéndose que dar procedimientos de arranque y paro escalonados, y un sobredimensionamiento de la unidad.
- Las poleas necesitan de una periódica revisión y reemplazo de las fajas.
- Los engranes requieren de una revisión mecánica periódica debido a los desgastes de sus dientes.

2.3.6. Modificando la frecuencia:

Existe una variación directamente proporcional de la velocidad sincrónica de un motor de inducción con el cambio de la frecuencia de la alimentación; pero es necesario también que se efectúe un cambio de la tensión aplicada para mantener el mismo grado de saturación y la densidad del flujo en el entrehierro.

Estas variaciones de tensión y frecuencia se pueden realizar por medio de una fuerza motriz aparte, para accionar un alternador independiente a una velocidad variable. Esto también es posible utilizando un convertidor de frecuencia de inducción.

Generalmente se pueden dividir en dos las clases de dispositivos de control de los motores polifásicos de inducción mediante corriente alterna y reguladores de la frecuencia:

- El ciclo-convertidor:

Es un convertidor de frecuencia estático para transformar una frecuencia elevada a una inferior sin acoplamiento de corriente directa. Se puede utilizar con motores de inducción de jaula polifásicos, motores de rotor bobinado y motores síncronos.

- El inversor de rectificador:

Es un dispositivo que asocia un inversor (para transformar de corriente continua a corriente alterna) con un rectificador polifásico. Es utilizado con motores síncronos, de rotor bobinado y de inducción.

Por efectos de estudio de esta tesis, se analizará con detalle la siguiente sección dicho dispositivo.

2.4. El inversor:

Este dispositivo contiene los elementos para la transformación de corriente directa en alterna. Las configuraciones antiguas típicas eran las siguientes, alimentadas desde una fuente de corriente continua:

- El inversor de semionda:

Utiliza tres SCR's y produce una componente de corriente continua en la onda de salida o del estator.

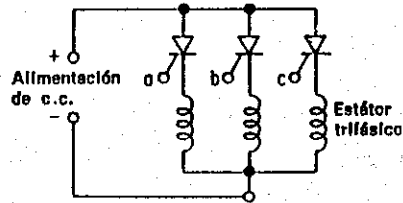


Fig. 2.3 Inversor de semionda trifásico

- El inversor de onda completa en puente trifásico, que utiliza 6 SCR's y tiene la ventaja de no generar ninguna componente de corriente continua en la salida; esto es con las cargas trifásicas balanceadas.

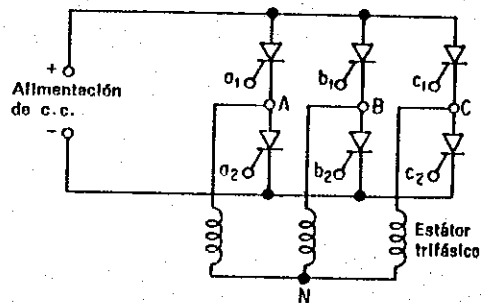


Fig. 2.4 Inversor de onda completa, en puente o múltiple, trifásico.

El inversor de onda completa se puede analizar por medio de tres métodos fundamentales de sintetizar la forma de onda de salida mediante el control de la anchura del impulso y de la forma de onda aplicada de los SCR's:

(a) Por el control de la relación de fase, que utiliza un circuito transistorizado emitiendo señales por medio de los SCR's en secuencias separadas 120° , se tiene en cada fase del estator una onda de la siguiente manera:

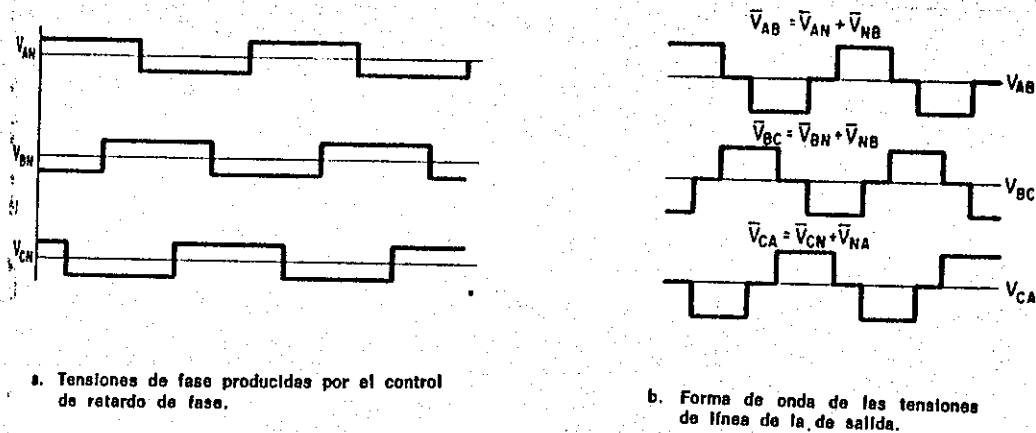


Fig. 2.5 Formas de onda de salida de un inversor trifásico mediante el control de la relación de fase: a) Tensiones de fase producidas por el control de retardo de fase
b) Forma de onda de las tensiones de línea de la de salida.

En este método, se inducen armónicos elevados del número impar en fase con la fundamental pudiéndose filtrar fácilmente para proporcionar una onda pura.

(b) Por el control de la forma de onda de salida de impulsos de anchura múltiple, denominado PWM (Pulse Width Modulation), y es un método de control de la anchura del impulso por el disparo del SCR apropiado en cada semiciclo.

Para un inversor monofásico,

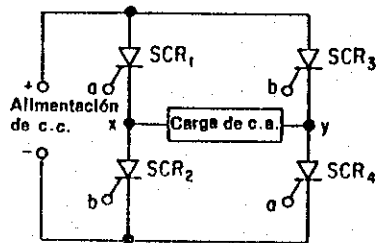


Fig. 2.6 Control de anchura múltiple del inversor monofásico (en puente)

a) Inversor en puente monofásico

Es posible disparar SCR's 1 y 4 en un semiciclo para dar lugar a corriente en la carga en un sentido y disparar los SCR's 3 y 2 en el siguiente semiciclo para originar corriente en la carga en el sentido opuesto. En cada semiciclo, los pares de SCR's apropiados se disparan de tal forma que producen anchuras de impulsos múltiples que poseen el equivalente de corriente eficaz de una onda senoidal:

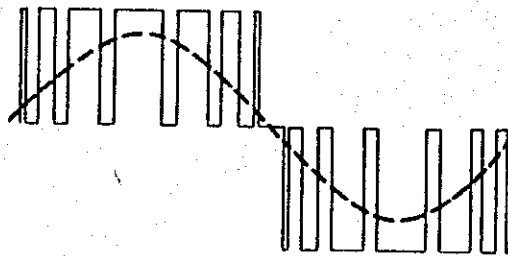


Fig. 2.7 Control de anchura múltiple del inversor monofásico (en puente)

b) Formas de onda PWM.

Los mismos tipos de disparo puede utilizarse para un inversor de onda completa trifásico. Las Tensiones V_{an} , V_{bn} y V_{cn} son efectivamente senoidales y desplazadas 120° respectivamente.

(c) Por la reducción seleccionada de armónicos para el control de la forma de onda de salida. Mediante el control adecuado de la anchura de impulsos son posibles formas de onda de salida que no posean armónicos por debajo del undécimo, y tiene las siguientes ventajas:

- El disparo queda considerablemente simplificado.
- Se tiene un control total de la onda fundamental desde cero hasta el máximo sin generación de armónicos.

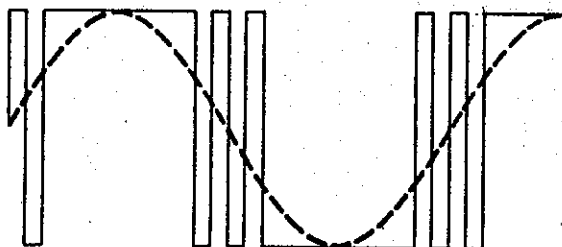


Fig. 2.8 Síntesis de la forma de corriente alterna mediante la reducción seleccionada de armónicos.

Los circuitos inversores se ven alimentados por una fuente de corriente continua que se obtiene generalmente de una fuente trifásica de 60 Hz utilizando un circuito de SCR de onda completa trifásico. Con la regulación de fase de la conducción de dichos SCR's, la forma de onda de salida de corriente continua y de entrada al inversor puede variarse de cero a un máximo. Este método de control es el procedimiento más común de suministrar una señal de salida de frecuencia variable a la tensión variable al estator de un motor de inducción de jaula de ardilla, de rotor bobinado o motor síncrono polifásico.

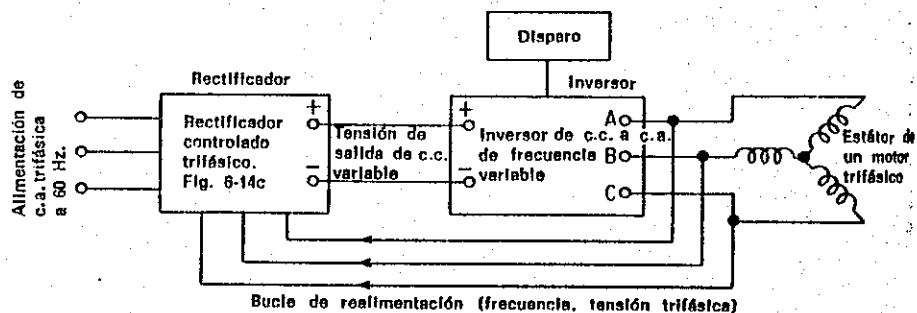


Fig. 2.9 Circuito Inversor completo

La reducción de frecuencia acusada en la carga es retroalimentada al rectificador de regulación de fase que a la vez reduce la tensión de entrada de corriente continua al inversor en proporción a la variación de frecuencia.

Los métodos anteriormente mencionados permiten también controlar la tensión de salida y con algunos grupos prefabricados de rectificadores-inversores trifásicos de estado sólido; la frecuencia y la tensión de salida son realimentadas al circuito de disparo para proporcionar la regulación adecuada de la tensión de salida.

Existen otros métodos para la regulación de la salida del inversor antes de conectarlos al estator de un motor trifásico y es por procedimientos a base de transformadores (reguladores de inducción, amplificadores magnéticos, o SCR's de fase controlada).

En los métodos más modernos, se han reemplazado los controles por medio de SCR's por transistores comunes, lo que permite obtener una utilización más sencilla. También se ha sustituido el rectificador de fase controlada por un rectificador común, por no requerirse un puente controlado para funciones regenerativas (especialmente en potencias bajas).

El diagrama de un variador de velocidad con esta configuración se presenta en la siguiente página en donde también se puede observar la aplicación del módulo IGBT, que garantiza una onda de salida más cercana a la senoidal, con la ventaja de proporcionar menos ruido en el motor y una mayor eficiencia.

El módulo IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) surgió de la necesidad de minimizar los problemas con los motores de corriente alterna generados por el suministro, por los transistores bipolares, de una onda de corriente no senoidal pura. Este efecto es causado por el bajo rango de switcheo de los transistores bipolares que limitan a los variadores a frecuencias de 2.5 kHz. Con los módulos IGBT se obtienen menores pérdidas por alta frecuencia y mucho más alto rango de switcheo. También se obtiene una frecuencia ocho veces mayor que la utilizada en los variadores con transistores bipolares.

Como se obtiene una onda de salida casi sinusoidal, se reducen los picos de corriente en un 42%. Como resultado, se obtiene un alto torque disponible y una abolición de la pulsación del torque. También se elimina el ruido en los motores y se calientan menos.

Es importante mencionar que la configuración de algunos variadores de velocidad puede basarse en retroalimentación de dos parámetros, voltaje y corriente en conjunto con la frecuencia. Cuando se toma la corriente en conjunto con la frecuencia (current source) se trata de sensarla para tenerla controlada; esto es muy importante en motores grandes. Y cuando se toma el voltaje y la frecuencia (voltage source) como parámetros de control de velocidad, el inversor puede alimentar a más de un motor. Esto es particularmente útil en aplicaciones de grupos de motores pequeños a los que se desea variar la velocidad.

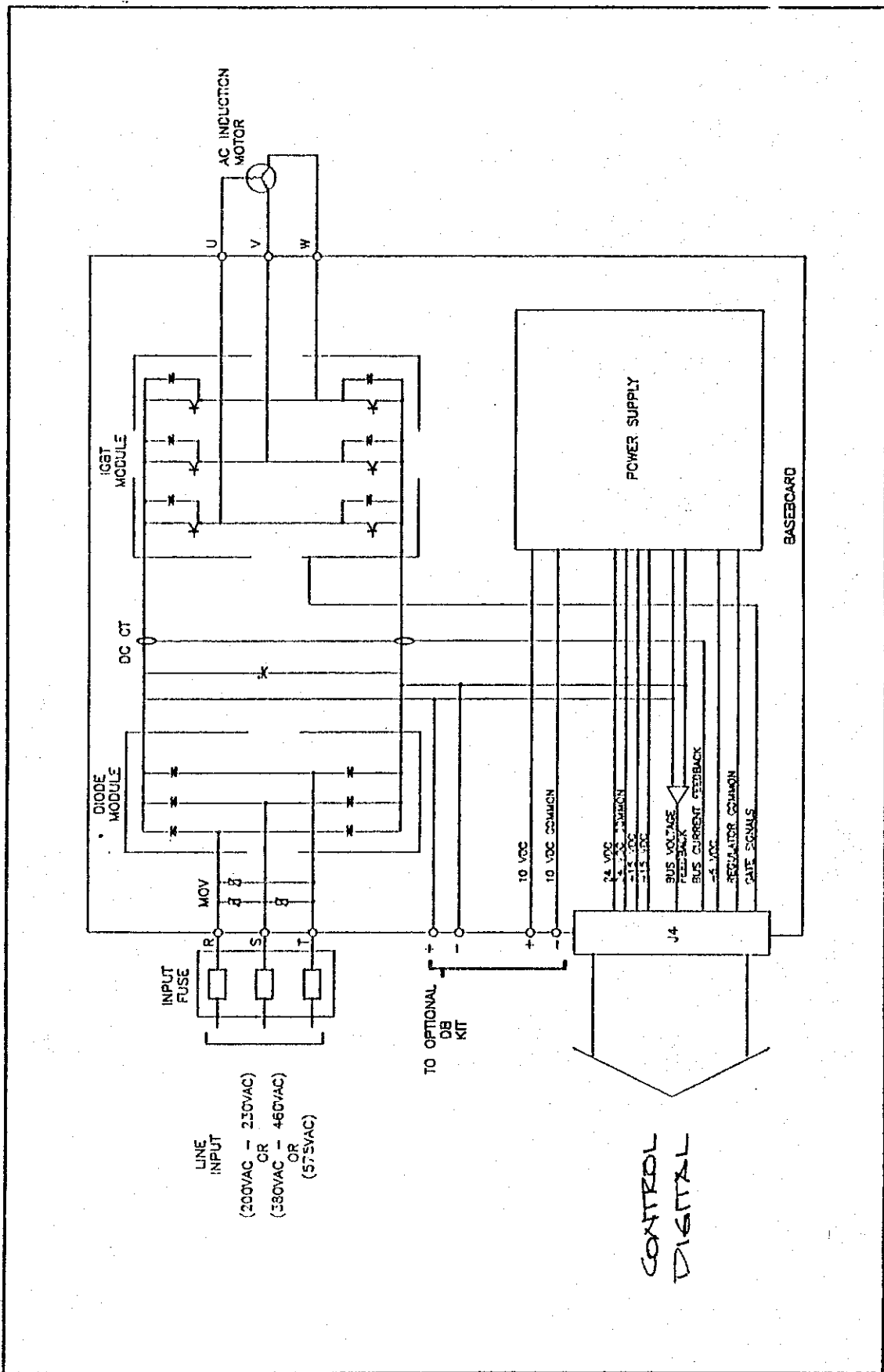


Fig. 2.10 Diagrama electrónico de variador actual

CAPITULO 3

ANALISIS DEL CASO

3.1. Descripción:

El caso escogido corresponde a una caldera de un ingenio azucarero de los más importantes en producción a nivel nacional.

La caldera, en su función primordial, proporciona vapor a un sistema, a una presión y temperatura deseada.

La caldera escogida pertenece al sistema de producción de un ingenio azucarero y su diagrama básico de elementos y flujos de aire se puede ver en la figura de la siguiente página.

La caldera es del tipo acuatubular en la cual el agua de alimentación se ve calentada, por medio de energía térmica producida dentro de la caldera, la convierte en vapor y posteriormente sobrecalentado para convertirla en vapor seco.

3.2. Funcionamiento básico:

El agua de entrada es conducida al denominado economizador, que calienta el agua de 250 a 410 grados Fahrenheit, con los gases de salida de la caldera. Luego esta agua calentada es trasladada al domo superior. En el domo superior, se da la separación del vapor de agua. Es aquí donde se produce vapor húmedo. En la parte superior del domo, se encuentran los separadores de vapor o mamparas que separan el vapor húmedo de los arrastres de agua que éste lleve.

Luego el agua de alimentación calentada baja por gravedad al domo inferior. En el domo inferior, se concentran los lodos del agua que deben ser purgados cada cierto tiempo, según la concentración de los mismos.

De la salida del domo inferior, el agua se ve calentada por los gases en el hogar, en donde se produce la combustión

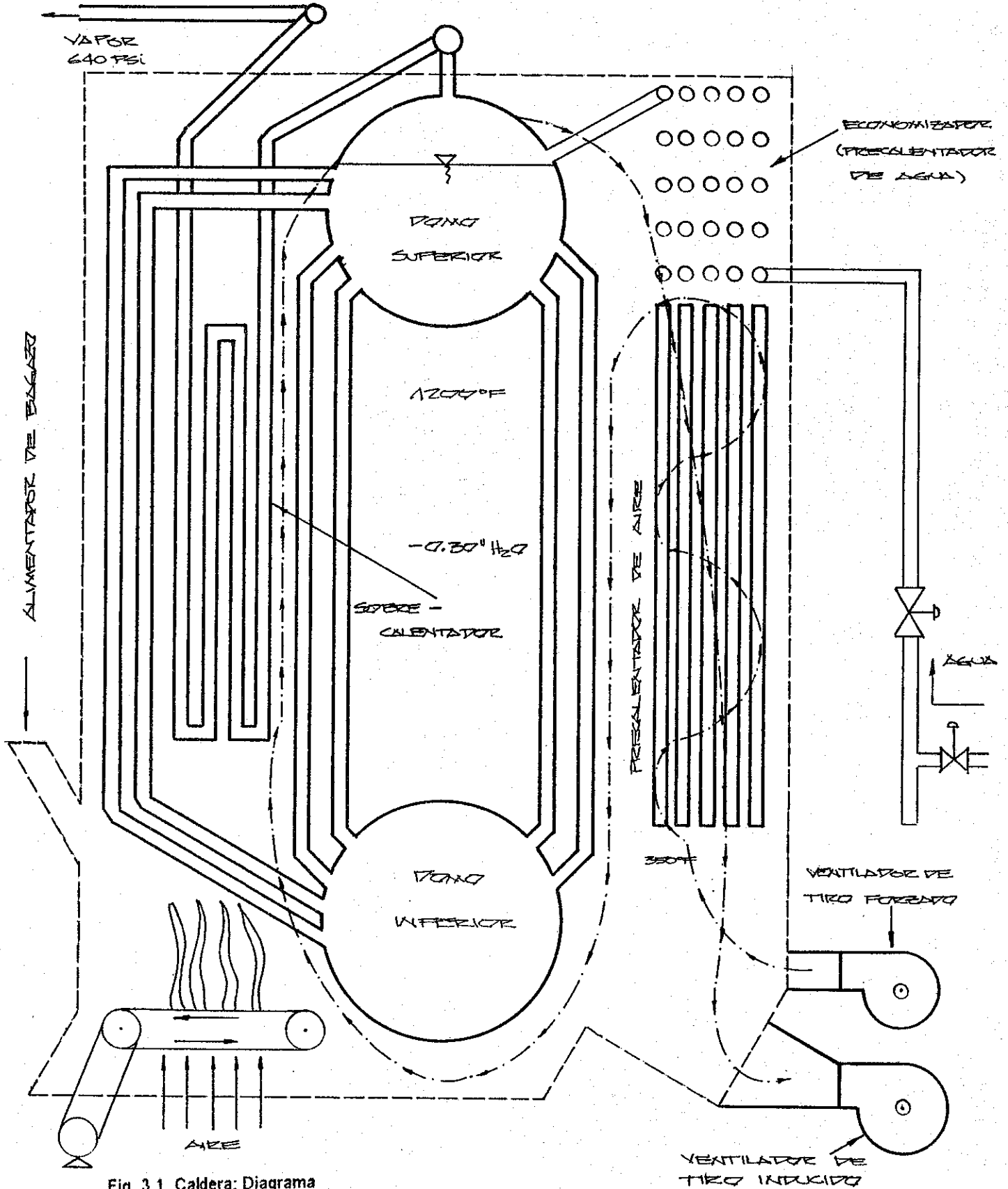


Fig. 3.1 Caldera: Diagrama y flujo de aire

CALDERA

El combustible puede ser bagazo o búnker C. Esta agua que ya se convierte en vapor es devuelta al domo superior. Luego teniendo vapor húmedo, se conduce a un sobrecalentador, que proporciona vapor seco del vapor húmedo. Este vapor es el que se transmite a las líneas de producción y a las turbinas para la producción de energía eléctrica en el proyecto de cogeneración.

Parte importante en el sistema de la caldera es la circulación del aire que efectúa la transmisión del calor interno.

El aire se ve alimentado a la caldera por medio de el accionamiento de un ventilador de tiro forzado que introduce al sistema aire a temperatura ambiente. Luego dicho aire pasa por medio del precalentador de aire elevando su temperatura de 350 a 389 ° F; luego se conduce a la parte del domo inferior y luego al hogar. En el hogar, el aire se sube pasando por el sobrecalentador de agua regresando por el economizador de agua para luego ser evacuado al exterior por medio del ventilador de tiro inducido. Básicamente en el transcurso de la trayectoria del aire dentro de la caldera, existe la transferencia de calor hacia el agua o vapor por medio de las tuberías.

El combustible utilizado para la caldera es bagazo y búnker C. Para el bagazo, que es utilizado durante la zafra, se utilizan alimentadores por medio de unas bandas transportadoras y unas tolvas hacia el hogar de la caldera. En dicho hogar, se encuentra una banda transportadora para asegurar una combustión uniforme del bagazo. Un ventilador (overfire) proporciona aire continuamente al hogar para que el bagazo se consuma en su totalidad.

3.3. Ventiladores en el sistema:

El estudio de la presente se basará en el funcionamiento de los ventiladores de tiro forzado e inducido, en su función interactiva.

Para mantener una presión adecuada en el hogar, -0.3 plg de agua, se requiere que los ventiladores ajusten sus flujos. Estos ajustes los logra por medio de dampers reguladores del flujo que están introducidos dentro de los ductos respectivos. Estos dampers son hidráulicos y son controlados electrónicamente por medio de un control distribuido localizado en una cabina de control.

En dicha cabina se localiza un sistema electrónico de control que monitorea y sensa los diferentes parámetros de la caldera, tales como temperaturas, cantidad de vapor, porcentaje de apertura de los dampers, etc.

El diagrama lógico de control se muestra en la figura de la siguiente página.

En este diagrama, se ven representados los controles, por medio de elementos de control que finalmente influyen en el manejo de los ventiladores de tiro inducido, forzado y del alimentador de bagazo.

Durante el proceso o trabajo normal de la caldera, es importante mantener siempre un control de su funcionamiento analizando los productos de la misma. En el ingenio en mención, dicho análisis lo realizan una o dos veces al día.

La tabla siguiente representa algunos de dichos datos:

El analizador que proporciona dichos datos se coloca en la salida de los gases antes de salir por la chimenea.

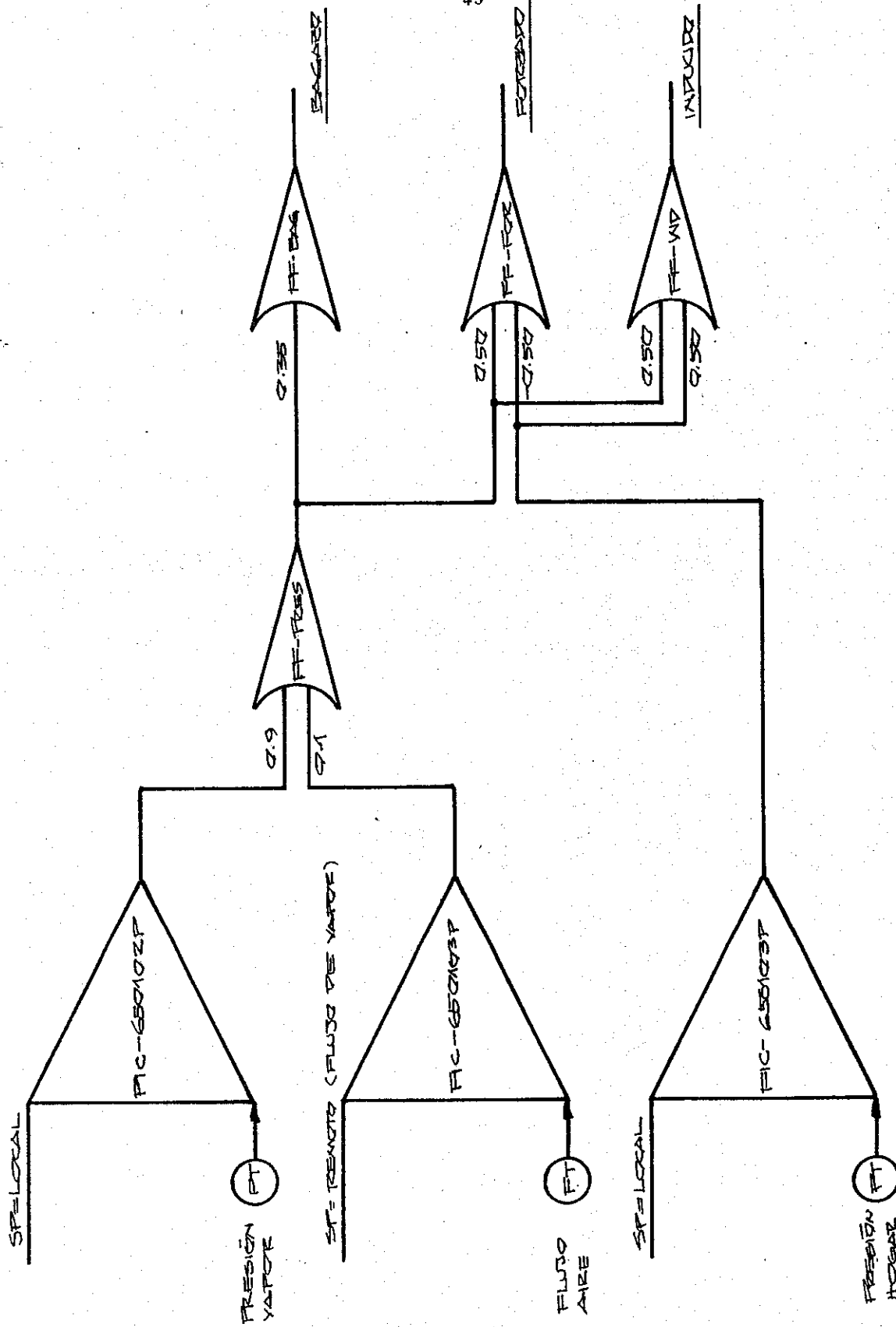


Fig. 3.2 Diagrama lógico de control

DIAGRAMA LÓGICO

Tabla 3.1 Análisis de gases de salida

Caldera	Fecha	Hora	Combustible	%Oxígeno	%CO2	PPM CO	%N
1-A	24-1	20:42	bagazo	4.5	16.5	3386	72.8
1-A	26-1	9:37	búnker C	6.5	14.1	2	73.0
1-A	26-1	18:05	búnker C	8.6	9.7	0	86.0
1-A	27-1	9:12	bagazo	6.4	14.2	3313	71.7
1-A	29-1	15:34	bagazo	7.4	13.2	3431	72.1
1-A	31-1	12:46	bagazo	11.4	9.0	3290	72.1
1-A	3-2	11:32	búnker C	9.0	9.0	9.7	79.9
1-A	4-2	8:55	búnker C	5.8	11.8	650	88.0
1-A	26-2	14:34	bagazo	8.5	12.2	3329	70.4
1-A	27-2	14:34	bagazo	12.2	8.5	1142	67.1
1-A	29-2	15:43	bagazo	14.6	6.2	1250	64

De la tabla anterior, se puede observar que la utilización de búnker C como combustible da a la caldera mejor eficiencia y una mejor combustión.

3.4. Características particulares:

La caldera escogida es la más grande en aplicación en el ingenio de un grupo de cuatro calderas que se encuentran interconectadas en la salida por medio de un manifold que suministra el vapor necesario para la producción de azúcar y la cogeneración de energía al sistema nacional.

El combustible utilizado durante la zafra es el bagazo que representa un 25% de la caña que ingresa al ingenio. No obstante en algunos días durante la zafra y durante la época de

mantenimiento, se requiere la utilización de búnker C para la generación de vapor. Esta caldera es la única que cuenta con quemadores de búnker C.

Para la alimentación de bagazo al hogar de la caldera, se cuenta con alimentadores que son impulsados por un motor que lo conduce hacia tolvas y luego al hogar. Esta caldera cuenta con cinco alimentadores y representa un 30% de consumo de bagazo total, dado también a que la velocidad del motor de alimentación es mayor que las otras calderas.

El ingenio en su totalidad consume un promedio de 12,500 toneladas por día de caña molida que nos dá 3125 toneladas de bagazo por día en su totalidad, que es el 25%. La caldera en estudio está consumiendo el 30% que son 937.5 toneladas de bagazo por día. La meta por alcanzar por este año es de 2 millones de toneladas de caña molida en su totalidad.

Los quemadores que se encuentran en el hogar son dos y se ajustan para que quemen combustible a 8 y 11 galones por minuto respectivamente. El consumo diario de combustible para la caldera es de un promedio de 18,000 galones.

En algunos casos muy remotos, se combinan los dos tipos de combustibles.

Los ventiladores utilizados en el tiro inducido y el forzado se ven esquematizados físicamente en las ilustraciones de las páginas siguientes.

El motor del ventilador de tiro inducido es de 500 hp trabajano a 1792 rpm y 796 V trifásicos, con un consumo, a plena carga, de 325 A.

El motor del ventilador de tiro forzado es de 200 hp a 1792 rpm y 480 V trifásico, con un consumo, a plena carga, de 209 A.

Los dämpers son accionados por medio de un actuador hidráulico que le proporciona la apertura deseada. Normalmente los dämpers del inducido se encuentran de 50 a 75% de apertura mientras que el en el ventilador de tiro forzado de 75 a 100%. La apertura de los dämpers se ve condicionada a la presión mantenida dentro del hogar.

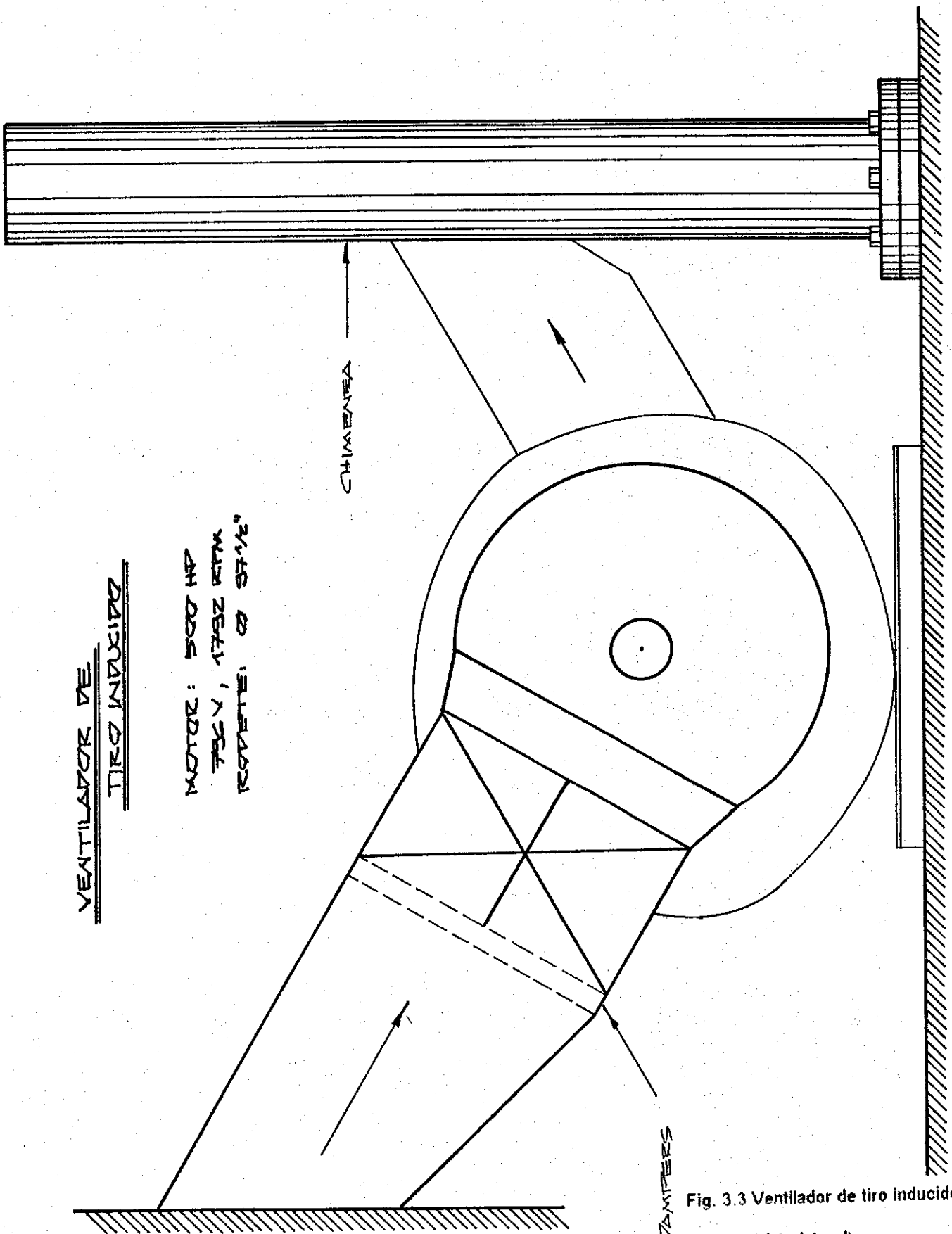
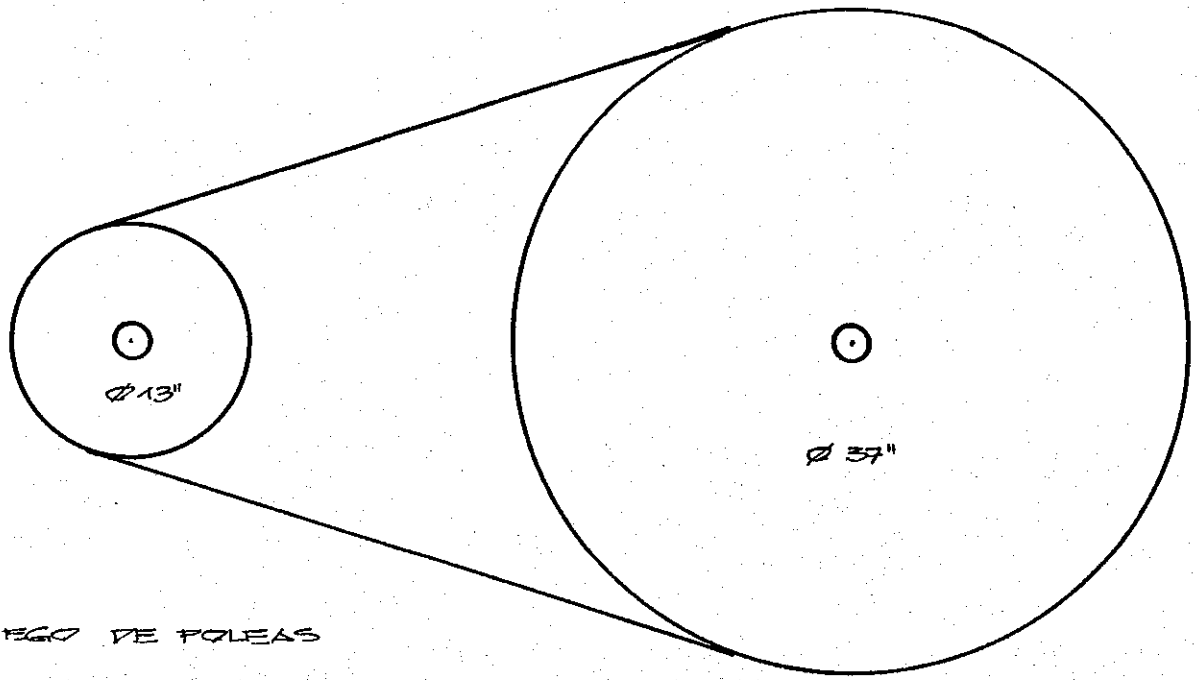
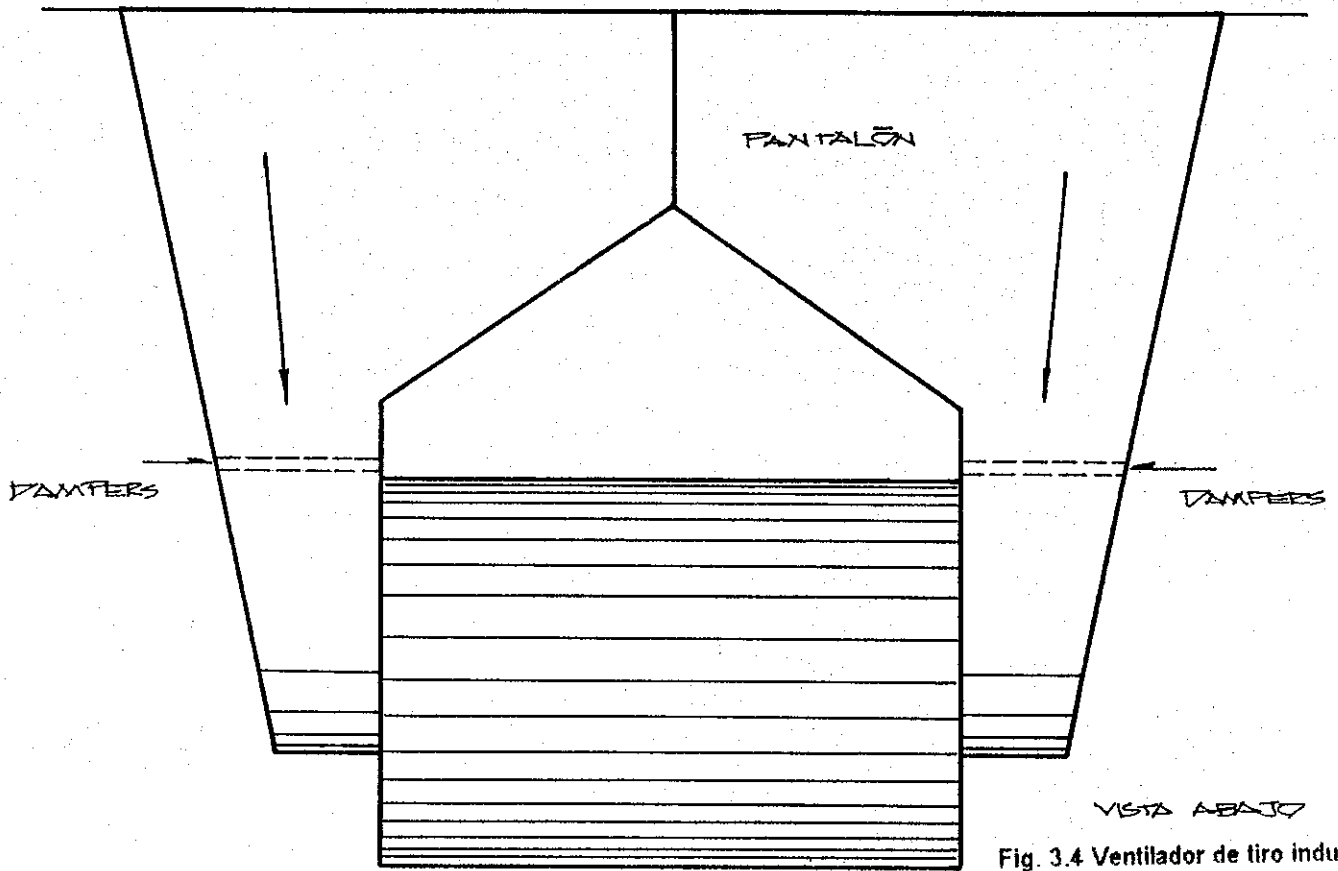


Fig. 3.3 Ventilador de tiro inducido
(vista lateral)



JUEGO DE POLEAS

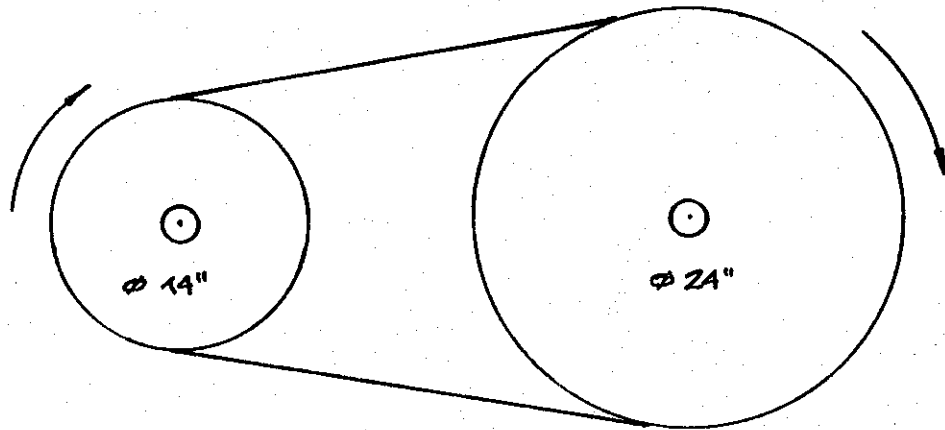


VISTA ABAJO

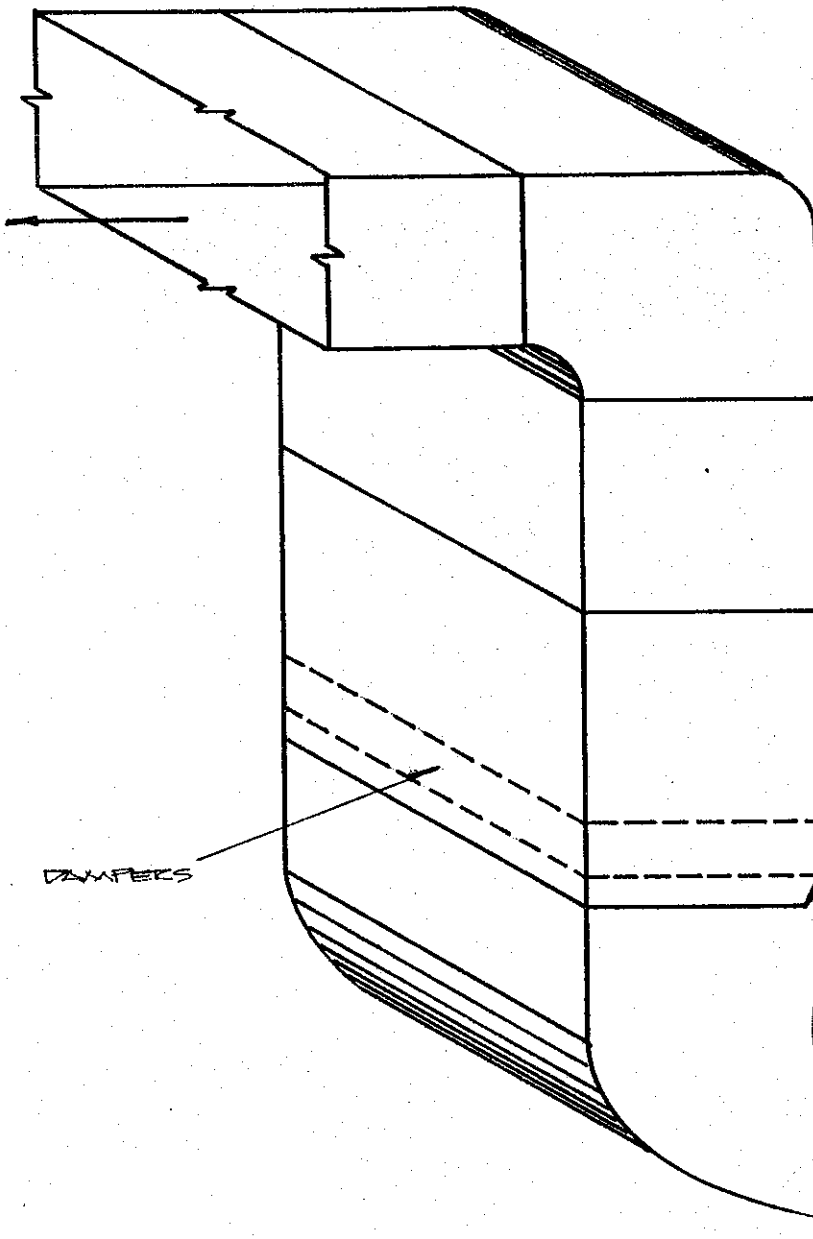
Fig. 3.4 Ventilador de tiro inducido

(vista frontal)

VENTILADOR DE TIRO INDUCIDO



JUEGO DE PULSAS



VENTILADOR DE
TIRO FORZADO

MOTOR: 200 HP,
480V, 1750 RPM
RODete: Ø 50"

VISTA FRONTAL

Fig. 3.5 Ventilador de tiro forzado

3.5. Cálculos:**3.5.1. Ventilador de tiro inducido:****Datos de placa del motor:**

Potencia:	500 hp
Voltaje:	796 V
Amperaje:	325 A
Velocidad:	1792 rpm

Entre el motor y el eje del rodete existe un acoplamiento por medio de fajas, según los siguientes datos:

Diámetro de la polea del motor: 13"

Diámetro de la polea del rodete: 37"

Por medio de las fajas, se transmite la misma velocidad tangencial entre las dos poleas:

$$V_{\text{motor}} = V_{\text{rodete}}$$

$$W_{\text{m}} \times R_{\text{m}} = W_{\text{r}} \times R_{\text{r}}$$

$$W_{\text{r}} = (W_{\text{m}} \times R_{\text{m}}) / R_{\text{r}} = (1792 \times 13/2) / (37/2)$$

$$= \underline{629.63 \text{ rpm}}$$

Esta velocidad se mantiene siempre, ya que la variación del flujo de aire se efectúa directamente por medio de los dámpers dentro de los ductos.

La caldera permanece en funcionamiento 95% del año, entonces se tiene en horas:

$$T = 365 \text{ días} \times 0.95 \times (24 \text{ h} / 1 \text{ día}) = \underline{8,322 \text{ h}}$$

El flujo en los ductos es:

Para 100 % de apertura de los dampers;

$$V = W \times R = 629 \text{ rpm} \times (37 \text{ plg} / 2) \times (2 \times 3.14 \text{ rad} / 1 \text{ rev}) \times (1 \text{ pie} / 12 \text{ plg}) = 6,098.95 \text{ pie/min}$$

Tomando en cuenta las dimensiones del ducto:

$$\begin{aligned} \text{Flujo} &= 6,098.95 \text{ pie/min} \times (122 \text{ plg} \times 72 \text{ plg}) \times (1 \text{ pie}^2 / 144 \text{ plg}^2) = \\ &= \underline{372,035.95 \text{ pies}^3 / \text{min} \text{ (CFM)}} \end{aligned}$$

Para el cálculo de la potencia requerida durante el funcionamiento de la caldera, se tendra como base la curva caracteristica siguiente:

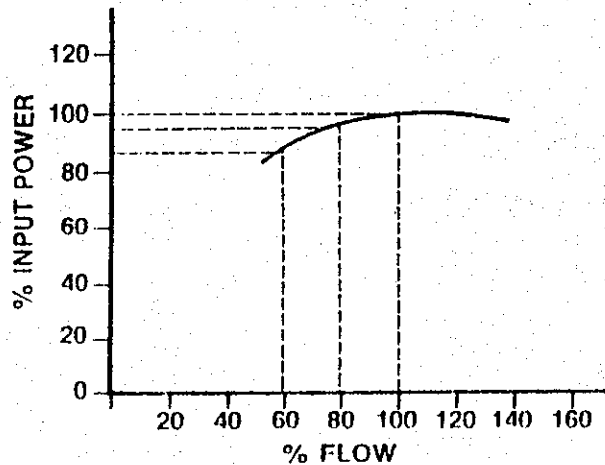


Fig. 3.6 Requerimientos de potencia utilizando dampers

Prácticamente se mantiene el requerimiento de energía, aun cuando cambian los dampers de posición.

Entonces se tiene la potencia para 100% del flujo; esta caracteristica se presenta únicamente para el arranque de la caldera:

La potencia requerida es del 100%

$$P = 500 \text{ hp} \times 0.746 = 373 \text{ kW}$$

La potencia durante el año es entonces, si se trabajara al 100% :

$$P = 373 \text{ kW} \times 8322 \text{ h} = \underline{3.104.106 \text{ kWh / año}}$$

Los dámpers mantienen normalmente de 50 a 75 % de apertura, que para efectos de cálculo se tomará el 62 % como promedio.

De la figura anterior:

Para 60% del flujo se tiene 90% de potencia requerida, y para 80% del flujo 59% de potencia.

Entonces para 62.5% del flujo se obtiene 93.75 % de potencia.

$$P = 373 \text{ kW} \times 0.9375 \times 8322 \text{ h} =$$

$$= \underline{2.910.099.40 \text{ kWh / año}}$$

Teniendo que el costo por Kw/hr cuando se utiliza búnker C que es Q 0.25 y cuando se utiliza bagazo Q 0.06. Prácticamente la caldera permanece utilizando búnker C un 50 % del año, que son los meses de mantenimiento del ingenio y algunos días durante la zafra, y el resto utiliza bagazo como combustible.

Entonces los costos de operación son:

$$\begin{aligned} \text{Costo} &= 2.910.099.40 \times 0.5 \times (0.25 + 0.06) = \\ &= \underline{Q \ 451.065.41 / \text{año}} \end{aligned}$$

3.5.2. Ventilador de tiro forzado:

Datos de placa del motor:

Potencia: 200 hp

Voltaje: 480 V
 Amperaje: 209 A
 Velocidad: 1792 rpm

Al igual que el ventilador de tiro inducido, existe un acoplamiento por medio de fajas del eje del motor al eje del rodete. Las dimensiones de las poleas son:

Diámetro de la polea del motor: 14"

Diámetro de la polea del rodete: 24"

Haciendo la misma secuencia de los cálculos anteriores se tiene:

$$V_{\text{motor}} = V_{\text{rodete}}$$

$$W_r = (W_m \times R_m) / R_r = (1792 \times 14/2) / (24/2) =$$

$$= \underline{1.045.33 \text{ rpm}}$$

De los cálculos anteriores se tiene:

$$T = 8,322 \text{ h}$$

Calculando el flujo en los ductos:

$$V = 1,045.33 \times (24/2) \times (2 \times 3.14 / 1) \times (1/12) =$$

$$= \underline{6.568 \text{ pie}^3/\text{min}} \quad (100\% \text{ apertura})$$

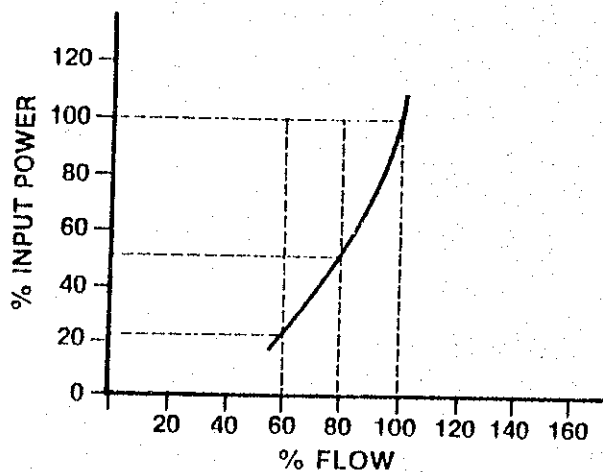
El flujo es entonces:

$$\text{Flujo} = 6568 \times (57 \times 32) \times (1/144) =$$

$$= \underline{83.194.67 \text{ pies}^3/\text{min}} \quad (\text{CFM})$$

De la misma figura anterior, se puede observar que la potencia no varía significativamente con la reducción del flujo en los ductos.

La potencia a un 100 %



**Fig. 3.7 Requerimientos de potencia
utilizando variador electrónico**

Según se puede observar de esta figura existe una considerable reducción de los requerimientos de la potencia al disminuir el flujo de aire.

Esta curva es el resultado de la combinación de las ecuaciones de afinidad de los ventiladores.

$$Q2 / Q1 = W2 / W1$$

$$P2 / P1 = (W2 / W1)^2$$

$$HP2 / HP1 = (W2 / W1)^3$$

De donde se deduce que:

$$HP2 / HP1 = (Q2 / Q1)^3$$

Entonces :

Para el ventilador de tiro inducido con flujo promedio de 62.5 %,

$$P = 373 \times 0.244 \times 8322 =$$

$$= \underline{757,401.86 \text{ kWh/año}}$$

Para el ventilador de tiro forzado:

El flujo promedio en dicho ventilador es de 90 %, que da un 73% de la potencia requerida,

$$P = 149.2 \times 0.73 \times 8322 =$$

$$= \underline{906,398.95 \text{ kWh/año}}$$

Calculando los costos de operación:

Ventilador de tiro inducido:

$$\text{Costo} = 757,401.86 \times 0.5 \times (0.25 + 0.06) =$$

$$= \underline{Q \ 117,397.29 / \text{año}}$$

Ventilador de tiro forzado:

$$\text{Costo} = 906,398.95 \times 0.5 \times (0.25 + 0.06) =$$

$$= \underline{Q \ 140,491.84 / \text{año}}$$

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS4.1. Resumen de resultados:

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior representan un comportamiento en el consumo de los ventiladores tanto del tiro forzado como del tiro inducido.

La importancia de obtener dichos resultados radica en que si se requiere de un cambio en el control del flujo del aire de la caldera, se tiene que hacer un estudio económico de inversión contra ahorro de energía.

Haciendo un resumen de los resultados importantes para este análisis, se tiene:

Tabla 4.1 Resumen de resultados

Descripción	Control de flujo de aire	
	Con dámpers	Con variador electrónico
Ventilador de tiro forzado	1,210,601.34	906,398.95
	(kWh/ año)	(kWh/ año)
	187,643.21	140,491.84
	(Q/ año)	(Q / año)
Ventilador de tiro inducido	2,910,099.40	757,401.86
	(kWh/ año)	(kWh/ año)
	451,085.41	117,397.29
	(Q / año)	(Q / año)

4.2. Análisis económico:

De los resultados anteriores, se puede observar que se tiene un ahorro en consumo de energía, con los siguientes resultados:

- Ventilador de tiro Inducido:

$$\begin{aligned} \text{Ahorro} &= 2,910,099.40 - 1,210,601.34 = \\ &= \underline{1,699,498.06 \text{ kWh/año}} \end{aligned}$$

El costo ahorrado es entonces:

$$\begin{aligned} \text{Costo ahorrado} &= 451,065.41 - 117,397.29 = \\ &= \underline{Q \ 333,668.12/\text{año}} \end{aligned}$$

- Ventilador de tiro forzado:

$$\begin{aligned} \text{Ahorro} &= 1,201,601.34 - 906,398.95 = \\ &= \underline{295,202.39 \text{ kWh/año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo ahorrado} &= 187,643.21 - 140,491.84 = \\ &= \underline{Q \ 47,151.37 / \text{año}} \end{aligned}$$

Entonces lo que se está ahorrando durante el año en total es:

$$\begin{array}{r} Q \ 333,668.12 \\ + \quad \quad 47,151.37 \\ \hline Q \ 380,819.49 \end{array}$$

Según los datos anteriores, se puede deducir que definitivamente el uso de un variador de velocidad para los motores en la regulación de flujo de aire en dicha caldera es de menor consumo de energía, y por tanto menor costo de operación.

Para la implementación de un variador de velocidad en sustitución de los dämpers existentes se requiere de una inversión, de la cual se hace el siguiente análisis:

Prácticamente lo que se necesita para la implementación del equipo es lo siguiente:

- Compra de un variador electrónico por motor, de torque constante y que se pueda controlar por medio de un control remoto.
- Montaje del variador en una cabina refrigerada y seca, con su debida aterrización.
- Cambio de acoplamiento del eje del motor al eje del rodete.

De los trabajos anteriores, la compra del variador de velocidad representa el mayor costo al que se va a incurrir. Los demás trabajos representan un 10% aproximadamente de dicho costo.

Los costos aproximados de los variadores y de los demás trabajos son:

- Variador de 500 hp, 796 V trifásico

Q 300,000.00

- Trabajos de obra civil, red de tierras, refrigeración de cabina, deshumidificación y acoplamiento mecánico (se asume 10% del costo del variador).

Q 30,000.00

- Variador de 250 hp, 440 V trifásico

Q 230,000.00

- Trabajos de obra civil, red de tierras, refrigeración de cabina, deshumidificación y acoplamiento mecánico (se asume 10% del costo del variador)

Q 23,000.00

La inversión inicial del proyecto es de:

Q 583,000.00

Los gastos que se incurren anualmente en dichos equipos son dirigidos básicamente al mantenimiento preventivo. Dicho mantenimiento es únicamente en limpieza de los circuitos impresos, ajustes en los parámetros de programación y ajustes en las terminales de los cables. Los costos de mantenimiento son, comparados con la inversión inicial, nulos.

Para los inversionistas es de vital importancia saber cuál es el tiempo en el cual se ve pagada dicha inversión inicial.

Para este fin, se deben combinar las siguientes fórmulas:

- Factor presente pago único:

$$1. \quad P = F [1 / (1+i)^n]$$

- Factor de recuperación de capital:

$$2. \quad A = P [i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)]$$

- Factor cantidad compuesta serie uniforme;

$$3. \quad F = A [((1+i)^n - 1) / i]$$

En donde:

i = tasa de interés por periodo (%)

P = valor o suma de dinero en un tiempo determinado (Q)

F = valor o suma de dinero en un tiempo futuro (Q)

A = una serie consecutiva, igual al final de cada periodo (Q/año)

n = número de periodos (año)

De la ecuación 1 se obtiene:

$$F = P (1+i)^n$$

Igualando esta última ecuación con la ecuación 3:

$$A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] = P (1+i)^n$$

$$A/P \left[(1+i)^n - 1 \right] = i (1+i)^n$$

$$A/P (1+i)^n - A/P = i (1+i)^n$$

$$(1+i)^n [A/P - i] = A/P$$

$$(1+i)^n = A/P (A/P - i)$$

Aplicando la ley de logaritmos:

$$n \ln (1+i) = \ln [A/P (A/P - i)]$$

$$n = \ln [A/P (A/P - i)] / \ln (1+i)$$

Los valores son entonces:

$$A = Q \ 380,819.49$$

$$P = Q \ 583,000.00$$

$$i = 0.28$$

Sustituyendo:

$$n = \ln [380,819.49 / (583,000.00 (380,819.49 / 583,000.00 - 0.28))] / \ln (1 + 0.28) =$$

$$n = 0.56 / 0.25$$

$$n = \underline{2.24 \text{ años}}$$

Este resultado nos dice que la inversión inicial se ve pagada en un plazo de 2.24 años o 2 años y 3 meses.

CONCLUSIONES

1. Técnicamente hablando, la implementación de variadores de velocidad en sustitución de dämpers para la regulación de flujo, presenta una serie de ventajas de flexibilidad en el manejo, facilidad de mantenimiento y ahorro en consumo de energía, que la justifica.

2. En el aspecto económico, presenta un ahorro en el consumo de energía eléctrica. En vista de que el plazo no es mayor de 5 años, se considera que tal inversión es de mediano plazo y dependerá de las políticas de la empresa si se deciden a invertir en este aspecto.

3. El avance de la tecnología, en todos los aspectos, crea medios para poder desarrollar mejor las funciones de las máquinas, obteniendo así mejor provecho de sus funciones, y que es importante en el desarrollo de nuevos proyectos.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario el reemplazo, por razones económicas, de sistemas de ajuste de flujo de aire con dámpers por variadores de frecuencia que actúan sobre el motor (ventiladores y bombas centrífugas).

2. Es importante que los empresarios tengan conciencia del tipo de equipo que se va a utilizar, dado que en el mercado internacional se puede cotizar variedad de equipos de diferentes marcas y calidades que pueden en algún momento afectar los cálculos de recuperación de la inversión. Será necesario obtener la mayor información técnica posible y recomendaciones en aplicaciones similares en otras industrias; no sólo se deberán de guiar por los precios de los equipos.

3. Dado que el equipo que se va a utilizar es del tipo electrónico, será necesario contar, ya sea con personal de planta, o con empresas externas que puedan dar respaldo en operación y reparaciones eventuales.

BIBLIOGRAFIA

- **Allen-Bradley. Energy savings with adjustable frequency drives.**
Publicación DGT-2.1. 1984. Estados Unidos: s.p.i.

- **Baumeister, Theodore. Marks manual del Ingeniero mecánico.**
Segunda Edición. México: Editorial McGraw-Hill. 1988. 250 pp.

- **Blank, Leland. Ingeniería económica.**
Tercera Edición. México: Editorial McGraw-Hill. 1994. 546 pp.

- **Chapman, Stephen. Máquina eléctricas.**
México: Editorial McGraw-Hill. 1987. 450pp.

- **Fitzgerald, A. E., et.al. Teoría y análisis de las máquina eléctricas.**
Segunda Edición. España: Editorial Hispano Europea. 1980. 587 pp.

- **Kosow, I.L. Control de máquinas eléctricas.**
Segunda Edición. México: Editorial Reverté. 1991. 429 pp.

- **Magnetek. GPD Drives for fan applications**
Manual de automatización. 1990. Estados Unidos: s.p.i.

- **Magnetek. GPD. Training manual**
Manual de entrenamiento. 1992. Estados Unidos: s.p.i.

- **Severns, W.H., et.al. Energía mediante vapor, aire o gas.**
Quinta Edición. México: Editorial Reverté. 1976. 503 pp.

- **Siemens, Radialventilatoren**
Catálogo V 12. 1987. Alemania: s.p.i.

- **Van Zile, James. How to cut centrifugal pump and fan energy costs.**
Manual de entrenamiento de variadores de velocidad. 1984. Estados Unidos:
s.p.i.