



118
24

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"OPTIMIZACION ELECTRICA DE LA CAMA DE
ENFRIAMIENTO DE CLINKER PARA LA
ELABORACION DEL CEMENTO PORTLAND"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
JORGE JUAN SANDOVAL ALVAREZ

ASESOR: ING. CASILDO RODRIGUEZ ARCINIEGA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

"Optimización eléctrica de la cama de enfriamiento de clinker para la elaboración del cemento Portland"

que presenta el pasante: Jorge Juan Sandoval Alvarez
con número de cuenta: 8733301-5 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista .

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 3 de mayo de 1996

PRESIDENTE	Ing. Juan Rafael Garibay Bermúdez	
VOCAL	Ing. Ma. Soledad Alvarado Martínez	
SECRETARIO	Ing. Casildo Rodríguez Arciniega	
PRIMER SUPLENTE	Ing. Esteban Corona Escamilla	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Antonio Trejo Lugo	

DEDICATORIAS

- A mi madre, a quien quiero expresarle tantas cosas que siento, pero que el lápiz no sabe escribir ni el papel contener y que creo que esta lágrima que se está derramando describe toda la admiración y amor que siento por ella.
- A la naturaleza, que me permitió estar aquí para realizar todo en mi vida.
- A mis hermanas Mónica y Claudia, con quien compartí, casi completa mi primer cuarto de siglo, las que me enseñaron a luchar y sobreponerme a adversidades. A las que quiero expresar mi orgullo, respeto y admiración por como han vivido sus vidas y por todo lo que han logrado. Les deseo lo mejor.
- A mi padre, quien con su ejemplo me dio la pauta a seguir.
- A Lalo, porque fuiste ejemplo e imagen de lo que siempre quise ser yo. Ánimo primo, tu tienes que vivir tu vida como tu creas que es mejor, con o sin enfermedades.
- A mis mejores amigos Enrique Ibarra y Manuel Flores (MAFO) porque han sido parte fundamental de mi vida, porque me escucharon y me aconsejaron tantas cosas y porque con su ejemplo me alentaron a seguir adelante.
- A el Ing. Casildo Rodríguez Arciniega, quien con su sistema de asesoría, me echó a volar, no para caer y fracasar sino para aprender a ser un profesional.

- A mis sinodales, que con sus sutiles sugerencias refinaron mi formación profesional.
- A Yayo, Pato, Manolo y a todos los amigos de la FESC, porque me apoyaron y estuvieron conmigo durante mi estancia en la facultad.
- A Pepe Serrano, porque me has enseñado tanto de la vida real, me has dado un panorama más amplio de como quiero ejercer y porque me apoyaste cuando necesite faltar al trabajo.
- A mis abuelos Alicia y Federico porque fueron pilar de una familia admirable.
- A mis tíos Federico y Tatí, Chabela y Eduardo, Enrique y Azalea, Nacho y Gisela, Tere e Hilario porque de alguna manera contribuyeron para que yo diera rumbo a mi vida.
- A Tony, porque me estás enseñando la manera de querer a alguien.
- A Joel Esquivel de quien aprendí muchas y muchas cosas que ahora valoro. Tienes capacidad de sobra para titularte, propóntelo y hazlo. Te espero.
- A Jesús Ocaña Jaramillo y Ramses Dolores por su ayuda y colaboración para la elaboración de este trabajo.
- A el Ing. Rafael Rodríguez Ceballos, Martha Espinoza a David y a mis amigas de exámenes profesionales, quienes me enseñaron el significado de la palabra eficiencia y me permitieron dar un paso muy importante en mi vida.
- A la FESC, que aunque a 52 Km de mi casa me alojó durante 5 años y medio.

- A todos mis profesores, de los cuales sustraje como abeja a la flor, un poco de ellos; de algunos, cuestiones académicas, de otros, rasgos de personalidad que forjaron y moldearon lo que ahora soy yo.

Agradezco a algunos de mis profesores entre otros:

Ing. Felipe Díaz del Castillo

Ing. Emilio Juárez Martínez

Ing. Filiberto Leyba

Ing. Francisco Rojas

Ing. Sergio Acosta

- A Kevin Burke, de quien aprendí a observar y analizar a la gente.
- A Samuel Márquez por escucharme, aconsejarme y ayudarme así como a Gerardo Granados.
- A toda la gente que conocí mientras trabajaba en CENLEX, porque fueron un capítulo importante de mi vida.

Finalmente quiero pedir una disculpa por alguna vez haber hecho trampa en alguna materia, ahora he comprendido que no engañé a nadie más que a mi mismo y me doy cuenta que lo que más importa es aprender. En la vida profesional la falta de conocimiento puede ocasionar un accidente y por tanto cobrar una vida.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
Diagrama de flujo para la elaboración de la tesis	7
PROLOGO	8
1 PANORAMA ELÉCTRICO GLOBAL GENERAL	10
1.1. La crisis de energía: realidad o mito	10
1.2. Panorama eléctrico nacional actual	12
1.3. Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994	15
1.4. Comportamiento del consumo de energía eléctrica 1989-1993	17
1.5. Alternativas de financiamiento	18
1.6. Ejemplo de acciones correctivas para la eficiencia energética	19
1.6.1. Objetivos del programa	22
1.6.2. Etapas del proyecto	23

2	PROCESO PRODUCTIVO	25
2.1.	Esquema básico para la elaboración de cemento Portland	25
2.2.	Motores de inducción: generalidades	26
3	ALTERNATIVAS DE CONTROL DE FLUJO DE AIRE	31
3.1.	Dispositivos de control de flujo de aire	31
3.2.	Uso de variadores de velocidad en motores de corriente alterna	38
3.3.	Calentamiento en motores de corriente alterna	39
3.4.	Aplicación de controladores de velocidad variable	39
3.4.1.	Reglas a seguir para la aplicación de variadores	40
3.4.2.	La importancia del calibre de los cables	41
3.4.3.	Como afectan las caídas de voltaje al torque	41
3.4.4.	Selección del calibre del cable	43
3.5.	Como limita la frecuencia a la velocidad del motor	44
3.6.	Como afecta el voltaje a la velocidad del motor	45
3.7.	Torque constante, baja velocidad de operación	46
3.8.	Limitación de corriente por transitorios de voltaje	47
3.9.	Tipos de variadores: capacidades y diferencias	48
3.9.1.	Inversor de voltaje variable	49
3.9.2.	Variador de forma de onda de seis etapas	49
3.9.3.	Inversor de fuente de corriente	50
3.9.4.	Voltaje variable o control de corriente	50

3.9.5. Variador de velocidad de modulación de ancho de pulso	51
3.9.6. Variador de propósito general	52
3.9.7. Variador de velocidad industrial	52
3.9.8. Variadores PWM con interfase inteligente	53
3.10. Consideraciones en la línea de distribución de potencia	55
3.11. Selección del sistema de distribución de corriente alterna apropiado	56
3.12. ¿Cómo se causan los transitorios de voltaje?	57
3.13. Corrección del sistema de distribución	59
3.14. Selección y aplicación de transformadores	60
3.15. Cuadro sinóptico de variadores de velocidad	61
3.16. Consideraciones	63
4 ANÁLISIS TÉCNICO-GRÁFICO DE CONSUMO DE POTENCIA	64
4.1. Consumo de energía con mamparas a la succión	66
4.2. Consumo de energía con mamparas a la descarga	69
4.3. Consumo de energía con variadores de velocidad	72
5 ESTUDIO COMPARATIVO DE CONSUMO DE POTENCIA	75
5.1. Tablas comparativas de consumo de energía eléctrica	75
5.2. Tablas comparativas de consumo de potencia en motores de inducción usando mamparas mecánicas a la descarga y mamparas a la succión	77

5.3. Tablas comparativas de consumo de potencia en motores de inducción usando mamparas mecánicas a la descarga y variadores de velocidad	79
5.4. Tablas comparativas de consumo de potencia en motores de inducción usando mamparas mecánicas a la succión y variadores de velocidad	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
APÉNDICE 1	90
APÉNDICE 2	91
BIBLIOGRAFÍA	92

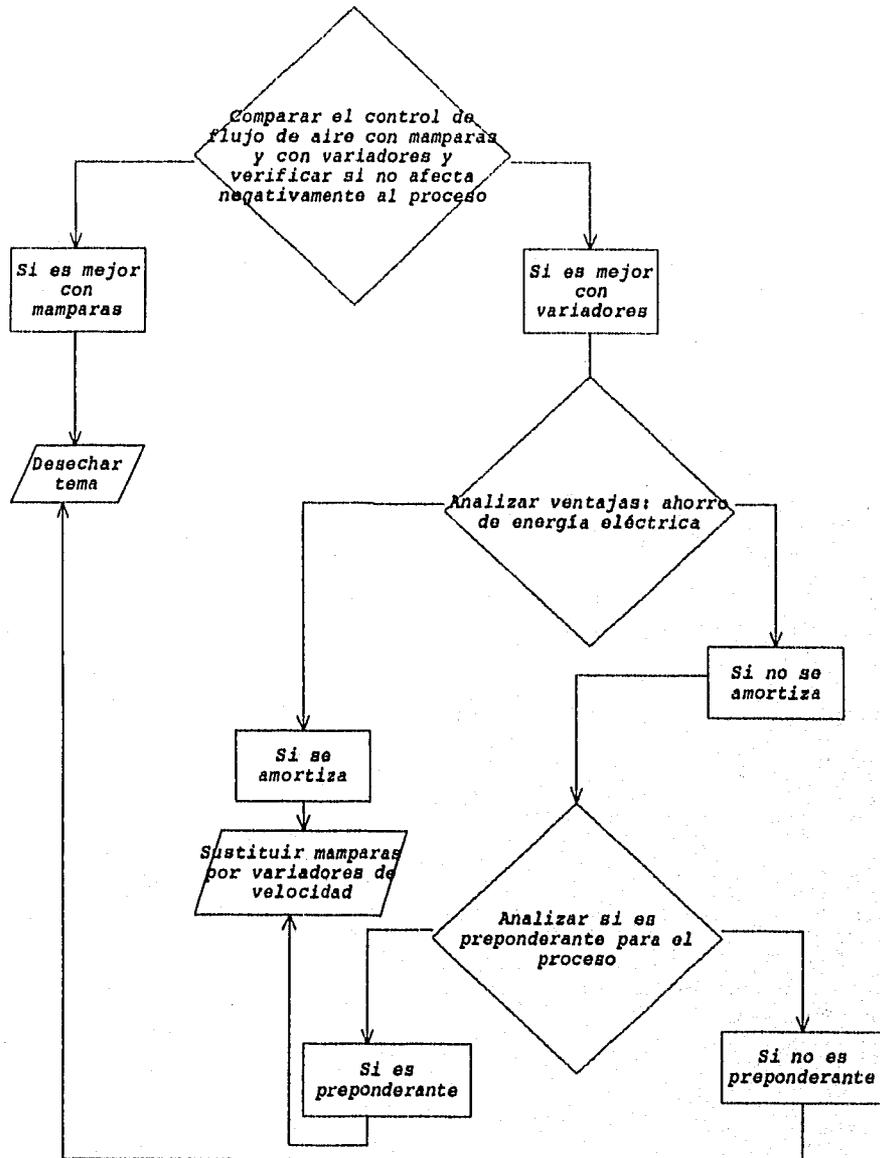
INTRODUCCIÓN

Los cambios que se han generado en el país en los últimos años, han representado en los sectores industrial y de servicios, un verdadero reto para alcanzar el nivel de competencia internacional. Los mercados globalizados demandan calidad a precios competitivos. Una de las herramientas prácticas aplicables para abatir costos y apoyar la mejora continua de la calidad es el uso eficiente de los recursos disponibles, como lo es la energía eléctrica. Para ello se necesitan implantar medidas dentro de programas integrales intensivos de eficiencia energética cuyos resultados se reflejen de manera inmediata y directa en forma de capital que pueda ser canalizado hacia otras demandas o en la obtención de beneficios económicos adicionales.

La realización de este trabajo aportará elementos que permitan abordar proyectos de gran magnitud; tal como la optimización eléctrica del proceso de enfriamiento de clinker en la producción de cemento Portland mediante la sustitución de mamparas mecánicas a la succión o a la descarga, por variadores de velocidad electrónicos donde actualmente se utilizan ventiladores de gran capacidad; asimismo contribuirá de manera significativa a que el uso eficiente de la energía eléctrica sea considerado en la planificación de obras presentes y futuras, convirtiendo así el ahorro de la energía eléctrica en una alternativa real para la ampliación de la capacidad instalada, para la competitividad nacional e internacional o para la aplicación de los recursos en áreas donde la planta lo requiera.

Se analizará* el panorama eléctrico internacional aunque principalmente en México; se mencionarán* alternativas para el financiamiento de proyectos dirigidos hacia el ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica; se estudiará* el proceso que se efectúa para la elaboración del clinker, el cual es la materia prima para la fabricación del cemento Portland; se estudiarán* brevemente los motores usados en la cama de enfriamiento de clinker; se definirá* la mejor alternativa de control de flujo de aire bajo las características que opera la cama de enfriamiento del clinker; se realizará* un análisis gráfico sobre las condiciones actuales de operación y las estimadas con la sustitución de los dispositivos actuales por variadores de velocidad; se hará* un estudio comparativo del consumo de potencia; y, se definirá* bajo qué circunstancias es factible la inversión.

Diagrama de flujo para la elaboración de la tesis



PRÓLOGO

El conflicto armado del medio oriente de los años 1973-1974, al que se conoce como la "primera crisis petrolera", tuvo efectos muy importantes en el campo energético, ya que en ese breve lapso de tiempo los precios del petróleo se elevaron bruscamente hasta alcanzar valores cuatro veces superiores a los que habían prevalecido. Debido a esto, sucedieron transformaciones repentinas y de largo alcance en el balance energético mundial, mismas que se intensificaron con los nuevos aumentos de precios de 1979 y 1980.

El cambio más importante se dio por parte de la demanda; los países industrializados implantaron una política de ahorro de energía y de diversificación de fuentes de suministro, con lo que el nivel de eficiencia energética de la planta productora mundial se incrementó.

Sin embargo, los esfuerzos enfocados a la conservación y ahorro de energía se dieron de manera prácticamente exclusiva en los países desarrollados. Los países en vías de desarrollo han permanecido por mucho tiempo ajenos a estos esfuerzos, lo que los condena a tener una participación reducida en el escenario internacional por falta de competitividad, causada, entre otros factores, por una menor eficiencia energética.

El panorama del uso eficiente de la energía en México es relativamente joven.

En la década de los años sesenta, nuestro país usaba de manera más eficiente sus energéticos, aún sin ser su intención, que en la actualidad. Al iniciarse la década de los setenta y al convertirse en un exportador neto de hidrocarburos, con grandes reservas petroleras, se empezó a usar de manera dispendiosa la energía, como puede constatarse por la creciente dependencia de los hidrocarburos y los elevados coeficientes de consumo por unidad de riqueza generada.¹

Desde el punto de vista ecológico, se debe considerar que un mayor consumo de energía eléctrica genera un mayor deterioro ambiental, esto implica que si se quiere conservar la naturaleza, se debe hacer un uso racional de los hidrocarburos, así como buscar fuentes alternas de suministro de energía que no contaminen tanto como las actuales.

¹Administración y ahorro de energía, Juan José Ambríz García.

1 PANORAMA ELÉCTRICO GLOBAL GENERAL

1.1. La crisis de energía: realidad o mito

"Este país no se encuentra aún envuelto en una crisis energética de proporciones paralizantes; sin embargo, una situación como esta no es inevitable. Y bien, estamos siendo arrastrados a ser el 'país de la crisis' y la insuficiencia empeorará si la nación no afronta la realidad de que el presupuesto de energía está muy fuera de balance. En otros términos, nuestro predicamento ahora es que estamos produciendo menos, pero usando más energía. Con objeto de evitar una 'quiebra' energética debemos confrontar realidades desagradables, abandonar viejos hábitos y hacer decisiones difíciles para establecer nuevas políticas. Para obtener un panorama general, las decisiones involucradas con la energía deben ser medidas contra algunas metas sociales como las siguientes: (1) uso de recursos naturales; (2) protección del medio ambiente; (3) mantenimiento del costo a precio razonable; (4) prevenir problemas con políticas exteriores. Mientras que el petróleo importado puede servir como solución inmediata para nuestras dificultades energéticas, no podemos continuar el aumento de la balanza de importaciones para satisfacer demandas, basadas en el derroche, indefinidamente. En el futuro la mejor política energética será la que ataque al desperdicio o derroche de energía. Al mismo tiempo, es esencial la investigación y desarrollo de fuentes de energía más limpias y más abundantes".²

²Is there an energy crisis? An overview, David Freeman.

... El patrón de cobro por concepto de consumo de energía eléctrica, el cual proporciona descuentos por alto consumo, promovió el derroche de energía.

... Desde que la época de la energía eléctrica comenzó, nuestro consumo de energéticos y combustibles para la generación de la misma ha aumentado casi dieciocho veces más que la población.

... El aumento promedio anual de la demanda de energía eléctrica ha sido casi del cinco por ciento desde mediados de los sesenta, esto es, se ha duplicado el consumo de energía en un periodo de 15 a 20 años.

... Pensamos que nuestros recursos naturales eran inagotables y asumimos que la tierra podría absorber todas las consecuencias inherentes al uso de la energía.

... En términos simples, el predicamento en el que estamos es el de producir más o consumir menos.

... Los dispositivos para el ahorro de energía eléctrica pueden ser parte de la solución a muchas de las dificultades existentes.

1.2. Panorama eléctrico nacional actual

Cabe citar parte de un artículo del Ing. Emilio Carranza Castellanos, subtítulo *La urgencia del ahorro de energía en el país.*

"Si se contempla a la energía eléctrica como un recurso escaso, que se genera en un gran porcentaje a base de elementos no renovables, que en el caso del petróleo alcanzarán para un máximo de 45 años y de gas natural, para 60 años, el ahorro de energía eléctrica resulta ser un factor determinante para el desarrollo de las sociedades actuales.

Escenario tecnológico

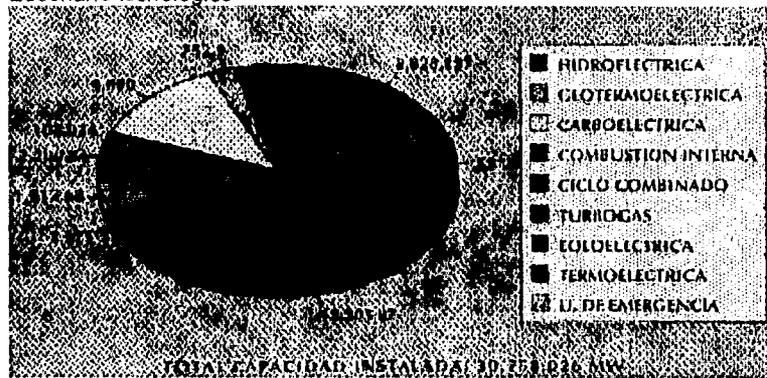


Figura 1.2.1 Capacidad instalada en MW.

En la figura 1.2.1 se aprecia que la mayor cantidad de MW se genera en plantas termoeléctricas y considerando que estas producen en base a derivados de petróleo, se estima según el artículo del Ing. Emilio Carranza Castellanos que estos recursos alcanzarán para un máximo de 45 años.

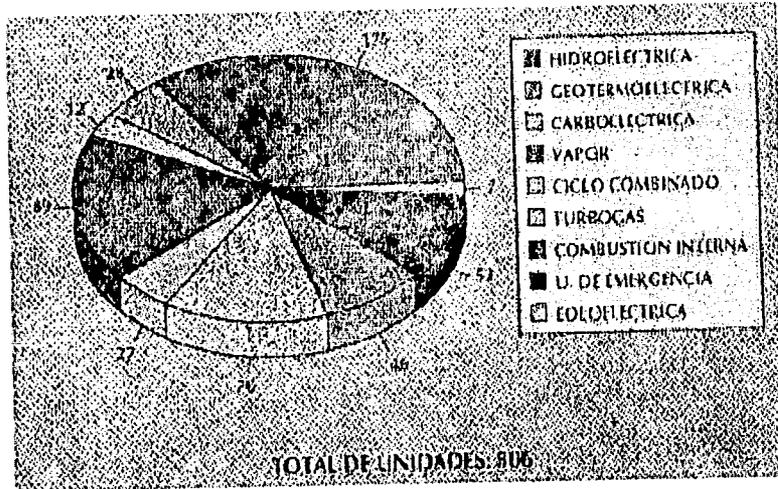


Figura 1.2.2 Número de unidades.

En la gráfica 1.2.2 se aprecia que el 43.25% de la energía se genera tan solo con el 17.58% de las unidades generadoras aunque cabe mencionar que estas unidades son las que más contaminan el ambiente.

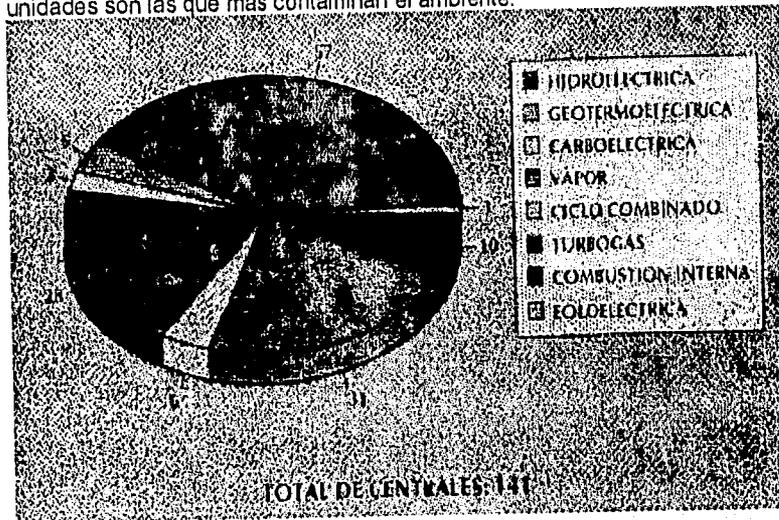


Figura 1.2.3 Número de centrales generadoras.

En la gráfica 1.2.3 se puede observar que con el 40.42% de centrales generadoras se produce el 28.70% de la energía total por lo que se sabe poca energía a nivel global se puede generar en muchas centrales termoeléctricas.

Consciente de esta situación, el gobierno mexicano ha establecido una serie de estrategias para alcanzar mejores niveles de eficiencia, mismas que quedaron plasmadas en el Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994, así como en el Programa Nacional de Modernización Energética. Debido a esto, se creó la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), a la cual pertenece la Comisión Federal de Electricidad, entidad que estableció el Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE) en diciembre de 1989...."

1.3. Plan Nacional de Desarrollo 1989 - 1994

El Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994 establece los objetivos nacionales en materia de energía, entre los que destacan la satisfacción de la demanda y el ahorro en su utilización. Sin embargo a mediano plazo, se buscará la autosuficiencia financiera en la prestación del servicio público de energía eléctrica con precios adecuados a los costos y con una eficiencia operativa creciente que, en el caso de los derivados del petróleo, así como en la extracción del crudo, propicie una mayor eficiencia productiva y precios realistas que sean congruentes con el valor de los recursos incorporados en su proceso de producción.

Ya que en México el uso de energía por unidad de producción va en aumento, será preciso, en consecuencia, acompañar el crecimiento de la capacidad de producción de energéticos con medidas que se traduzcan en el aprovechamiento racional y en el ahorro de los mismos.

Además, en congruencia con el Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994, el Programa Nacional de Modernización Energética 1990-1994 establece los siguientes objetivos: garantizar la suficiencia energética; fortalecer su vinculación con la economía, la sociedad y la protección ambiental; consolidar un sector energético más moderno y mejor integrado.³

³DIARIO OFICIAL, viernes 4 mayo de 1990

El Programa Nacional de Modernización Energética es más desagregado que el Plan Nacional de Desarrollo; incluye el detalle programático indispensable para fijar la estrategia y el rumbo básico en el que se da la modernización del sector.

El Programa define el reto fundamental del Sector Energético para la administración pública: asegurar la disponibilidad de energía que exige la modernización de México, misma que debe darse con eficiencia, oportunidad y particular atención al cuidado del ambiente.

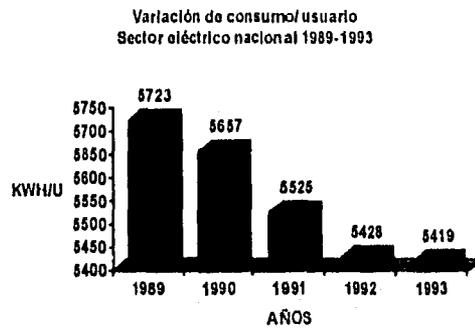
Frente a una mayor demanda de energía, derivada de una economía en crecimiento y una población que requiere elevar sus niveles de vida, la tarea del sector no solo es crecer *per se*, sino también hacerse más eficiente, productivo y más racional en la utilización de los recursos.

El programa propone atender cinco prioridades: Productividad; ahorro y uso eficiente de la energía; financiamiento del desarrollo y expansión de la oferta; diversificación de fuentes; y, participación eficaz en el mercado internacional⁴

⁴DIARIO OFICIAL, lunes 7 mayo 1990

1.4. Comportamiento del consumo de energía eléctrica 1989-1993

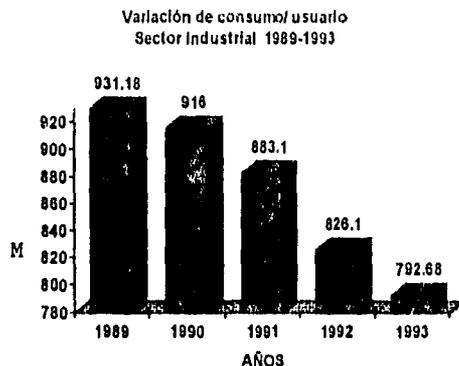
Como puede observarse en la gráfica correspondiente al periodo 1989-1993, el consumo total de energía eléctrica por usuario para el sistema eléctrico nacional muestra una tendencia descendente, influido principalmente por el comportamiento del sector industrial que ha disminuido su consumo específico.



Gráfica 1.4.1 Variación de consumo / usuario, sector eléctrico nacional

El consumo de energía por usuario muestra una tendencia a disminuir lo que podría significar que la gente comienza a ahorrar energía.

Entre los objetivos de este trabajo se encuentra el que la gente tome conciencia y ahorre energía.



5

Gráfica 1.4.2 Variación de consumo / usuario, sector industrial

A pesar de que el consumo de energía eléctrica ha ido disminuyendo, no se han alcanzado los niveles de eficiencia energética para que el aparato productivo nacional esté al mismo nivel que en otros países desarrollados.

1.5. Alternativas de financiamiento

La UCEE apoya financieramente las inversiones y otros gastos que se realicen para la prevención, control y eliminación de los efectos contaminantes, así como para racionalizar el consumo de agua y energía.

Se considera ahora la pregunta. Que tan posible es para las empresas hacer un uso mas eficiente de la energía?. En todas las empresas industriales o de servicios, independientemente de su giro, magnitud y ubicación, es posible abatir costos energéticos y en la mayoría de los casos,

⁵FIDE, Energía Racional, Comportamiento del consumo de energía eléctrica por usuario 1989-1993

drásticamente. En la mayoría de los estudios las inversiones se pueden llegar a amortizar rápidamente con el costo de los energéticos ahorrados y se obtienen beneficios económicos adicionales.

Estas consideraciones han convencido a consultores, fabricantes de equipos, autoridades gubernamentales y organismos privados que apoyan técnica y financieramente a las empresas que lo requieren.

1.6. Ejemplo de acciones correctivas para la eficiencia energética.

Programa piloto para la sustitución de motores eléctricos estándar por motores eléctricos de alta eficiencia.

Los motores eléctricos representan aproximadamente un 60% del consumo de energía eléctrica del sector industrial, principal consumidor de este recurso en México, de ahí la importancia de impulsar el uso de motores cuyo diseño y componentes para su fabricación permitan incrementar su eficiencia y reducir el consumo eléctrico.

En el país, el principal sector consumidor de energía eléctrica es el industrial, ya que este representa el 54.2% del total nacional, seguido por los sectores residencial, comercial, agrícola y de servicios. La estructura interna del consumo nacional industrial mexicano depende principalmente del gas natural, que en términos de energía satisface el 52% de las necesidades de este sector; le siguen en orden de importancia, el combustible con 26% la electricidad con 17% y el diesel con 5%. Esta estructura de consumo de energía en esta actividad, varía substancialmente al considerarlo, no desde el punto de vista de la aportación energética, sino desde un enfoque en términos de valor, ya que bajo esta consideración la electricidad representa un 48%.

Con base en los planteamientos anteriores, se hace evidente la necesidad de buscar mecanismos que permitan a la industria de México reducir sus costos por concepto de consumo de energía eléctrica. En este sentido y siguiendo el mismo proceso que se utilizó para plantear la importancia del consumo de energía eléctrica dentro del sector industrial, es necesario identificar dentro de este último, las áreas de oportunidad de ahorro de energía eléctrica; esto es posible considerando el destino de la energía eléctrica en las instalaciones industriales, dentro de estos el más importante es el uso de motores que representa más de un 70% del total, mientras que la iluminación representa aproximadamente un 17% y otros usos, principalmente para procesos térmicos, el 13%.

Los motores eléctricos, son por su alta participación en el consumo de energía eléctrica de la industria, el equipo que mayor relevancia tiene en cualquier esfuerzo en la búsqueda de la optimización energética en este sector; es importante señalar que los posibles ahorros no solo se encuentran en el equipo sino en el sistema integral que éste acciona, de ahí que cuando se habla de ahorro de energía en motores eléctricos se hace referencia a la optimización energética de sistemas electromotrices.

Los antecedentes mencionados han dado origen a que el FIDE (Fideicomiso de Apoyo al Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico) planteara distintas acciones para buscar ahorro en los sistemas electromotrices, para lo cual en más de 200 proyectos realizados se ha hecho énfasis en este sector de consumo, encontrándose que una solución sería cambiar los motores estándar por motores de alta eficiencia y en las aplicaciones en que el proceso lo permita instalar variadores de velocidad.

Adicional a lo antes planteado, dentro de la estrategia del FIDE, se busca la realización de proyectos a gran escala, esto es la utilización generalizada de equipos y materiales de intenso consumo de energía eléctrica y mayor eficiencia energética. En este tipo de proyectos se han logrado avances importantes en lo que se refiere a uso de lámparas fluorescentes compactas y se pretende formular proyectos de este mismo tipo en motores. Para lograr este fin es necesario probar distintos mecanismos que estimulen a los usuarios a adquirir motores eléctricos de alta eficiencia o sustituir con éstos a aquellos cuya eficiencia sea convencional; asimismo, se requiere determinar con un alto

nivel de precisión el impacto que estas medidas tienen sobre el consumo de energía en las plantas industriales.

Con el fin de cumplir estos dos objetivos básicos, se definieron los alcances y los procedimientos a seguir para llevar a cabo un programa piloto de sustitución de motores eléctricos estándar por motores eléctricos de alta eficiencia.⁶

1.6.1. Objetivos del programa

Uno de los objetivos principales de este programa es el de comprobar la factibilidad técnico-económica de motores estándar por motores de alta eficiencia, la optimización en la operación y mantenimiento de equipos auxiliares, así como las ventajas que implica el uso de variadores de frecuencia.

Otro de los objetivos consiste en probar distintos mecanismos de financiamiento y entrega para la adquisición de motores eléctricos de alta eficiencia, así como convertidores de alta eficiencia (arrendamiento, bonificaciones, financiamientos preferenciales, créditos puente, pago de equipo a través de los ahorros obtenidos, etc.) que sean atractivos para los industriales que requieran la instalación de estos equipos y dispositivos.

⁶FIDE, Energía Racional, programa piloto para la sustitución de motores eléctricos estándar por motores eléctricos de alta eficiencia.

Con base en los resultados obtenidos de este proyecto, será posible determinar los objetivos, alcances, metodología, programa de trabajo y presupuesto de un proyecto a gran escala que, a partir del análisis del mercado y del desarrollo de este programa piloto, permita la instalación en forma masiva de motores eléctricos de alta eficiencia, así como otras medidas y aplicaciones tecnológicas relacionadas con la optimización energética de sistemas electromotrices a nivel nacional.

1.6.2. Etapas del proyecto

- Convocatoria a aliados comerciales. En esta primera etapa se realizarán reuniones de trabajo con los principales fabricantes y distribuidores de motores eléctricos de alta eficiencia, para lograr su participación como aliados comerciales en la sustitución de estos equipos.
- Capacitación. Esta fase del programa consiste en realizar un curso de capacitación, en donde al personal asignado por las empresas participantes se le proporcione los elementos básicos sobre diagnósticos energéticos y las técnicas para ahorrar energía en los sistemas electromotrices.
- Diagnóstico energético. Como resultado de esta actividad se precisarán las áreas de oportunidad, potenciales y medidas de ahorro de energía eléctrica en los sistemas electromotrices, así como las medidas, incluyendo la instalación de motores eléctricos de alta eficiencia, las inversiones y el tiempo de recuperación de las mismas.

- Aplicación de medidas. En esta etapa se aplicarán las medidas de ahorro detectadas en el diagnóstico energético, principalmente la instalación de motores eléctricos de alta eficiencia y convertidores de frecuencia.
- Monitoreo y seguimiento. El objetivo de esta actividad es efectuar mediciones para verificar el comportamiento y los resultados obtenidos en las empresas, como consecuencia de la aplicación de las medidas de ahorro de energía eléctrica.
- Diseño del proyecto a gran escala. Se definirán los objetivos, alcances, impacto en el consumo y demanda nacionales, metodología y presupuesto de un programa de sustitución de motores eléctricos estándar por motores eléctricos de alta eficiencia y variadores de velocidad a nivel nacional y en forma masiva.

2 PROCESO PRODUCTIVO

2.1. Esquema básico para la elaboración de cemento Portland

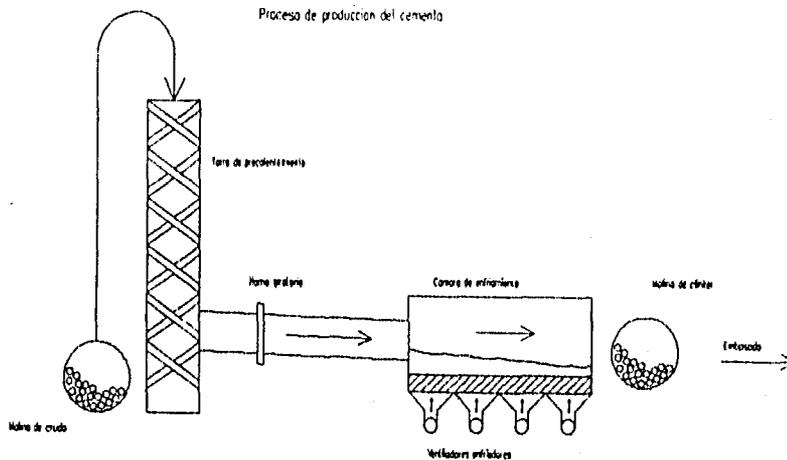


Figura 2.1 Diagrama esquemático del proceso de producción de clinker.

El cemento es una mezcla homogénea de carbonato cálcico, silicato de aluminio y una pequeña cantidad de hierro y magnesio. Esta mezcla se pulveriza en los molinos de crudo (molinos de bolas), posteriormente pasan a la torre de precalentamiento de la que salen a una alta temperatura para entrar al horno giratorio; a la salida del horno el material sale en pequeñas bolas llamadas clinker, se disminuye la temperatura en la cama de enfriamiento a la vez que se transporta el material hasta los molinos de cemento donde es molido hasta tener un tamaño de grano determinado. Finalmente pasa a la etapa de emvasado en la cual puede ser puesto en furgones de ferrocarril a granel o en costales de cemento de 50Kg. cada uno.

Con el agua se obtiene una pasta que fragua con cierta rapidez y se endurece, formando un material compuesto. Es una cal superhidráulica y, químicamente, una solución compleja de silicatos y aluminatos bi o tricálcicos.

La etapa que se pretende optimizar es la de cama de enfriamiento de clinker ya que se cuenta con una gran cantidad de motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla de gran capacidad, normalmente motores desde 50 hasta 300 HP ya que éstos son usados como ventiladores enfriadores del material, cada cámara de enfriamiento consta de un motor de inducción, un ventilador y una recámara, en la cual la variable a cuidar es la presión de aire debajo del clinker, pues se presenta una cantidad de flujo variable y se requiere un control para restringir el paso del aire. Los dispositivos de control de aire se mencionan más adelante en el capítulo 3.

2.2. Motores de inducción: generalidades

Los motores de inducción son dispositivos que transforman energía eléctrica (en la modalidad de corriente alterna), en energía mecánica (en la modalidad de movimiento rotatorio).

La medición de la energía, tanto eléctrica como mecánica se suele hacer en la unidad de tiempo, es decir, con base en el concepto de potencia.

Si ΔW es el trabajo realizado por \vec{F} , para un incremento Δt cualquiera se define como potencia media de \vec{F} al cociente.

$$\frac{\Delta W}{\Delta t}$$

y como potencia instantánea de \vec{F} al escalar P tal que

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

es decir que

$$P = \frac{dW}{dt} \dots (P_1)$$

O bien por definición de trabajo realizado por \vec{F}

$$P = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{v}}{dt} \text{ que puede escribirse } P = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$

es decir que $P = \vec{F} \cdot \vec{V} \dots (P_2)$

Por (P_1) diremos que la potencia P es la derivada del trabajo con respecto al tiempo, a su vez debido a la relación que existe entre trabajo y energía, nos permite definir la potencia como la variación de energía cinética de una partícula con respecto al tiempo.

Por (P_2) diremos que la unidad de potencia P será la correspondiente al producto $\bar{F} \cdot \bar{v}$ de modo que si las unidades de \bar{F} y \bar{v} son respectivamente N y m/s la unidad de P es:

$$(N)(m/s) = (N \cdot m/s) = J/s = W \dots (I)$$

Comúnmente llamada watts.

Dada la equivalencia

$$1 \text{ lb} \cdot \text{ft}/s = 1.356 \text{ W} \dots (II)$$

Como un caballo de potencia (HP) es tal que

$$1 \text{ HP} = 550 \text{ lb} \cdot \text{ft}/s \dots (III)$$

Por (II) y (III) se tiene

$$1 \text{ HP} = 746.8 \text{ W} = 0.7458 \text{ KW}$$

La **potencia eléctrica** tiene como componentes, el voltaje, la intensidad de corriente y el factor de potencia que depende del defasamiento entre ondas de voltaje y corriente.

$$P_e = VI \cos \theta \quad \text{para una fase}$$

$$P_e = \sqrt{3} VI \cos \theta \quad \text{para tres fases}$$

Como ya se demostró, la potencia eléctrica se mide en watts, el voltaje en volts, la intensidad de corriente en amperes y el factor de potencia $\cos \theta$ es adimensional.

En el movimiento rotatorio, la potencia mecánica tiene como componentes el momento (o par) y la velocidad angular.

$$P_m = T\omega$$

En el Sistema Internacional de Unidades, la potencia se mide en watts, el par en newton-metro y la velocidad angular en radianes por segundo. La fórmula no requiere de constantes de conversión de unidades.

El kilogramo-metro se refiere al kilogramo fuerza del sistema técnico (no al Internacional). El kilogramo-metro es la unidad de par.

$$1\text{kg} \cdot \text{m} = 9.81\text{N} \cdot \text{m}$$

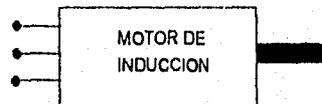
Las revoluciones por minuto constituyen la unidad práctica de la velocidad angular, simbolizada con N.

$$\text{RPM} = \omega \left(\frac{60}{2\pi} \right)$$

La conversión de energía se ilustra en la figura 2.1.3. Aunque las máquinas eléctricas son reversibles y el motor de inducción no es una excepción, el trabajo usual en este caso, es la modalidad de motor. El flujo de energía en la figura sería por tanto de izquierda a derecha.

$$P_e = \sqrt{3} VI \cos \theta \quad \text{para tres fases}$$

$$P_m = T\omega$$



3. Alternativas de control de flujo de aire

3.1. Dispositivos de control de flujo de aire

Si un sistema de ventilación tiene que operar sobre un rango de capacidades, se tiene que tener algún instrumento que modifique las características del ventilador o del sistema.

Las características del sistema pueden ser alteradas agregando resistencia adicional o proporcionando caminos alternativos al flujo de aire. Se puede obtener un ajuste gradual sobre mamparas, ya sea a la entrada del ventilador (INLET GUIDE VANES (IGVS)) o a la salida (OUTLET DAMPERS) como un *bypass*.

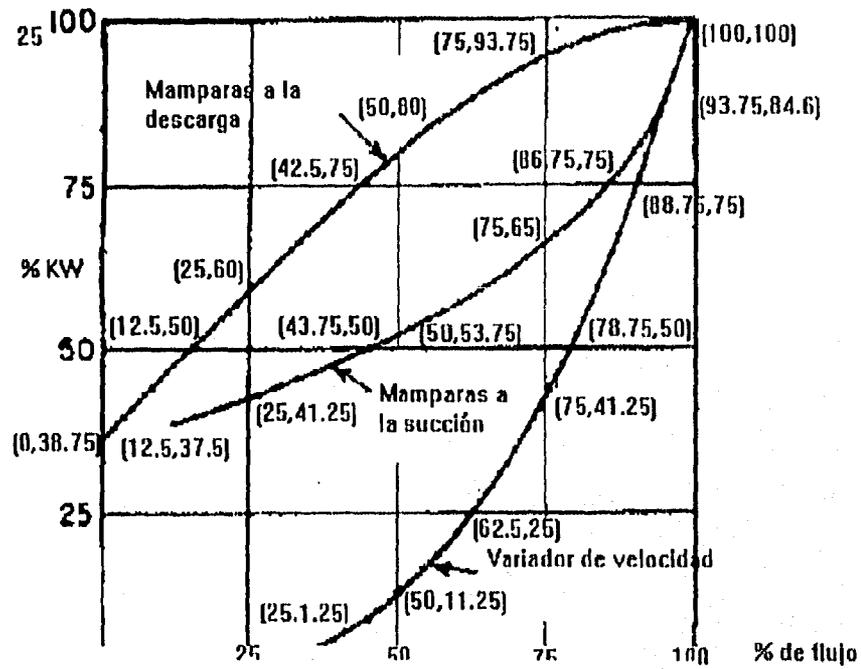
Todas las opciones de control pueden ser controladas automáticamente o manualmente.

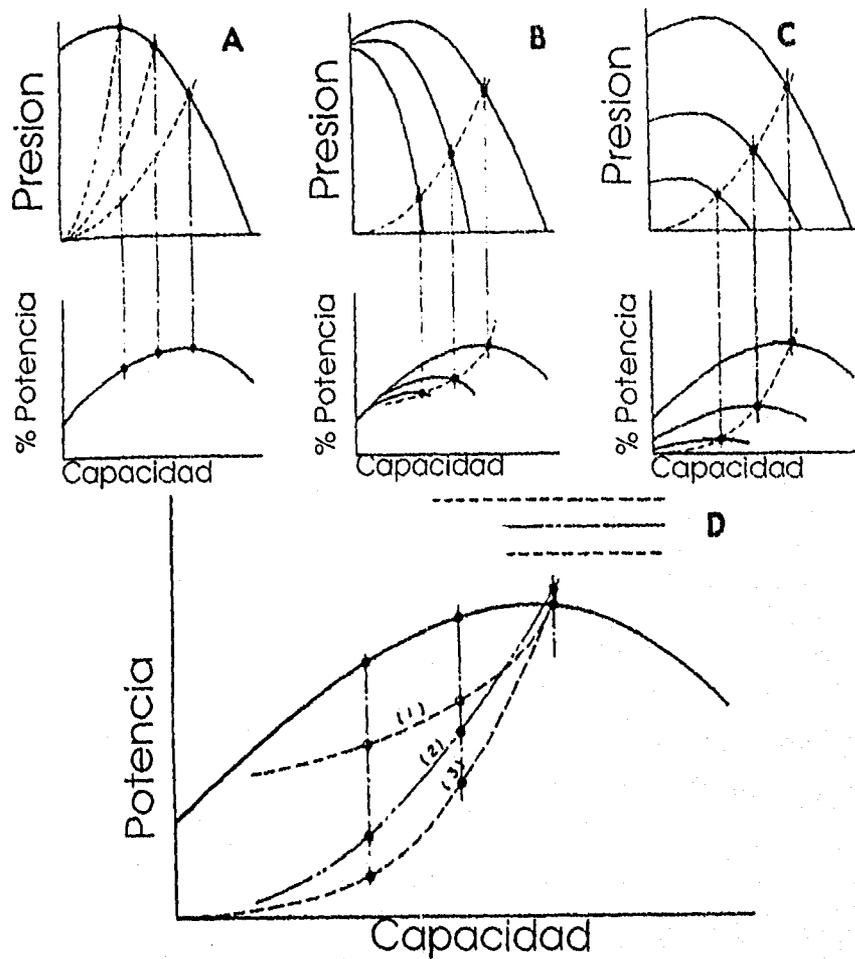
Las características del ventilador pueden ser modificadas cambiando el ventilador mismo su velocidad de rotación o alterando la capacidad de entrada de aire. El ajuste gradual normalmente es posible aunque con las limitantes del dispositivo usado. Un control de "paso por paso" es posible usando motores multivelocidades.

La elección de un método de control de flujo de aire debe estar basado en una evaluación económica. Antes de hacer esta evaluación es necesario estimar o calcular el tiempo de operación a varias capacidades determinadas. Cada método disponible de control conlleva pérdidas en eficiencia sobre la mayoría, sino es que sobre todo el rango de la operación. Los métodos más ineficientes son generalmente los más económicos en la inversión inicial.

Los efectos de varios métodos de control se ilustran en la figura 3.1. Todas las curvas pertenecen al mismo sistema (motor y ventilador) operando a la misma velocidad y plena carga. La resistencia del sistema varía con el cuadrado de la capacidad.

Gráfica 3.1. Representación gráfica del consumo de energía en función de la capacidad con distintos dispositivos de control.





Gráfica 3.2 Representación gráfica del consumo de potencia en ventiladores con distintos métodos de control de flujo.

La figura A de la gráfica 3.2 muestra el desempeño del sistema con mamparas a la descarga (*Outlet dampers*) La presión requerida por el ventilador es de mayor a menor rango que en el punto de diseño debido a que la mampara incrementa la resistencia del sistema. Las curvas de líneas punteadas incluyen este aumento, mismo que también varía con el cuadrado de la capacidad. Los HP's al cincuenta porciento y a tres cuartas partes de carga son menores que al cien por ciento de carga debido a la naturaleza de las características del ventilador. Esto no sería cierto si estuviéramos hablando de un ventilador axial.

Las mamparas a la descarga se muestran en la figura 3.2.A

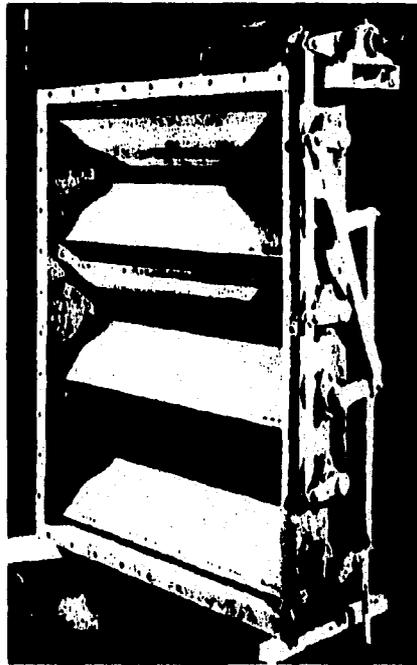


Figura 3.2.A Esquema de las mamparas a la descarga.

Las mamparas a la descarga desempeñan su función simplemente añadiendo resistencia al sistema. La presión estática producida por el ventilador se desperdicia completamente; sin embargo son sencillas y confiables.

La figura B de la gráfica 3.2 muestra el desempeño para mamparas a la succión (Inlet guide vanes) o (Variable inlet vanes) en tres posiciones diferentes. Los HP's requeridos por el ventilador a capacidades reducidas están en medio de los requeridos por mamparas a la salida y control de velocidad.

Las mampara a la succión se muestran en la figura 3.2.B

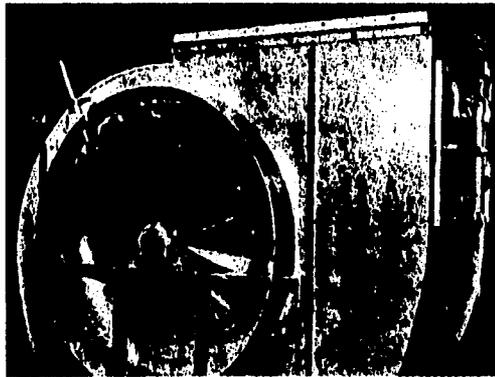


Figura 3.2.B Esquema de las mamparas a la succión.

Éstas consisten en un número determinado de persianas radiales, posicionadas tan cerca como sea posible de la entrada del ventilador. Las persianas operan simultáneamente por medio de un mecanismo y son controladas por una sola palanca. Estas alteran el funcionamiento de las características del ventilador de tal manera que ambas, presión y capacidad, son reducidas. Consecuentemente estas no desperdician tanta presión estática como las mamparas a la salida.

La figura C de la gráfica 3.2 muestra el funcionamiento con velocidad variable. En lugar de tener tres curvas por cada sistema, se obtienen tres curvas del ventilador una para cien por ciento, otra para tres cuartas partes y otra para cincuenta por ciento de la velocidad. Hay también una curva de potencia para cada velocidad. Los HP's a capacidades reducidas son menores que los HP's por control con mamparas a la entrada o a la salida debido a que la eficiencia del ventilador es constante y los elementos del sistema no añaden resistencia al mismo. La figura D muestra las relaciones de potencia para los tres métodos de control de flujo de aire. Las curvas para mamparas a la entrada y a la salida son iguales a las curvas A y B, sin embargo se muestran dos curvas para control de velocidad. La curva extra incluye la ineficiencia del acoplamiento hidráulico usado como transmisión de velocidad variable. La simplicidad de las mamparas a la salida (Outlet dampers) proporciona la ventaja del costo inicial. Las mamparas a la entrada (Inlet guide vanes) son considerablemente menos caras que los métodos de control de velocidad. El control de velocidad tiene muchas ventajas adicionales cuando la operación del sistema es normalmente

menor a la máxima velocidad o velocidad nominal de operación. La reducción en el ruido y el aumento de la vida útil del motor son algunas otras ventajas de variador de velocidad.

3.2. Uso de variadores de velocidad en motores de corriente alterna.

El motor de corriente alterna ha probado ser por si mismo un dispositivo de conversión de energía confiable. Fue diseñado y construido para proporcionar una velocidad razonablemente precisa con una buena eficiencia. Sus características pueden ser cambiadas para proporcionar un torque óptimo sin grandes corrientes de arranque. Ha sido diseñado para operar a una velocidad fija usando una frecuencia de línea fija. Desde hace algún tiempo, ha sido un aspecto importante el ahorro de energía en México. Con la llegada de los motores de alta eficiencia, las pérdidas del motor de corriente alterna se han reducido. Sin embargo, usándolos directamente en la línea se pueden esperar grandes corrientes de arranque.

Aunque el motor de corriente alterna está definido como un dispositivo de velocidad constante o fija, la operación de éste, a velocidad variable, requiere de un análisis sobre como puede modificarse la velocidad y el tipo de cargas que se puede esperar que el motor maneje.

3.3. Calentamiento en motores de corriente alterna

Considerando que el motor estándar de corriente alterna ha sido diseñado para trabajar a velocidad fija, el uso de estos motores en aplicaciones de velocidad variable requiere ciertas características térmicas del motor. Las pérdidas en los motores de corriente alterna se deben principalmente a las pérdidas en el cobre, y sabiendo que éstas se deben a la corriente del motor, la pérdida de watts será proporcional a la carga. A medida que el motor gira más lento, con la misma pérdida de watts que si girara rápido, el motor se calentará más. El motor se calienta más porque se dispone de menos aire para enfriar sus componentes debido a que el ventilador interno se mueve también más lento. Si el motor se está usando para controlar ventiladores, la carga disminuye cuando la velocidad disminuye, por tanto el problema de calentamiento del motor también disminuye.

3.4. Aplicación de controladores de velocidad variable

Si se compara con métodos alternativos para controlar la velocidad, el variador de velocidad y el motor de corriente alterna son el método más sencillo de control. Reemplazar el arrancador de un motor con un variador de velocidad, no solo mejora el arranque del motor y varía la velocidad del mismo sino que reduce el estrés en bandas, cajas de engranes y sistema de distribución eléctrica. Hay algunas reglas simples a seguir para asegurar una buena instalación y un largo periodo de operación sin requerimiento de mantenimiento correctivo.

3.4.1. Reglas a seguir para la aplicación de variadores

La primera regla a seguir es asegurarse que el sistema conste de tierra apropiada, la segunda es utilizar los calibres apropiados para el sistema y la tercera y última regla es asegurarse que todos los componentes hayan sido seleccionados para realizar el trabajo.

Para aterrizar apropiadamente la instalación se debe conectar todos los equipos a tierra. Esto implica un sistema trifásico de cuatro hilos, donde el cuarto hilo es el conductor a tierra. Para la corriente de entrada la mejor fuente de potencia para equipo electrónico es la configuración de estrella, ésta puede ser la conexión del sistema de distribución de la planta o el secundario de un transformador de aislamiento o de distribución.

En un sistema de cuatro hilos, toda la corriente será contenida por estos conductores y reducirá la posibilidad de crear interferencia en la línea de entrada. Para reducir la interferencia en la salida de potencia al equipo, el cuarto hilo deberá ser usado como una conexión fija a tierra entre el gabinete del variador y la carcasa del motor.

3.4.2. La importancia del calibre de los cables

La regla básica para métodos de cableado comienza por las especificaciones NEMA. Se selecciona el calibre adecuado para tener las mínimas pérdidas o caídas de tensión en los conductores la selección del *conduit* metálico es importante para eliminar o reducir la radiación magnética o ruido eléctrico.

En aplicaciones de velocidad variable el voltaje del motor es proporcional a la velocidad. Cuando la velocidad es cercana a la nominal el voltaje es máximo. A velocidad máxima la caída de voltaje en los cables de alimentación al motor serán menos críticas que a velocidades menores. A bajas velocidades, el voltaje aplicado al motor es bajo por lo que la poca pérdida de volts en los conductores previene al motor de proporcionar la máxima capacidad.

3.4.3. Como afectan las caídas de voltaje al torque

Las aplicaciones que requieren el 100% del torque a bajas velocidades serán sensibles a caídas de voltaje en los cables causadas por las corrientes motor.

Todos los variadores de velocidad controlan la relación de volts por hertz. La relación asegura que la cantidad de flujo de aire se mantenga en un valor seleccionado. Cuando el voltaje en las terminales del motor varía, la cantidad de flujo de aire en el motor varía. Controlando esta cantidad de flujo de aire en el motor se controla el desempeño del mismo.

En algunas aplicaciones, cualquier variación en la cantidad de flujo de aire repercute en variaciones rotacionales o variando la capacidad del torque. La tecnología de "Control Vectorial" puede ser empleada para reducir la cantidad de variación rotacional. Para llevar a cabo el "Control Vectorial" se usa la retroalimentación de la posición del rotor. Conociendo la relación de tiempo entre el voltaje de estator y la posición del rotor, el voltaje de estator puede ser ajustado para mantener la relación de deslizamiento entre estator y rotor definida y estable.

Todos los variadores de velocidad tipo PWM (*Pulse Width Modulated*) transfieren la potencia de la línea de corriente alterna al motor. En la mayoría de los variadores, el voltaje de salida varía si el voltaje de línea de entrada varía. Cualquier variación en el voltaje de salida repercute en variaciones de velocidad. A velocidades bajas de operación, una variación significativa ocurre debido a cambios en el voltaje de salida. Como el porcentaje de deslizamiento es constante, cuando una cantidad constante de flujo de aire se mantiene en el motor de corriente alterna el cambio de R.P.M. será mayor mientras la velocidad se reduce. Es muy importante que el voltaje en las terminales del motor se mantenga dentro de $\pm 2\%$ para obtener el mejor desempeño del motor.

Pocos variadores tipo PWM regulan el voltaje de salida cambiando la modulación para compensar las variaciones en el voltaje de entrada. Corrigiendo las variaciones en el voltaje de entrada, las variaciones en el desempeño del motor se reducen. Con compensación de voltaje de entrada, la variación en la velocidad, en la corriente y la variación de la temperatura de operación se pueden reducir.

3.4.4. Selección del calibre del cable

Debido a que todos los motores de corriente alterna se afectan por cualquier variación en el voltaje, la selección del calibre del cable es importante. NEMA proporciona criterios para la selección del calibre en función de la corriente que el motor va a manejar. Estos criterios asumen generalmente fuentes de voltaje fijas. Si se usan variadores de velocidad (variadores de frecuencia) el voltaje de salida varía con la frecuencia. A bajas velocidades o frecuencias bajas, el voltaje reducido correspondiente intensificará cualquier pérdida de voltaje en los cables entre el variador y el motor. Para reducir el impacto de pérdida de voltaje, la resistencia del cable se deberá mantener tan baja como sea práctico.

La resistencia máxima en ohms, se definirá por el largo y la sección transversal del cable. Esta sección está dada por el número AWG (American Wire Gauge). el valor de la resistencia máxima es igual a 0.5 volts dividido entre los amperes en la placa del motor. Entre más largo sea el cable mayor será la sección transversal del cable (número AWG más pequeño). Una baja pérdida de voltaje en el cable asegura que el motor reciba la mayor cantidad de volts en las terminales de salida del variador de velocidad.

En algunos variadores de velocidad de corriente alterna, la corriente de salida llevará muchas corrientes armónicas. Las corrientes armónicas son corrientes de alta frecuencia. Estas corrientes tienden a comprimirse en la superficie exterior del cable. Es importante que el calibre del cable sea seleccionado para asegurar que el calor adicional debido a estas corrientes sea soportado.

3.5. Como limita la frecuencia la velocidad del motor

La velocidad de un motor de corriente alterna está limitada a la frecuencia aplicada. La siguiente fórmula muestra como la velocidad máxima del motor está controlada por su construcción (número de polos) y por la frecuencia aplicada.

$$\text{Velocidad real RPM} = \frac{120 \times \text{frecuencia aplicada}}{\text{N}^\circ \text{ pares de polos}} - \text{deslizamiento del motor}$$

La velocidad de sincronismo es la velocidad límite dada por la frecuencia aplicada. El deslizamiento del motor varía en función de la carga. A plena carga se tendrá una reducción de velocidad de aproximadamente 50 r.p.m. con un motor NEMA B o un motor de propósito general.

3.6. Como afecta el voltaje a la velocidad del motor

La regulación de velocidad es mejor en motores de propósito general de corriente alterna que en motores de corriente directa. La frecuencia determina un límite superior de velocidad, sin embargo el voltaje controla la velocidad real del motor. En instalaciones apropiadas el voltaje aplicado al motor a frecuencia constante afectará la velocidad real de operación de dicho motor. Si la carga se incrementa, la reducción de velocidad se deberá al deslizamiento del motor y debido a la reducción de voltaje en las terminales del mismo, causada por la pérdida de voltaje en los cables de alimentación. Un 10% de caída de voltaje en los cables causará un 18% de pérdida en el torque, el cual, a su vez, provocará un deslizamiento mayor al esperado en el motor. Si la caída de voltaje en el cableado es mantenida en menos de 1% a plena carga se puede esperar una excelente regulación de velocidad.

En otras clasificaciones de diseño de motor, los cuales ajustan al diseño del rotor, para modificar las características de arranque (motores NEMA A,B,C,D) las variaciones en el deslizamiento están en función de la resistencia del rotor. El porcentaje real de deslizamiento dependerá entonces de las características de diseño del rotor para un motor particular. El diseño de rotor, ventilación y estator afectan las curvas de velocidad-torque del motor. La corriente de arranque varía entonces en función del diseño del rotor.

3.7. Torque constante, baja velocidad de operación

En aplicaciones donde el motor debe desarrollar el 100% del torque (100% de la corriente) a baja velocidad, se requerirá utilizar motores "sobrados" o con un alto factor de servicio. En muchas aplicaciones, la carga dinámica o estática es menor a la capacidad máxima de amperaje del motor. Con un cuidadoso análisis de los requerimientos de la aplicación, se puede determinar si la carga real es menor que la capacidad máxima especificada en la placa del motor. Si este es el caso, será posible usar un motor con un factor de servicio de 1.15 y usarlo a $\frac{1}{4}$ de su velocidad nominal. Para proteger a los motores de daño por sobrecalentamiento se pueden usar sensores internos de temperatura para evitar que se dañen los aislamientos.

3.8. Limitación de corriente por transitorios de voltaje

La manera más fácil de limitar la corriente es seleccionando una impedancia que retarde o limite la cantidad de corriente de entrada permisible mientras existe el transitorio de voltaje. Todos los variadores industriales incluyen inductores al circuito de filtrado. Estos inductores previenen que la corriente se incremente rápidamente limitando el aumento en el voltaje de capacitor. Un inductor no evita que el voltaje aumente, solo extiende el tiempo en que ocurre. Es importante recordar que la potencia debe ser tomada del capacitor de cd para evitar que ocurra un sobrevoltaje.

En aplicaciones de ventiladores a menor velocidad se requiere menor potencia. Una condición de sobrevoltaje puede ocurrir si más energía circula hacia el capacitor de la que se sustrae del mismo. Esto sucede cuando el ventilador está siendo operado a una velocidad menor a la nominal y un transitorio de voltaje está presente en la línea de ca. La energía del transitorio causa que la corriente fluya hacia el circuito de filtrado de cd. Si la corriente carga al circuito de filtrado al nivel de paro del variador, éste se apagará. Para la misma aplicación, cuando el ventilador opera a velocidad nominal, más energía va al motor y ayuda a mantener el circuito de filtrado fuera de posibilidad de condición de sobrevoltaje.

En la mayoría de los casos, los transitorios de voltaje en la línea de corriente alterna no serán lo suficientemente grandes para causar que el variador pare. En casos severos, el efecto del transitorio de alto voltaje se puede reducir añadiendo reactores de entrada o transformadores de aislamiento. Los filtros para la línea de potencia sirven para contener transitorios de voltaje con sólo un pequeño porcentaje de desviación sobre el nivel nominal. Los capacitores instalados para mejorar el factor de potencia tienden a crear una gran cantidad de transitorios de alto voltaje. Para evitar paros en los equipos de estado sólido por ruido, los transitorios de voltajes picos no deberán ser mayores al 125% del valor nominal de la línea de corriente alterna con duraciones no mayores a 1/10 del periodo de la frecuencia aplicada.

3.9. Tipos de variadores: capacidades y diferencias

Las diferencias entre los variadores de velocidad para motores de corriente alterna no se pueden determinar fácilmente por la información proporcionada con el proveedor. Todos los variadores convierten el voltaje de corriente alterna de entrada a alguna forma de corriente o voltaje de corriente directa y después conectan esa corriente directa a las terminales del motor de corriente alterna. Hay tres tipos básicos de variadores para motores de corriente alterna, estos son: voltaje variable, fuente de corriente y modulación de ancho de pulso.

3.9.1. Inversor de voltaje variable

El variador de velocidad para motor de corriente alterna más antiguo es el VVI o inversor de voltaje variable. Este voltaje se conecta a las terminales del motor simulando frecuencia. La amplitud de voltaje de corriente directa varía.

Un variador de voltaje VVI proporciona una simulación de onda senoidal de baja calidad. La forma de onda de salida al motor se llama forma de onda de 6 pasos o etapas.

3.9.2. Variador de forma de onda de seis etapas

Esta forma de onda contiene una frecuencia fundamental o frecuencia de operación que produce las características deseadas en el motor. Esta forma de onda también contiene otras frecuencias, las cuales producen efectos no deseables en el motor; causan calentamiento adicional y rotación del eje forzado. Este tipo de forma de onda limitará el rango de velocidad de motores de corriente alterna estándar usados en bajas velocidades y aplicaciones de torque constante.

3.9.3. Inversor de fuente de corriente

Este tipo de inversor controla un nivel de corriente directa, el cual está conectado a las terminales del motor. Si el nivel de corriente en los devanados del motor está controlado, se controla el torque que el motor puede producir. La forma de onda de entrada al motor es trapezoidal conteniendo frecuencias diferentes a la frecuencia de operación fundamental. Las características del motor definirán la forma real de la onda de voltaje resultante.

El inversor de fuente de corriente (CSI) depende del diseño eléctrico del motor y no siempre acepta motores estándar cuando se requiere un cambio de motor. Este tipo de variador se diseña normalmente para operar con un solo motor y retroalimentación de tacómetro.

3.9.4. Voltaje variable o control de corriente

La mayoría de los VVI o CSI convierten la potencia de entrada de corriente alterna a una fuente de corriente directa usando SCR's (Silicon Controlled Rectifiers). Este es el tipo de dispositivos de potencia usado por controles de motores de corriente directa. El método de conversión por medio de SCR's es bien conocido por su pobre factor de potencia de entrada y el impacto sobre la línea. La conversión por SCR's causa gran distorsión en la línea de corriente alterna debido a la conmutación, la cual cortocircuita la línea de corriente alterna.

En general, todos los controles para motores de corriente alterna de tipo VVI usados en aplicaciones de torque constante usan reactores o transformadores de entrada en la línea de corriente alterna para reducir la distorsión producida a la línea, así como altas corrientes a bajas velocidades de operación. Algunos controles VVI utilizan diodos para rectificar la corriente alterna a corriente directa fija y un chopper para convertir esta corriente directa fija a corriente directa variable. Esta corriente directa variable se conecta al motor como una fuente de voltaje / frecuencia variable.

3.9.5. Variador de velocidad de modulación de ancho de pulso

De los tres tipos básicos de variadores, el variador tipo PWM (Pulse Width Modulated) ofrece el control más eficiente para motores de corriente alterna. No todos los PWM son iguales. Las principales diferencias son.

De los variadores tipo PWM disponibles en el mercado, se pueden definir tres tipos en términos de funciones o características y forma de onda de salida.

3.9.6. Variador de propósito general

Este variador proporciona el control de velocidad de motor de corriente alterna pero no ofrece el mejor uso de energía eléctrica. Tiene capacidades básicas, pero puede ser muy sensible en algunos tipos de instalaciones. Existen diferencias en la sección de conversión del variador y tiende a ser sensible a las variaciones de voltaje. Está diseñado con un filtro simple de corriente directa. Todos los variadores tipo PWM convierten o rectifican el voltaje de entrada de corriente alterna a voltaje de corriente directa. Este voltaje de corriente directa debe ser filtrado antes de transferir la potencia al motor en forma de voltaje de corriente alterna. El filtro simple es de capacitores y con este filtro el factor de potencia reflejado a la línea de corriente alterna es más bajo que el factor de potencia del motor al que está controlando, por lo tanto el variador PWM con filtro simple causa una penalización mayor por debajo del factor de potencia que causaría el motor conectado directamente a la línea.

3.9.7. Variador de velocidad industrial

Este tipo de variador tiene un filtro LC. Un filtro LC es el que contiene reactores o inductores antes del filtrado por capacitores. Esto mejora significativamente el factor de potencia. Cuando se tienen corrientes en un choke o inductor de corriente directa continuamente, se obtiene un alto factor de potencia y menores corrientes armónicas o corrientes de distorsión.

Este variador tiene la capacidad de controlar la corriente del motor y de soportar condiciones de sobrecarga momentáneas. Muchos variadores se apagan en caso de sobrecarga en lugar de "pasar" sobre ésta. Normalmente estos variadores se instalan donde la aplicación demanda más potencia en algunos instantes.

3.9.8. Variadores PWM con interfase inteligente

Este tipo de variadores contienen alguna forma de programación donde se pueden seleccionar características de operación. Esta programación no aumenta la capacidad del variador para proporcionar energía al motor, pero simplifica la interfase del variador y un control maestro exterior. Esta clase de variadores son generalmente digitales y no analógicos. Algún tipo de microprocesador o circuito integrado se usa para procesar las señales externas y para controlar la potencia de salida. Este tipo de variadores pueden recordar tendencias y proporcionar diagnósticos.

En todos los variadores tipo PWM se puede tener una forma de onda distinta. La mayoría de estos variadores utilizan un método de cambio "unipolar". Pocos variadores utilizan método "bipolar". El método bipolar proporciona un mejor y mayor control del voltaje de corriente directa aplicado al motor. Esto da como consecuencia menores corrientes armónicas y una mejor relación de corriente pico a RMS.

La modulación de ancho de pulso (PWM) es el método usado para controlar el voltaje al motor. El patrón de pulso usado en los variadores puede ser distinto en función de los dispositivos usados para el cambio de polaridad.

Cuando se compara con un motor cuya energía procede directamente de la línea, la temperatura en la superficie del motor no deberá, cuando sea operado a velocidad nominal, alcanzar un nivel mayor al 3% de la línea que alimenta al motor. La corriente real medida podrá ser distinta debido a que la forma de onda de entrada no es senoidal, aunque el calor adicional no sea significativamente diferente. El desempeño rotacional del motor no se degrada cuando se usa con un variador de velocidad. La rotación del eje no debe pulsar a una frecuencia mayor a 6 hertz. La pulsación generalmente se debe a variaciones en la carga, debido a variaciones de fricción en la máquina o proceso o cuando el movimiento se convierte de rotacional a lineal.

Con algunos variadores tipo PWM el ruido audible es un problema. Algunos métodos de inversión usan una frecuencia mayor a 12000 hertz para llevar el "ruido" a niveles no audibles por el humano. Este tipo de inversión ocasiona mayores pérdidas por calor en el motor y en el variador. Estas frecuencias estresan el aislamiento de los cables, conduciendo a una vida menor del motor. Con motores estándar de corriente alterna se puede usar un rango de frecuencia de 600 a 3000 hertz haciéndolo más eficiente. Con diseños especiales de motores se puede usar un rango más amplio de frecuencia.

Los variadores tipo PWM con un filtro LC o reactores de entrada en la línea de corriente alterna proporcionan el mejor método de conversión de energía eléctrica a energía mecánica en aplicaciones de velocidad variable. El alto factor de potencia y la capacidad mejorada de ignorar las condiciones de la línea de corriente alterna hacen al variador de velocidad tipo PWM el dispositivo más efectivo.

3.10. Consideraciones en la línea de distribución de potencia

La línea de alimentación de corriente de la cual el variador toma su energía, tiene un papel más importante que el sólo proporcionar potencia RMS. El voltaje de entrada a cualquier dispositivo de estado sólido debe proveer siempre una forma de onda de voltaje que permanezca con un valor aceptable de RMS y suministre una forma de onda de voltaje instantáneo admisible.

En la mayoría de los dispositivos de estado sólido, el voltaje de la línea de corriente alterna es cambiado a voltaje de cd por medio de un proceso de rectificación. Con lo único con que se relaciona el proceso de rectificación es con el valor instantáneo del voltaje. En el proceso de filtrado, un valor instantáneo de voltaje puede causar que el valor de voltaje en el capacitor cambie al valor del voltaje instantáneo de la línea de corriente alterna. Mientras el valor del voltaje de entrada instantáneo sea mayor que el voltaje en el capacitor (DC BUS) la corriente fluirá hacia el capacitor.

Todos los dispositivos de estado sólido tienen límites de voltaje que pueden soportar. Cuando el nivel de voltaje alcanza ese límite, el dispositivo tenderá a protegerse a sí mismo. Para evitar paros por sobrevoltaje causados por transitorios se debe limitar la corriente al capacitor.

3.11. Selección del sistema de distribución de corriente alterna apropiado

Existen variaciones en los sistemas de distribución de ca. Los sistemas delta estrella pueden ser aterrizados o no aterrizados. Con variadores de velocidad, que rectifican la corriente de la línea y la almacenan en un bus de cd, la forma de onda de la corriente se conforma con pulsos y consiste en la corriente fundamental de 50 o 60 hertz y muchas corrientes armónicas. Una configuración de estrella para eliminar cualquier corriente armónica cuya frecuencia sea divisible entre tres. Usando un cuarto cable para neutral/tierra en la estrella, los caminos para la corriente quedarán definidos, minimizando los desbalances de voltaje que ocurren cuando las corrientes son conducidas a tierra por un conductor.

Las corrientes armónicas que son originadas en un sistema de distribución, son debidas generalmente, a desbalances de voltaje entre las fases de la línea más que por el equipo que toma su energía de este sistema de distribución. Para minimizar las armónicas, la línea de corriente alterna debe tener la misma forma de onda de voltaje en el ciclo positivo y negativo así como su magnitud. Cualquier desviación creará corrientes armónicas al sistema de distribución.

Si se tiene una configuración delta y una de las fases está aterrizada, el circuito equivalente de estrella ya no estará balanceado. Las corrientes de línea resultantes no serán iguales. Esto puede originar calentamiento, falla prematura de fusibles así como fallas en los rectificadores de los variadores.

3.12. ¿Cómo se causan los transitorios de voltaje?

Cualquier desviación del valor ideal del voltaje, puede ser definida como un transitorio de voltaje. El valor de la desviación puede ser mayor o menor al valor ideal de voltaje. Los transitorios de voltaje no son siempre valores mayores de entrada que puedan causar paros por sobrevoltaje.

Un paro por sobrevoltaje generalmente es causado cuando el voltaje en el bus de cd excede un valor especificado. La corriente del capacitor resultante de diferencias de voltaje entre las fases de la línea de alimentación es lo que realmente causa la condición de sobrevoltaje. Nótese que la palabra "diferencias" implica que si el voltaje de la fase A tiene un valor ideal y el voltaje de la fase B es menor al valor ideal o fase invertida, la cantidad de corriente fluyendo de la fase A a la fase B puede ser mayor a la esperada.

Cuando un motor de velocidad fija se conecta directo a la línea es posible que una sola fase reduzca su voltaje comparada con las otras dos fases. Esta "caída de voltaje de fase" puede motivar un flujo de corriente mayor al normal en otros equipos conectados al sistema de distribución. Cuando se usan capacitores para la corrección del factor de potencia de un sistema ocurrirá una distorsión en la forma de onda. Cuando los capacitores cambian se tendrán caídas de voltaje y dependiendo de las características del sistema de distribución RL y C la oscilación de voltaje distorsiona la forma de onda ocasionando ruido eléctrico indeseable.

Con la llegada de las fuentes de poder tipo SWITCHING MODE en balastros para lámparas fluorescentes para ahorro de energía, para computadoras y equipo comercial como televisiones y videocaseteras, el nivel de distorsión por corrientes armónicas ha aumentado en los sistemas de distribución. Con estas fuentes de poder en sistemas monofásicos, la distorsión por corrientes armónicas es significativamente mayor que con fuentes trifásicas.

El problema radica en que la mayoría de los sistemas de distribución están diseñados y dimensionados para manejar cargas lineales. Las fuentes de tipo SWITCHING MODE (estado sólido) son cargas no lineales y pueden requerir el cambio del sistema de distribución.

3.13. Corrección del sistema de distribución

El problema más simple de corregir es el del paro por ruido debido a sobrevoltaje o transitorios de voltaje. Este problema se puede corregir añadiendo inductancias en cada fase. Los problemas difíciles de corregir causados por desbalance en la línea de corriente alterna requerirán la redistribución del equipo de poder en esa línea de distribución.

Últimamente ha habido problemas en la conexión del cable de aluminio o terminales con los conductores de cobre. La diferencia en el material ocasiona una degradación de largo plazo la cual provoca falsos contactos no intencionales, creando transitorios de voltaje. Estos transitorios hacen que el equipo se apague o se dañe.

Las nuevas tecnologías en los variadores de velocidad, minimizan los problemas que pueden ocurrir debido a pérdidas temporales de corriente en la línea. Los problemas ahora se asocian con transformadores y dispositivos protectores usados con el equipo.

3.14. Selección y aplicación de transformadores

Los transformadores han sido usados normalmente con los variadores de velocidad. El propósito de los transformadores era mediar la línea de corriente alterna de los efectos del equipo de conversión. Los equipos a base de SCR's crean distorsión en la línea y pueden afectar a otros equipos en ese sistema de distribución. Con la llegada de los variadores tipo PWM, la necesidad de un mediador para la línea de corriente alterna se redujo. De hecho los variadores PWM no requieren de un transformador de aislamiento de entrada para prevenir la distorsión en la línea. Con el uso de transformadores de aislamiento con variadores PWM se puede reducir o evitar la posibilidad de cortocircuito en la línea.

La mayoría de los transformadores están diseñados para cargas lineales. La luz incandescente, los motores y en general las cargas resistivas son todos lineales. Con las cargas de tecnologías más nuevas, las características han ido de lineales a no lineales. Las cargas no lineales aumentan las demandas en los transformadores.

Para seleccionar correctamente un transformador para cargas no lineales, el calibre de cable debe permitir la mayor área transversal posible para tener la menor resistencia a corrientes de alta frecuencia. Los transformadores están clasificados por un factor K. El factor K define la capacidad del transformador para manejar corrientes armónicas al mismo tiempo que soportar la temperatura de operación del transformador.

Un transformador diseñado para cargas lineales, está clasificado por un factor $K=1$. Los transformadores con factores $K=4$ son apropiados para niveles moderados de corrientes armónicas. Un factor $K=13$ es apropiado para mayores niveles de corrientes armónicas. Un variador de velocidad industrial tipo PWM contribuye con corrientes armónicas equivalentes a un factor $K=2.5$. Los dispositivos monofásicos como el alumbrado y computadoras contribuyen con corrientes armónicas equivalentes a un factor $K=10$ o mayores.

3.15. Cuadro sinóptico de variadores de velocidad

En la figura 3.2.1 se aprecia que hay distintos tipos de variadores de velocidad los cuales se diferencian en el parámetro que regulan, la teoría de operación de los variadores que se mencionan en este cuadro sinóptico se explica de la sección 2.3.1 a la sección 2.3.8

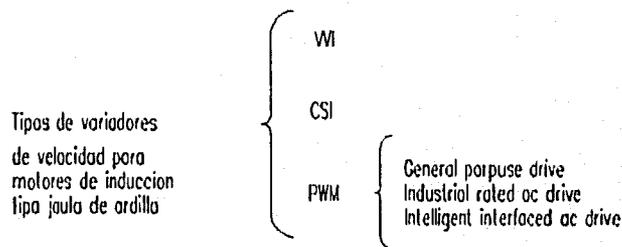


Diagrama 3.16.1. Cuadro sinóptico de variadores de velocidad.

El análisis de la tesis está basado en la comparación del desempeño de mamparas a la entrada (Inlet Guide Vanes), mamparas a la salida (Outlet Dampers) contra variadores de velocidad tipo PWM con interface inteligente, los cuales son los que mejor cubren la aplicación que se estudia.

Como se aprecia en las gráficas 112 y 2-11 de los textos *Fan Engineering* y *Maintenance Engineering Handbook* respectivamente en el apéndice 1 y 2, el consumo de potencia eléctrica varía en función del tipo de control de flujo de aire.

Cuando la aplicación lo permite, y las siguientes condiciones se cumplan, será factible la sustitución de mamparas a la succión o a la descarga por variadores de velocidad:

1. Trabajo continuo durante todo el día o la mayor parte de éste y a su vez durante todo el año o la mayor parte de éste.
2. Régimen de operación menor al máximo o nominal. Desde 0% hasta el 80% de flujo.
3. Necesidad de un control de flujo de aire rápido y preciso.
4. Control por señal de retroalimentación.
5. Motores eléctricos altamente consumidores de potencia.

3.17. Consideraciones

- La potencia de los motores ya está definida por la planta.
- El flujo de aire ya está calculado en función de la potencia del motor y la geometría de los alabes del ventilador.
- La temperatura y la presión del aire en la cama de enfriamiento ya está definida por la planta para una determinada calidad de *clinker*.

4 ANÁLISIS TÉCNICO-GRÁFICO DE CONSUMO DE POTENCIA

En base a las gráficas 112 y 2-11 de los textos *Fan Engineering y Maintenance Engineering Handbook* en apéndice 1 y 2 respectivamente, se tabulan los valores de consumo de potencia estimados para los distintos tipos de control de flujo con varias capacidades de potencia en motores eléctricos altamente usados tanto en la industria cementera, (en las camas enfriadoras de clinker) como en la mayoría de las industrias en donde se requiere velocidad variable y con alto consumo de energía.

En las gráficas 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 se muestra el consumo de potencia estimado para motores de 50, 150 y 300 Hp respectivamente con control de flujo de aire de mamparas a la descarga.

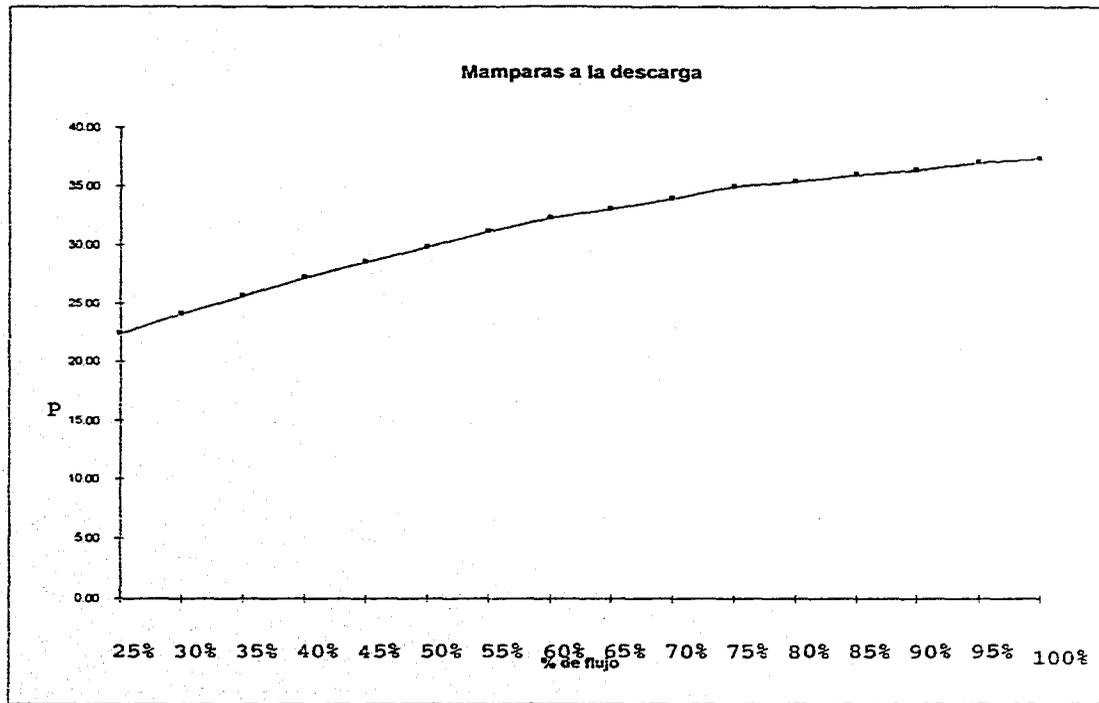
En las gráficas 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 se estudia a las mamparas a la succión, con ventiladores de 100, 200 y 250 Hp respectivamente, vemos la diferencia en consumo de potencia entre las mamparas a la descarga y las mamparas a la succión y que a pesar de que los dos son dispositivos de control mecánicos, existen diferencias en el consumo las cuales pueden convencer a los industriales para modificar sus sistemas de control de flujo.

En las gráficas 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3 se analiza el comportamiento de los variadores de velocidad aplicados a ventiladores de 200, 250 y 300 hp se observa que el ahorro de potencia puede ser obtenido en un amplio rango de operación, es decir desde el 5% de flujo hasta el 85% de flujo.

Los variadores de velocidad comparados con cualquier otro método de control de flujo, resultan más confiables y muy económicos en cuanto al consumo de energía.

Gráfica 4.1.1 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 50 Hp's con mamparas a la descarga
 Motor de 50 HP = 37.3 KW

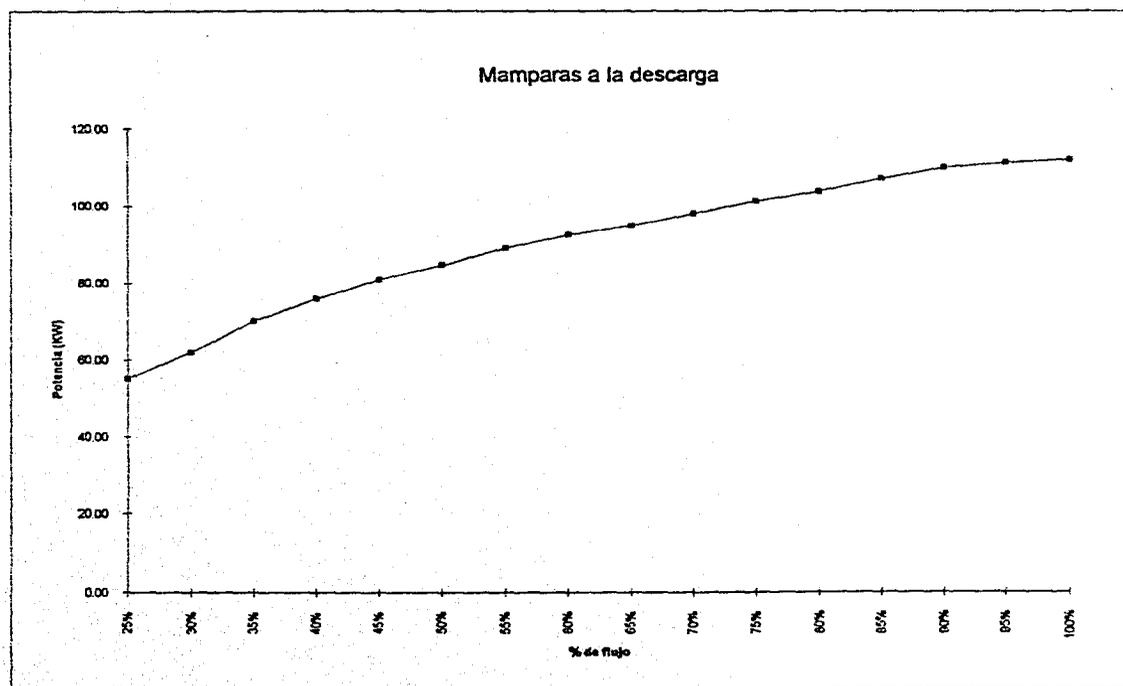
	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Mamparas a la succión	22.38	24.06	25.64	27.23	28.53	29.84	31.15	32.26	33.01	33.94	34.97	35.44	36.01	36.46	37.02	37.30	KW



4.1. Consumo de energía con mamparas a la succión

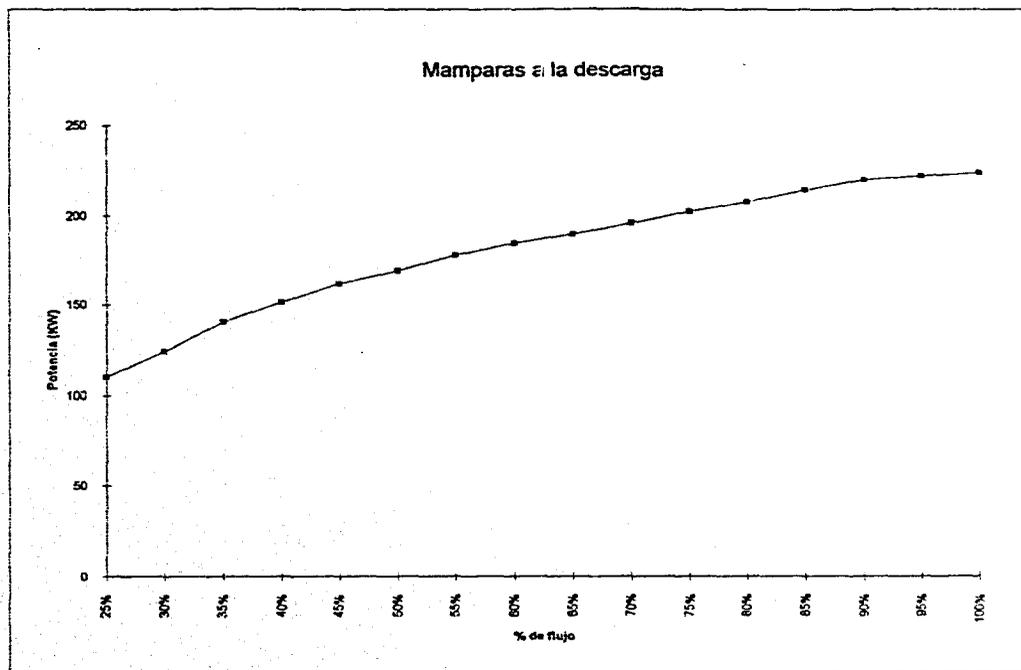
Gráfica 4.1.2 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 150 Hp's con mamparas a la descarga
 Motor de 150 HP =

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Mamparas a la succión	55.11	62.10	70.22	75.81	81.02	84.71	88.96	92.32	94.84	97.91	100.99	103.56	106.92	109.64	111.06	111.90	KW



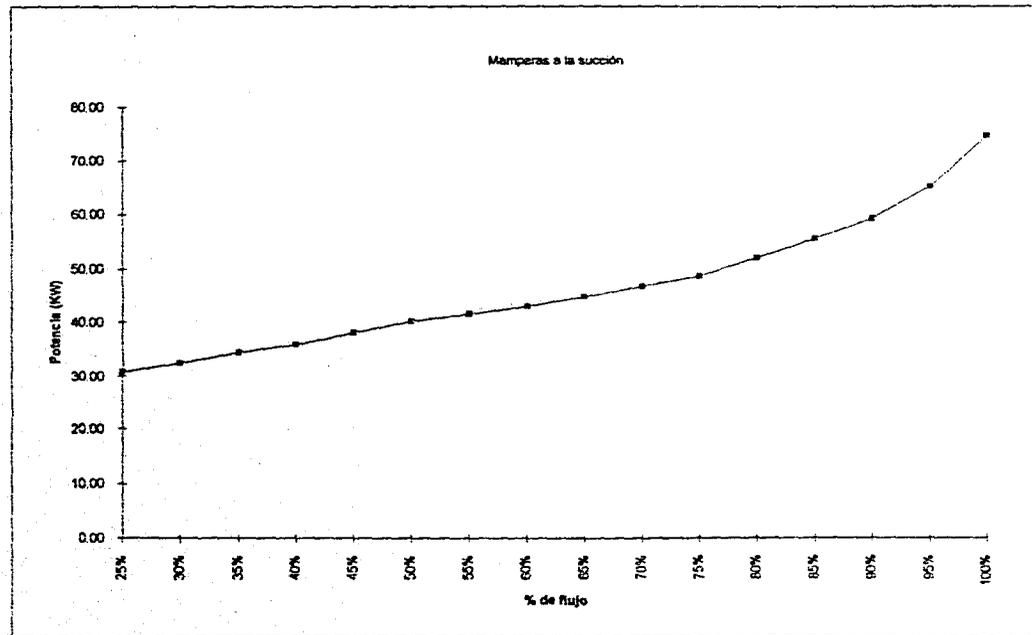
Gráfica 4.1.3 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 300 Hp's con mamparas a la descarga
 Motor de 300 HP = 223.8 KW

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Mamparas a la succión	110.22	124.21	140.43	151.62	162.03	169.42	177.92	184.64	189.67	195.83	201.98	207.13	213.84	219.88	222.12	223.8	KW



Gráfica 4.2.1 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 200 Hp's con mamparas a la succión
 Motor de 100 HP = 74.6 KW

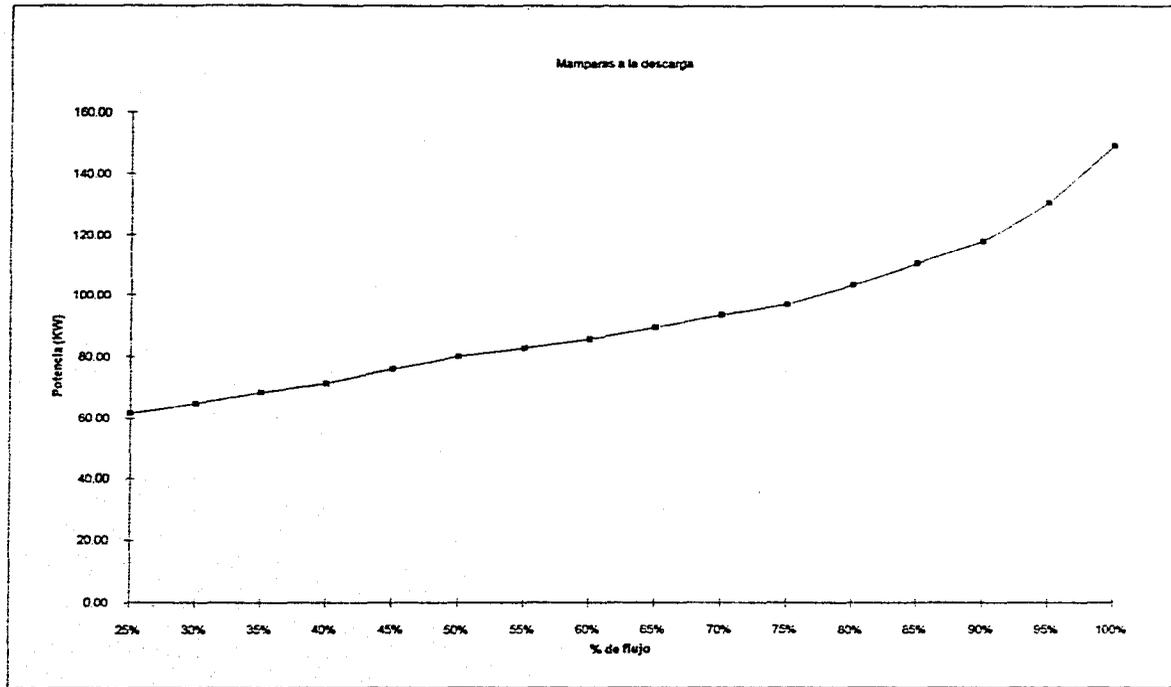
	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Mamparas a la descarg	30.77	32.45	34.32	35.81	38.05	40.10	41.40	42.90	44.76	46.63	48.49	51.66	55.39	58.93	65.28	74.60	KW



4.2. Consumo de energía con mamparas a la descarga

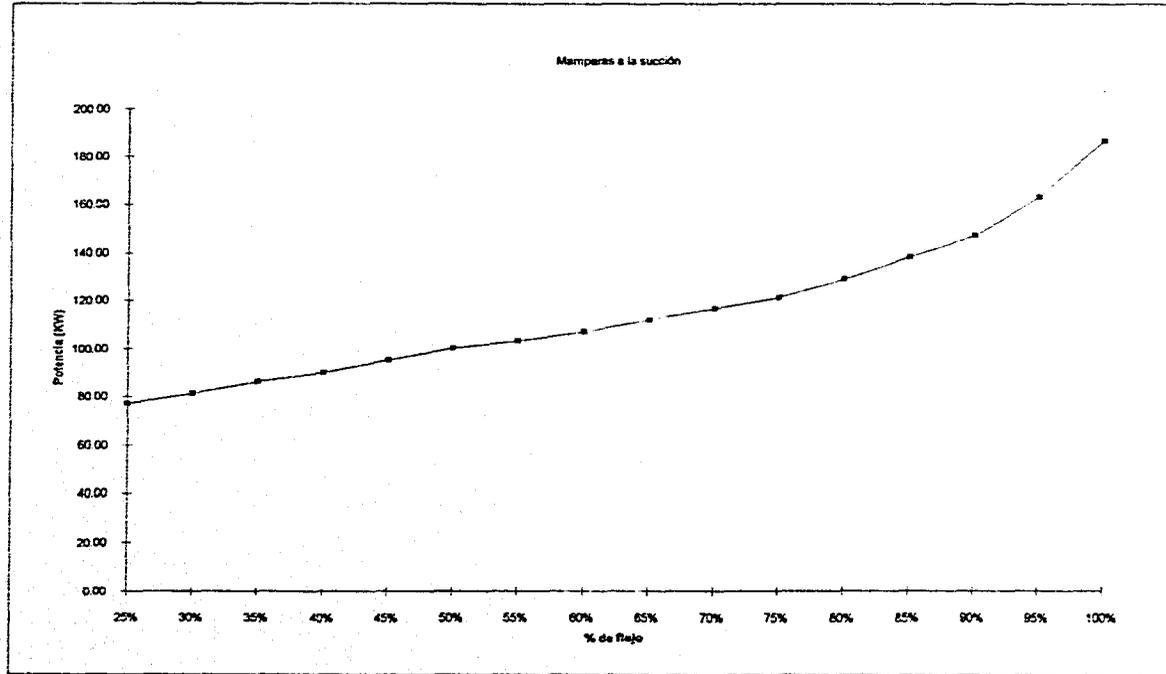
Gráfica 4.2.2 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 200 Hp's con mamparas a la succión
 Motor de 200 HP = 149.2 KW

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Mamparas a la descarg	61.55	64.90	68.63	71.62	76.09	80.20	82.81	85.79	89.52	93.25	96.98	103.32	110.78	117.87	130.55	149.20	KW



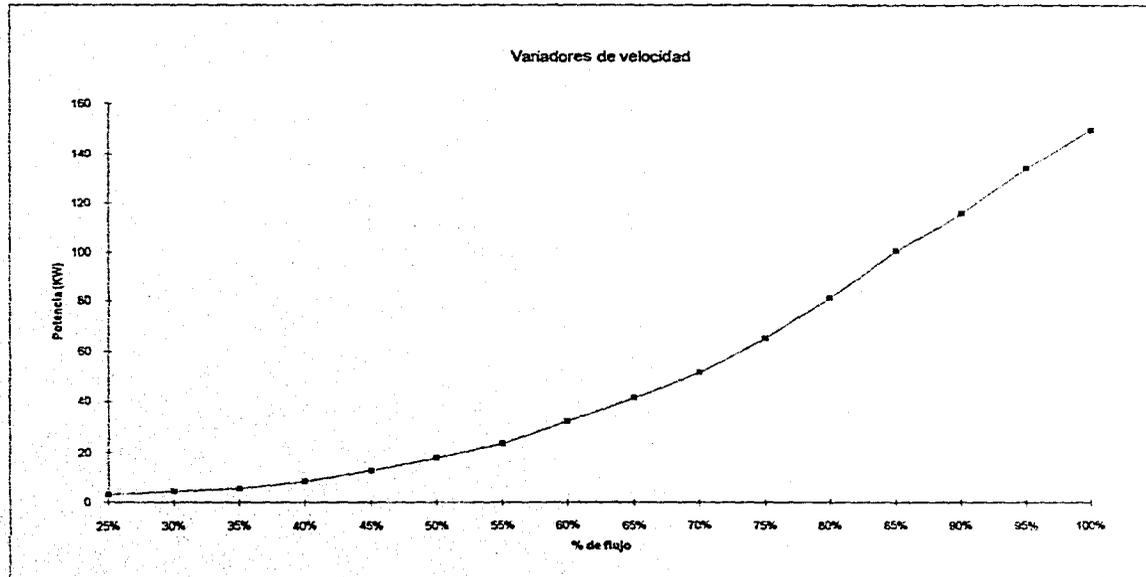
Gráfica 4.2.3 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 250 Hp's con mamparas a la succión
 Motor de 250 HP =

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Mamparas a la descarg	76.93	81.13	85.79	89.52	95.12	100.24	103.51	107.24	111.90	116.56	121.23	129.15	138.48	147.34	163.19	186.50	KW



Gráfica 4.3.1 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 200 Hp's con variador de velocidad
 Motor de 200 HP =

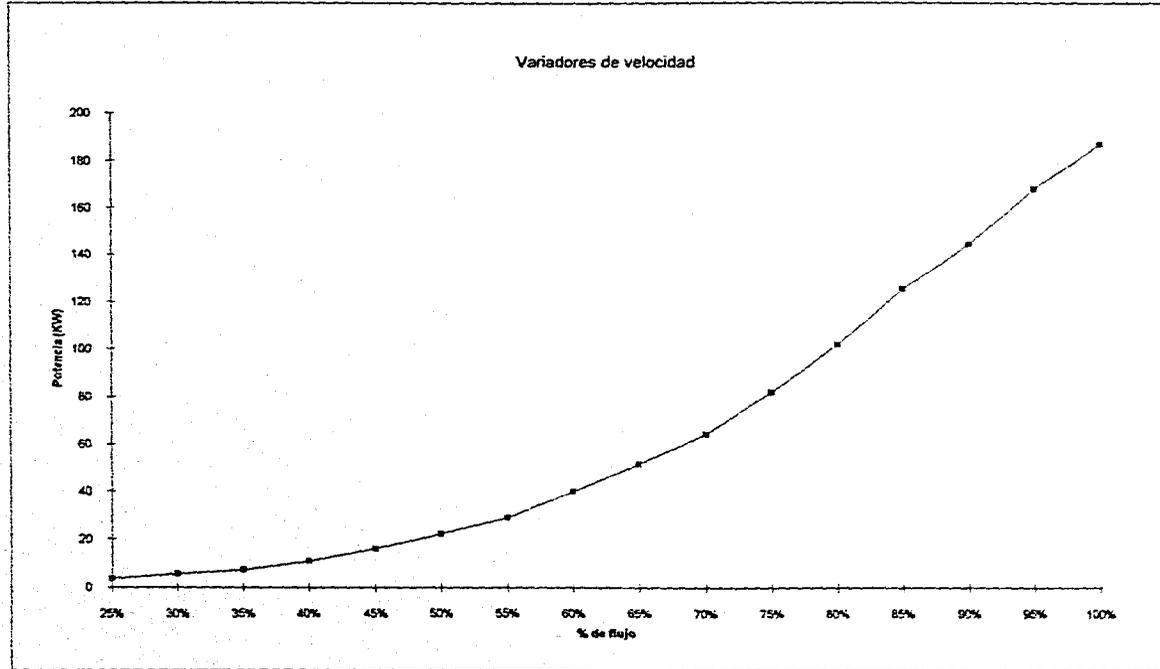
	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Variadores de velocidad	2.984	4.476	5.6696	8.579	12.682	17.904	23.35	32.078	41.403	51.474	65.275	81.314	100.34	115.63	134.28	149.2	KW



4.3. Consumo de energía con variadores de velocidad

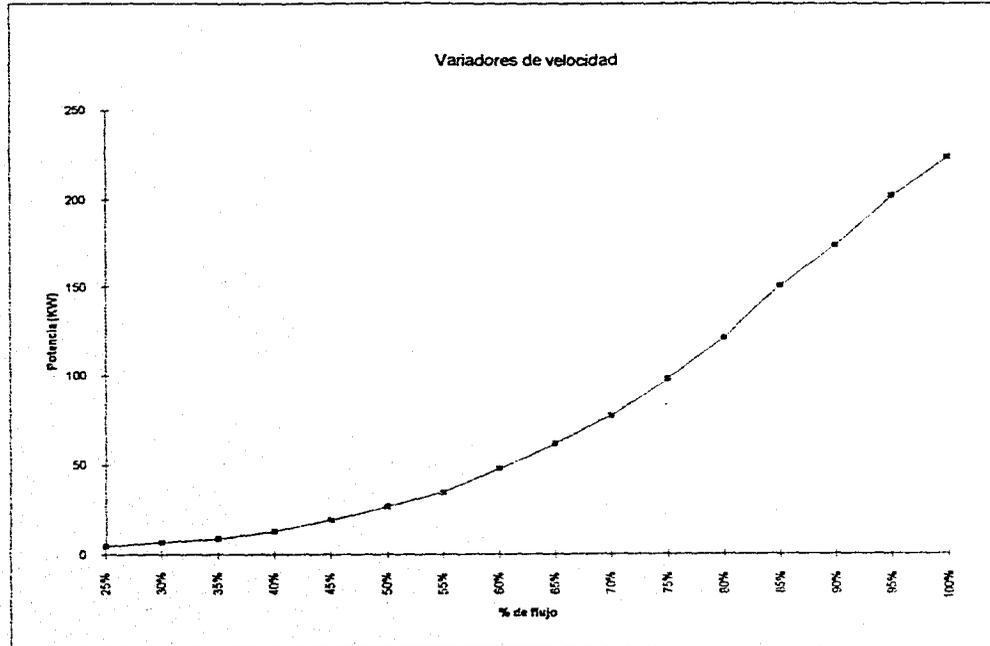
Gráfica 4.3.2 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 250 Hp`s convariadores de velocidad
 Motor de 250 HP =

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	% flujo
Variadores de velocidad	3.73	5.595	7.087	10.724	15.853	22.38	29.187	40.098	51.754	64.343	81.594	101.64	125.42	144.54	167.85	186.5	KW



Gráfica 4.3.3 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor de 300 Hp's con Motor de 300 HP =

	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	%flujo
Variadores de velocidad	4.476	6.714	8.5044	12.869	19.023	26.856	35.025	48.117	62.105	77.211	97.913	121.97	150.51	173.45	201.42	223.8	KW



5. ESTUDIO COMPARATIVO DE CONSUMO DE POTENCIA

5.1. Tablas comparativas de consumo de energía eléctrica

En la siguiente sección se hace un análisis comparativo de consumo de potencia entre los distintos dispositivos de control de flujo; con lo que se quiere demostrar la viabilidad de la sustitución de los controles actuales bajo determinadas características de carga del ventilador

En la tabla 5.1 se hace una comparación entre el desempeño de las mamparas a la succión y mamparas a la descarga con capacidades de motores entre 50 hasta 300 HP, las cuales son capacidades usuales en la cama de enfriamiento de clinker.

Se aprecia que el ahorro de energía puede ser obtenido desde el 30 hasta el 85% de flujo .

En la tabla 5.2 se compara entre el funcionamiento de las mamparas a la descarga y los variadores de velocidad, obteniéndose el ahorro más significativo de potencia entre los tres dispositivos de control analizados en este trabajo.

En la tabla 5.3 se estudia el ahorro entre mamparas a la succión y variadores de velocidad, cabe notar que el ahorro de energía no es tan drástico como lo es comparando a los variadores de velocidad con mamparas a la descarga, sin embargo hace algunos años las planta cementeras optaron por sustituir las mamparas a la descarga (Dispositivo más económico en inversión inicial) por mamparas a la succión. Esta modificación al sistema les ha traído buenos ahorros de energía aunque no tan buenos como lo significa el cambio de cualquier dispositivo mecánico por un o electrónico.

5.2. Tablas comparativas de consumo de potencia en motores de inducción usando mamparas mecánicas a la descarga y mamparas a la succión

Tabla 5.1 Consumo de potencia (en KW) estimado para motores desde 50 Hp's hasta 300 Hp's con mamparas a la descarga como control de flujo de aire.

HP	KW	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.3	13.24	18.37	20.70	22.41	25.27	27.01	29.24	30.95	33.77	35.51	38.34	39.86	41.52	43.24	44.98	46.74	48.50
75	55.95	20.46	27.74	31.01	33.61	37.04	40.01	43.35	44.91	48.16	49.72	52.97	54.49	57.74	59.26	62.51	64.03	67.28
100	74.80	26.48	36.74	41.40	44.81	50.54	54.21	59.75	61.31	66.85	68.41	73.95	75.51	81.05	82.61	88.15	89.71	95.25
125	93.25	33.10	45.83	51.76	56.51	63.18	67.92	74.59	76.53	83.20	85.14	91.81	93.75	100.42	102.36	109.03	110.97	117.64
150	111.90	39.72	55.30	62.10	67.22	75.81	81.02	89.63	92.07	100.68	103.12	111.73	114.17	122.78	125.22	133.83	136.27	144.88
175	130.55	46.35	64.30	72.48	78.82	89.45	95.82	106.45	109.39	120.02	123.44	134.07	137.49	148.12	151.54	162.17	165.59	176.22
200	149.20	52.97	73.46	82.81	89.32	101.06	108.02	120.06	123.44	135.48	139.34	151.38	155.24	167.28	171.14	183.18	187.04	199.08
225	167.85	59.59	82.67	93.16	100.33	113.72	121.52	135.44	139.68	153.60	157.84	171.76	176.00	190.92	195.16	210.08	214.32	229.24
250	186.50	66.21	91.85	103.51	111.03	126.35	135.03	151.18	155.30	171.45	175.57	191.72	195.84	211.99	216.11	232.26	236.38	252.53
275	205.15	72.83	101.04	113.86	122.73	139.99	149.38	167.24	171.45	189.30	193.51	211.36	215.57	233.42	237.63	255.48	259.69	277.54
300	223.80	79.45	110.22	124.21	140.43	151.62	162.03	180.42	174.62	193.01	197.21	215.60	219.79	238.18	242.37	260.76	264.95	283.34

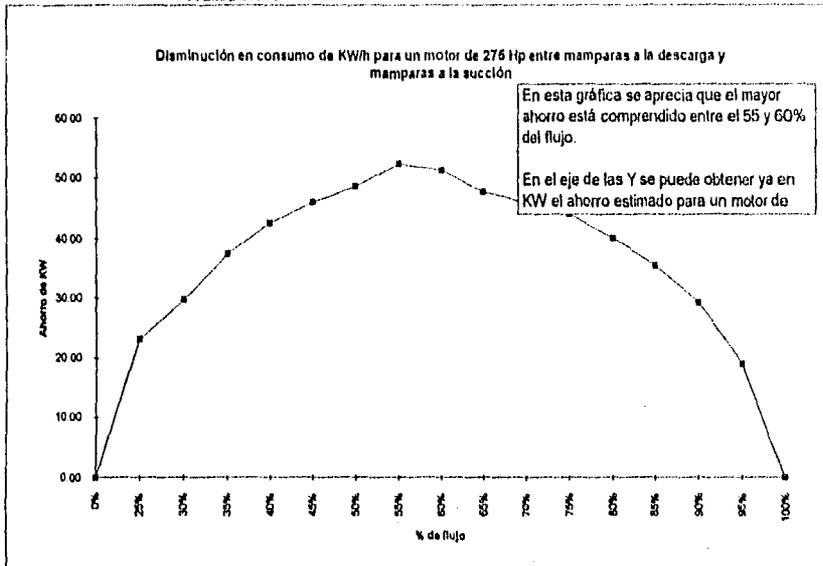
Consumo de potencia (en KW) estimado para un motor desde 50 Hp's hasta 300 Hp's con mamparas a la succión como control de flujo de aire.

HP	KW	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	13.24	14.17	15.29	16.60	17.53	18.65	19.40	20.14	21.45	22.64	24.32	25.84	27.23	28.19	31.33	33.57	37.30
75	55.95	19.86	21.29	22.84	24.00	26.30	27.60	29.00	30.21	32.17	34.41	36.48	38.47	40.84	43.78	47.00	50.36	55.95
100	74.80	26.48	28.35	30.59	33.20	36.00	37.30	39.79	43.28	42.80	45.86	48.64	51.26	54.46	58.37	62.90	67.14	74.80
125	93.25	33.10	35.44	38.23	41.50	43.83	46.63	48.49	50.36	53.62	57.35	60.80	64.11	68.07	72.87	78.33	83.93	93.25
150	111.90	39.72	42.52	45.86	49.60	52.56	55.95	59.19	60.43	64.34	68.62	72.96	76.93	81.69	87.56	94.00	100.71	111.90
175	130.55	46.35	49.61	53.53	58.09	61.36	65.26	67.59	70.50	75.07	80.29	85.12	88.75	93.30	102.15	108.86	117.50	130.55
200	149.20	52.97	56.70	61.17	66.39	70.12	74.80	77.58	80.57	85.79	91.78	97.44	102.36	107.63	115.46	123.60	133.25	149.20
225	167.85	59.59	63.76	68.82	74.69	78.86	83.25	87.86	90.71	96.45	102.24	107.70	112.44	118.22	126.22	134.54	143.99	167.85
250	186.50	66.21	70.77	76.17	82.06	86.96	92.25	98.04	100.71	107.21	114.70	121.60	128.22	136.15	144.76	153.96	164.85	186.50
275	205.15	72.83	77.88	83.25	89.42	93.58	99.42	105.58	108.25	117.78	124.76	133.78	141.04	149.76	159.53	172.33	184.84	205.15
300	223.80	79.45	85.04	91.78	99.59	105.19	111.90	118.38	120.85	128.69	137.84	145.92	153.86	163.37	175.12	187.60	201.42	223.80

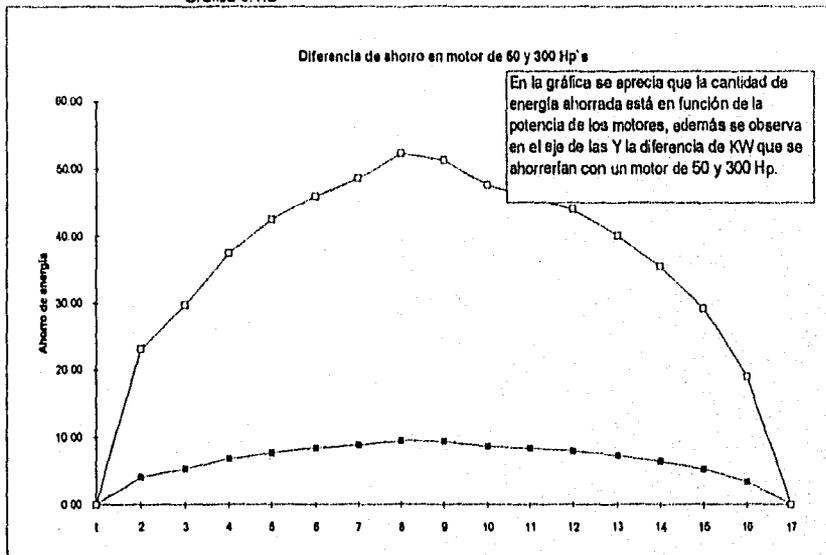
Diferencia de consumo de energía eléctrica entre a la mamparas a la descarga y mamparas a la succión

HP	KW	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	0.00	4.20	5.41	6.81	7.74	8.36	8.84	9.51	9.33	8.07	8.32	8.02	7.29	8.45	6.32	3.45	0.00
75	55.95	0.00	6.39	8.11	10.21	11.61	12.53	13.26	14.27	13.69	13.01	12.46	12.03	10.64	9.68	7.87	5.18	0.00
100	74.80	0.00	10.49	13.52	17.02	19.35	20.89	22.10	23.78	23.31	21.86	20.76	20.05	18.23	16.13	13.29	8.63	0.00
125	93.25	0.00	12.59	16.23	20.42	23.22	25.07	25.52	27.85	27.89	26.02	24.85	24.06	21.86	19.36	15.95	10.35	0.00
150	111.90	0.00	14.86	19.63	24.83	27.09	28.24	30.64	33.39	32.64	30.35	29.11	28.07	25.52	22.96	18.90	13.08	0.00
175	130.55	0.00	16.79	21.83	27.23	30.84	33.42	35.36	38.05	37.30	34.86	33.27	32.08	29.17	25.81	21.20	15.00	0.00
200	149.20	0.00	18.86	24.34	30.63	34.63	37.90	40.76	42.60	41.86	39.13	37.13	35.10	32.48	28.56	23.56	17.25	0.00
225	167.85	0.00	20.98	27.14	33.44	38.57	42.57	45.95	47.80	47.05	44.32	42.10	40.41	37.28	32.59	27.23	20.86	0.00
250	186.50	0.00	23.08	29.75	37.44	43.57	48.55	52.62	54.37	53.62	50.89	48.71	46.51	43.11	38.72	31.89	25.70	0.00
275	205.15	0.00	25.18	32.45	40.84	46.44	50.13	53.04	55.07	54.32	51.59	49.01	46.12	43.75	38.72	31.89	25.70	0.00
300	223.80	0.00	27.28	35.12	44.13	49.33	52.62	55.14	56.89	56.14	53.41	50.83	47.74	45.17	40.76	33.90	27.70	0.00

Gráfica 5.1.A



Gráfica 5.1.B



5.3. Tablas comparativas de consumo de potencia en motores de inducción usando mamparas mecánicas a la descarga y variadores de velocidad

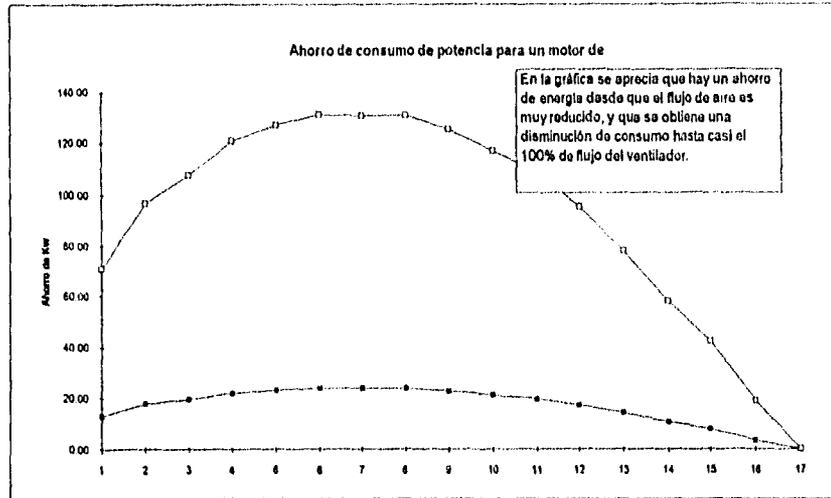
Tabla 5.2 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motores desde 50 Hp's hasta 300 Hp's con mamparas a la descarga como control de flujo de aire.

HP	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	13.24	19.37	20.70	22.41	27.01	28.24	29.65	30.77	31.61	32.04	33.06	34.52	35.64	36.85	37.02	37.30
75	55.95	18.68	27.58	31.06	35.11	40.51	42.35	44.18	45.56	46.18	47.42	48.96	50.49	51.78	53.48	54.87	55.95
100	74.80	25.40	38.74	41.40	46.81	50.54	54.01	57.13	60.56	64.13	67.42	70.33	73.26	74.66	76.56	78.06	79.80
125	93.25	33.70	45.93	51.75	57.20	62.81	66.86	70.90	74.73	78.63	81.91	85.29	88.10	89.10	91.04	92.55	94.20
150	111.80	42.35	55.11	62.10	68.45	74.52	78.82	83.10	86.82	90.48	93.59	96.65	99.20	100.92	102.64	104.04	105.50
175	130.55	51.40	65.35	72.81	79.52	85.83	90.63	94.90	98.70	102.45	105.56	108.58	111.00	112.74	114.58	116.08	117.60
200	149.20	60.85	75.80	83.81	90.82	96.52	101.03	105.23	108.74	112.06	114.78	117.00	118.81	120.61	122.12	123.62	125.10
225	167.85	70.65	86.60	95.11	102.35	108.35	113.72	118.16	121.95	125.44	128.25	130.66	132.15	133.64	134.84	135.84	136.80
250	186.50	80.85	97.80	106.81	113.55	118.85	123.65	127.85	131.65	134.65	137.25	139.15	140.65	141.85	142.65	143.25	143.80
275	205.15	91.55	109.50	119.01	125.25	130.05	134.25	137.95	141.25	143.95	146.15	147.85	149.15	149.85	150.35	150.75	151.10
300	223.80	102.80	121.75	131.81	138.55	143.85	148.05	151.25	153.95	156.15	157.85	159.15	159.85	160.35	160.75	161.05	161.30

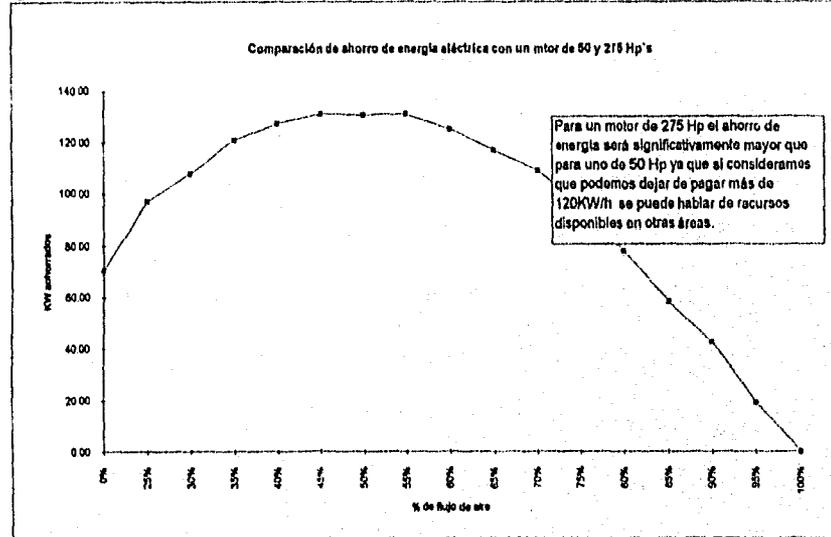
HP	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	0.73	1.10	1.47	1.84	2.21	2.58	2.95	3.32	3.69	4.06	4.43	4.80	5.17	5.54	5.91	6.28
75	55.95	1.19	1.78	2.37	2.96	3.55	4.14	4.73	5.32	5.91	6.50	7.09	7.68	8.27	8.86	9.45	10.04
100	74.80	1.62	2.43	3.24	4.05	4.86	5.67	6.48	7.29	8.10	8.91	9.72	10.53	11.34	12.15	12.96	13.77
125	93.25	1.98	2.97	3.96	4.95	5.94	6.93	7.92	8.91	9.90	10.89	11.88	12.87	13.86	14.85	15.84	16.83
150	111.80	2.31	3.49	4.67	5.85	7.03	8.21	9.39	10.57	11.75	12.93	14.11	15.29	16.47	17.65	18.83	20.01
175	130.55	2.61	3.98	5.35	6.72	8.09	9.46	10.83	12.20	13.57	14.94	16.31	17.68	19.05	20.42	21.79	23.16
200	149.20	2.88	4.45	5.92	7.39	8.86	10.33	11.80	13.27	14.74	16.21	17.68	19.15	20.62	22.09	23.56	25.03
225	167.85	3.13	4.89	6.65	8.41	10.17	11.93	13.69	15.45	17.21	18.97	20.73	22.49	24.25	26.01	27.77	29.53
250	186.50	3.35	5.30	7.25	9.20	11.15	13.10	15.05	17.00	18.95	20.90	22.85	24.80	26.75	28.70	30.65	32.60
275	205.15	3.55	5.69	7.83	9.97	12.11	14.25	16.39	18.53	20.67	22.81	24.95	27.09	29.23	31.37	33.51	35.65
300	223.80	3.73	6.06	8.39	10.72	13.05	15.38	17.71	20.04	22.37	24.70	27.03	29.36	31.69	34.02	36.35	38.68

HP	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	0.56	0.74	0.92	1.10	1.28	1.46	1.64	1.82	2.00	2.18	2.36	2.54	2.72	2.90	3.08	3.26
75	55.95	0.85	1.13	1.41	1.69	1.97	2.25	2.53	2.81	3.09	3.37	3.65	3.93	4.21	4.49	4.77	5.05
100	74.80	1.14	1.51	1.88	2.25	2.62	2.99	3.36	3.73	4.10	4.47	4.84	5.21	5.58	5.95	6.32	6.69
125	93.25	1.43	1.90	2.37	2.84	3.31	3.78	4.25	4.72	5.19	5.66	6.13	6.60	7.07	7.54	8.01	8.48
150	111.80	1.72	2.29	2.86	3.43	4.00	4.57	5.14	5.71	6.28	6.85	7.42	7.99	8.56	9.13	9.70	10.27
175	130.55	2.01	2.68	3.35	4.02	4.69	5.36	6.03	6.70	7.37	8.04	8.71	9.38	10.05	10.72	11.39	12.06
200	149.20	2.29	3.06	3.83	4.60	5.37	6.14	6.91	7.68	8.45	9.22	9.99	10.76	11.53	12.30	13.07	13.84
225	167.85	2.57	3.44	4.31	5.18	6.05	6.92	7.79	8.66	9.53	10.40	11.27	12.14	13.01	13.88	14.75	15.62
250	186.50	2.85	3.82	4.79	5.76	6.73	7.70	8.67	9.64	10.61	11.58	12.55	13.52	14.49	15.46	16.43	17.40
275	205.15	3.13	4.10	5.07	6.04	7.01	7.98	8.95	9.92	10.89	11.86	12.83	13.80	14.77	15.74	16.71	17.68
300	223.80	3.41	4.48	5.55	6.62	7.69	8.76	9.83	10.90	11.97	13.04	14.11	15.18	16.25	17.32	18.39	19.46

Gráfica 5.2.A



Gráfica 5.2.B



5.4. Tablas comparativas de consumo de potencia en motores de inducción usando mamparas mecánicas a la succión y variadores de velocidad

Tabla 5.3 Consumo de potencia (en KW) estimado para un motores desde 50 Hp's hasta 300 Hp's con mamparas a la succión como control de flujo de aire.

HP	KW	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	13.24	14.17	15.29	16.60	17.53	18.85	19.40	20.14	21.45	22.94	24.32	25.64	27.23	28.15	31.33	33.57	37.30
75	55.95	19.86	21.26	22.94	24.90	25.90	27.96	28.06	30.21	32.17	34.41	36.48	38.47	40.84	43.78	47.00	50.36	55.95
100	74.80	26.48	28.35	30.59	33.20	35.00	37.30	38.70	40.35	42.90	45.88	48.64	51.29	54.48	58.37	62.86	67.14	74.80
125	93.25	33.10	35.43	38.23	41.50	43.83	46.63	48.49	50.35	53.62	57.35	60.80	64.11	68.07	73.33	78.93	83.90	93.25
150	111.90	39.72	42.32	45.86	49.80	52.99	56.95	58.19	60.43	64.34	68.82	72.96	76.93	81.69	87.98	94.50	100.00	111.90
175	130.55	46.35	49.61	53.53	58.08	61.36	65.26	67.58	70.50	75.07	79.29	82.92	86.93	91.59	97.82	104.30	110.00	130.55
200	149.20	52.97	56.70	61.17	66.28	70.12	74.80	77.26	80.94	86.21	90.23	93.64	97.54	102.53	108.44	115.00	121.20	149.20
225	167.85	59.59	63.76	68.57	74.26	77.12	81.80	83.96	88.00	93.81	97.33	100.44	104.14	108.93	114.70	121.50	128.00	167.85
250	186.50	66.21	70.81	75.92	82.08	84.42	89.60	91.36	95.00	101.20	104.17	106.70	109.80	113.80	119.80	126.80	133.50	186.50
275	205.15	72.83	77.86	83.28	89.84	92.58	98.20	100.00	104.00	110.50	112.70	115.70	119.00	123.30	129.60	136.50	143.00	205.15
300	223.80	79.45	85.04	91.78	98.99	105.19	111.90	113.36	120.55	126.69	131.64	135.62	140.00	145.62	153.00	161.00	168.50	223.80

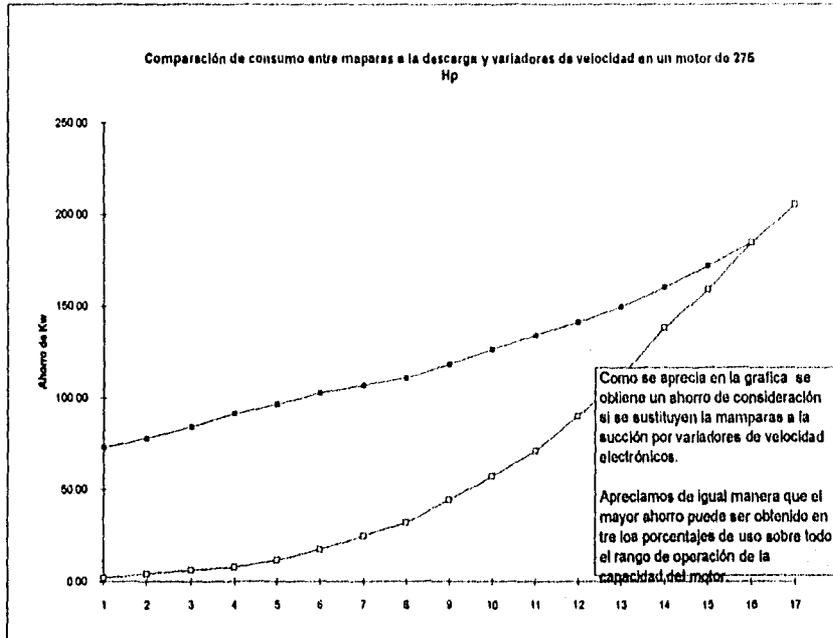
Consumo de potencia (en KW) estimado para un motores desde 50 Hp's hasta 300 Hp's con variador de velocidad como control de flujo de aire.

HP	KW	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	0.37	0.75	1.12	1.42	2.14	3.17	4.48	5.64	8.02	10.35	12.67	15.32	20.33	25.08	28.91	33.57	37.30
75	55.95	0.56	1.12	1.68	2.13	3.22	4.76	6.71	8.78	12.03	15.35	18.30	21.60	28.94	36.71	42.83	49.30	55.95
100	74.80	0.75	1.49	2.24	2.83	4.26	6.19	8.62	11.19	14.59	18.60	22.80	27.60	36.71	46.48	53.77	61.50	74.80
125	93.25	1.12	2.24	3.36	4.25	6.43	9.51	13.43	17.81	24.08	31.05	38.61	46.98	60.82	75.25	86.72	100.71	119.90
150	111.90	1.31	2.61	3.92	4.96	7.51	11.10	15.67	20.43	27.07	34.23	41.40	49.28	63.11	77.15	87.79	101.18	117.50
175	130.55	1.49	2.98	4.48	5.87	8.58	12.68	17.60	23.35	30.08	37.40	45.28	53.28	67.40	81.34	91.63	104.28	120.55
200	149.20	1.67	3.35	5.04	6.38	9.65	14.27	20.14	26.27	34.09	42.58	51.47	59.28	74.48	89.00	100.06	115.07	133.50
225	167.85	1.87	3.73	5.60	7.06	10.72	15.85	22.38	29.19	38.00	47.15	56.34	64.56	81.64	97.62	110.64	126.54	146.50
250	186.50	2.05	4.10	6.15	7.80	11.60	17.44	24.62	32.11	42.11	52.50	62.78	72.66	91.61	109.00	126.86	146.54	168.50
275	205.15	2.24	4.45	6.71	8.50	12.67	18.92	26.86	35.52	46.12	57.10	67.71	77.91	97.91	116.51	135.45	155.90	179.90
300	223.80	2.44	4.85	7.11	9.00	13.42	19.92	28.86	38.12	49.12	60.10	70.71	80.91	101.91	121.91	142.91	163.91	189.90

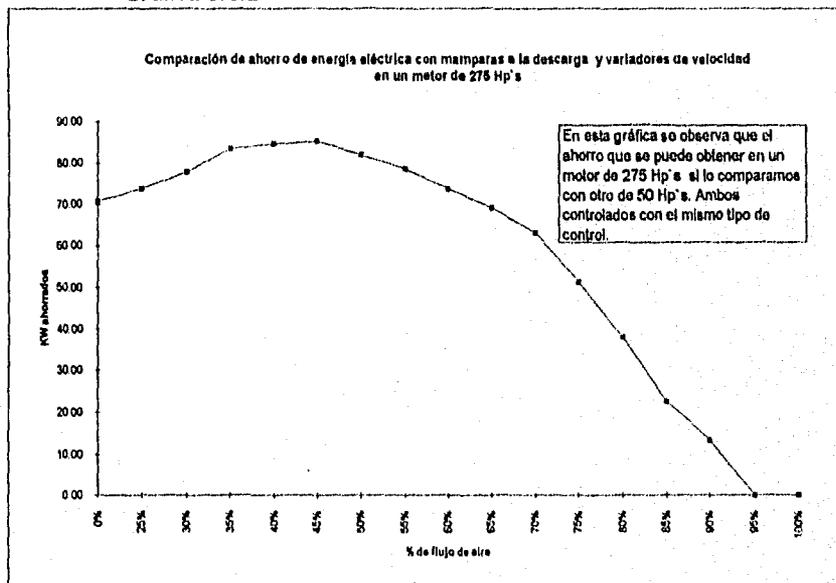
Diferencia de consumo de energía eléctrica entre mamparas a la descarga y variadores de velocidad

HP	KW	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
50	37.30	12.87	13.43	14.17	15.18	15.39	15.48	14.82	14.30	13.43	12.59	11.42	9.33	5.93	4.10	2.42	0.00	0.00
75	55.95	19.30	20.14	21.26	22.77	23.08	23.22	22.96	21.49	20.84	20.16	18.66	15.65	10.84	7.26	4.85	0.00	0.00
100	74.80	25.74	26.95	28.35	30.16	30.47	30.70	30.50	28.76	28.06	27.31	25.63	23.31	17.26	13.80	9.21	0.00	0.00
125	93.25	32.16	33.76	35.59	37.86	38.17	38.20	37.50	35.76	35.00	34.17	32.63	30.31	23.00	17.26	11.66	0.00	0.00
150	111.90	38.61	40.20	42.52	45.54	46.16	46.44	44.78	42.91	42.29	41.47	39.35	37.06	29.70	22.31	15.66	0.00	0.00
175	130.55	45.04	47.00	49.61	53.15	53.85	54.16	52.22	50.07	47.00	44.06	40.08	32.84	24.15	14.36	6.49	0.00	0.00
200	149.20	51.47	53.71	56.70	60.72	61.55	61.92	59.69	57.22	53.71	50.36	45.80	37.30	27.60	16.41	0.00	0.00	0.00
225	167.85	57.91	60.43	63.78	68.31	68.24	68.06	67.14	64.37	60.43	56.85	51.53	41.06	31.05	18.46	10.91	0.00	0.00
250	186.50	64.34	67.14	70.87	75.91	76.03	75.40	74.80	71.52	67.14	63.64	57.26	46.03	34.50	20.52	12.12	0.00	0.00
275	205.15	70.78	73.85	77.86	83.50	84.62	85.14	82.06	78.06	73.65	69.24	62.98	51.29	37.95	22.57	13.33	0.00	0.00
300	223.80	77.21	80.57	85.04	91.06	92.33	92.86	89.53	85.63	80.57	75.53	68.71	55.95	41.42	24.62	14.55	0.00	0.00

Gráfica 5.3.A



Gráfica 5.3.B

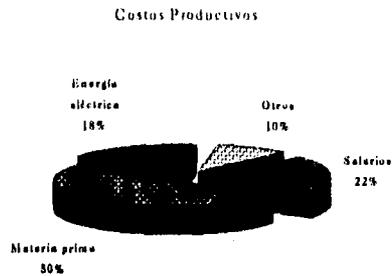


CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los últimos cinco años el panorama del uso eficiente de la energía ha cambiado radicalmente; cada vez son más las empresas privadas y públicas que se interesan en la aplicación de medidas correctivas para usar mejor su energía. Esto es debido a la acción conjunta de medidas de difusión y toma de conciencia, con la participación de todos los sectores de la comunidad; las políticas de precios y tarifas gubernamentales que inducen favorablemente al mejor uso de la energía y, por último, la necesidad de ser competitivo en una sociedad que ha entrado al comercio internacional.

Sin embargo, ahora que el clima es propicio para que la sociedad mexicana entre de lleno al uso eficiente de la energía, aparecen cuellos de botella y restricciones que pueden influir negativamente a este desarrollo. Entre los principales se tiene la escasez de recursos humanos capacitados para crear, organizar y supervisar planes, programas y proyectos sobre uso racional de la energía y la falta de bibliografía acorde a la situación empresarial.

Consideremos los siguientes costos de producción de una empresa determinada de la siguiente manera:



Si con la optimización del sector de energía eléctrica en la planta se puede disminuir hasta 55% el consumo promedio de operación de los ventiladores, implica que el costo de producción disminuye y que el producto puede ser más competitivo aún en los mercados internacionales.

Esto beneficia al país porque como se aprecia en la tabla 5.1.

AÑO	Consumo Total (10e12Kcal)	PIB Nacional 10e6\$ 1980	Población Nacional 10e6
1980	1074.39	4470077	66.82
1981	1147.54	4862219	68.15
1982	1232.78	4831689	69.48
1983	1165.54	4628937	70.85

1984	1184.28	4796050	72.23
1985	1210.13	4920430	73.64
1986	1184.93	4732150	75.09
1987	1233.15	4819574	76.56
1988	1250.17	4888891	78.05
1989	1324.40	5040866	79.58
1990	1327.45	5236337	81.14

Si el consumo de energía eléctrica disminuye por medio del ahorro y el PIB Nacional se mantiene en sus niveles de crecimiento se generará una mayor riqueza para el país.

Se considera entonces, no sólo la necesidad por el ahorro de la energía, sino la urgencia de ello debido a las circunstancias económicas y ambientales que actualmente vive el país.

Por otra parte se observa que es realmente necesario establecer una cultura de ahorro de la energía, además de profesionalizarlo y establecerlo como parte indispensable de las empresas.

Se estima que el apoyo financiero puede ser factor determinante para la modernización tanto de la industria mexicana como del país mismo. Se considera primordial la negociación por parte de los empresarios con las instituciones de crédito para la elevación de su eficiencia productiva.

En las gráficas del comportamiento del consumo de energía eléctrica se aprecia que hay una tendencia a la disminución del consumo, aunque éste aún sea insuficiente, por lo que se recomienda elevar al máximo la eficiencia en todos los procesos en los cuales exista la posibilidad de ahorro de energía.

Se concluye que para el proceso de enfriamiento de clinker existe posibilidad de optimizar el consumo de energía y se puede observar que esta optimización puede ser extrapolada a otro tipo de industrias las cuales involucra la velocidad variable en alguno de sus procesos productivos.

Como se aprecia en las tablas y en las gráficas, el ahorro de energía puede ser obtenido por medio de los siguientes cambios:

- Sustitución de mamparas a la descarga por mamparas a la succión.

En la gráfica 5.1.A se observa el ahorro de potencia en (KW) que puede ser obtenido por medio de este cambio. Se observa que cuando el motor eléctrico opera a un régimen reducido de capacidad no se obtiene ningún ahorro. De igual manera sucede a muy alto rango de capacidad de operación del ventilador. El máximo ahorro puede ser obtenido cuando el ventilador opera entre un 40 y un 70 por ciento de flujo de aire.

El ahorro de potencia es proporcional a la capacidad del motor, es decir que entre más grande sea el motor eléctrico mayor será el ahorro de energía eléctrica bajo el mismo régimen de operación.

- Sustitución de mamparas a la descarga por variadores de velocidad.

En la tabla 5.2 se advierte el mayor ahorro de potencia eléctrica debido a que las mamparas a la descarga son el método más ineficiente y los variadores de velocidad son el método más eficiente para el control de flujo de aire.

En esta gráfica se obtiene ahorro de potencia sobre la mayor parte del rango de operación ya que desde el 0% de flujo existe ahorro de energía de igual forma hasta casi el 95% del flujo.

Por medio de esta sustitución se puede esperar un plazo más corto para amortización del equipo, y posteriormente establecer los beneficios del ahorro de energía eléctrica

- Sustitución de mamparas a la succión por variadores de velocidad.

En la gráfica 5.3.A y su tabla se aprecia que la sustitución del dispositivo mecánico más eficiente, la mampara a la succión, puede ser reemplazable por el dispositivo electrónico, el variador de velocidad y obteniéndose un ahorro de potencia eléctrica que, aunque no tan sustancial como el de mampara a la descarga y variador de velocidad, puede, dependiendo del tiempo de operación total del motor, proporcionar generosos ahorros de potencia.

El ahorro de potencia en KW deberá de ser cuantificado por la planta o industria en función a variables conocidas por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Costo total del variador (\$)}}{\text{Ahorro mensual del variador (\$)}} = \text{Tiempo de amortización}$$

Es importante que el costo total del variador sea definido por la planta, y esta definición será en función de los siguientes parámetros:

- Marca del variador.
- Costo de instalación.
- Costo de capacitación.
- Gastos varios involucrados con la adquisición del variador.

El ahorro mensual del variador estará definido por el producto de los siguientes parámetros:

- El ahorro en KW / hora expresado en las tablas 1, 2, 3.
- Tiempo promedio diario de operación del motor.
- Tiempo promedio mensual de operación del motor.
- Costo del Kilowatt / hora en la planta.

Nota: El ahorro mensual económico y beneficios adicionales, que el cambio de mamparas mecánicas (a la entrada o a la salida) por variadores de velocidad puede dar, se enlista a continuación:

1. Ahorro en demanda máxima.
2. Ahorro en mano de obra.
3. Ahorro en mantenimiento de motores debido al aumento de la vida útil de motor y partes tales como los rodamientos.
4. Ahorro de energía eléctrica.

El análisis efectuado en este trabajo está basado principalmente en el ahorro económico por concepto de energía eléctrica.

Se recomienda al empresario invertir unas pocas horas hombre en la adquisición de datos de operación de sus sistemas para evaluar posibles cambios a la instalación y optimizar energéticamente el proceso que actualmente llevan a cabo.

El estudio aporta factores de gran utilidad para que el empresario pueda tener elementos de decisión en la sustitución de dispositivos mecánicos poco eficientes por dispositivos electrónicos más eficientes.

Apéndice 1

Representación gráfica del consumo de energía en función de la capacidad con distintos dispositivos de control.

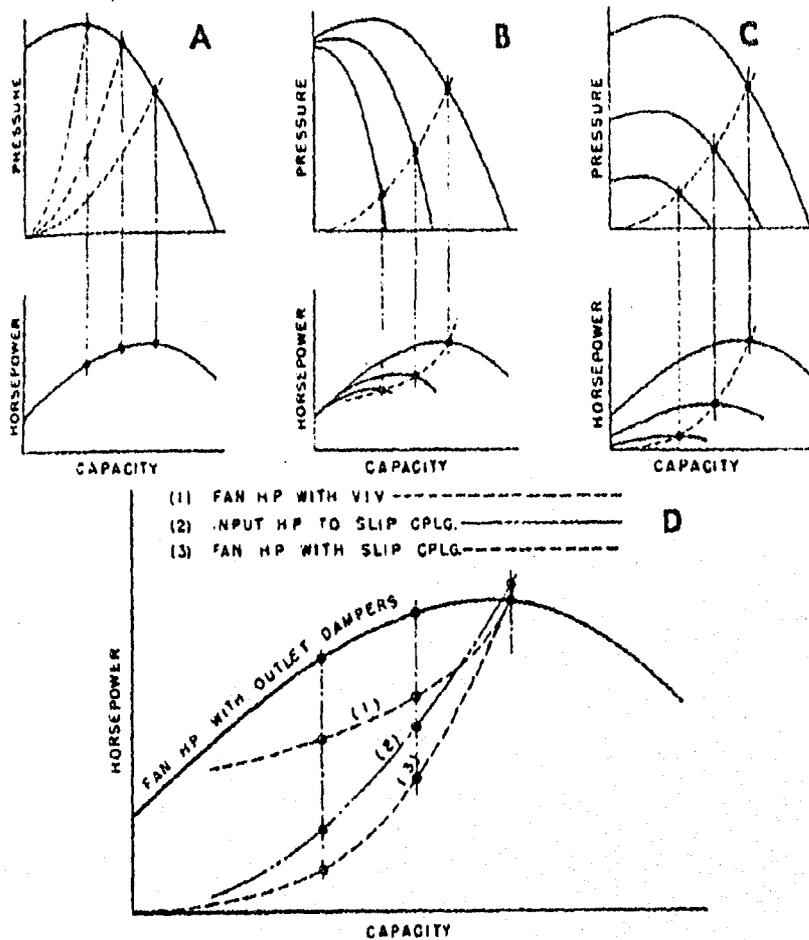


Figure 112—Horsepowers for Various Control Methods

Gráfica 112 *Fan Engineering*, Seventh Edition, Buffalo Forge Company

Apéndice 2

Gráfica de consumo de energía en función de la capacidad con tres distintos dispositivos de control de flujo de aire.

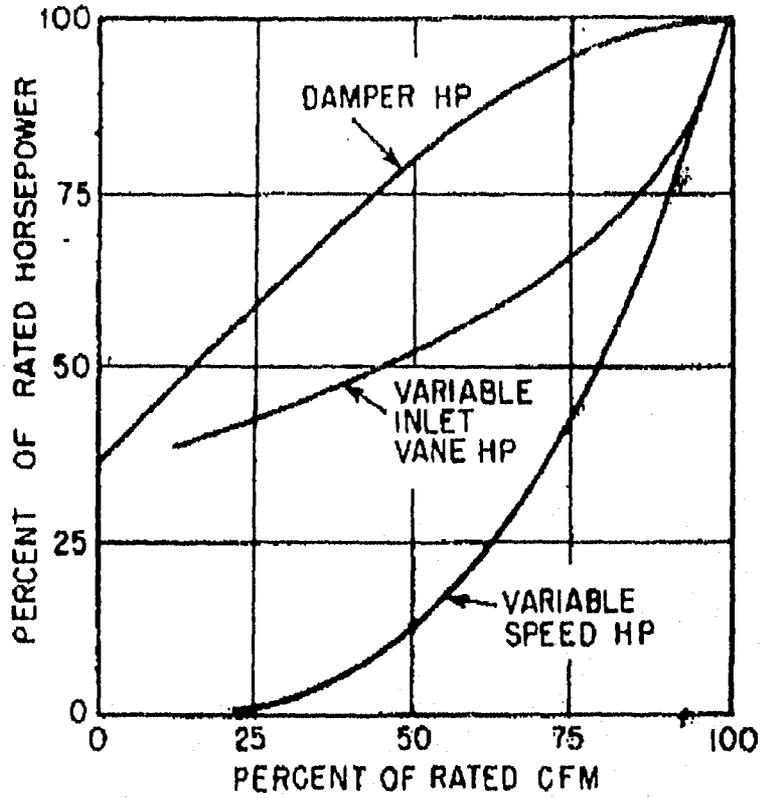


Fig. 2-11 Comparison of power required with various methods of control.

Gráfica 2-11 *Maintenance Engineering Handbook*, Fourth Edition, Mc Graw Hill

Bibliografía

- IRVING L KOSOW
MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y TRANSFORMADORES
ED. PRENTICE HALL

- BUFFALO FORGED COMPANY
FAN ENGINEERING

- CONDUCTORES MONTERREY
MANUAL DEL ELECTRICISTA

- SERGIO ZEPEDA C
MANUAL DE INSTALACIONES HIDRÁULICAS, SANITARIAS, AIRE, GAS Y VAPOR
ED. LIMUSA

- KATSUHIKO OGATA
ELEMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO
ED. PRENTICE HALL

- LINDLEY R HIGGINS
MAINTENANCE ENGINEERING HANDBOOK
FOURTH EDITION
ED. MC GRAW HILL

- KATSUHIKO OGATA

DINÁMICA DE SISTEMAS

ED. PRENTICE HALL

- THE ANNALS

THE ENERGY CRISIS: REALITY OR MYTH

- HOWARD G. MURPHY

TUTORIAL ON AC DRIVES AND DRIVE APPLICATIONS

ALLEN - BRADLEY COMPANY

- LUIS FLOWER LEIVA

CONTROLES Y AUTOMATISMOS ELÉCTRICOS TEORÍA Y PRÁCTICA

TELEMECANIQUE DE COLOMBIA S. A.

- CLAUDIO MATAIX

MECÁNICA DE FLUIDOS Y MÁQUINAS HIDRÁULICAS

ED. HARLA

- JUAN JOSÉ AMBRIZ GARCÍA, HERNANDO ROMERO PAREDES RUBIO

ADMINISTRACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA