



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

**AHORRO ENERGÉTICO EN LA CALDERA 1 DEL INGENIO PANTALEÓN
IMPLEMENTANDO VARIADORES DE FRECUENCIA A LOS TIROS
MECÁNICOS**

Erick Israel Lima Aguirre
Asesorado por Ing. Francisco González

Guatemala, febrero de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**AHORRO ENERGÉTICO EN LA CALDERA 1 DEL INGENIO PANTALEÓN
IMPLEMENTANDO VARIADORES DE FRECUENCIA A LOS TIROS
MECÁNICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR**

ERICK ISRAEL LIMA AGUIRRE

ASESORADO POR EL INGENIERO FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Edgar Neptalí Carrera Díaz
EXAMINADOR	Ing. Conrado Guillermo Szasdi Soto
EXAMINADOR	Ing. Julio Roberto Urdiales Contreras
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

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 graduación titulado:

AHORRO ENERGÉTICO EN LA CALDERA 1 DEL INGENIO PANTALEÓN IMPLEMENTANDO VARIADORES DE FRECUENCIA A LOS TIROS MECÁNICOS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha de marzo de 2006.

Erick Israel Lima Aguirre

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 10 de enero 2007.

Ingeniero
Coordinador Area de Electrotécnica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado:
**AHORRO ENERGÉTICO EN LA CALDERA 1 DEL INGENIO PANTALEÓN
IMPLEMENTANDO VARIADORES DE FRECUENCIA A LOS TIROS
MECÁNICOS**, elaborado por el estudiante Erick Israel Lima Aguirre.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle
que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la
misma.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Francisco Javier González López'.

Ing Francisco Javier González López
ASESOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala, 12 de enero 2007.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**AHORRO ENERGÉTICO EN LA CALDERA 1 DEL INGENIO
PANTALEÓN IMPLEMENTANDO VARIADORES DE
FRECUENCIA A LOS TIROS MECÁNICOS**, desarrollado por el
estudiante, Erick Israel Lima Aguirre, por considerar que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

FE Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área de Electrotécnica

FJGL/sro

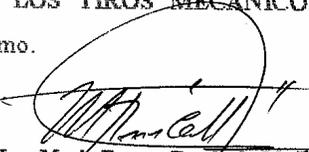


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

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 Graduación del estudiante, Erick Israel Lima Aguirre titulado: **AHORRO ENERGÉTICO EN LA CALDERA 1 DEL INGENIO PANTALEÓN IMPLEMENTANDO VARIADORES DE FRECUENCIA A LOS TIROS MECÁNICOS,** procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
DIRECTOR



GUATEMALA, 12 DE ENERO 2,007.

ACTO QUE DEDICO A

DIOS

JESUCRISTO TODO PODEROSO

Por ser el guía en mi vida y permitirme alcanzar este éxito.

MI MADRE

Rosario de María Aguirre Berganza

Gracias por tu apoyo incondicional y tu ejemplo de espíritu de lucha, este éxito alcanzado es nuestro.

MI ESPOSA

Nancy Paola Peralta de Lima

MI HIJO

Erick Fernando

Por ser la chispa que llena de alegría y de temas nuestro hogar.

MIS HERMANOS

Ing. Erwin Lima, Ing. Sergio Lima y Mario Romeo Lima Aguirre (Q.E.P.D.)

Por ser parte importante en mi vida.

MIS FAMILIARES

Tíos, primos, abuela, cuñados, etc.

MI AMIGO Y ASESOR

Ing. Francisco González

Por sus consejos y orientación en mi trabajo de graduación

MI PATRIA	Guatemala
MI UNIVERSIDAD	San Carlos de Guatemala Alma mater
MI FACULTAD	Ingeniería
MIS CENTROS DE ESTUDIO	CSS, Computer Science School Colegio Católico Jesús de Candelaria Colegio Católico Teresa de Ávila
MIS CATEDRÁTICOS	Por sus conocimientos y experiencias transmitidas a mi persona

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. CONCEPTOS BÁSICOS	1
1.1 Potencia eléctrica	1
1.1.1 Potencia activa	2
1.1.2 Potencia reactiva	3
1.1.3 Potencia total o aparente	3
1.2 Frecuencia Eléctrica	4
1.3 Variadores de Frecuencia Eléctrica	6
1.3.1 Fundamentos tecnológicos de la regulación electrónica de velocidad en motores	10
1.3.2 Funcionamiento del motor asíncrono alimentado por convertidores de frecuencia	17
1.4 Procesos industriales y regulación de velocidad	21

2.	SITUACION ACTUAL DE LAS INSTALACIONES	25
2.1	Inventario técnico	25
3.	ANÁLISIS TEÓRICO-TÉCNICO	29
3.1	Eficiencia de la implementación de variadores	29
3.2	Eficiencia en el accionamiento de los motores eléctricos	30
3.3	Flexibilidad y eficiencia en el control	31
3.4	Eficiencia energética-ahorro y medio ambiente	32
3.5	Calidad de la energía eléctrica	35
3.6	Tres perspectivas de la calidad de la energía eléctrica	37
3.7	Terminología para la descripción de disturbios	38
3.7.1	Pico de voltaje	38
3.7.2	Depresión de voltaje (Sags)	39
3.7.3	Dilatación de voltaje (Swell)	39
3.7.4	Sobrevoltaje	40
3.7.5	Parpadeo (Flickers)	41
3.7.6	Interrupciones de energía	41
3.7.7	Ruido eléctrico	42
4.	ESTUDIO ECONÓMICO	43

CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	51
APÉNDICE	53
ANEXOS	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Triángulo de potencia	4
2.	Fem inducida en un conductor de un generador de corriente simple	5
3.	Efecto de campo giratorio sobre una espira en cortocircuito	6
4.	Sistema magnético de la máquina asíncrona	7
5.	Unidad de control	10
6.	Rectificador trifásico de media onda	13
7.	Rectificadores controlados de tensión variable	13
8.	Ondulador	16
9.	Curvas de par-velocidad de un motor asíncrono alimentado a flujo constante	18
10.	Curvas de par-velocidad en régimen permanente para un motor asíncrono alimentado con tensión y frecuencia variable	19
11.	Curva volts por hertz	21
12.	Tipos de par para las diferentes aplicaciones industriales	22
13.	Carcaza del ventilador	27
14.	Ventilador centrífugo	27
15.	Esquema del ventilador centrífugo acoplado al motor eléctrico	28
16.	Curvas de potencia y torque en función de la velocidad características de bombas y ventiladores	33

17.	Ahorro energético	33
18.	Reducción del estrés mecánico	34
19.	Corriente de arranque reducida al emplear variadores de frecuencia	34
20.	Pico de voltaje	38
21.	Depresión de voltaje	39
22.	Dilatación de voltaje	40
23.	Sobrevoltaje	40
24.	Parpadeo (flickers)	41
25.	Interrupción de energía	41
26.	Ruido eléctrico	42
27.	Gráfico de velocidad de giro del motor vrs. consumo de energía	44
28.	Implementación de variadores de frecuencia eléctrica a los tiros mecánicos	52

TABLAS

I.	Datos técnicos de los motores de utilizados para impulsar los ventiladores centrífugos.	26
II	Datos del aire que circula por los ductos.	46

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potencia activa.
Q	Potencia reactiva
S	Potencia total o aparente
Fem.	Fuerza electromotriz inducida
f	Frecuencia eléctrica
s	Deslizamiento
n_s	Velocidad síncrona
n	Velocidad del eje del motor
W	Watt
DC	Corriente directa
AC	Corriente alterna
Wh	Watt por hora.
T	Torque
AMM	Administrador del Mercado Mayorista

GLOSARIO

Deslizamiento	Es la diferencia entre la velocidad actual de un motor a inducción y la velocidad síncrona que es la velocidad a la que correría un motor bobinado de manera similar.
Energía	Es la capacidad de los cuerpos o conjunto de estos para realizar un trabajo.
Estator	Parte inmóvil de un motor o generador.
Factor de potencia	Relación entre la potencia activa y la potencia total o aparente.
Flujo magnético	Es una medida de la cantidad de magnetismo a partir de la fuerza y la extensión de un campo magnético.
Frecuencia eléctrica	Número de veces que se repite la señal alterna en un segundo. La unidad de medida es el Hertz.
Inductancia	Dispositivo eléctrico que almacena energía en forma de campo magnético.
Potencia eléctrica	Velocidad a la que se consume la energía eléctrica.

Rotor	Parte giratoria de una máquina eléctrica.
Tiristor	Dispositivo semiconductor formado por cuatro capas de material semiconductor con estructura PNPN o bien NPNP sus siglas en inglés son SCR (<i>Silicon Controlled Rectifier</i>).
Torque	Medida del efecto de rotación que una fuerza produce al ser aplicada sobre un cuerpo rígido.
Transistor	Dispositivo electrónico semiconductor que se utiliza como amplificador o conmutador electrónico.

RESUMEN

El desarrollo de los países va de la mano con el incremento del consumo de recursos energéticos, por esta razón la búsqueda del ser humano de suplir este consumo con diferentes procesos que permitan obtener la generación de energía eléctrica: hidráulica, térmica, eólica, atómica, etc. Cada uno de estos procesos ha sido motivo de desarrollo tecnológico en diferentes ramas de ingeniería: Mecánico, eléctrico, sistemas de control, etc., buscando mejorar la eficiencia en cada uno de ellos.

El desarrollo continuo de equipos que incrementan la eficiencia de los procesos son motivo de interés pues el mundo actual competitivo lo demanda.

El presente trabajo busca incrementar la eficiencia en la generación de energía eléctrica del ciclo de condensación de un turbogenerador de 11,500 kW, al hacer uso de la tecnología actual eléctrica, implementando variadores de frecuencia eléctrica o convertidores de velocidad en los motores que impulsan a los ventiladores centrífugos que generan el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera (Forzado principal, forzados auxiliares e inducido), haciendo de esta forma el proceso más eficiente al demandar de los motores únicamente la potencia necesaria de acuerdo a las diferentes producciones de vapor de la caldera. Al implementar este modelo como beneficios adicionales al ahorro energético obtendremos:

- Reducir las corrientes de arranque a valores que no produzcan estrés electromecánico en los motores.

- Reducir el estrés mecánico en los acoples de los ventiladores a los motores.
- Reducir las pérdidas en el hierro de los motores con lo que obtendremos la reducción de la temperatura de operación de las máquinas eléctricas prolongando su vida útil.
- Tener un sistema de diagnóstico avanzado en los motores eléctricos teniendo el despliegue de las diferentes variables eléctricas en tiempo real: Corriente, voltaje, potencia eléctrica, frecuencia, etc.

Al hacer uso de los variadores de frecuencia eléctrica logramos que la reducción del consumo de energía eléctrica por parte de los equipos auxiliares del ciclo se traduzca en el potencial de incremento de la generación para suministrar a la red eléctrica nacional.

OBJETIVOS

- **General**

Reducir el consumo de energía eléctrica de los motores eléctricos que están acoplados a los ventiladores centrífugos que crean el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera.

- **Específicos**

1. Mejorar las condiciones de arranque de los motores de los ventiladores centrífugos que producen el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera.
2. Analizar el uso de variadores de frecuencia eléctrica para reducir el consumo de energía eléctrica por parte de los equipos utilizados para ingresar aire al hogar y egresar los gases de combustión de la caldera.
3. Cuantificar la reducción del consumo de energía eléctrica al implementar los variadores de frecuencia eléctrica a los motores de los ventiladores de los tiros forzados así como del tiro inducido en la caldera.

4. Disponer de un avanzado sistema de diagnóstico y protección de los motores que generan el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera.

5. Mejorar el proceso de combustión en la caldera al tener un mejor control del ingreso de aire y egreso de gases de combustión del hogar.

6. Reducir el estrés electromecánico de las espiras finales del bobinado estático e incrementar la vida útil de los motores empleados para generar el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación está orientado y dirigido a estudiantes de ingeniería eléctrica, ingenieros electricistas, jefes de mantenimiento.

A menudo se dice que el desarrollo del mundo moderno, va de la mano del crecimiento del consumo de recursos energéticos. Cada día vemos el desarrollo de nuevos equipos que mejoran la calidad de vida de los seres humanos: Computadoras, lavadoras, secadoras, etc. Todos estos equipos tienen en común el uso de la energía eléctrica y por consiguiente las demandas de energía eléctrica en las sociedades que hacen uso de estos equipos van cada día en incremento. Por esta razón, la transformación de las diferentes formas de energía en electricidad ha cobrado interés, buscando en cada etapa la forma más eficiente al generarla, transportarla, distribuirla y consumirla.

En el mundo moderno, cada vez más competitivo, nos exige buscar el incremento de la eficiencia en los diferentes procesos productivos y esto por consiguiente compete al sector energético. La tecnología es un aliado muy importante que nos permite mejorar los resultados en la producción.

El uso de los variadores de frecuencia eléctrica o convertidores de velocidad en los procesos mejora la eficiencia además el desempeño de los procesos y las máquinas.

Al implementar los variadores de frecuencia a los circuitos de potencia de los motores que mueven los ventiladores que producen el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera se reduce el impacto que tiene sobre la vida de los motores la corriente de arranque la cual es del rango de seis a ocho veces la corriente nominal, reduciendo de tal forma el estrés electromecánico al cual están sometidas las máquinas eléctricas, como beneficio adicional tendremos la reducción de las perturbaciones en la red eléctrica al reducir los picos y huecos de tensión, además reduciremos el estrés mecánico de los sistemas mecánicos de acople, al operar a menor frecuencia reduciremos las pérdidas en el hierro del motor y por consiguiente la temperatura de operación de la máquina eléctrica.

El elegir al variador de frecuencia para controlar la velocidad de operación del ventilador centrífugo y no el uso de sistemas mecánicos hace más eficiente al sistema completo al reducir el número de elementos del proceso, esto impacta en la optimización de los costos de operación.

Los sistemas motor-ventilador utilizados para ingresar aire al horno del hogar y egresar los gases de combustión son un caso típico de aplicaciones de par cuadrático las cuales son atractivas para reducir el consumo de energía eléctrica por medio de la implementación de los variadores de frecuencia eléctrica, pues estos sistemas se ajustan a la ley física que establece que “todo fluido genera sobre un cuerpo sólido en movimiento una fuerza resistente que aumenta en forma proporcional al cuadrado de la velocidad relativa”, en otras palabras al operar los sistemas a la mitad de la velocidad nominal utilizaremos únicamente un octavo de la potencia nominal, puesto que estos sistemas de acuerdo a las demandas de vapor requeridas por la turbina varían los caudales de ingreso de aire y egreso de gases de combustión a la caldera es aplicable tal principio.

Los variadores de frecuencia eléctrica interaccionan muy bien con los sistemas de automatización vía buses de campo como PROFIBUS, DeviceNet y otros.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 Potencia eléctrica

Para entender qué es la potencia eléctrica es necesario primeramente conocer el concepto de energía, que no es más que la capacidad que tiene un mecanismo o dispositivo eléctrico cualquiera para realizar trabajo.

Cuando conectamos un equipo o consumidor eléctrico a un circuito alimentado por una fuente electromotriz (Fem.), como puede ser una batería, la energía eléctrica que suministra fluye por un conductor, permitiendo que, por ejemplo, una bombilla de alumbrado, transforme esa energía en luz y calor, o un motor pueda mover una maquinaria.

De acuerdo con la definición de la física “La energía no se crea ni se destruye, se transforma”. En el caso de la energía eléctrica esa transformación se manifiesta en la obtención de luz, calor, frío, movimiento (en un motor), o en otro trabajo útil que realice, cualquier otro dispositivo conectado a un circuito eléctrico cerrado.

La energía utilizada para realizar un trabajo cualquiera, se mide en “Joule” y se representa por la letra **J**.

La potencia es la velocidad a la que se consume la energía. Si la energía fuese un líquido, la potencia sería los litros por segundo que vierte el depósito que lo contiene. La potencia se mide en Joule por segundo (J/s) y se representa con la letra **P**.

Un J/s equivale a un Watt (W), por tanto, cuando se consume un joule de potencia en un segundo, estamos gastando o consumiendo 1 Watt de energía eléctrica.

La unidad de medida de la potencia eléctrica “**P**” es el Watt y se representa con la letra W.

1.1.1 Potencia activa

Es la potencia en que el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es, por lo tanto, la realmente consumida por los circuitos. Cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda. Se designa

con la letra P y se mide en Vatios (W). De acuerdo con su expresión, la ley de Ohm y el triángulo de impedancias:

$$P = V * I * \text{Cos}\varphi \quad \text{Sistemas monofásicos}$$

$$P = 1.7321 * V * I * \text{Cos}\varphi \quad \text{Sistemas trifásicos}$$

1.1.2 Potencia reactiva

Esta potencia no tiene tampoco el carácter de realmente consumida y sólo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos. La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, por lo que no produce trabajo útil. Por ello que se dice que es una potencia *desvatada* (no produce vatios), se mide en voltamperios reactivos (VAR) y se designa con la letra Q.

$$Q = V * I * \text{Sen}\varphi \quad \text{Sistemas monofásicos}$$

$$Q = 1.7321 * V * I * \text{Sen}\varphi \quad \text{Sistemas trifásicos}$$

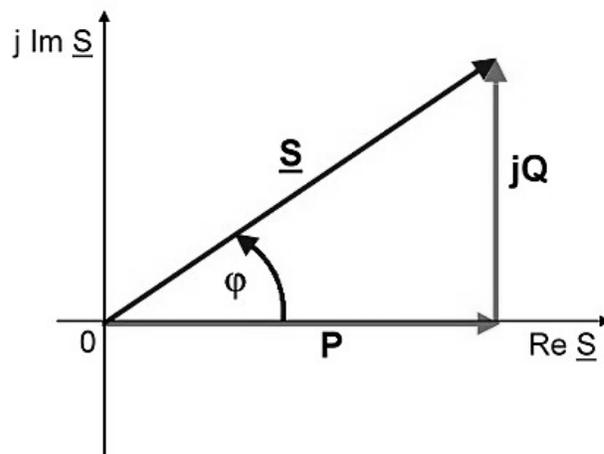
1.1.3 Potencia total o aparente

La potencia aparente de un circuito eléctrico de corriente alterna, es la suma de la energía que disipa dicho circuito en cierto tiempo en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes.

Esta potencia no es la realmente consumida, salvo cuando el factor de potencia es la unidad ($\text{co}\varphi=1$), y nos señala que la red de alimentación de un

circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a "entretener" bobinas y condensadores. Se la designa con la letra S y se mide en voltamperios (VA).

Figura 1. Triángulo de Potencia

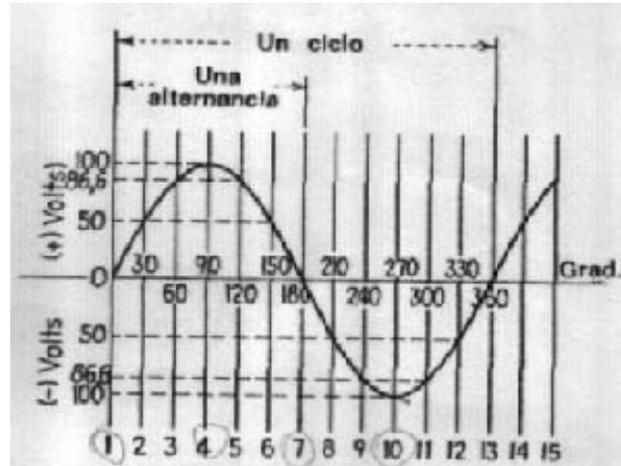


1.2 Frecuencia eléctrica

En la figura 2 se muestra el voltaje de CA comenzando en cero voltios, aumentando en sentido positivo hasta un valor máximo a los 90° , después bajando a cero a los 180° , donde cambia de polaridad, o alterna; volviendo después a aumentar hasta su valor máximo negativo a los 270° y bajando otra vez a cero a los 360° . Desde este punto continúa indefinidamente repitiendo este ciclo.

Los grados mencionados se llaman grados eléctricos.

Figura 2. Fem. Inducida en un conductor de un generador de CA simple



La Frecuencia eléctrica es el número de veces que se presenta un ciclo en un segundo y se expresa en Hertz. La frecuencia de un alternador depende de su velocidad de rotación y del número de polos, matemáticamente se expresa,

$$f = P \times N / 120$$

Donde

f = frecuencia en Hertz.

P = número de polos del alternador.

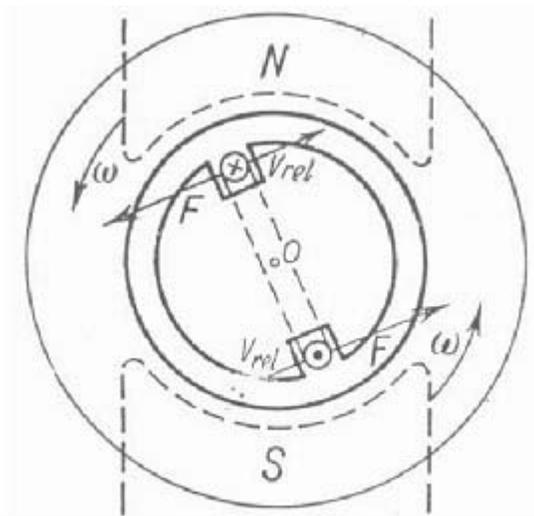
N = velocidad del alternador en r.p.m.

1.3 Variadores de frecuencia eléctrica

Como paso previo a la lectura de estos apuntes, es conveniente un repaso a los conceptos básicos de los motores asíncronos de jaula de ardilla, sobre todo a los puntos de arranque, velocidad y frenado. Igualmente, a continuación se exponen, como repaso, algunos conceptos sobre máquinas asíncronas (generadores y motores). Las máquinas eléctricas sirven para transformar la energía mecánica en eléctrica (generadores) o, inversamente, para transformar la energía eléctrica en mecánica (motores); es decir que las máquinas eléctricas son reversibles y pueden trabajar como generador o como motor.

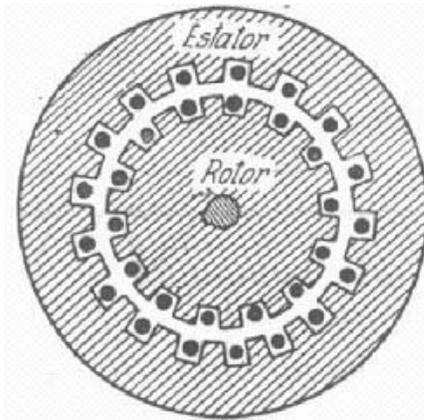
Estas máquinas asíncronas se basan en el principio de la acción de un campo magnético giratorio sobre un arrollamiento en cortocircuito.

Figura 3. Efecto de campo giratorio sobre una espira en cortocircuito



El sistema magnético de una máquina asíncrona consta de 2 núcleos: el núcleo exterior fijo que tiene la forma de un cilindro hueco y el núcleo cilíndrico interior giratorio.

Figura 4. Sistema magnético de la máquina asíncrona



La parte fija de la máquina se llama estator y la parte giratoria rotor.

Estator: en las ranuras ubicadas en el lado interior del estator se coloca un arrollamiento trifásico, constituido por 3 arrollamientos iguales (uno por cada fase) desplazado 120° entre sí (para un motor con un solo par de polos). Por lo visto en campos giratorios, los efectos simultáneos de las 3 corrientes de una red trifásica originan un campo constante que gira a velocidad síncrona (n_s).

Rotor: si en el interior del estator colocamos una espira en cortocircuito (rotor) que pueda girar alrededor de un eje, se tiene que:

- Al conectar el estator a la red se origina un campo giratorio que originará una Fem. inducida.
- Esta Fem. inducida, a su vez hace circular una corriente en la espira en cortocircuito (rotor), y por la acción del campo magnético creará cuplas distribuidas a lo largo de la espira haciendo que ésta trate de seguir al campo giratorio.
- Es obvio que la espira nunca podrá alcanzar al campo giratorio debido a la cupla resistente, que está compuesta en primer término por las pérdidas por rozamiento en los cojinetes, y en segundo término por la carga que mueve el eje del motor.
- Es decir que siempre habrá una diferencia entre la velocidad “ n_s ” del campo giratorio y la del rotor “ n ” (o la del eje del motor). Por lo tanto, llamaremos velocidad relativa a la diferencia entre n_s y n , que para el caso de motores será positiva y para el caso de generadores será negativa.

$$n_{rel} = n_s - n$$

La magnitud característica que determina las condiciones de trabajo de la máquina asíncrona es el deslizamiento, definido como:

$$s = (n_s - n)/n_s$$

El deslizamiento es positivo cuando la máquina trabaja como motor y negativo cuando trabaja como generador.

Sin duda alguna los accionamientos a base de motores eléctricos son los más numerosos de la mayoría de las aplicaciones, y dentro de ellos los basados en motores de corriente continua han gozado de una total hegemonía en el campo industrial durante décadas. Sin embargo los motores con menor nivel de exigencias en el mantenimiento son los motores asíncronos de jaula de ardilla, debido a que carecen de colector, tienen una relación peso-potencia mucho menor que los de continua, y por tanto un costo significativamente más bajo. Por estas razones, dada su capacidad de soportar sobrecargas y su elevado rendimiento, es el motor más atractivo para la industria.

Desde hace aproximadamente 20 años, el elevado desarrollo de la electrónica de potencia y los microprocesadores ha permitido variar la velocidad de estos motores, de una forma rápida, robusta y fiable, mediante los reguladores electrónicos de velocidad.

La elección de la instalación de un convertidor de frecuencia como método de ahorro energético supone:

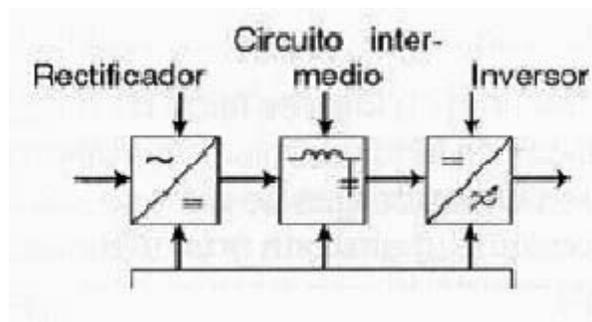
1. Reducción del consumo de energía eléctrica.
2. Mejor control operativo, mejorando la rentabilidad y la productividad de los procesos productivos.
3. Minimizan las pérdidas en las instalaciones.
4. Ahorro en mantenimiento (el motor trabaja siempre en las condiciones óptimas de funcionamiento).

1.3.1 Fundamentos tecnológicos de la regulación electrónica de velocidad en motores

Un regulador electrónico de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable.

Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna. A esta segunda etapa también se le suele llamar ondulator. Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de inversor.

Figura 5. Unidad de control



El modo de trabajo puede ser manual o automático, según las necesidades del proceso, dada la enorme flexibilidad que ofrecen los reguladores de velocidad, permitiendo hallar soluciones para obtener puntos de trabajo óptimos en todo tipo de procesos, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual. La mayoría de las marcas incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobreintensidad, sobretensión, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc, además de ofrecer procesos de arranque y frenados suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que redundará en un aumento de la vida del motor y las instalaciones.

Como debe saberse, el uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones. Además aportan los siguientes beneficios:

1. Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
2. Se puede programar un arranque suave, parada y freno (funciones de arrancador progresivo).
3. Amplio rango de velocidad, par y potencia. (velocidades continuas y discretas).
4. Bucles de velocidad.
5. Puede controlar varios motores.
6. Factor de potencia unitario.
7. Respuesta dinámica comparable con los drivers de DC.
8. Capacidad de by-pass ante fallos del variador.
9. Protección integrada del motor.
10. Marcha paso a paso (comando JOG).

Con respecto a la velocidad los convertidores suelen permitir dos tipos de control:

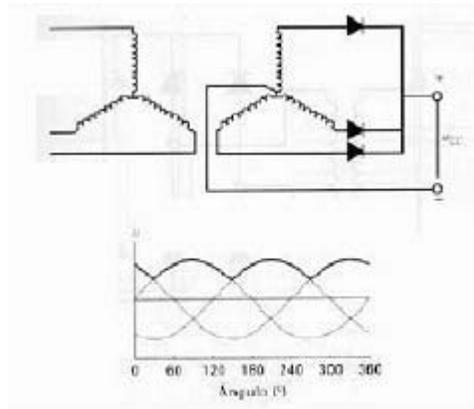
Control manual de velocidad. La velocidad puede ser establecida o modificada manualmente (display de operador). Posibilidad de variación en el sentido de giro.

Control automático de velocidad. Utilizando realimentación se puede ajustar la velocidad automáticamente. Esta solución es la ideal para la instalación en aplicaciones en las que la velocidad demandada varía de forma continua.

1.3.1.1 Rectificadores para convertidores de frecuencia.

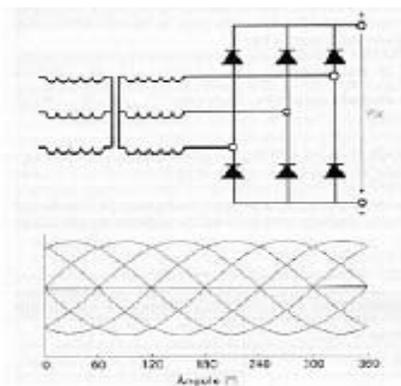
Rectificadores no controlados de tensión fija. El fenómeno de la rectificación se da porque los diodos van conmutando cíclicamente al circuito de cc sobre las fases de ca. Es la tensión de esta red la que va forzando el paso a conducción o bloqueo de los diodos, a esta conmutación se le llama forzada. Si sólo se rectifican las semiondas positivas de la tensión alterna tenemos un montaje de media onda y si se rectifican ambas semiondas, tenemos un montaje de onda completa. En los montajes de media onda la tensión no es continua pura, ya que exhibe cierto grado de rizado u oscilación en torno a su valor medio. Los diodos que conducen en cada momento son aquellos en los que la tensión de la fase en la que van conectados supera a la de las otras dos.

Figura 6. Rectificador trifásico de media onda



El rectificador trifásico de onda completa o puente de Graetz, está formado por seis diodos y tiene la ventaja del menor rizado. Este puente es de los más empleados en las aplicaciones industriales de potencia.

Figura 7. Rectificador trifásico de onda completa. Puente de Graetz



1.3.1.2 Rectificadores controlados de tensión variable.

Los esquemas son similares a los anteriores, cambiando los diodos por semiconductores controlables, que normalmente son tiristores, así lograremos que la tensión de salida sea variable y con prestaciones más interesantes debido a esta circunstancia.

El puente trifásico de onda completa o de Graetz es el más empleado desde el punto de vista industrial, ya que tiene las siguientes ventajas:

1. Cargamos simétricamente línea trifásica.
2. Se absorben menos armónicos de intensidad en la línea trifásica.
3. La tensión continua es de rizado con menor amplitud y por tanto los filtros para alisado son menores.
4. Las prestaciones dinámicas son mayores, ya que con seis pulsos se puede variar el ángulo de encendido seis veces por período.

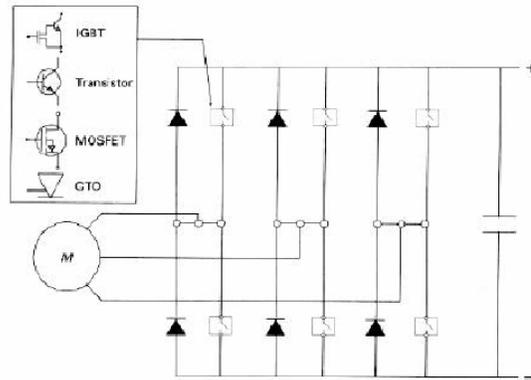
Circuito intermedio.

La etapa central es el denominado circuito intermedio de continua y que puede funcionar como fuente de tensión o intensidad para la etapa final del ondulator, según la disposición que se adopte. A veces al ondulator se le llama inversor tal como aparece en la figura, aunque es más correcto llamar inversor a todo el conjunto (rectificador, circuito intermedio y ondulator). La función del circuito intermedio es alimentar la tercera etapa, es decir al ondulator, y esto puede hacerlo funcionando como fuente de tensión, en cuyo caso se colocaría un condensador electrostático entre los terminales (+) y (-) para mantener constante la tensión y daría lugar a un inversor con circuito intermedio de tensión. Cuando el circuito intermedio funciona como fuente de intensidad para el ondulator, se pone una inductancia en serie con una de sus ramas, su función es mantener constante la intensidad, y estaríamos hablando de un inversor con circuito intermedio de intensidad. Según la configuración que se adopte las características del inversor son distintas y condiciona cuestiones tales como: armónicos, resistencia de frenado, gama de potencias, accionamiento para un solo motor o varios a la vez, etc.

1.3.1.3 Ondulator

El ondulator es un conmutador electrónico que comunica alternativamente la tensión o intensidad continua del circuito intermedio sobre las fases del motor de ca conectado a su salida. La disposición más común es el puente trifásico de Graetz y está formado por semiconductores controlables que pueden ser tiristores, tiristores desconectables por puerta (GTO), transistores de potencia, IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o MOSFET (transistor de efecto campo de óxido metálico). De los anteriores el que más se está utilizando para motores industriales de BT es el IGBT.

Figura 8. Conmutador electrónico



En función de la mayor o menor perfección del sistema de conmutación lograremos que las ondas de tensión a la salida hagan que las corrientes absorbidas se acerquen más o menos al sistema trifásico senoidal.

Hay distintas formas de regular la tensión de salida del inversor como son:

- Variar el valor de la tensión en el circuito intermedio.
- Variar el ancho de la zona de conducción de cada semionda de salida.

- Variar la tensión de salida en función de la proporción entre los tiempos de conexión y desconexión de los semiconductores de potencia mediante la técnica de regulación PWM (**Modulación del Ancho de Pulso**, por sus siglas en inglés). Además de regular la salida, este método tiene la ventaja de generar una onda de tensión de salida que mejora notablemente la onda de intensidad absorbida por el motor, lo cual hace que el motor funcione de forma semejante a si estuviera alimentado por tensiones senoidales de la red. Con ello se logra la grandísima ventaja de emplear motores normalizados de fabricación en serie sin la necesidad de fabricar motores específicos para poder ser regulados por convertidores.

1.3.2 Funcionamiento del motor asíncrono alimentado por convertidores de frecuencia

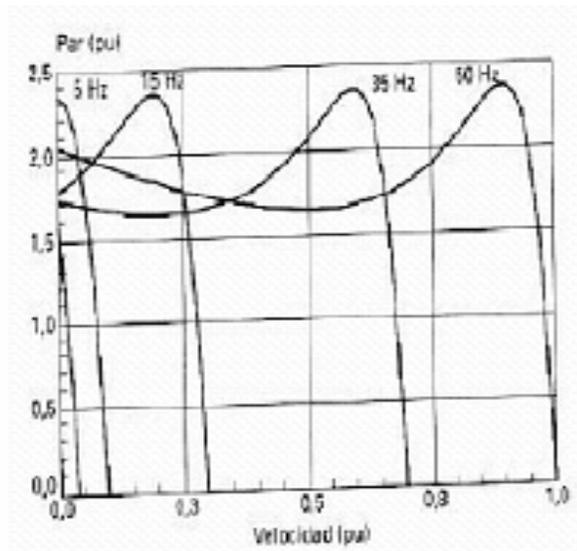
Los inversores con circuito intermedio de tensión son los más usados en aplicaciones prácticas, siendo su campo predominante el de las pequeñas y medianas potencias. Un inversor se elige en función de parámetros tales como:

1. Accionar a un solo motor o varios.
2. Banda necesaria de regulación y su precisión.
3. Consecuencias sobre la red eléctrica del convertidor adoptado.
4. ¿Tiene sentido económico prever un retorno de energía? (Frenado regenerativo).
5. Velocidad de respuesta para adaptarse a los cambios de consigna.

Para aprovechar al máximo el motor hay que controlarlo de modo que el flujo se aproxime lo más posible al nominal para el cual ha sido diseñado.

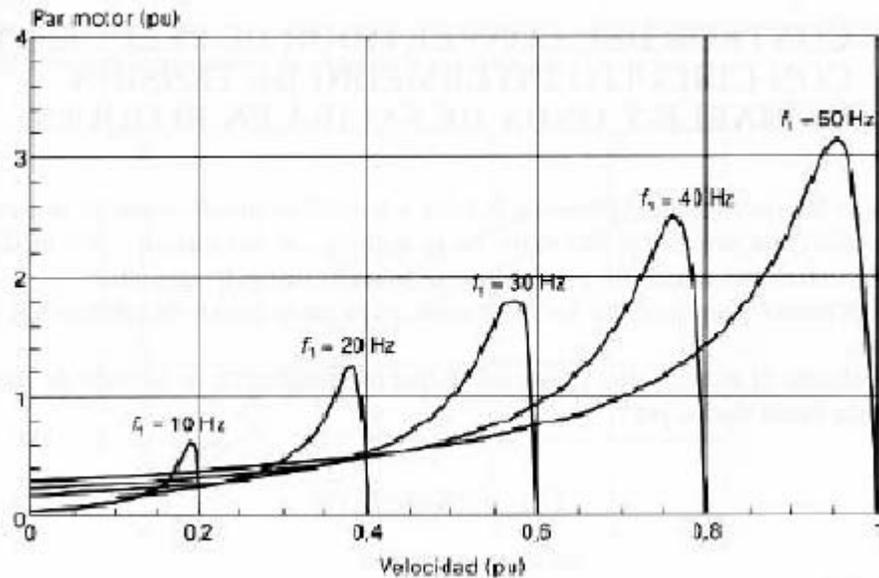
Cuando el motor está regulado con flujo constante e igual al nominal presenta unas curvas características como las siguientes:

Figura 9. Curva de par-velocidad de un motor asíncrono alimentado a flujo constante



Una forma de lograr que el flujo sea constante de manera aproximada, es hacer que la tensión y la frecuencia varíen de forma proporcional. Sin embargo esto es sólo aproximado, y a medida que las frecuencias van bajando los flujos disminuyen también por lo que el par para bajas frecuencias disminuye de forma importante.

Figura 10. Curvas de par-velocidad en régimen permanente para un motor asíncrono alimentado con tensión y frecuencia variable.



Para lograr el funcionamiento con flujo constante es preciso que a bajas frecuencias la tensión sea más elevada que lo que dicta la ley sencilla de la proporcionalidad. Cuando la regulación necesaria para modificar la velocidad supera la frecuencia nominal (60 Hz), el flujo ha de disminuir, ya que la tensión no debe ser elevada para no sobrepasar las posibilidades dieléctricas del bobinado del motor. En este caso las curvas de par para frecuencias elevadas decrecen, por lo que habrá que verificar que los menores pares disponibles cumplen los requisitos de la máquina accionada a alta velocidad. En general en aquellos inversores con circuito intermedio de tensión, para el control del par electromagnético del accionamiento se emplean los siguientes métodos:

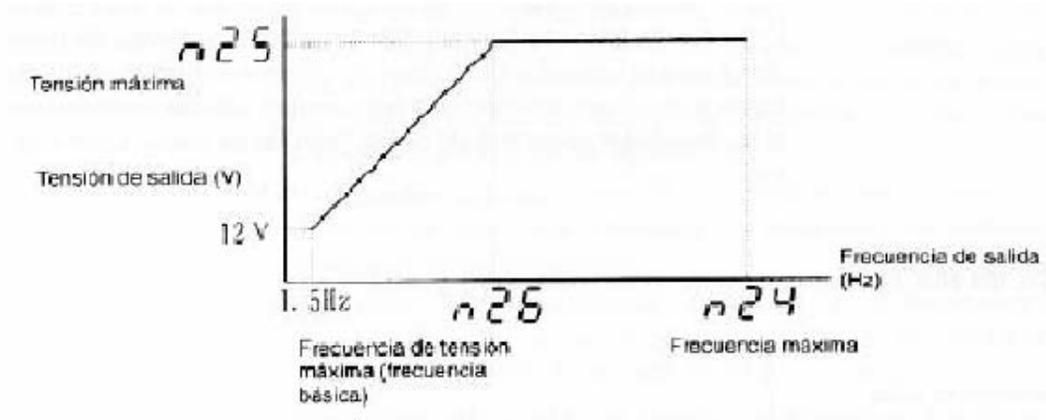
- Regular la tensión del estator en función de la frecuencia. (Control V/f).

- Regulación mediante la descomposición vectorial de la intensidad del estator sobre unos ejes orientados con el flujo magnético. (Control vectorial).

1.3.2.1 Control V/f.

Con este método la tensión de alimentación evoluciona proporcionalmente a la frecuencia. Cuando V/f es constante, el motor funciona de forma aproximada con flujo constante en los regímenes permanentes. Este tipo de control es más fácil de llevar a la práctica en un convertidor y se suele emplear cuando los requisitos de regulación son de baja velocidad. Como hemos dicho anteriormente la proporcionalidad V/f desaparece en las bajas frecuencias, además la característica de la curva de par depende también de la frecuencia del rotor y de su temperatura, por lo que el dispositivo de control del convertidor ha de incluir las correspondientes correcciones. En los convertidores con este tipo de control, una de las parametrizaciones más importante es la selección o ajuste de la curva V/f . Algunos convertidores traen varias curvas ya ajustadas en su programación. Para seleccionar la curva adecuada se debe tener en cuenta las características de tensión y frecuencia del motor y la velocidad máxima a la que puede girar el rotor.

Figura 11. Curva Volts por Hertz



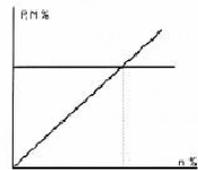
1.4 Procesos industriales y regulación de velocidad.

Para estimar el ahorro es necesario conocer el proceso industrial en que se pretende instalar el regulador de velocidad. No todos los procesos ahorran energía, incluso hay procesos en que la energía no aumenta con la velocidad. Con el fin de identificar puntos de ahorro en la industria, vamos a ver a continuación las cargas típicas que nos podemos encontrar. En la mayoría de los procesos, se tendrán combinaciones de varios de estos tipos:

1. Par constante.
2. Par creciente linealmente con la velocidad.
3. Par creciente con el cuadrado de la velocidad.
4. Potencia constante.

Figura 12. Tipos de Par para las Diferentes Aplicaciones Industriales

PAR CONSTANTE



EN LA INDUSTRIA LA MAYOR PARTE DE LAS MÁQUINAS EMPLEADAS FUNCIONAN A PAR CTE.

EL PAR ES INDEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD

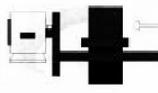
EN EL ARRANQUE EXISTE FRECUENTEMENTE UN SOBREPARE INICIAL MÁS ELEVADO QUE EL PAR NOMINAL



Elevación



Grúas



Alimentadores



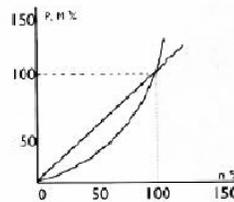
Transportadores

PAR CRECIENTE LINEALMENTE CON LA VELOCIDAD

EN ESTAS MÁQUINAS EL PAR VARÍA LINEALMENTE CON LA VELOCIDAD

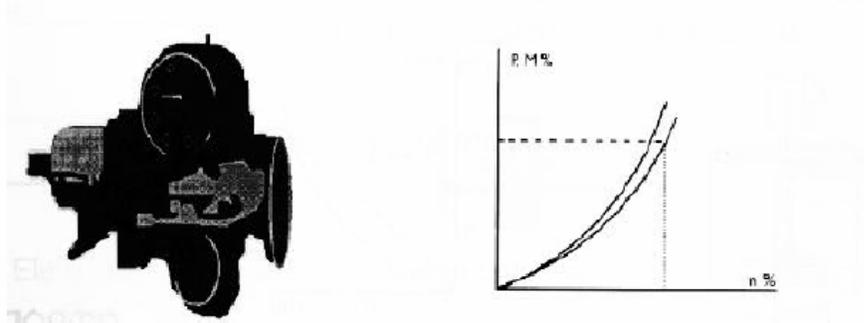
LA POTENCIA VARÍA CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD

EJEMPLOS: BOMBAS VOLUMÉTRICAS DE TORNILLO DE ARQUIMEDES Y MEZCLADORAS

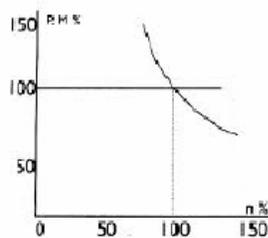


PAR CRECIENTE CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD

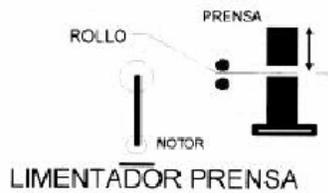
- EN ESTAS MÁQUINAS EL PAR VARIA CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD
- LA POTENCIA LO HACE CON EL CUBO DE LA VELOCIDAD
- ES EL CASO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS Y LOS VENTILADORES



POTENCIA CONSTANTE



- LA POTENCIA REQUERIDA ES INDEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD
- FUNCIONAMIENTO PROPIO DE MÁQUINAS HERRAMIENTAS Y SISTEMAS DE ARROLLAMIENTO
- SE REQUIERE MENOR PAR, Y POR TANTO SE PUEDE UTILIZAR UN ACCIONAMIENTO MENOR



Como se puede comprobar en las gráficas, los ahorros más importantes los tendremos en las cargas de par cuadrático, donde una pequeña disminución de velocidad produce una gran disminución de potencia absorbida por el motor.

2 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS INSTALACIONES

2.1 Inventario técnico

Actualmente las instalaciones de los equipos que generan el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera, disponen de tres ventiladores centrífugos que ingresan el aire al hogar de la caldera que contiene el oxígeno necesario para el proceso de combustión y un ventilador centrífugo que extrae los gases generados por la combustión. Estos ventiladores están acoplados a motores eléctricos de inducción los cuales los impulsan. El arranque de los motores de los ventiladores de los forzados auxiliares y forzado principal se realiza por medio de arrancadores directos. El motor que impulsa al ventilador que extrae los gases de combustión del hogar de la caldera es puesto en marcha por medio de un arrancador electrónico el cual limita la corriente de arranque al motor para evitar caídas de tensión en las líneas hasta llevarlo a su velocidad nominal.

En los ductos de ingreso del caudal de aire al hogar y el egreso de los gases de combustión se regula por medio de dampers los cuales son controlados por medio de un sistema electromecánico que recibe una señal analógica (4-20 ma) proveniente del sistema de control del proceso de combustión para la apertura o cierre de acuerdo a las condiciones en la combustión y presión interna del hogar de la caldera.

En la tabla 2.1 se presenta el detalle de las características eléctricas de los motores de inducción que están acoplados a los ventiladores que generan el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera:

Tabla I. Datos técnicos de los motores de utilizados para impulsar los ventiladores centrífugos.

Aplicación del motor	Potencia del motor (HP)	Velocidad del motor (RPM)	Voltaje de operación del motor (Volts)	Tipo de arranque del motor
Forzado auxiliar #1	125	1780	460	Directo
Forzado auxiliar # 2	125	1780	460	Directo
Forzado General	200	1790	460	Directo
Inducido	500	1780	460	Arrancador electrónico

Figura 13. Carcaza del ventilador

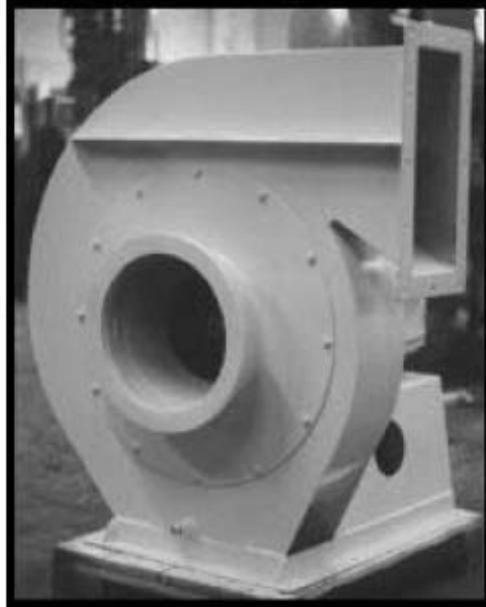
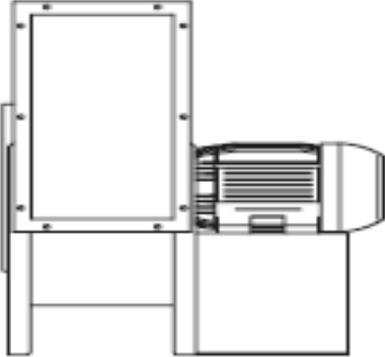


Figura 14. Ventilador centrifugo



Figura 15. Esquema del ventilador centrífugo acoplado al motor eléctrico



3 ANÁLISIS TEÓRICO-TÉCNICO

3.1 Eficiencia de la implementación de variadores

El uso de convertidores de frecuencia en las distintas etapas de los procesos productivos aparece en la actualidad como un tema fuera de discusión. La posibilidad de adaptar el régimen de fabricación a la demanda, ajustando las prestaciones de las máquinas eléctricas a las necesidades de la cadena de producción, torna más eficiente al sistema completo y reduce los costos en un mundo cada vez más competitivo. Sin embargo este no es el único punto en el que los accionamientos de velocidad variable contribuirán decididamente a mejorar el desempeño del proceso de generación de vapor y las máquinas. Al implementar a los circuitos de potencia de los motores que generan el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera (Forzado general, forzados auxiliares e inducido, como se muestra en la figura 1 del apéndice) donde se da el proceso de combustión, se reducirá el consumo de energía eléctrica de estos motores demandando de ellos únicamente la potencia necesaria para los diferentes regímenes de producción de vapor de la caldera incrementando la eficiencia del proceso logrando de esta forma que la reducción del “consumo de energía de los equipos auxiliares” se traduzca en un incremento en la venta de energía eléctrica, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Producción de energía} = \text{Venta de energía} + \text{Consumo de energía de los equipos auxiliares}$$

3.2 Eficiencia en el accionamiento de los motores eléctricos

Los motores al ser accionados por convertidores de frecuencia no se verán afectados por el pico de corriente característico de los arranques directos. Este pico, que típicamente resulta entre seis y ocho veces superior a la corriente nominal, provoca estrés electromecánico en las espiras finales del bobinado estatórico y reduce su vida útil. Los variadores de velocidad con sus rampas de aceleración y desaceleración programables, eliminan este efecto y permiten el arranque de estas máquinas eléctricas con valores de corriente iguales e incluso inferiores a la nominal. Como beneficio adicional se tiene la reducción de las perturbaciones en las redes de alimentación, del estrés mecánico al que se ven sometidos los sistemas de acople. Por otro lado la operación con frecuencias menores que la nominal reduce las pérdidas en el hierro del motor y por consiguiente su temperatura de trabajo. Esto se debe a que cuanto menor es la frecuencia de alimentación, menos frecuentes son las inversiones de polaridad que experimentan las partículas magnéticas del núcleo estatórico. Cada vez que se invierte la polaridad con que se “carga” un dipolo magnético se pierde energía, pudiendo asociarse este fenómeno a la idea de “fricción magnética”. A menor frecuencia de operación esta inversión de polaridad ocurre menor cantidad de veces por unidad de tiempo, reduciéndose la fricción magnética y con ello las pérdidas en el hierro.

3.3 Flexibilidad y eficiencia en el control

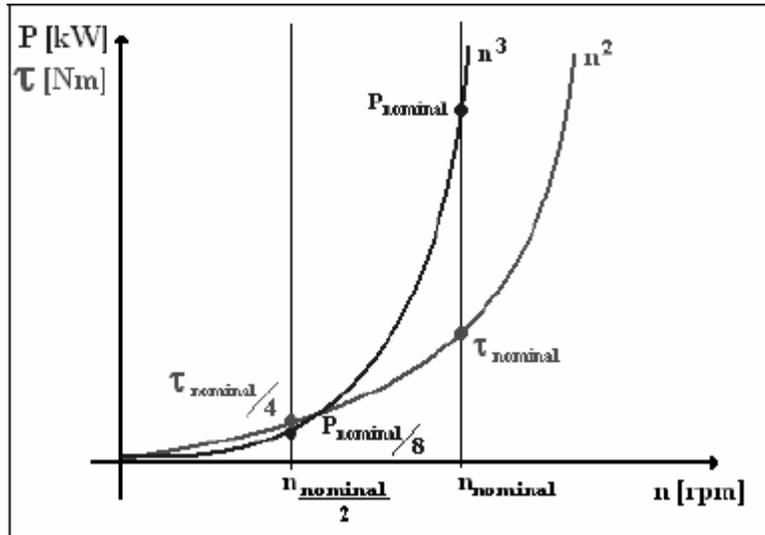
El control de las variables de proceso por medio de convertidores de frecuencia resulta más directo, flexible y eficiente al compararlo con los sistemas mecánicos tradicionales. Instalaciones de ventiladores con regulación convencional de caudal con válvulas limitadoras o dampers se benefician con el uso de accionamientos de velocidad variable. Al reducir el número de componentes que integran el sistema o la máquina, se alargan los períodos de mantenimiento y por consiguiente se optimizan los costos de operación.

Paralelamente, la búsqueda incesante de mejoras en el rendimiento del proceso productivo requiere de la interacción total de los distintos niveles que conforman el sistema de automatización. Hoy en día y gracias a la capacidad de integración de los convertidores a los sistemas de control vía buses de campo como PROFIBUS, DeviceNet o CANopen, resulta posible que las capas superiores del sistema de automatización modifiquen y ajusten en línea parámetros de operación o accedan a operación en tiempo real sobre regímenes de producción (Velocidad o frecuencia), estados de carga (Corrientes de salida) y energía consumida.

3.4 Eficiencia Energética-Ahorro y medio ambiente

Dado que los motores son los responsables de la mayor parte del consumo eléctrico (entre el 60 y el 80 % de la industria), la temática del ahorro de energía en máquinas eléctricas se presenta como un factor clave a la hora de incrementar la rentabilidad y reducir el impacto medio ambiental provocado por los sistemas de generación. El ejemplo más concreto sobre la posibilidad de economizar energía se tiene en las llamadas aplicaciones de par cuadrático como bombas centrífugas, ventiladores, soplantes y compresores centrífugos, nuestro caso es en la aplicación de las cargas de ventiladores centrífugos, que ingresan el aire para el proceso de combustión y egresan los gases producidos dentro del hogar de la caldera. Estas máquinas constituyen casos típicos de resistencia sobre un fluido y en ellas resulta aplicable la ley física que establece que todo fluido genera sobre un cuerpo sólido en movimiento una fuerza resistente que aumenta en forma proporcional al cuadrado de su velocidad relativa. Y como se trata de sólidos moviéndose en fluidos, el torque necesario para vencer la resistencia del fluido a mover será proporcional al cuadrado de la velocidad, y en consecuencia la potencia, proporcional al cubo de la velocidad. Esto significa que la operación a mitad de la velocidad nominal requerirá solo de un octavo de la potencia nominal. Si se tiene en cuenta que una gran cantidad de sistemas funcionan por debajo de la capacidad máxima por largos períodos de tiempo, se podrá apreciar el enorme potencial de ahorro energético que subyace en el control de la velocidad.

Figura 16. Curvas de potencia y torque en función de la velocidad características de bombas y ventiladores



Otro factor de ahorro se tiene en la naturaleza misma del convertidor de frecuencia: la capacidad de ajustar la velocidad de la máquina accionada en función de los requerimientos del proceso de generación de vapor.

Figura 17. Ahorro Energético

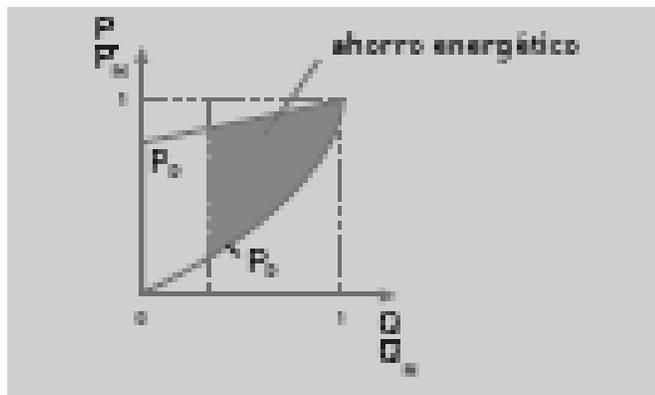


Figura 18. Reducción del Estrés Mecánico

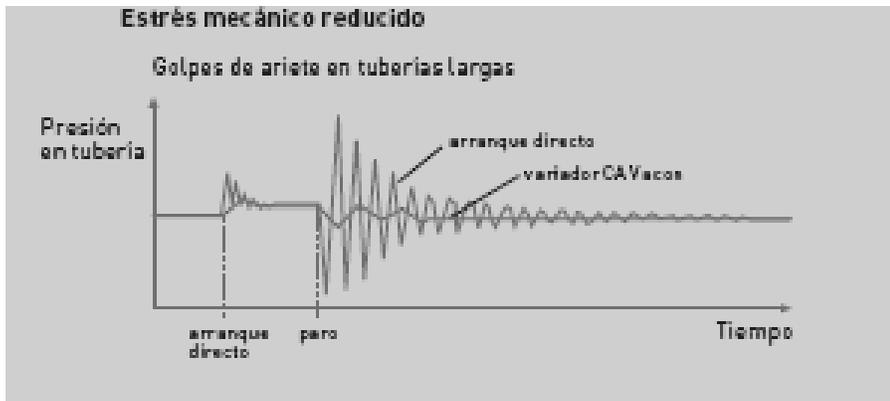
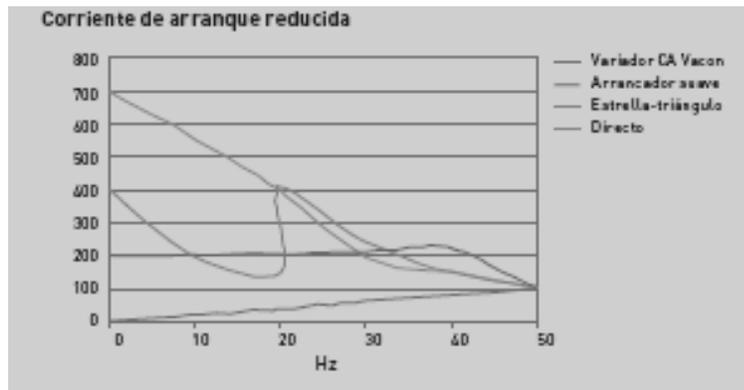


Figura 19. Corriente de arranque reducida al emplear variadores de frecuencia



3.5 Calidad de la energía eléctrica

La definición de la calidad de la energía eléctrica es muy amplia. Pero la podemos definir como la ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidos por armónicos en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario. Además le concierne la estabilidad de voltaje, frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Actualmente la calidad de la energía es el resultado de una atención continua, en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas eléctricos, las cuales, por sí solas resultan ser una causa de degradación en la calidad de la energía eléctrica.

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida, la cual es usada en la iluminación, en la operación de diversos equipos, sistemas de cómputo, así como en los procesos industriales, es importante contar con una buena calidad de energía. La energía eléctrica se emplea en la mayoría de cosas que utilizamos. Por consiguiente los disturbios y variaciones de voltaje que se producen en la red eléctrica afectan directamente al usuario.

Por ejemplo en el caso de una computadora las depresiones de voltaje por sólo cinco milisegundos son capaces de hacer que pierda su información o causar errores, es por esto que el incremento en el equipo de procesamiento de datos (computadoras) ha marcado al problema de la calidad de la energía como un problema serio.

Los disturbios no sólo afectan al equipo de los consumidores, sino que también perjudica la operación de la red de suministro. Los disturbios mencionados causan problemas como los que se citan a continuación:

- a) Operación incorrecta de controles remotos.
- b) Sobrecalentamiento de cables.
- c) Incremento de las pérdidas reactivas de los transformadores y motores.
- d) Errores en medición.
- e) Operación incorrecta de sistemas de protección.

Debido a estos problemas, algún componente de cualquier equipo puede sufrir un daño considerable al presentarse algún transitorio que rebase su nivel de aislamiento. Otro ejemplo, un rectificador puede llegar a fallar si es expuesto a un voltaje transitorio arriba de cierto nivel.

Podemos decir, que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario, y proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de la compañías suministradoras de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica con calidad.

3.6 Tres perspectivas de la calidad de la energía eléctrica

El problema de la calidad de la energía puede ser visto desde tres perspectivas diferentes. La primera de ellas, es la que corresponde al lado de los consumidores después del medidor, y es el impacto de los disturbios en los equipos. La segunda, también del lado de los consumidores, es que los fabricantes de equipos deben conocer los niveles de éstos disturbios y la frecuencia con que ocurren, para así determinar una tolerancia razonable para sus equipos. La tercera que concierne a ambos lados del medidor, es cómo los disturbios ocasionados por un consumidor afectan a otros consumidores que están conectados a la misma red de suministro.

La compañía de suministro no puede darse el lujo de suponer que provee una excelente calidad de energía, ya que algunos de los disturbios quedan fuera del control de la empresa. Por ejemplo no puede tener el control de que una descarga atmosférica no caiga sobre ni en las cercanías de una línea de transmisión, o no puede evitar que algún desperfecto en algún equipo genere una interrupción de energía.

Basados en el conocimiento de diseño y en el área eléctrica, los fabricantes deben diseñar y construir equipos que puedan resistir niveles razonables de disturbios. Los usuarios de equipo sensible a los disturbios pueden escoger entre dos opciones para eliminarlos, o al menos reducirlos: Una es hacer un buen diseño del circuito de distribución y otra es utilizar equipo de acondicionamiento.

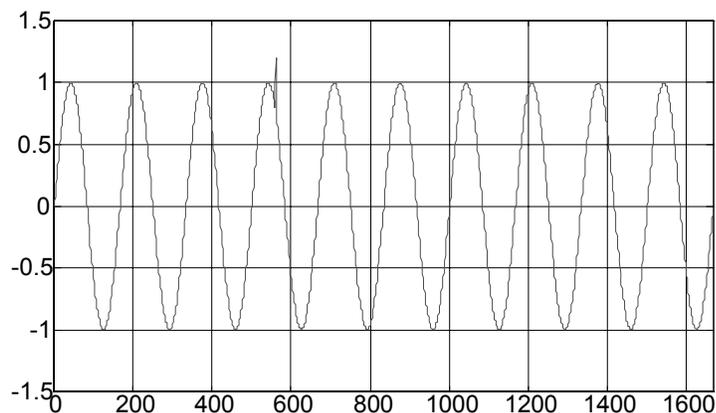
3.7 Terminología para la descripción de disturbios

Los términos usados para describir los disturbios frecuentemente tienen diferente significado para diferentes usuarios. Pero muchos atributos de calidad de energía son comúnmente reconocidos. A continuación se da una breve descripción de algunos de los disturbios más comunes.

3.7.1 Pico de voltaje

Es un incremento en el nivel de voltaje que dura microsegundos. Es debido principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas y switcheo de grandes cargas.

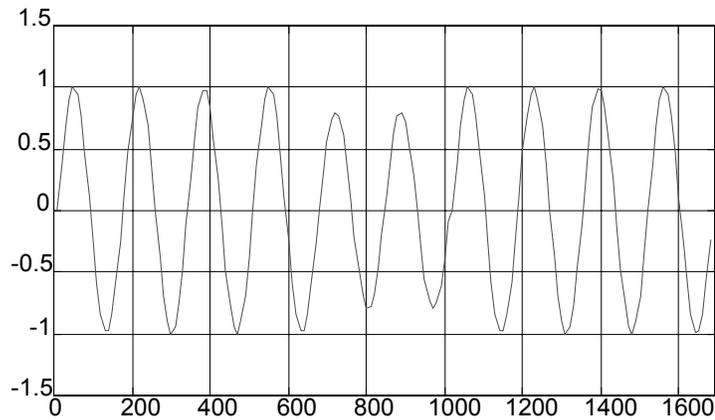
Figura 20. Pico de voltaje



3.7.2 Depresión de voltaje (sags)

Es un decremento momentáneo (varios ciclos de duración) en el nivel de voltaje. Es debido a la conexión de grandes cargas, descargas atmosféricas y fallas en la red eléctrica.

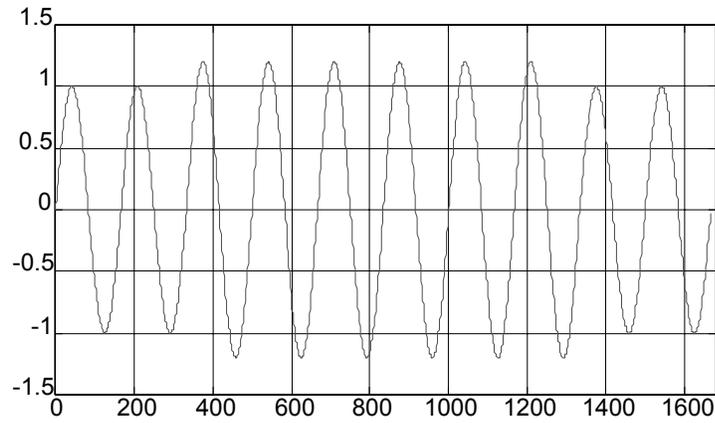
Figura 21. Depresión de Voltaje



3.7.3 Dilatación de voltaje (swell)

Es un incremento del voltaje de varios ciclos de duración. Es ocasionado por la desconexión de cargas grandes y no llega a ser un sobrevoltaje.

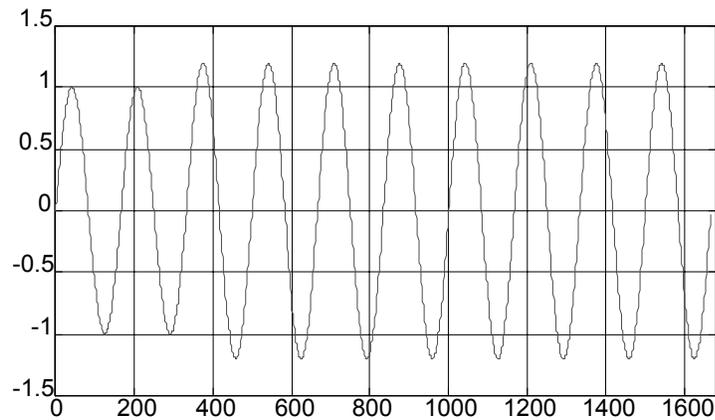
Figura 22. Dilatación de Voltaje



3.7.4 Sobrevoltaje

Es una condición de voltaje elevado (arriba del valor nominal) que a diferencia del swell de voltaje, dura mucho más tiempo. Es causado por una pobre regulación de voltaje.

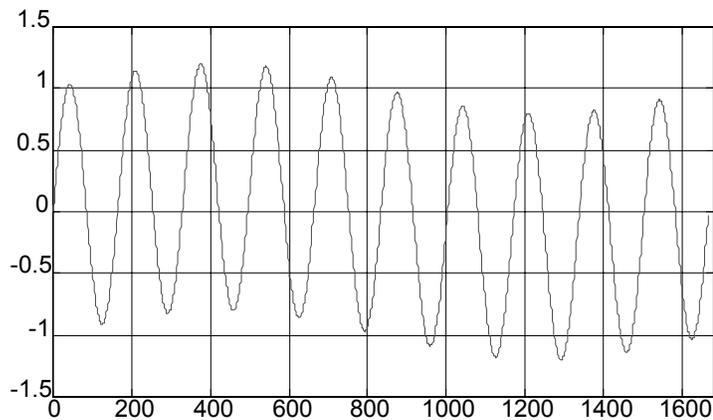
Figura 23. Sobrevoltaje



3.7.5 Parpadeo (flickers)

Se refiere a las fluctuaciones en el nivel de voltaje. Estas son debidas a la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos o por oscilaciones subarmónicas (subarmónicas se refiere a señales de frecuencia menor a la fundamental). Por lo general este efecto se observa fácilmente en el cambio de intensidad bajo y alto de lámparas y ruido acelerado y desacelerado de motores.

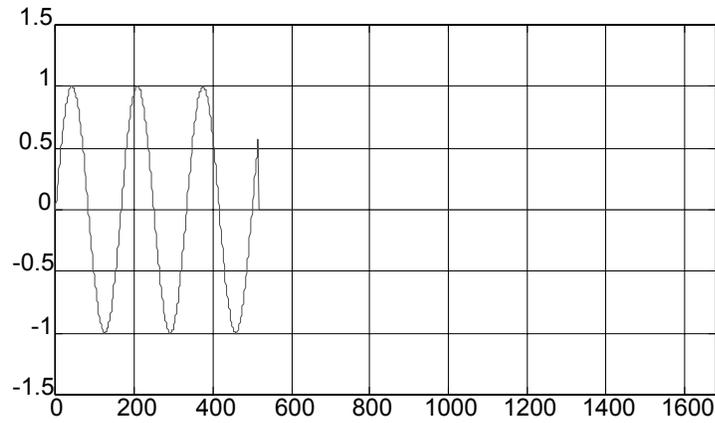
Figura 24. Parpadeo (Flickers)



3.7.6 Interrupciones de energía

Es la pérdida total de potencia. Por lo general se considera interrupción cuando el voltaje ha decrecido a un 15 % del valor nominal o menos. Este es debido a aperturas de líneas, daño de transformadores, operación de fusibles o equipos de protección de la red, entre otras posibilidades. También se consideran interrupciones de energía aquellas que duran milisegundos.

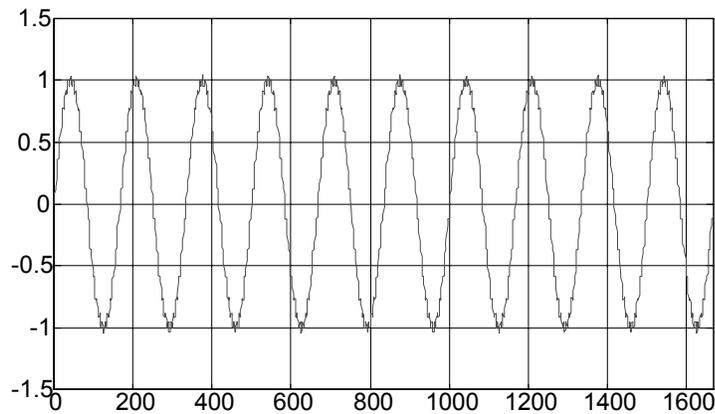
Figura 25. Interrupción de energía



3.7.7 Ruido eléctrico

Es la distorsión (no necesariamente periódica) de la forma senoidal del voltaje. Este es debido a switcheo, transmisores de radio y equipo industrial de arco eléctrico.

Figura 26. Ruido eléctrico



4 ESTUDIO ECONÓMICO

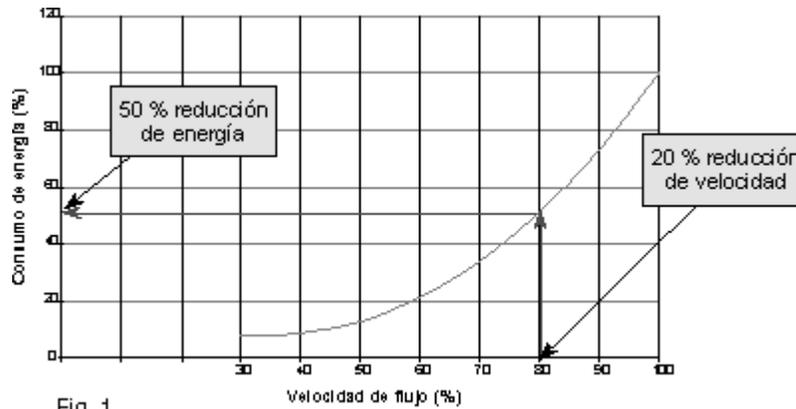
Los sistemas de accionamiento con velocidad variable constituyen la selección técnica y rentablemente más conveniente para poder ajustar el caudal con la rapidez y exactitud necesarias. En comparación con los sistemas de regulación mecánicos tales como válvulas, los sistemas de velocidad variable permiten controlar el caudal con una exactitud considerablemente mayor y tiempos de reacción mucho menores. Los costos operativos de estos sistemas son decididamente menores, en especial, porque su consumo es notablemente menor. En las máquinas del tipo dinámicas tales como las bombas o ventiladores, el consumo representa un tercio de sus costos operativos.

Un variador de frecuencia eléctrica aprovecha la ventaja de que los ventiladores siguen las leyes de proporcionalidad que son las siguientes:

1. El flujo es proporcional a la velocidad.
2. El torque es proporcional al cuadrado de la velocidad.
3. La potencia es proporcional al cubo de la velocidad.

El consumo de energía en una bomba o ventilador es proporcional a la velocidad al cubo (figura 1) y al reducir en 20 % la velocidad se reduce en 50 % el consumo de energía. Si el sistema en cuestión tiene que suministrar un flujo correspondiente al 100 % durante unos días al año, mientras el promedio es inferior al flujo nominal, el ahorro de energía es sumamente importante.

Figura 27. Gráfico de velocidad de giro del motor vrs. consumo de energía



Los motores de velocidad fija funcionan siempre con velocidad plena. En cambio, los sistemas de accionamiento con velocidad variable y los convertidores de frecuencia siempre adaptan su potencia a los requerimientos momentáneos del servicio. Es decir el motor, solo consume la potencia que requiere en ese instante. El resultado es un consumo notablemente menor si se le compara con un accionamiento de velocidad fija y potencia equivalente operando con carga parcial y sistemas mecánicos de regulación. Otra reducción notable en los costos operativos proviene del menor desgaste de los componentes mecánicos del sistema. El funcionamiento con variador de frecuencia eléctrica reduce considerablemente los picos en la corriente en la aceleración.

La caldera 1 abastece de vapor una turbina de condensación que esta acoplada a un generador de 11,500 kw, esta produce los requerimientos que se demandan de acuerdo a la carga que se le asigne a esta unidad generadora de acuerdo al requerimiento solicitado por el AMM (Administrador del Mercado Mayorista), ente encargado en Guatemala de la programación de despacho de los generadores del país. Esta unidad requiere demandas de vapor de acuerdo a la programación diaria desde 40 Klb/h hasta 110 Klb/h, siendo a bajas demandas la oportunidad de ahorro energético pues es aquí cuando la regulación por estrangulamiento de válvulas de entrada a los ductos incrementa teniendo caudales en los ductos de los forzados auxiliares de 50 %, forzado general 55 %, e inducido 45 %, en 87 % del tiempo diario durante el periodo de no zafra. Para determinar el ahorro energético implementando variadores de frecuencia eléctrica se ha hecho uso de un software, elaborado por la Universidad Técnica de *Kaiserslautern* de Alemania, llamado *Energiesparprogramm Sinasave™* versión 2.0 Stand 02/06, realizado para Siemens, empresa dedicada al estudio y fabricación de variadores de frecuencia eléctrica, en el cual se ingresan: El costo del variador, las variables mecánicas y eléctricas particulares del sistema en estudio. En la tabla II se presentan los datos utilizados en el programa, los resultados presentados por este revelan: Ahorro de energía, factor de potencia mejorado, mantenimiento disminuido, carga reducida del motor, regulación del proceso mejorado, supresión de la regulación mecánica, ahorros anuales, rendimiento de la inversión, tiempo de amortización, además muestra la curva característica de caudal. En el anexo se presentan los resultados obtenidos del estudio económico de la implementación de los variadores de frecuencia para cada motor utilizado en los tiros mecánicos de la caldera 1 (Forzado general, forzados auxiliar 1, forzado auxiliar 2 e inducido).

Tabla II. Datos del aire que circula por los ductos

Ventilador	Presión total milibar	Temperatura del aire °F	Densidad del aire Kg/m3	Caudal l/h
Forzado Aux. 1	17.6	459	0.92	54733868
Forzado Aux. 2	17.6	459	0.92	54731868
Forzado Gen.	16.4	97	1.52	114533075
Inducido	9.4	200	1.26	273008425

El precio actual de la energía eléctrica es de \$0.09 por Kwh.

CONCLUSIONES

1. El uso de variadores de frecuencia eléctrica en los motores que impulsan los ventiladores centrífugos que generan el tiro mecánico dentro del hogar de la caldera reducen el consumo de energía eléctrica, al ajustar la velocidad del motor de acuerdo a la demanda requerida por el proceso para los diferentes puntos de la operación .
2. La reducción del consumo de energía eléctrica al utilizar variadores de frecuencia eléctrica en el sistema de ventiladores de la caldera se basa en que la potencia en estos sistemas es proporcional al cubo de la velocidad.
3. Al usar variadores de frecuencia eléctrica se reducirán las corrientes de arranque en los motores, reduciendo de este modo el estrés electromecánico en las bobinas, prolongando la vida útil del motor.
4. La implementación de variadores de frecuencia eléctrica en los motores que están acoplados a los ventiladores centrífugos que ingresan el aire y egresan los gases de combustión del hogar de la caldera es la mejor alternativa operativa y económica para el sistema.

5. La implementación de variadores de frecuencia eléctrica a los motores que impulsan los ventiladores centrífugos permite tener un control más efectivo y flexible sobre las variables a controlar: ingreso de aire al hogar y egreso de los gases producto de la combustión.

6. Al implementar los variadores de frecuencia eléctrica a los motores de los ventiladores que ingresan el aire al hogar de la caldera y el ventilador que egresa los gases de combustión, el ahorro energético por consumo de los motores será igual al incremento de la venta de energía eléctrica del generador.

RECOMENDACIONES

1. Implementar los variadores de frecuencia eléctrica a los motores que impulsan los ventiladores que ingresan el aire para el proceso de combustión: Forzado general y forzados auxiliares, así como al motor que está acoplado al ventilador que extrae los gases de combustión para el mejoramiento operativo y el ahorro energético que esto representa para el proceso.
2. Al implementar los variadores de frecuencia eléctrica, monitorear el ahorro energético obtenido del consumo de los equipos auxiliares utilizados para el proceso de generación de la unidad.
3. Al implementar los variadores de frecuencia eléctrica a los motores que impulsan los ventiladores, monitorear las múltiples variables eléctricas de los motores: Potencia consumida, corriente por fase, frecuencia eléctrica, etc., para tener control de la operación de los equipos, las cuales son desplegadas en el monitor de los variadores de frecuencia eléctrica y son configurables para ser desplegadas en el sistema.

4. Al implementar los variadores de frecuencia eléctrica a los motores, aprovechar las múltiples protecciones eléctricas que estos brindan a los motores en adición a las protecciones que se utilicen por parte del interruptor de potencia: sobrecarga, desbalance de corrientes, alta temperatura en las bobinas del estator, etc.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bratu N. y E. Campero. **Instalaciones eléctricas, Conceptos básicos y diseño.** (2ª edición, México: Editorial Alfa Omega, 1995)
2. Donald G. Fink/H. **Wayne Beaty. Manual de ingeniería eléctrica.** (13ª edición, México: Editorial McGRAW-HILL, 2000)
3. Richard C. Dorf. **Circuitos eléctricos introducción al análisis y diseño.** (2ª edición, México: Editorial AlfaOmega, 1995)
4. Universidad Tecnologica Kaiserslautern. **Programa de ahorro De energía Sinasave™.** (2ª versión Alemania: Siemens Automatization & Drives, 2003-2005)

ANEXOS

Anexo 1 Ventilador Forzado Auxiliar #1, Caldera # 1 Página 1

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar # 1, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 15:01:37
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Resultado de cálculo
Rendimientos de la inversión: 39%
Tiempo de amortización: 31 meses

Datos de operación

Diferencia de presión total	Δp_{tot}	17.60 mbar
Caudal	Q	70745906.00l/h
Número de revoluciones	n	1780.00 1/min
Potencia	P_{el}	56.30 hp
Densidad del fluido	ρ	0.92 kg/m ³
Número de revoluciones específico	n_q	151.17 1/min
Potencia del ventilador	P_{vent}	54.05 hp
Rendimiento eléctrico	η_{el}	0.96
Rendimiento del ventilador	$\eta_{vent,opt}$	0.87
Rendimiento total	η_{tot}	0.84

SIEMENS

Automation & Drives

Cliete: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar # 1, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 15:01:37
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Datos de la instalación

Tipo de regulación del sistema comparativo: Regulación por estrangulación
Selección sin altura estática/geodésica
Convertidor de frecuencia: Micromaster 430 3 AC 380 V - 480 V
Potencia instalada del motor: 150.00 hp

Perfil de prestaciones del ventilador

Caudal [%]	Horas
0	0.0
10	0.0
20	0.0
30	0.0
40	0.0
50	20.0
60	0.0
70	0.0
80	0.0
90	0.0
100	4.0

Tiempo útil: 60 días por año

SIEMENS

Automation & Drives

Cliete: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar # 1, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 15:01:37
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Costos

Costos generales

Costos de inversión	10900.00	\$
Costos de la energía por hph	6.71	¢

Costos de energía anuales

Regulación por estrangulación	5303.93	\$
Micromaster 430 3 AC 380 V - 480 V	1473.31	\$
Ahorro de energía	3830.62	\$

Análisis de ahorro

Ahorro de energía	3830.62	\$
Factor de potencia mejorado	53.04	\$
Mantenimiento disminuido	106.08	\$
Carga reducida del motor	106.08	\$
Regulación de proceso mejorado	53.04	\$
Supresión de la regulación mecánica	53.04	\$
Ahorros anuales	4201.89	\$

Tiempo de amortización

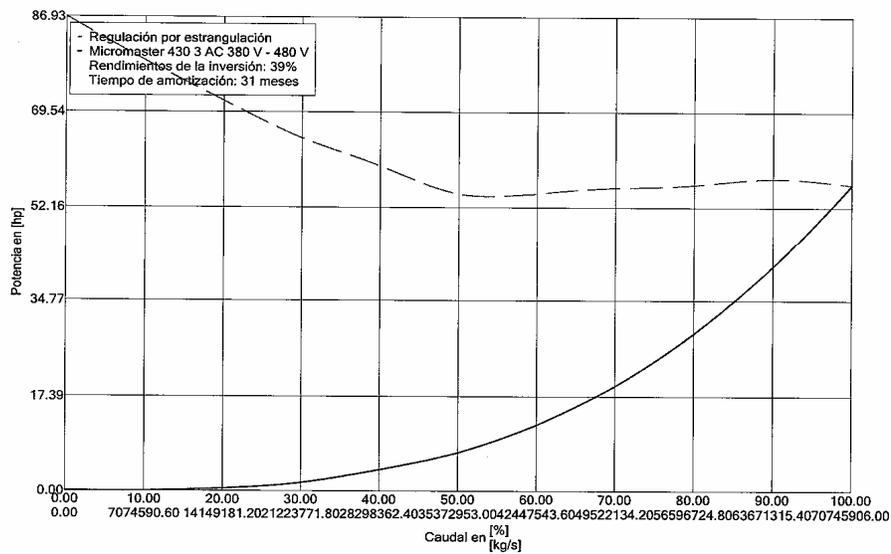
Rendimientos de la inversión: 39%
Tiempo de amortización: 31 meses

SIEMENS

Automation & Drives

Cliete: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar # 1, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 15:01:37
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Curva característica de caudal



Fuente: Ingenio Pantaleón

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar #2, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 17:20:39
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Resultado de cálculo
Rendimientos de la inversión: 39%
Tiempo de amortización: 31 meses

Datos de operación

Diferencia de presión total	Δp_{tot}	17.60 mbar
Caudal	Q	70745906.00 l/h
Número de revoluciones	n	1780.00 1/min
Potencia	P_{el}	56.30 hp
Densidad del fluido	ρ	0.92 kg/m ³
Número de revoluciones específico	n_q	151.17 1/min
Potencia del ventilador	P_{vent}	54.05 hp
Rendimiento eléctrico	η_{el}	0.96
Rendimiento del ventilador	$\eta_{vent,opt}$	0.87
Rendimiento total	η_{tot}	0.84

SIEMENS

Automation & Drives

Cliete: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar #2, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 17:20:39
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Datos de la instalación

Tipo de regulación del sistema comparativo: Regulación por estrangulación
Selección sin altura estática/geodésica
Convertidor de frecuencia: Micromaster 430 3 AC 380 V - 480 V
Potencia instalada del motor: 150.00 hp

Perfil de prestaciones del ventilador

Caudal [%]	Horas
0	0.0
10	0.0
20	0.0
30	0.0
40	0.0
50	20.0
60	0.0
70	0.0
80	0.0
90	0.0
100	4.0

Tiempo útil: 60 días por año

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar #2, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 17:20:39
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Costos

Costos generales

Costos de inversión	10900.00	\$
Costos de la energía por hph	6.71	¢

Costos de energía anuales

Regulación por estrangulación	5303.93	\$
Micromaster 430 3 AC 380 V - 480 V	1473.31	\$
Ahorro de energía	3830.62	\$

Análisis de ahorro

Ahorro de energía	3830.62	\$
Factor de potencia mejorado	53.04	\$
Mantenimiento disminuido	106.08	\$
Carga reducida del motor	106.08	\$
Regulación de proceso mejorado	53.04	\$
Supresión de la regulación mecánica	53.04	\$
Ahorros anuales	4201.89	\$

Tiempo de amortización

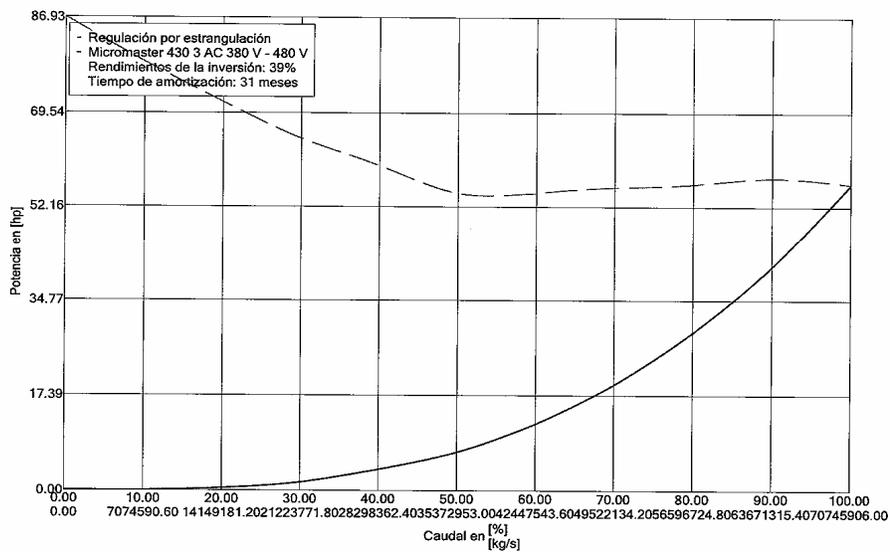
Rendimientos de la inversión: 39%
Tiempo de amortización: 31 meses

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Ventilador Forzado Auxiliar #2, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 17:20:39
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Curva característica de caudal



Fuente: Ingenio Pantaleón

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Forzado General, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 18:16:18
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Resultado de cálculo

Rendimientos de la inversión: 85%
Tiempo de amortización: 14 meses

Datos de operación

Diferencia de presión total	Δp_{tot}	16.40 mbar	
Caudal	Q	114533075.00	l/h
Número de revoluciones	n	1790.00	1/min
Potencia	P_{el}	84.94	hp
Densidad del fluido	ρ	1.52	kg/m ³
Número de revoluciones específico	n_q	297.21	1/min
Potencia del ventilador	P_{vent}	81.54	hp
Rendimiento eléctrico	η_{el}	0.96	
Rendimiento del ventilador	$\eta_{vent,opt}$	0.87	
Rendimiento total	η_{tot}	0.84	

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Forzado General, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 18:16:18
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Datos de la instalación

Tipo de regulación del sistema comparativo: Regulación por estrangulación
Selección sin altura estática/geodésica
Convertidor de frecuencia: Micromaster 430 3 AC 380 V - 480 V
Potencia instalada del motor: 100.00 hp

Perfil de prestaciones del ventilador

Caudal [%]	Horas
0	0.0
10	0.0
20	0.0
30	0.0
40	0.0
50	20.0
60	0.0
70	4.0
80	0.0
90	0.0
100	0.0

Tiempo útil: 60 días por año

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Forzado General, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 18:16:18
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Costos

Costos generales

Costos de inversión	12850.00	\$
Costos de la energía por hph	6.71	¢

Costos de energía anuales

Regulación por estrangulación	11462.78	\$
Micromaster 430 3 AC 380 V - 480 V	1324.10	\$
Ahorro de energía	10138.68	\$

Análisis de ahorro

Ahorro de energía	10138.68	\$
Factor de potencia mejorado	114.63	\$
Mantenimiento disminuido	229.26	\$
Carga reducida del motor	229.26	\$
Regulación de proceso mejorado	114.63	\$
Supresión de la regulación mecánica	114.63	\$
Ahorros anuales	10941.08	\$

Tiempo de amortización

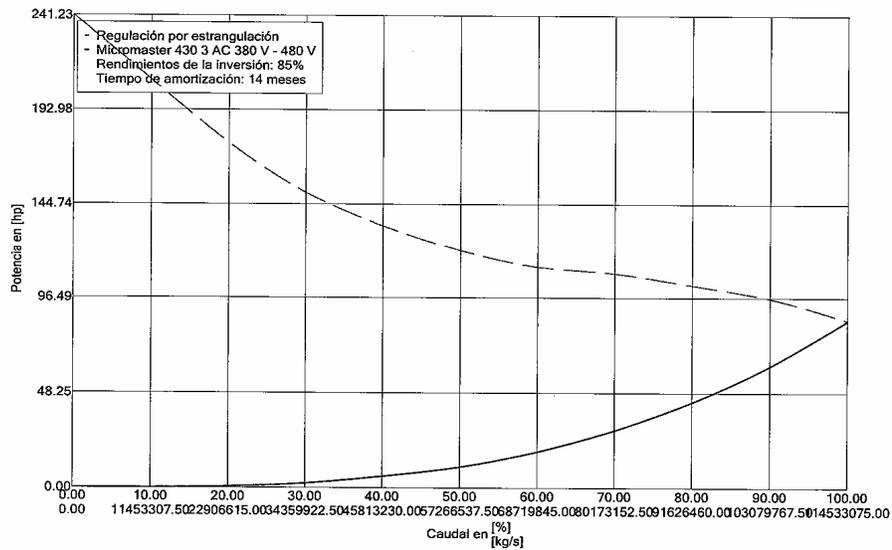
Rendimientos de la inversión: 85%
Tiempo de amortización: 14 meses

SIEMENS

Automation & Drives

Cliete: Pantaleón
Instalación: Forzado General, Caldera 1
Fecha: 16/01/2007 - 18:16:18
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Curva característica de caudal



Fuente: Ingenio Pantaleón

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Inducido, caldera 1
Fecha: 17/01/2007 - 8:22:44
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Resultado de cálculo

Rendimientos de la inversión: 90%
Tiempo de amortización: 13 meses

Datos de operación

Diferencia de presión total	Δp_{tot}	9.40	mbar
Caudal	Q	273008425.00	l/h
Número de revoluciones	n	1780.00	1/min
Potencia	P_{el}	116.05	hp
Densidad del fluido	ρ	1.26	kg/m ³
Número de revoluciones específico	n_q	601.77	1/min
Potencia del ventilador	P_{vent}	111.40	hp
Rendimiento eléctrico	η_{el}	0.96	
Rendimiento del ventilador	$\eta_{vent,opt}$	0.87	
Rendimiento total	η_{tot}	0.84	

SIEMENS

Automation & Drives

Cliete: Pantaleón
Instalación: Inducido, caldera 1
Fecha: 17/01/2007 - 8:22:44
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Datos de la instalación

Tipo de regulación del sistema comparativo: Regulación por estrangulación
Selección sin altura estática/geodésica
Convertidor de frecuencia: Sinamics G 150 690V (VT)
Potencia instalada del motor: 544.00 hp

Perfil de prestaciones del ventilador

Caudal [%]	Horas
0	0.0
10	0.0
20	20.0
30	0.0
40	4.0
50	0.0
60	0.0
70	0.0
80	0.0
90	0.0
100	0.0

Tiempo útil: 60 días por año

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Inducido, caldera 1
Fecha: 17/01/2007 - 8:22:44
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Costos

Costos generales

Costos de inversión	26115.00	\$
Costos de la energía por hph	6.71	¢

Costos de energía anuales

Regulación por estrangulación	22276.92	\$
Sinamics G 150 690V (VT)	203.71	\$
Ahorro de energía	22073.21	\$

Análisis de ahorro

Ahorro de energía	22073.21	\$
Factor de potencia mejorado	222.77	\$
Mantenimiento disminuido	445.54	\$
Carga reducida del motor	445.54	\$
Regulación de proceso mejorado	222.77	\$
Supresión de la regulación mecánica	222.77	\$
Ahorros anuales	23632.60	\$

Tiempo de amortización

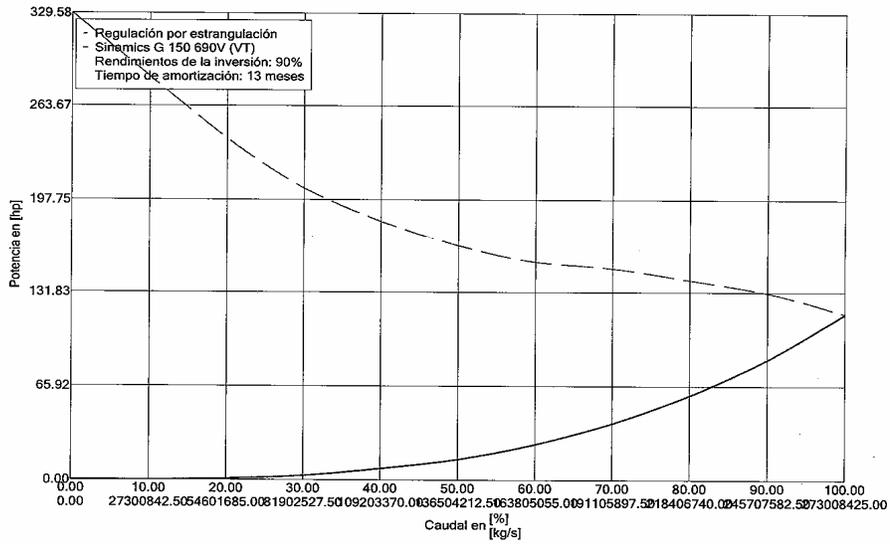
Rendimientos de la inversión: 90%
Tiempo de amortización: 13 meses

SIEMENS

Automation & Drives

Cliente: Pantaleón
Instalación: Inducido, caldera 1
Fecha: 17/01/2007 - 8:22:44
Proyecto: Implementación de variadores a los tiros mecánicos
Operador:
Comentario:

Curva característica de caudal



Fuente: Ingenio Pantaleón