



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD: METALURGIA- ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# TRABAJO DE DIPLOMA

*Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico*

**Título:** *Mejoramiento de los accionamientos principales en la CTE Lidio Ramón Pérez de Felton.*

**Autor:** *Nobel Almira Zayas*

**Tutor(es):** *Dr. Luís Delfín Rojas Purón*  
*Ing. Osmar Ochoa Matos*

**Moa-2008**

**“Año 50 de la Revolución”**



## **Pensamiento**

*Centrar la atención en la técnica es como estudiar en el último momento. Uno a veces acaba arreglándoselas, o incluso puede obtener buenas notas, pero si queremos lograr realmente el dominio de las materias o desarrollar una mente culta, lo que hay que hacer es esforzarse honestamente día tras día.*

*Stephen R. Covey*



## **Agradecimiento**

Agradezco profundamente a mis tutores Luís Rojas Purón y Osmar Ochoa Matos que se preocuparon y no dudaron en apoyarme en ningún momento.

Gracias al Ing. Daniel Mendiola Ellis y a los técnicos del departamento de eléctrica de la CTE Lidio Ramón Pérez que siempre estuvieron presentes.

Eternamente agradecido al Ing. Ivan Perres de SERCONI por su ayuda incondicional.

A mis familiares y amigos que siempre me acompañaron.

A todos, muchas gracias.



## **DEDICATORIA**

El presente trabajo ha sido el resultado de muchas noches de desvelo y horas de trabajo compartido con aquellas personas que a continuación relaciono y a las que dedico el mismo.

A la revolución cubana, pues sin ella no hubiera sido posible la oportunidad que hoy tengo.

A mis padres, que tanto me han enseñado y me han apoyado en toda la vida.

A mis hermanos, que aunque no están cerca en este momento, se han preocupado y me han estimulado a llegar hasta aquí.

A mis hijos, de los cuales espero un mañana lleno de logros y victorias.

A mi esposa, que siempre ha estado presente con todas las atenciones del mundo.

A cada una de las personas que desinteresadamente me han ayudado a que este sueño se haga realidad.



## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como tema fundamental la mejora de los accionamientos eléctricos principales en la CTE Lidio Ramón Pérez. Se realizó con el objetivo de analizar la factibilidad y proponer el uso de controladores de flujo con variadores de frecuencia en los accionamientos de los sistemas de bombeo de combustible y bombeo de condensado.

El primer capítulo trata de la descripción del proceso tecnológico y del régimen de trabajo de los motores eléctricos que accionan las distintas bombas que se utilizan en el proceso, así como el tratamiento del objeto de estudio.

El segundo capítulo hace referencia al diseño de los motores asíncronos y su utilización en el ahorro energético en equipos de bombeo.

El tercer capítulo se refiere al uso de variadores de velocidad en los accionamientos eléctricos para fomentar el ahorro energético por el método de regulación de frecuencia en motores asíncronos.

En el cuarto capítulo se hace una valoración económica de la factibilidad de la implementación de controladores de flujo con variadores de frecuencia.



## INDICE

<b><u>CONTENIDO</u></b>	<b><u>Págs.</u></b>
<b>Introducción</b>	1
<b>Capítulo I: Descripción del suministro eléctrico</b>	4
1.1. Introducción	4
1.2. Descripción del flujo tecnológico de la CTE Lidio Ramón Pérez.	4
1.3. Relacionar los motores de mayor consumo.	8
1.4. Descripción del régimen de trabajo de los motores de mayor consumo.	8
1.5. Descripción del sistema de regulación.	14
1.6. Descripción del objeto de estudio.	16
<b>Capítulo II: Medidas para racionalización de las operaciones en los accionamientos eléctricos.</b>	17
2.1. Introducción	17
2.2. Consideraciones especiales en el diseño y utilización de motores de inducción para variadores de velocidad por frecuencias.	17
2.3. Arranque suave del motor de inducción trifásico.	21
2.4. Frenaje del motor de inducción en el método de control por variador de frecuencia	22
2.5. Ahorro de energía mediante la utilización de variadores de velocidad en el accionamiento de equipos de bombeo.	26
2.6. Velocidad como una forma de controlar un proceso.	33
<b>Capítulo III: Uso de variadores de velocidad en los accionamientos eléctricos.</b>	34
3.1. Introducción.	34
3.2. Posibilidad de controlar la velocidad de un motor asincrónico.	34
3.3. Conceptos de variadores de velocidad.	34
3.4. Principio de funcionamiento del motor de inducción trifásico.	35
3.5. Control de la velocidad de motores de inducción por variación de la frecuencia.	41
3.6. Aspecto a tener en cuenta para seleccionar un variador de velocidad.	48
3.7. Fomentar el ahorro de energía mediante el uso de variadores de velocidad.	48
3.8. Elección del variador de velocidad.	49
<b>Capítulo IV: Análisis técnico económico del trabajo.</b>	57
<b>Conclusiones.</b>	60
<b>Recomendaciones.</b>	61
<b>Bibliografía.</b>	62
<b>Anexos.</b>	



## INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un factor clave en la gestión de las organizaciones ya que es necesaria tanto para los procesos como para las actividades auxiliares y constituye una parte importantísima de los costos. Una buena gestión energética permite disminuir el consumo de energía eléctrica de manera estructurada y sistemática, es decir, le permite ahorrar de manera constante, permanente y fácil. Además, disminuye el impacto de la empresa sobre el medio ambiente y a menudo aumenta el confort y la productividad. Las ventajas de una gestión energética eficiente no tardan en hacerse evidentes.

La energía eléctrica es la forma de energía que se utiliza mayormente en Cuba y también en el mundo entero, lo que obedece a sus múltiples ventajas económicas y operativas, ya que se aplica en la producción, los servicios y el hogar. De manera que cuando se va a hablar de ahorro de energía en las instalaciones eléctricas, no queda más remedio que vincularlo a la industria, la iluminación, el aire acondicionado, etc., considerándolo como una consecuencia del ahorro en esas instalaciones y no en si mismo.

Dada a la gran importancia que tiene el ahorro de energía eléctrica, expresado en la revolución energética que lleva a cabo nuestro país con nuestro Comandante en Jefe como su máximo exponente y líder, se ha planteado la tarea de analizar las potencialidades existentes en la Termoeléctrica de Felton con vistas a lograr una racionalización del insumo de la misma, con lo cual se aportaría una gran contribución a esa gran revolución energética llevada a cabo en la nación, y garantizar así un servicio eléctrico con mayor calidad, eficiencia y eficacia.

En ocasiones en las empresas se cuenta con un volumen de información energética, la cual solo se utiliza para determinar algunos indicadores que permitan la planificación y la vigilancia tecnológica. Existen en la actualidad herramientas cuyo empleo en el área energética facilitan un análisis estadístico – matemático que permiten determinar las causas y regularidades de determinados fenómenos. Con estos elementos, unido a la valoración de la gestión energética se sientan las bases para el diseño e implementación de un sistema integral en el área energética.

La información empleada en este trabajo nos permite un mejor análisis de comportamientos y tendencias, así como, comparaciones mucho más efectivas con respecto a indicadores predeterminados en este tipo de industria.



La experiencia acumulada trabajando en esta empresa desde su fundación hace posible vincular los resultados analíticos con un enfoque tecnológico preciso. Es así como el presente trabajo constituye un punto de partida sustentado en los requerimientos de la investigación científica.

### **SITUACIÓN PROBLEMICA:**

Los equipos que forman parte de la tecnología para el proceso de flujo donde intervienen los accionamientos principales de las unidades generadoras de la CTE Lidio Ramón Pérez, operan siempre a velocidad fija, independientemente a la carga que estén entregando estas, suministrando un flujo fijo que es regulado por el sistema automático que actúa sobre la válvula de control, lo que trae como consecuencia que el consumo de electricidad por esta razón sea prácticamente invariable sin tener en cuenta las variaciones de potencia que esté entregando la unidad.

### **PROBLEMA:**

La operación a velocidades fija de los accionamientos principales de los equipos tecnológicos de la CTE Lidio Ramón Pérez, trae aparejado que los consumos de electricidad estén por encima de los valores que demandaría la potencia que estén entregando las unidades.

### **HIPÓTESIS:**

Si se introduce el uso de variadores de velocidad en los accionamientos principales de los esquemas de suministro de combustible a la caldera y condensado al tanque de alimentar con que cuentan las unidades generadoras de la CTE Lidio Ramón Pérez, se lograría que la regulación del flujo necesario para satisfacer la potencia entregada por estas unidades se realice variando la velocidad de los motores que accionan estos equipos de bombeo, lo cual traería aparejado solo el consumo de electricidad indispensable, y a su vez aumentaría la eficiencia en el uso de estos portadores.

### **OBJETO:**

Accionamientos principales de la CTE Lidio Ramón Pérez.





### **CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN:**

Estudio de la factibilidad del uso de variadores de velocidad con vistas a la mejora de los accionamiento principales de la CTE Lidio Ramón Pérez con vistas a la mejora de la gestión energética de la misma.

### **OBJETIVO:**

Evaluar las reservas para la mejora de los accionamientos principales de la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez con el uso de variadores de velocidad.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

1. Realizar un diagnóstico energético preliminar en los principales accionamientos eléctricos de la CTE Lidio Ramón Pérez.
2. Valorar el uso de variadores de velocidad en los accionamientos eléctricos que se justifique.

### **TAREAS:**

1. Descripción de los esquemas tecnológicos donde intervienen los accionamiento principales de la CTE Lidio Ramón Pérez.
2. Obtención de datos de medición de los parámetros de operación de los accionamientos principales de la CTE Lidio Ramón Pérez.
3. Procesamiento de los datos de las mediciones obtenidas para analizar la ocurrencia de variaciones en los flujos medidos en el proceso.
4. Análisis de la eficiencia, cálculo y seguimiento para el uso de variador de velocidad en un accionamiento eléctrico.



## **CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO**

### **1.1. Introducción**

Las bombas son mecanismos de amplia utilización en la industria, es casi imposible encontrar un proceso tecnológico donde no jueguen un papel más o menos importante una o varias bombas. Las bombas se dividen en dos grupos: centrífugas y reciprocantes. En las bombas reciprocantes la potencia que se demanda en el eje del motor varía en función del ángulo de giro del rotor, normalmente estos mecanismos poseen biela y manivela. Por otro lado, los mecanismos centrífugos poseen una dependencia de la potencia entregada con el cubo de la velocidad debido a que su operación está vinculada con la fuerza centrífuga que se ejerce sobre el fluido. En este epígrafe sólo se tendrán en cuenta las bombas centrífugas y ventiladores.

### **1.2. Descripción del flujo tecnológico de la CTE Lidio Ramón Pérez. (anexo 1)**

#### **1.2.1. Recepción y preparación del combustible.**

El combustible llega a la Central Eléctrica desde la Base de Combustible (CUPET) o directamente desde el barco, los cuales con sus equipos de bombeo lo trasladan hasta los tanques de recepción y almacenamiento de la CTE. Existen dos tanques para la recepción, almacenaje y preparación del combustible, estos tienen capacidad de 15 000 m<sup>3</sup> cada uno, además tienen dispositivos interiores y exteriores para el calentamiento del combustible, con el fin de facilitar su bombeo.

Desde los tanques se succiona el combustible por dos bombas de engranes para cada unidad, situadas en la Casa de Bombas de Primer Impulso, las cuales transportan el mismo con una temperatura de 60-70 °C hasta el sistema de combustible interior de cada Caldera, manteniendo la presión constante de 0.45 MPa en la succión de las bombas del Segundo Impulso.

En la Casa de Bombas de Segundo Impulso el combustible es bombeado por dos bombas de alta presión, las cuales elevan la presión hasta 3.2 MPa, además existen dos calentadores de superficie que trabajan con vapor, los cuales suben la temperatura del combustible hasta aproximadamente 145 °C. Con estas condiciones se facilita la pulverización del combustible en los quemadores de las calderas.



La estación de válvulas de regulación de la potencia de la Caldera es la que controla el suministro del combustible hacia los quemadores en dependencia de la producción de vapor que tengan las mismas.

Cada caldera consta de doce quemadores tangenciales, ubicados en tres niveles, en las esquinas del Horno, cada uno puede suministrar hasta 110 Litros de combustible por minutos, para la pulverización son auxiliados con vapor de agua a una presión de 1 MPa y 250 °C.

### **1.2.2. Generación de Vapor.**

Además del combustible, para el proceso de oxidación del mismo con el consiguiente desprendimiento de gran cantidad del calor, al horno de la caldera se suministra la cantidad de aire necesaria para lograr la combustión completa, este aire es succionado de la atmósfera por dos ventiladores, se precalienta en los precalentadores de aire con vapor hasta 75 °C y finalmente se eleva su temperatura hasta 315 °C en los calentadores de aire regenerativos (CAR). Por otra parte a la caldera se le suministra agua de alimentación, la cual al absorber el calor desprendido por la combustión, se transforma en vapor de agua con 13.7 MPa y 525 °C.

### **1.2.3. Sala de Máquinas.**

El vapor producido en la caldera llega a la turbina a través de las tuberías de alta presión con 13.24 MPa y 520 °C, este vapor entra al cuerpo de alta presión de la misma a través de 4 válvulas de regulación que controlan la cantidad de vapor en dependencia de la potencia mecánica demandada por el Generador Eléctrico. En la turbina de vapor se transforma la energía térmica del vapor en energía cinética en los alabes fijos de la misma y la energía cinética en energía mecánica del rotor a través de los alabes móviles.

El vapor sale desde el cilindro de alta presión hacia la caldera nuevamente con 3,4 MPa y 340 °C para volver a elevar su temperatura, retornando al cilindro de media presión con 520 °C y 3.2 MPa, desde el cilindro de media presión pasa al cilindro de baja presión desde donde va hacia el condensador con 0.005 MPa, aquí se condensa al ceder su calor latente al agua de mar que circula como medio de enfriamiento del condensador.



El condensado que se produce en el condensador con una temperatura de 50 °C, es succionado por las bombas de Primera Etapa de Condensado, las que lo hacen pasar por una estación de filtros desmineralizadores con el fin de eliminar cualquier contaminación con agua del mar, luego este condensado es bombeado por las bombas de la Segunda Etapa del Condensado a través de tres Calentadores de Baja Presión, los cuales tienen como función elevar gradualmente su temperatura para facilitar su preparación como agua de alimentación de la Caldera. Al condensador llega también el agua desmineralizada procedente de la planta de Tratamiento Químico del Agua, que es utilizada para reponer las pérdidas de masa que se producen en el ciclo térmico.

El condensado llega al deareador con una temperatura de 110 °C donde por medio del calentamiento con vapor y productos químicos se le extraen los gases incondensables (fundamentalmente el oxígeno libre) que pueda contener, los gases incondensables escapan hacia la atmósfera y el condensado va al tanque de alimentación de la Caldera desde donde es succionado por las Bombas de Alimentar de la Caldera.

Las Bombas de Alimentar elevan la presión del agua de alimentar hasta 15.7 MPa para incorporarla a la Caldera, pasándola antes a través de dos Calentadores de Alta Presión donde se lleva la temperatura del agua hasta 235 °C, la cantidad de agua que se suministra a la Caldera es controlada por una estación de válvulas reguladoras que garantizan que se mantenga el balance de masa entre la cantidad de vapor que sale de la misma y la cantidad de agua que se suministra con el fin de asegurar el funcionamiento correcto de la Caldera.

#### **1.2.4. Generador Eléctrico.**

El rotor del Generador Eléctrico está directamente acoplado al eje de la turbina por lo que gira a la misma velocidad que esta 3600 r.p.m, es un generador cerrado, bipolar, trifásico, sincrónico con una potencia activa nominal de 250 MW y máxima de 275 MW. Tiene sistemas de enfriamiento con agua e hidrógeno, además de tener un sistema de excitación estático que garantiza con su conjunto todo el proceso de excitación, generación y suministro de energía eléctrica al sistema electro energético nacional.

El generador posee doce protecciones que sin el servicio de ellas no se puede garantizar la seguridad de este, así como la buena calidad del servicio

Debido a la potencia a que fue diseñado el generador es preciso mantener el doble sistema de enfriamiento, el primero por agua desmineralizada que circula por dentro del enrollado del



estator y de esa forma evacuar el calor que induce el propio proceso de trabajo; y el segundo el hidrógeno que permanece herméticamente en el generador con su ciclo de enfriamiento.

Después que el generador ha convertido la energía mecánica en energía eléctrica por medio de procesos electromagnéticos que ocurren en él al excitarse; se garantizan los 60 Hz de frecuencia, y teniendo referencia de voltaje, frecuencia, y fasaje igualado al del sistema nacional, se cierra el interruptor que nos enlaza al sistema nacional (sincronizado). El transformador eléctrico es el encargado de transformar (elevar) la magnitud de tensión primaria (15.75 kV) en la secundaria (220 kV) para que se transmita a largas distancias y con un mínimo de pérdidas por todo el Sistema Electro energético Nacional y así se brinden los 250 MW de potencia deseados.

La central termoeléctrica Lidio Ramón Pérez para su arranque y alimentación (**anexo 2**) comunes cuenta con un transformador de 110 kV que se alimenta de la línea Nipe - Nicaro. Este transformador alimenta a través de los interruptores H 900 y H 905 las barras de 6 kV común respectivamente, OBA y OBB, donde se encuentran los transformadores de 6 kV a 380 V que alimentan las subestaciones techada de 380 V.

Las cuales de una forma u otra tiene relaciones con los dos bloques, en el caso del arranque de los bloques, las secciones de barra 1BA y 1BB para la unidad 1 cuando esta se encuentra fuera de servicio se alimenta de las barras OBA y OBB respectivamente a través de los interruptores de los campos 15 en la común y 15 de la unidad propia o sea 1BA y 1BB. Una vez alimentadas las barras de 6 kV unidad 1 es posible alimentar los equipos dinámicos de esta unidad que serán utilizados durante el arranque de la misma hasta lograr sincronizar la unidad y alcanzar 50 MW, momento en que se realiza el cambio de uso de planta y después de sincronizar las secciones de barras de 6 kV quedarán los equipos de ambas secciones por su transformador propio 1BT01. Una vez realizado el cambio se continúa subiendo carga hasta lograr llegar al máximo según lo permita el SEN. Lo mismo sucede con la unidad 2. Debemos aclarar que las mayorías de los transformadores de 6 kV a 380 V están subutilizados.

Teniendo las secciones de barras propio sea 6 kV1 ó 6 kV2; en este caso nos referimos a la unidad No2; alimentada de su alimentación propia entonces quedarían los consumidores de las secciones 2BA y 2BB donde están los equipos dinámicos y los transformadores 2CT01, 2CT02 y 2CT03. Todos estos equipos quedan E/S consumiendo del transformador 2BT01 hasta que salga F/S el bloque los equipos que se alimentan de esta barra son los equipos de 6 kV a los que luego le haremos referencia y, los transformadores 2CT01 y 2CT02 son

transformadores de 6 kV / 380 V que alimentan las secciones de barras 2CA y 2CB respectivamente donde se encuentran los equipos de 380 V que son necesarios en el proceso de generación en el caso del transformador 2CT03 es un transformador de 6kV/380V que alimenta la barra 2CN+2CP donde esta el alumbrado del bloque No2 . Tenemos que aclarar que en el bloque No1 sucede exactamente lo mismo lo único que cambia son las nomenclaturas de los equipos por la referentes a la unidad No1

### **1.3. Relación de motores de mayor consumo**

- ❖ Bombas de circulación de agua de mar VC01; 11 M101.
- ❖ Bombas de enfriamiento de agua dulce VG01; 11 M101.
- ❖ Bombas de alimentar RL01; 11; 21 M101.
- ❖ Ventiladores de tiro forzado NG10; 20 M101.
- ❖ Ventiladores de recirculación de gases NS10; 20 M101
- ❖ Bombas de condensado 1<sup>ra</sup> etapa RM11; 12; 13 M101.
- ❖ Bombas de condensado 2<sup>da</sup> etapa RM31; 32; 33 M101.
- ❖ Bombas de petróleo 1<sup>er</sup> impulso PD31; 32; 33 M101.
- ❖ Bombas de petróleo 2<sup>do</sup> impulso PE 10; 20; 30 M101.

### **1.4. Descripción de régimen de trabajo de los motores de mayor consumo.**

#### **1.4.1. Bombas de circulación de agua de mar.**

Se utilizan para hacer circular el agua de mar por el condensador con el objetivo de condensar el vapor que ha realizado trabajo en la turbina y enfriar el agua de enfriamiento por medio de la circulación del agua de mar por los enfriadores de agua de enfriamiento.

Son dos bombas centrífugas de ejecución vertical (una para cada sección del condensador) que en operación normal se ponen en servicio desde el inicio del proceso de arranque de las unidades y se mantienen en servicio mientras las unidades se encuentren sincronizadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y en caso de salida de línea de alguna unidad, por lo menos una de estas bombas se mantiene en servicio por las dos secciones del condensador hasta tanto la temperatura de la cubierta de escape del cilindro de baja presión

de la turbina alcance valores que posibilite su puesta fuera de servicio. En caso de avería en una de estas bombas se puede poner la otra en servicio por las dos secciones del condensador, con la cual se puede alcanzar hasta el 60% de la carga nominal de la unidad (160 MW).

#### Datos técnicos

<b>Variables</b>	<b>Bomba</b>	<b>Motor</b>
Flujo	18000m <sup>3</sup> /h	
Presión de descarga	0.9 bar	
Altura del bombeo	10.7 mca	
Velocidad	445 rpm	445 rpm
Potencia	710 Kw.	710 Kw.
Voltaje		6000 v
Corriente		91 A
Frecuencia		60 Hz

#### 1.4.2. Bombas de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento es el encargado de suministrar el agua para el enfriamiento de todos los equipos dinámicos del bloque, así como, intercambiadores de calor que por sus características técnicas necesitan del agua para su trabajo.

Son dos bombas centrífugas de ejecución vertical cada una para el 100 % de la capacidad nominal del bloque, de estas una se pone en servicio desde el principio del arranque del bloque mientras la otra se mantiene en reserva.

#### Datos Técnicos

<b>Variables</b>	<b>Motor</b>	<b>Bomba</b>
Voltaje	6000 v (6 Kv)	
Corriente	38,7 A	
Velocidad	888 r.p.m	888 r.p.m.
Potencia	300 kW	292 kW
Presión de descarga		0.6 MPa
Flujo		1 422 m <sup>3</sup> /h (395 l/s)

#### 1.4.3. Bomba de alimentar.

Este sistema tiene la función de suministrar la cantidad de agua necesaria, con la presión y temperatura requerida, para producir en la caldera el vapor que será utilizado en la turbina para la producción de energía eléctrica. Estas son tres bombas centrífugas de ejecución vertical (dos en servicio para el 100% de la carga y la tercera en reserva) que toman el agua desde el tanque de alimentar, la hacen pasar por los calentadores de alta presión para aumentarle su temperatura y luego la introducen en la caldera para la producción del vapor.

En los procesos de arranque se pone en servicio una bomba hasta que se va a sincronizar la unidad que se arranca la segunda y se mantienen las dos en servicio desde que se sincroniza hasta que ocurra un disparo de la unidad o una salida planificada. Con estas dos bombas se van dando flujo según la carga lo requiera hasta alcanzar la máxima carga. La tercera bomba queda como reserva automática y se rota cada 15 días si no existe avería. Este motor es de arranque directo a línea con un tiempo de arranque de 3s.

#### Datos técnicos.

<b>ELECTROMOTOR</b>	
Voltaje	6 kV.
Amperaje	511 A
Velocidad	3580 r.p.m.
Potencia nominal	4.5 MW
<b>BOMBA PRINCIPAL DE ALIMENTAR</b>	
Temperatura del agua de alimentar	152.6°C
Presión de succión	1.1166 Mpa
Presión de descarga	20.39 Mpa
Presión de descarga con la entretoma abierta	20.1086 Mpa
Flujo de descarga	435.9 t/h
Presión en la entretoma	9.85 Mpa
Flujo en la entretoma	26.5 t/h
Potencia consumida	34 030 Kw.
Velocidad	4419 r.p.m.

#### 1.4.4. Bombas de condensado.

El Sistema de Condensado (**anexo 3**) tiene la función de transportar el condensado que se acumula en el pozo caliente del condensador producto a la condensación del vapor que ha realizado trabajo en la turbina, para llevarlo al tanque de alimentar, pasando durante su recorrido por los calentadores de baja presión donde adquiere temperatura antes de entrar al





mismo. Además permite reponer las pérdidas de agua del ciclo con agua desmineralizada proveniente de tratamiento químico al condensador.

Este sistema está formado por 6 bombas, tres bombas centrífugas de ejecución vertical de primera etapa (380 V) que succionan el condensado del pozo caliente del condensador sometido al vacío y lo descargan a la succión de las tres bombas centrífugas de ejecución horizontal de segunda etapa (6000 V) que aumentan la presión para hacer llegar el condensado al tanque de alimentar.

En le proceso de arranque se pone en servicio un juego de bombas de condensado (una de primera etapa y una de segunda etapa), hasta que el flujo de condensado sobrepase el valor de 420 t/h que entra en servicio el segundo juego de bombas hasta la salida de servicio de la unidad, ya sea por avería o planificada, en que se mantiene en servicio una bomba de primera etapa para el enfriamiento de la cubierta de escape del cilindro de baja presión de la turbina.

#### Datos técnicos.

##### Bombas I Etapa

Variables	Motor	Bomba
Flujo		117 l/s
Presión		0,65 MPa
Velocidad	1 180 r.p.m	1 170 r.p.m.
Potencia	135 Kw.	108 Kw.
Voltaje	380 v	
Corriente	262 A	

##### Bombas II Etapa

Variables	Motor	Bomba
Flujo		114 l/s
Presión		4 MPa
Potencia	370 KW	302 KW
Velocidad	1777 r.p.m.	1780 r.p.m
Voltaje	6000 v	
Corriente	45.4 A	

#### 1.4.5. Ventiladores de tiro forzado.



El sistema de aire tiene la función de suministrar la cantidad de aire necesaria que requiere el proceso de combustión del combustible dentro de la caldera. Esta integrado por dos ventiladores de tiro forzado (VTF) para el 100 % de la carga, los cuales hacen pasar el aire por los precalentadores de aire donde aumenta la temperatura hasta los 75 °C y los calentadores de aire regenerativos (CAR) para aumentarle la temperatura hasta los 305 °C antes de ser introducido a la caldera. En el proceso de arranque se pone en servicio un VTF con el cual se puede alcanzar hasta el 60 % de la carga, aunque por seguridad de la operación al alcanzar los 50 MW se pone en servicio el otro ventilador, manteniéndose ambos en servicio mientras la unidad esté sincronizada al SEN. El flujo de aire es regulado por una compuerta de regulación en la succión en dependencia de la cantidad de combustible que entra a la caldera.

Parámetros	Ventilador	Motor
Flujo	137 m <sup>3</sup> /s	
Temperatura del aire	32 °C	
Pr de descarga	11 kPa	
Velocidad	1744 rpm	1190 rpm
Potencia	1825 Kw.	2000 Kw.
Voltaje		6 kV.
Frecuencia		60 Hz
Corriente		232 Amperes

#### 1.4.6. Ventilador recirculador de gases.

Antes de entrar al CAR, una determinada cantidad de gases se recirculan hacia la caldera mediante los ventiladores de recirculación de gases (VRG), con dos objetivos principales, en primer lugar mantener la temperatura adecuada en el vapor recalentado principalmente a potencias inferiores a 150 MW ya que para potencias superiores a esta el volumen de gases que se genera producto de la combustión generalmente es suficiente para alcanzar dicha temperatura y en segundo lugar enfriar la parte inferior del horno. Este flujo de gases de recirculación se regula mediante las compuertas de regulación en la entrada del VRG en función del flujo y temperatura del vapor recalentado a la salida del recalentador 2. Se ponen

en servicio desde el mismo momento del arranque de la caldera hasta su puesta fuera de servicio.

#### Datos técnicos

Capacidad	35 m <sup>3</sup> /s. (126 000 m <sup>3</sup> /h).
Presión de descarga	4,3 kPa.
Temperatura de los gases	350 °C.
Potencia absorbida	180 Kw.
Potencia del motor	250 Kw.
Voltaje	6 kV.
Corriente	31,7 A

#### 1.4.7. Sistema de bombeo de petróleo.

El suministro de combustible (**anexo 4**) a las calderas se garantiza por medio de seis bombas de petróleo, de estas tres se encuentran ubicadas en la estación de combustible primer impulso, donde operan dos y una de reserva para el 50 % de la carga, las cuales trasiegan el combustible a 60 °C desde los tanques de almacenamiento hasta la succión de las tres bombas ubicadas en la estación de petróleo segundo, de las cuales están en servicio normal 2 bombas y la tercera se mantiene en reserva, estas elevan la presión del combustible a los valores requeridos por la caldera y lo hacen pasar por los calentadores de petróleo para incrementar la temperatura a los valores especificados por el laboratorio químico y luego introducirlo al horno.

#### Datos Técnicos.

##### Estación de bombeo de combustible 1<sup>do</sup> impulso

Parámetros	Bomba	Motor
Capacidad	14,5 l/s	
Presión	0,6 MPa.	
Velocidad	875 rpm.	
Potencia	16 kW	22,5 kW
Voltaje		380 Volt
Frecuencia		60 HZ.
Revoluciones		875 rpm.
Corriente		53 A

##### Estación de bombeo de combustible 2<sup>er</sup> impulso.



Parámetros	Bomba	Motor
Temperatura:	60 – 90 °C	
Viscosidad	340 – 74 cSt	
Densidad	991,2 – 974,1 Kg. m <sup>3</sup>	
Presión en la succión	0,3 - 0,6 Mpa	
Capacidad	11,66 L/ s	
Altura de bombeo	3.5 Mpa	
Velocidad	1775 rpm	1175 rpm
Potencia	57 kW	82 kW
Voltaje		380 V
Frecuencia		60 Hz
Corriente		162 A

### 1.5. Descripción del sistema de regulación.

Nuestra central termoeléctrica desde la puesta en servicio ha utilizado el sistema de regulación por estrangulación, gobernado por un control automático checo a lazo cerrado. El sistema ZAT-2000 es un sistema para dirigir y regular procesos tecnológicos. Está destinado para utilizar en la energética, sin embargo, encuentra también su aplicación en otras ramas industriales. La dirección del proceso se distribuye en varias partes descentralizadas del sistema y conectadas a una red de comunicación. Todo el sistema se puede dividir en tres partes fundamentales por orden jerárquico, es decir, el sistema de visualización, las unidades de dirección y la interconexión con la tecnología, los cuales garantizan las estaciones modulares, o sea, otras periféricas. La interconexión del sistema de visualización y las unidades de dirección la realiza el bus serie con el protocolo PROFIBUS FMS, y la comunicación de la periferia y las estaciones modulares con la unidad de dirección se basa en el protocolo PROFIBUS DP

#### 1.5.1. Software utilizado.

**In touch**, es un software gráfico para la creación de aplicaciones complejas SCADA/MMI en la automatización de la industria, el monitoreo, el control y la supervisión de los procesos tecnológicos. Facilita de forma sencilla y rápida la representación gráfica de cualquiera de los procesos en el monitor de la computadora, su operación y animación dinámica. Para la animación existe una escala amplia de posibilidades para aumentar el efecto real de la



representación. Puede procesar hasta 32767 informaciones. La cantidad de fotografías es ilimitada.

### **1.5.2. El Bus**

**BUS** – Es la interconexión de las diferentes unidades funcionales que se hace por medio de buses, implica un ahorro considerable de interconexiones y una simplificación desde el punto de vista estructural ya que todas las unidades van conectadas a un mismo sitio lo que facilita la detección de fallas para el mantenimiento y reparación de los mismos, un bus esta formado por un grupo de líneas por donde se transmiten los datos, código de instrucción, señales de sincronización entre las diferentes unidades funcionales, de forma paralela lo que permite una alta velocidad de transmisión, todos los buses tienen la ventaja de transmitir tres estados lógicos, el cero, el uno y tercer estado (estado de alta impedancia) este ultimo permite aislar los dispositivos que no intervienen en la comunicación o transmisión que se efectúa en ese instante lo cual permite que no exista ni transferencia ni choques entre las informaciones digitales

### **1.5.3. Otros elementos utilizados en el sistema ZAT-2000**

**FC** – Conjunto funcional que contiene los gráficos y sistemas que propician el control desde las diferentes pantallas del sistema In touch para comandar y atender los elementos del campo.

**SAI** – Sistema de alimentación ininterrumpida. Modulo que contiene baterías acumuladoras que suministran la energía al consumidor al fallar la alimentación alterna al panel ZAT o al PC.

**PROFIBUS** – Protocolo o norma que establece la fabricación estandarizada de diferentes tipos de buses por los diferentes fabricantes.

**RED** – Una red de ordenadores está formada por muchos elementos. En primer lugar, unos adaptadores o tarjetas de red que capaciten al PC para conectarse a la red. En segundo lugar, un cable entre los adaptadores a través del cual viajan los datos. Finalmente, una determinada topología o estructura de la red.

**ZAT-2000** - Sistema para dirigir y regular procesos tecnológicos.



### **1.6. Descripción del objeto de estudio.**

El interés de este trabajo está basado en los problemas energéticos que están ocurriendo en los sistemas de bombeo de combustible y condensado. En la estación de combustible 1<sup>er</sup> impulso de las tres bombas existente dos permanecen en servicio y una de reserva, las que están en servicio lo realizan en régimen continuo para garantizar una presión continua en la succión de las bombas de II impulso para esto se utiliza la válvula reguladora (**anexo 5**) que en dependencia de la cantidad de combustible necesario en el cabezal de segundo impulso abre ó cierra permitiendo el retorno de una cantidad de combustible al tanque de almacenamiento y regular la presión en el cabezal. En 2<sup>do</sup> impulso las bombas al igual que en 1<sup>er</sup> impulso trabajan dos en servicio y una de reserva en régimen continuo de trabajo estas bombean una cantidad de combustible casi constante que en dependencia de la cantidad de combustible necesaria para la carga que tenga el bloque a través de otra válvula de regulación incorpora otra cantidad de petróleo a la succión de II impulso y al tanque de almacenamiento para garantizar la presión en el cabezal de los quemadores, lo que trae como consecuencia un consumo de energía por encima de los valores necesario ya que el método utilizado (estrangulación) mantiene el trabajo de los motores casi constante. El sistema de condensado está formado por 6 bombas tres de ellas I etapa de 380 v dos en servicio y una de reserva que succionan el condensado del pozo caliente del condensador sometido al vacío y lo descargan a la succión de las tres bombas de II etapa de 6Kv que aumentan la presión para hacer llegar el condensado al tanque de alimentar y mantener un nivel en el mismo, para esto cuenta con un Bay pass ó desvío donde se encuentra la válvula reguladora quien mantiene una presión continua en las línea retornando cierta cantidad de condensado al condensador.



## **CAPITULO II: MEDIDAS PARA RACIONALIZACIÓN DE LAS OPERACIONES EN LOS ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS.**

### **2.1. Introducción**

El ahorro de la energía eléctrica es un factor clave en la gestión de las organizaciones ya que es necesaria tanto para los procesos como para las actividades auxiliares y constituye una parte importantísima de los costos. Una buena gestión energética permite disminuir el consumo de energía eléctrica de manera estructurada y sistemática, es decir, le permite ahorrar de manera constante, permanente y fácil. Además, disminuye el impacto de la empresa sobre el medio ambiente y menudo aumenta el confort y productividad. Las ventajas de una gestión energética eficiente no tardan en hacerse evidentes.

### **2.2. Consideraciones especiales en el diseño y utilización de motores de inducción para variadores de velocidad por frecuencia.**

En la operación con variadores de velocidad no existe un punto nominal de trabajo del motor, o sea, no puede especificarse una velocidad nominal y un momento nominal únicos. Más bien, existe un "lugar geométrico" de valores nominales en la característica mecánica, la cual puede comprender zonas de momento constante, de momento variable o de potencia constante. Esto hace muy difícil la tarea de optimizar la operación del motor. A pesar de esta dificultad, es posible incidir en algunos aspectos de construcción y diseño del motor que han conducido a la obtención de series especiales que logran una mejor eficiencia y un mejor comportamiento con velocidad variable.

Uno de los problemas más importantes a considerar es el diseño de las barras del rotor. En los motores de propósito general debe llegarse a una solución de

Compromiso entre construir una barra de baja resistencia para aumentar la eficiencia, o una de alta resistencia para obtener un momento de arranque adecuado. Cuando el motor arranca alimentado por un variador de velocidad el proceso de arranque se controla de forma tal que la frecuencia va aumentando suavemente. Esto hace que siempre se trabaje en la zona de la característica mecánica cercana al momento máximo y no sea necesario aumentar la resistencia del rotor. Esto posibilita fabricar una barra más grande y de un material de mayor conductividad, con el objetivo de reducir su resistencia. El aumento del tamaño de la barra tiene el efecto adicional de aumentar el flujo de dispersión y la reactancia de dispersión. Esto, aunque disminuye en algo la capacidad de sobrecarga del motor, tiene



el efecto beneficioso, de disminuir el contenido de armónicas de corriente del motor y hacer menor su calentamiento. Los motores denominados de ALTA EFICIENCIA se basan también en este principio.

Las armónicas de la corriente del estator aumentan las pérdidas por efecto Joule y las pérdidas en el acero. Mientras mayor es la frecuencia de estas armónicas mayor es el efecto pelicular, lo cual tiende a aumentar todavía más el calentamiento. Este efecto puede disminuirse colocando en el estator un mayor número de conductores de diámetro más pequeño. Esto es caro y provoca una disminución de la razón cobre/aislamiento en la ranura del estator, obligando a llegar a una solución de compromiso. También suele usarse para disminuir este efecto la transposición de conductores. Las pérdidas de acero pueden disminuirse utilizando un mejor material y láminas más finas.

Otra ventaja de la utilización de los variadores de velocidad por frecuencia es que puede prescindirse de los motores de 2 polos para obtener velocidades altas. El motor de 2 polos impone requerimientos muy fuertes a los diseñadores ya que en ellos es muy difícil, prácticamente imposible, ubicar bobinas de paso completo. Esto obliga a utilizar bobinas de paso muy acortado, lo cual disminuye la utilización de los materiales. Con una fuente de frecuencia variable puede diseñarse un motor de 4 polos para trabajar a 3600 r/min. Alimentándolo con 120 Hz. Debe señalarse que, en este caso, las pérdidas aumentan por el aumento de la frecuencia, por lo cual, nuevamente, debe llegarse a una solución de compromiso.

Es importante volver a insistir en la pérdida de enfriamiento del motor cuando trabaja a velocidades muy bajas. Esto hace que su potencia nominal a estas velocidades disminuya. Los fabricantes recomiendan una disminución de la potencia nominal a partir de determinado por ciento de la velocidad nominal. En algunos casos puede ser más económico disponer de ventilación forzada.

Debe insistirse también en un fenómeno al cual en los últimos años se le está prestando gran importancia y es el efecto que tiene sobre el aislamiento del motor la forma de onda de la tensión, la cual, como se explicará en el capítulo 3, no es sinusoidal, sino que está formada por pulsos en los cuales la tensión varía de forma muy abrupta, dando lugar a elevados valores de  $du/dt$ , los cuales provocan un fenómeno de reflexión de ondas similar al que sucede en las líneas de transmisión y que trae por consecuencia picos de tensión de 2 a 3 veces el nominal, cada vez que se produce un "switchero" o conmutación de los dispositivos semiconductores que conforman el puente (ver figura 2.21). Por ejemplo, para



una frecuencia de conmutación de 6 kHz, con una frecuencia fundamental de 60 Hz, se producirán 100 picos de tensión como los señalados por cada ciclo, o sea, por cada 16,6 milisegundos.

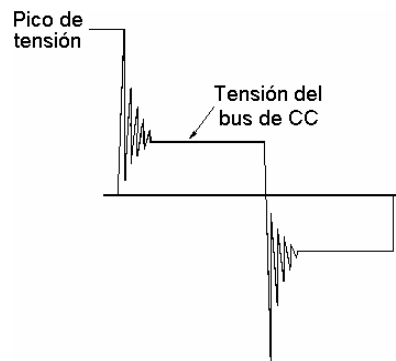


Figura 2.1. Sobretensión en los terminales del motor.

Si los valores de tensión de pico son superiores a las tensiones de descargas parciales del aislamiento del devanado, éstas comenzarán a aparecer y la vida útil del aislamiento disminuirá apreciablemente. Este fenómeno se acentúa cuando existe humedad, contaminación o partículas de polvo o aceite en el devanado. En la actualidad, los motores diseñados para operar con convertidores de frecuencia soportan picos de tensión seg. Para disminuir este efecto se recomienda adoptar de 1600 V durante 0,1 las siguientes medidas:

- Disminuir al máximo la longitud de los cables que van al motor.
- Minimizar la frecuencia de conmutación, siendo 3 kHz la óptima.
- Tratar de evitar las sobre tensiones en el motor y trabajar con el menor valor posible de tensión nominal.
- Mantener la temperatura ambiente en menos de 40° centígrados.
- Operar el motor con un límite de clase de aislamiento inferior al nominal.
- Usar motores de construcción cerrada cuando existe posibilidad de trabajar en ambientes húmedos, contaminados o sucios.

Si aún tomando todas o algunas de estas medidas, se sospecha que puedan existir sobre tensiones que limiten apreciablemente la vida del aislamiento debe conectarse algún dispositivo exterior que minimice estos efectos. Existen cuatro variantes posibles:



- Colocar reactores de línea a la salida. Estos deben tener una impedancia por unidad del 2 al 4%. Los reactores de 0,5 a 1% provocan picos aún más altos. Esta solución es barata y puede utilizarse con, prácticamente, cualquier frecuencia de conmutación. Tiene como inconveniente que provoca una caída de tensión adicional entre el convertidor y el motor.
- Filtro RLC con puente de diodos para la disminución del  $du/dt$ . Ese filtro recupera la energía adicional, reduce tanto el  $du/dt$  como los picos de tensión.
- Trampa de Onda Reflejada. Se instala en los terminales del motor y limita los picos de onda reflejada a un valor menor de 900 V.
- Filtro RLC para onda sinusoidal. Su estructura es similar a la del caso 2, pero su objetivo es producir una onda sinusoidal a la salida del convertidor. Es la variante que da lugar a más caídas de tensión y más pérdidas.

Otro fenómeno muy importante a tener en cuenta en la operación del motor con una onda no sinusoidal es el debido a las componentes de corrientes de alta frecuencia, las cuales circulan a través de las capacidades existente entre el cojinete o chumacera y tierra o carcasa, el cojinete o caja de bolas y la película de aceite lubricante que se forma al girar el rotor y entre rotor y estator. Estas corrientes van dañando estos elementos mecánicos y provocan una disminución apreciable de su vida útil. Para evitar el daño que provocan estos fenómenos se recomienda:

- Hacer del devanado del estator una jaula de Faraday, cubriendo las ranuras y las cabezas de las bobinas con una cinta metálica aterrada. Esta solución da muy buenos resultados pero necesita motores especiales.
- Aislar ambos cojinetes para que las corrientes capacitivas no fluyan a tierra.
- Añadir una escobilla para aterrar el eje sin necesidad de aislar el cojinete.
- Incluir un filtro de salida para derivar estas corrientes por otros caminos.

Estos dos últimos fenómenos que hemos señalado son de una gran importancia si tenemos en cuenta que las principales causas de fallos en los motores de inducción son, precisamente, los problemas mecánicos en los cojinetes y el deterioro del aislamiento del devanado del estator.

Los accionamientos de los diferentes sistemas de nuestra central cuentan con fusible protector, magnético y protección térmica y un motor asíncrono jaula de ardilla, en este caso me refiero a los motores de 380 V, son accionamientos que en dependencia de la función que realizan trabajan a una velocidad casi constante para mantener un flujo en la

descarga. En todos los sistemas se utilizan lasos de regulación que son los encargado de regular a través de las válvula reguladora los diferentes caudales que se utilizaran en el proceso en el caso de petróleo I y II impulso, sistema de condensado se utiliza la regulación por estrangulación con el uso de válvulas reguladoras después de la descarga ,gobernada por el sistema de regulación automática utilizando los desvíos o BYPAS con el fin de llevar a los tanques ,caldera o succiones de otras bombas un caudal y mantener los niveles en parámetros.

### 2.3. Arranque suave del motor de inducción trifásico.

Como es sabido, cuando el motor de inducción trifásico se arranca directo a la línea su corriente es de 5 a 7 veces la nominal. Si se arranca con el inversor, con los valores nominales de tensión y frecuencia, éste tendría que soportar esa corriente. Esto implica que su capacidad tendría que ser, por lo menos, cinco veces la del motor. Para evitar esto se programa el arranque del motor de manera tal que la frecuencia (y la tensión) vayan aumentando progresivamente (en forma de rampa o de letra S) hasta alcanzar la velocidad deseada, además se habilita un límite de deslizamiento que hace que en todo instante se trabaje en la zona estable de la característica mecánica del motor. En esta zona el factor de potencia del rotor es alto y se consigue un valor de momento determinado, con una corriente relativamente baja. Esto no sólo provoca la disminución de la corriente de arranque sino también un "aplanamiento" de los picos de momento que protege al mecanismo accionado.

Como se recuerda, la ecuación dinámica del accionamiento es:

$$M = J \frac{d\omega_M}{dt} + M_c \quad (2.3.1)$$

Por otra parte, la velocidad del rotor es igual a:

$$\omega_M = \omega_1 - \omega_{1s} \quad (2.3.2)$$

Donde  $\omega_1$  es la velocidad sincrónica y  $\omega_{1s}$  el denominado DESLIZAMIENTO ABSOLUTO o FRECUENCIA DE DESLIZAMIENTO.

Sustituyendo (2.52) en (2.51) y despejando el momento dinámico se obtiene:

$$M_{din} = M - M_c = J \frac{d\omega_1}{dt} - J \frac{d\omega_{1s}}{dt} \quad (2.3.3)$$

El momento dinámico tiene dos componentes: una proporcional a la velocidad de cambio de la frecuencia, o sea, a la pendiente de la rampa de aceleración (este valor es seleccionable por el usuario en los variadores de velocidad industriales) y la otra, proporcional a la variación del deslizamiento. Este último valor es, generalmente, casi cero ya que el deslizamiento suele mantenerse casi constante e igual al nominal. Esto quiere decir que a mayor pendiente de la rampa de aceleración, mayor es el momento dinámico y más rápido es el arranque.

#### 2.4. Frenaje del motor de inducción en el método de control por variación de la frecuencia.

Al enviar la orden de parada al motor el esquema de control de detención va reduciendo la tensión y la frecuencia del modulador, de acuerdo a la ley de mando vigente, a un ritmo o velocidad que puede ser seleccionado por el operador. Al disminuir la frecuencia se pasa a trabajar a una característica mecánica más baja, tal como se muestra en la figura 2.2. Como la velocidad no puede cambiar instantáneamente, el motor pasa a trabajar al segundo cuadrante, que es la zona de FRENAJE REGENERATIVO, en el cual el sentido del flujo de energía se invierte al igual que la corriente por el circuito intermedio. La corriente, al salir del motor, circula, fundamentalmente, por los diodos de reactivo.

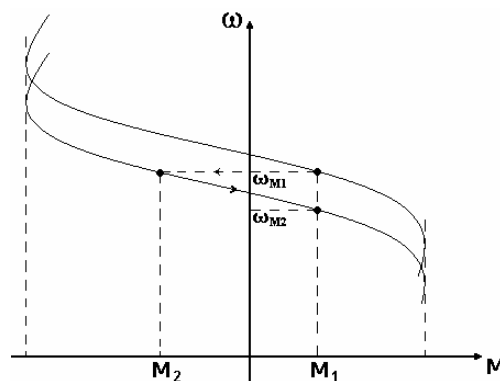


Figura 2.2. Frenaje regenerativo en las características mecánicas del motor de inducción.

Cuando se desea devolver energía a la red se utilizan dos rectificadores en antiparalelo, tal como se muestra en la figura 2.3. Ahora bien, en el circuito intermedio de corriente continua, que emplean la gran mayoría de los variadores de velocidad, esto no puede suceder ya que el rectificador es no controlado e impide la devolución de energía a la red al no poder circular la corriente en sentido inverso. Lo que ocurre es que la energía que sale del motor

se "acumula" en el condensador, aumentando rápidamente su carga, hasta que los circuitos de protección del variador desconectan el motor de la alimentación, perdiéndose el frenaje eléctrico y produciéndose un frenaje libre.

Si se quiere detener el motor en un tiempo determinado controlando, por tanto, el proceso de frenaje debe colocarse una resistencia en paralelo con el condensador, tal como se muestra en la figura 2.4. De esta forma, la energía que sale del motor se disipa en ella en forma de calor. En la propia figura se muestra una trayectoria típica de la corriente.

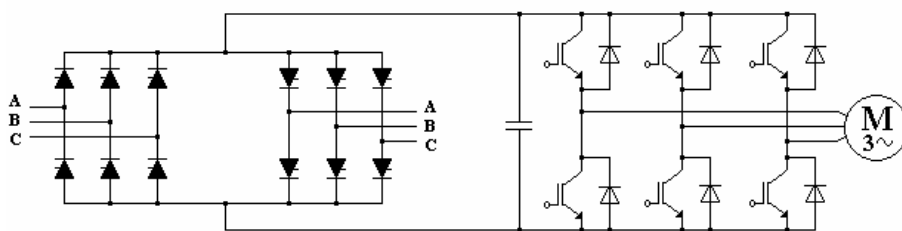


Figura 2.3. Convertidores en antiparalelo para devolver la energía a la red.

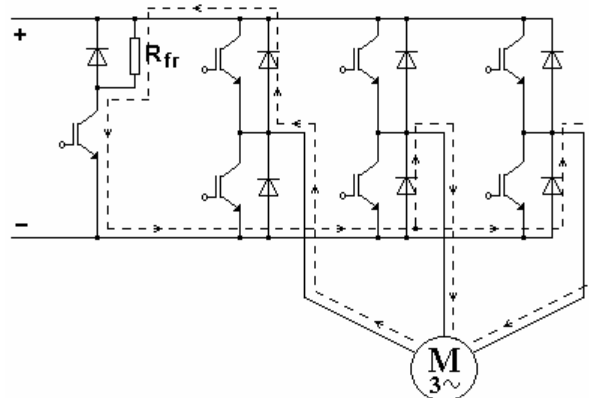


Figura 2.4. Ubicación de la resistencia de frenaje y trayectoria típica de la corriente.

La explicación de la metodología de cálculo de la resistencia de frenaje  $R_{fr}$  se llevará a cabo mediante un ejemplo. Suponga que se desea calcular la resistencia de frenaje para un motor de inducción trifásico de 208V; 20A; 11kW; 60Hz; 1740 r/min. El variador de velocidad es alimentado de una red de 220V; 60Hz. El mecanismo accionado por el motor tiene una velocidad máxima de 1700 r/min y debe detenerse en dos segundos. La operación de frenaje se realiza cada 8 segundos. La inercia total del motor y el mecanismo accionado es de 0,7kg-m<sup>2</sup>.



La ecuación mecánica del accionamiento es:

$$M = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + M_c \quad (2.4.1)$$

Donde M es el momento electromagnético producido por el motor, Mc el momento resistivo de la carga o mecanismo accionado, J la inercia total y  $\omega_m$  la velocidad de rotación en rad/seg.

Durante el frenaje el momento electromagnético es negativo e igual a  $M = -M_{fr}$ , convirtiéndose la ecuación (2.4.1) en:

$$M_{fr} + M_c = -J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.4.2)$$

El signo negativo significa que se produce una desaceleración como es lógico pensar en el caso de un frenaje. También se observa que el momento de la carga o mecanismo accionado ayuda al frenaje.

De la ecuación (2.55), mediante la integración del tiempo, puede determinarse el tiempo de frenaje:

$$t_{fr} = \frac{J}{M_{fr} + M_c} \cdot \omega_{max} \quad (2.4.3)$$

Siendo  $\omega_{max}$  la velocidad máxima en rad/seg, la cual es en este caso igual a:

$$1700 \cdot \frac{\pi}{30} = 178,5 \text{ rad/seg.}$$

El momento de la carga oscila entre un 30% y un 100% del nominal. Como no hay información con respecto a esto, se supondrá un momento de carga igual a un 50% del nominal. Los momentos nominal y de la carga, son:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \cdot 1000 = \frac{11}{1740 \cdot \frac{\pi}{30}} \cdot 1000 = 60,2 \text{ N} - m$$

$$M_c = 0,5 \cdot 60,2 = 30,1 \text{ N} - m$$

Suponiendo  $t_{fr} = 2$  seg, se despeja el momento de frenaje y se obtiene:  $M_{fr} = 32,4 \text{ N} - m$

La energía total disipada en la resistencia durante el proceso de frenaje es:

$$W_{fr} = \frac{\eta_M \cdot M_{fr} \cdot \omega_{max} \cdot t_{fr}}{2} \quad (2.4.4)$$

Suponiendo que el momento de frenaje permanece constante y que la velocidad varía desde su valor máximo hasta cero, de forma lineal.

$\eta_M$  es la eficiencia del motor, la cual puede suponerse igual al 85%. Por tanto:

$$W_{fr} = \frac{0,85 \cdot 32,4 \cdot 178,5 \cdot 2}{2 \cdot 1000} = 4,92 \text{ kW-seg}$$

Ahora bien, el frenaje sólo se produce durante una cuarta parte del ciclo de trabajo, por tanto, la energía que debe disipar el resistor, durante su ciclo de trabajo, es igual a:

$$W_R = W_{fr} \cdot \frac{t_{fr}}{t_c} = 4,92 \cdot \frac{2}{8} = 1,23 \text{ kW-seg}$$

El valor óhmico de la resistencia de frenaje se calcula con el objetivo de que pueda circular por ella la corriente máxima de frenaje  $I_{fr,max}$ , la cual ocurre al principio del frenaje y es la correspondiente a la potencia máxima, o sea:

$$P_{max,fr} = \eta_M \cdot M_{fr} \cdot \omega_{max} = \frac{0,85 \cdot 32,4 \cdot 178,5}{1000} = 4,92 \text{ kW}$$

La resistencia de frenaje es igual, entonces, a:

$$R_{fr} = \frac{U_c^2}{P_{max,fr}} = \frac{(U_{red} \cdot \sqrt{2} \cdot 1,5)^2}{P_{max,fr}} = \frac{(220 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,5)^2}{4920} = 44 \Omega$$

donde 1,5 es un factor de seguridad para tener en cuenta posibles sobretensiones en el condensador. Por tanto, debe seleccionarse una resistencia de 44  $\Omega$  y 1,25 kW.

Debe señalarse que el ejemplo resuelto corresponde a una condición difícil de frenaje ya que se trata de un mecanismo intermitente, de ciclo de frenaje muy corto, en el cual el frenaje representa la cuarta parte de ese ciclo. Esto quiere decir que la resistencia de frenaje prácticamente no tiene tiempo de enfriarse a la temperatura ambiente durante el tiempo de operación del mecanismo. Generalmente la condición de frenaje es más fácil o suave y no es necesaria una resistencia tan voluminosa.

También es posible en la mayoría de los variadores de velocidad industriales la realización del denominado FRENAJE POR INYECCIÓN DE CORRIENTE CONTINUA, el cual consiste en la inyección de una corriente continua durante un período de tiempo muy corto (alrededor de 1 segundo). La conexión correspondiente a este frenaje se muestra en la figura 2.25. Los variadores modernos permiten la selección del valor de la corriente de frenaje.

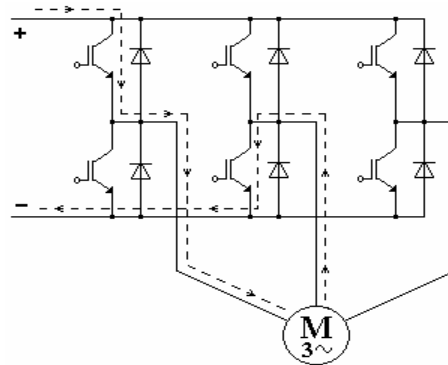


Figura 2.5. Frenaje por inyección de corriente continua.

### 2.5. Ahorro de energía mediante la utilización del variador de velocidad en el accionamiento de equipos de bombeo.

Las bombas son mecanismos de amplia utilización en la industria, es casi imposible encontrar un proceso tecnológico donde no jueguen un papel más o menos importante una o varias bombas. Las bombas se dividen en dos grupos: centrífugas y reciprocantes. En las bombas reciprocantes la potencia que se demanda en el eje del motor varía en función del ángulo de giro del rotor, normalmente estos mecanismos poseen biela y manivela. Por otro lado, los mecanismos centrífugos poseen una dependencia de la potencia entregada con el cubo de la velocidad debido a que su operación está vinculada con la fuerza centrífuga que se ejerce sobre el fluido. En este epígrafe sólo se tendrán en cuenta las bombas centrífugas.

En la figura 2.6 se muestra un sistema hidráulico típico, en el cual se eleva un líquido de un nivel a una presión  $p_1$ , a otro nivel a una presión  $p_2$ . Para el estudio de un sistema hidráulico es necesario tener en cuenta dos variables fundamentales: el caudal ( $Q$ ) y la carga hidráulica ( $H$ ). Por caudal se define la cantidad o volumen de líquido suministrado por unidad de tiempo y se da en  $m^3 / s$ . Por carga hidráulica se define la energía que debe suministrarse al líquido por unidad de peso y se da en m.

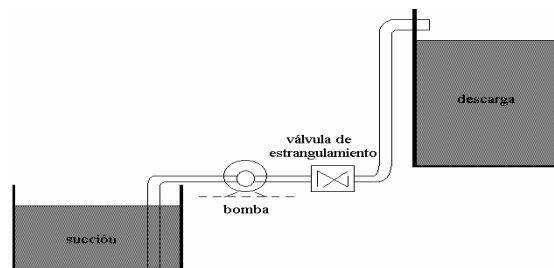


Figura 2.6. Sistema de bombeo típico.



La instalación hidráulica, al igual que la bomba, posee sus propias características  $H$  vs  $Q$ , esto se explica fácilmente si entendemos que toda instalación requiere determinada energía por unidad de peso para hacer circular por ella determinado caudal de líquido. De la misma forma, toda bomba puede suministrar determinado caudal de líquido contra una carga hidráulica dada. La intersección entre las características de la bomba y la carga hidráulica determina el punto de operación del sistema.

Una bomba centrífuga puede descargar un caudal limitado de líquido en función de la carga hidráulica que deba vencer la bomba para una velocidad dada, a esta dependencia se le denomina característica de carga, que no es más que la relación entre caudal y carga hidráulica de la bomba. Estas características dependen del tamaño y diseño de la bomba y de sus condiciones de succión, y como puede apreciarse a través de la figura 2.7 dependen también de la velocidad de rotación del impelente.

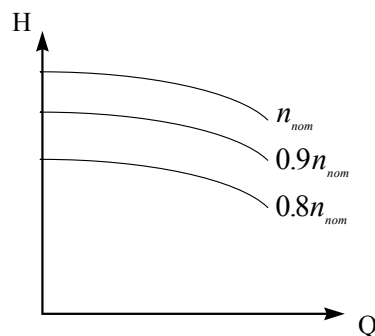


Figura 2.7. Característica de la bomba centrífuga para diferentes valores de velocidad.

La carga hidráulica total está compuesta, en una instalación real, de las componentes siguientes:

- Carga estática.
- Carga de presión.
- Carga de fricción.
- Carga de velocidad.

La carga estática está compuesta por la carga estática de succión  $H_s$  y la carga estática de descarga  $H_d$ , siendo la primera función de la altura entre la bomba y el lugar de donde se succiona y la segunda, función de la altura entre la bomba y el lugar donde se descarga el líquido bombeado.

La carga de presión tiene que ver con la energía que debe ser suministrada al líquido para que pueda vencer la diferencia de presiones entre la entrada y la salida.

La carga de fricción incluye las pérdidas que ocurren al circular el líquido por las tuberías y otros dispositivos de la instalación, las mismas dependen del caudal y la naturaleza del líquido bombeado, así como de las características de las tuberías y demás accesorios.

La carga de velocidad se relaciona con la energía cinética que debe suministrarse al líquido, para las bombas esta carga tiene muy poca importancia.

Para muchas instalaciones hidráulicas la presión de entrada y la de salida son iguales, por lo tanto, para este tipo de instalaciones sólo se tendrán en cuenta la carga estática y la de fricción. Para estos sistemas la carga hidráulica total toma la forma de la figura 2.8.

Otra característica muy importante es la de eficiencia vs caudal del líquido bombeado, esta característica tiene la forma que se muestra en la figura 2.9. En la figura 2.10 se muestran las características de la bomba, el sistema y la eficiencia, en un sólo gráfico, mostrando cómo se obtiene el punto de operación del sistema.

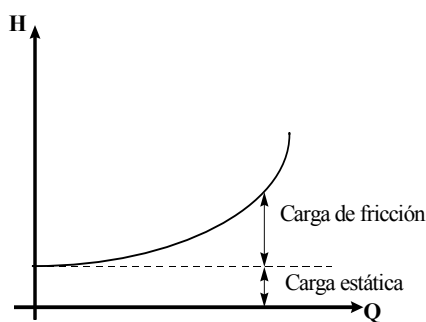


Figura 2.8. Carga hidráulica total.

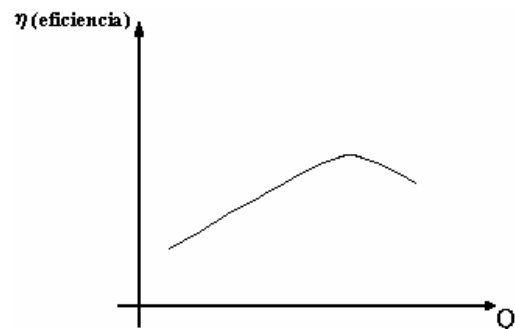


Figura 2.9. Característica de eficiencia de la bomba.

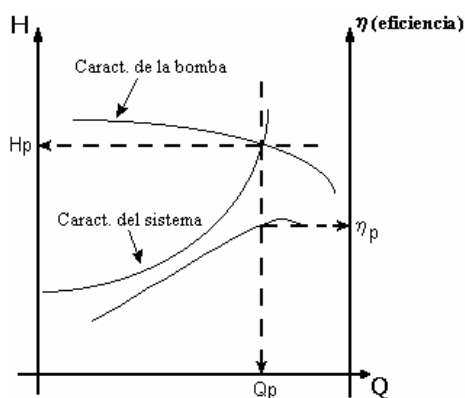


Figura 2.10. Características conjuntas de la bomba y la instalación hidráulica.

Para determinar la potencia que debe tener el motor eléctrico que mueve la bomba debe plantearse inicialmente la potencia que debe entregarse al líquido  $P_h$ , la cual es igual a la energía entregada por unidad de tiempo. Por otra parte, se tiene que la carga hidráulica es energía por unidad de peso y, como es conveniente expresar la potencia en función de la carga hidráulica, se determinará primeramente ésta.

$$\text{Se sabe que: } H = \frac{W}{m \cdot g} \quad (2.5.1)$$

Donde  $W$  es la energía entregada al líquido y  $m \cdot g$ , su peso.

Esta energía es la suma de la energía cinética, la potencial, la necesaria para vencer la diferencia de presiones y la necesaria para vencer la fricción.

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} + m \cdot g \cdot (H_s + H_d) + (p_2 - p_1) \cdot \Delta V + W_f \quad (2.5.2)$$

Donde  $m$  es la masa del líquido,  $v$  la velocidad del líquido y  $W_f$  la energía necesaria para vencer la fricción. Combinando (2.58) y (2.59) se obtiene la expresión de la carga hidráulica total, o sea:

$$H = \frac{v^2}{2 \cdot g} + H_s + H_d + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + H_f \quad (2.5.3)$$

El primer término es la carga de velocidad, el segundo y el tercero la carga estática, el cuarto la carga de presión y el quinto la de fricción,  $\rho$  es el peso específico del líquido.

Para determinar la potencia entregada al líquido se aplica la expresión:

$$P_h = \frac{W}{t} = \frac{W}{m \cdot g} \cdot \frac{m \cdot g}{t} = H \cdot \frac{m \cdot g}{t} \quad (2.5.4)$$

Si se tiene en cuenta que  $m \cdot g = V \cdot \rho$ , o sea, que el peso es igual al volumen por el peso específico, se obtiene la expresión:

$$P_h = H \cdot \frac{V}{t} \cdot \rho \quad (2.5.5)$$

$$\text{Pero se sabe que el caudal } Q \text{ es igual a: } Q = \frac{V}{t} \quad (2.5.6)$$

$$\text{Por tanto, (2.58) queda como: } P_h = H \cdot Q \cdot \rho \quad (2.5.7)$$

Esta es la potencia que debe entregarse al líquido, para hallar la potencia que debe entregar el motor debe tenerse en cuenta la eficiencia de la bomba y la eficiencia de la transmisión mecánica:

$$P = \frac{H \cdot Q \cdot \rho}{\eta_t \cdot \eta_b} \quad (2.5.8)$$

Donde  $\eta_t$  es la eficiencia de la transmisión y  $\eta_b$  la eficiencia de la bomba que se calcula a partir de la determinación del punto de trabajo.

En las industrias procesadoras, la industria de generación de energía eléctrica, los acueductos y otras aplicaciones es necesario regular el caudal de fluido que entrega la bomba. Para ello existen dos métodos fundamentales:

- El método de estrangulación de la salida (con su variante de recirculación de fluido).
- El método de variación de la velocidad de la bomba.
- El método de estrangular la salida consiste en situar en la salida de la bomba una válvula de estrangulación la cual se encarga de variar el caudal entregado, las características que se obtienen para este tipo de control se muestran en la figura 2.11.

El método de control del caudal variando la velocidad de la bomba consiste en hacer que la bomba varíe su velocidad en función del caudal requerido en cada momento, las características que se obtienen al utilizar este método se muestran en la figura 2.12

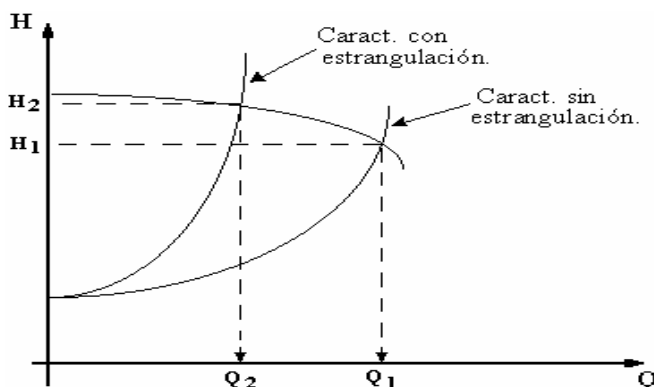


Figura 2.11. – Características de la bomba y la instalación con control por estrangulación. .

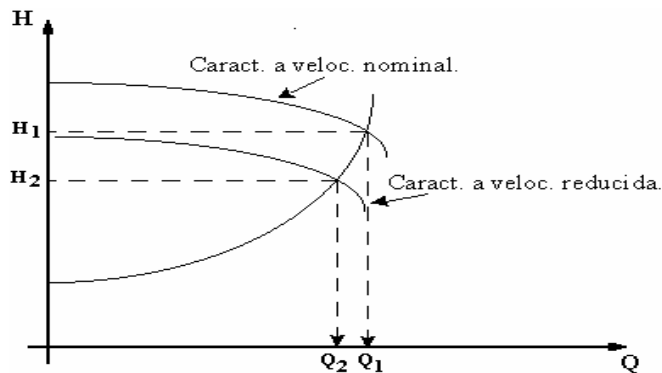


Figura 2.12. – Características de la bomba y la instalación con control por variación de la velocidad. .

De los gráficos anteriores podemos llegar a la conclusión que el método de control de caudal a partir de la estrangulación de la salida introduce pérdidas considerables en el sistema, ya que, como puede apreciarse, la disminución de caudal se logra a expensas de aumentar las pérdidas por fricción que ocurren en la válvula, mientras que la utilización del método de control variando la velocidad de la bomba es mas eficiente, por esta razón en la actualidad cuando se requiere controlar el caudal en un amplio rango de variación del mismo se utiliza el control por variación de la velocidad de la bomba. Un método muy utilizado antes de los años sesenta consistía en introducir resistencias en el circuito del rotor del motor con rotor bobinado para variar la velocidad del mismo, como se sabe este método es muy ineficiente y solo

logra controlar el caudal de forma discreta, esto último se traduce en una mala gradación del control, que en algunos casos es inadmisibile debido fundamentalmente a la imposibilidad de automatizar el proceso. Otro método utilizado hasta hace unos años para bombas de poca potencia era el control por variación de la tensión aplicada al estator, mediante la utilización de chopper de C.A. Este método posee dos desventajas fundamentales que consisten en la disminución de la capacidad de sobrecarga y la eficiencia al disminuir la tensión aplicada y el estrecho margen de regulación de la velocidad que el mismo brinda. Se debe señalar que para cargas del tipo de las bombas centrífugas estas desventajas no son tan notables pues la eficiencia no disminuye tanto y no se reduce en extremo el diapasón de control de velocidad pues no se limita tanto la capacidad de sobrecarga. Ahora bien, debido a que en la actualidad, la forma de conseguir esta disminución de tensión es mediante un chopper de CA en el estator, a las desventajas antes planteadas se le añade el elevado contenido de armónicas de corriente y el empeoramiento del factor de potencia.

Entre los métodos que aparecieron hace no muchos años se encuentran la cascada asincrónica a tiristores y el motor doblemente alimentado, para potencias elevadas estos accionamientos permiten realizar un control del caudal de una elevada eficiencia y exactitud en la regulación, aunque tienen el inconveniente de aumentar el consumo de potencia reactiva..

Cuando los requerimientos del diapasón de regulación y la eficiencia son altos se utilizaba el sistema generador-motor que en la década del los sesenta se fue cambiando por el sistema rectificador controlado-motor.

Desde hace unos años se viene utilizando para el control del caudal por variación de la velocidad de bombas de menos de 3500 kW el control de variación de la frecuencia del motor asincrónico jaula de ardilla debido a sus conocidas ventajas. Para potencias mayores se utiliza el motor síncrono alimentado por un inversor a tiristores controlado por la carga o la mencionada cascada asincrónica a tiristores.

Podemos concluir que en la actualidad cuando se requiere regular el caudal entregado por la bomba en un amplio margen de regulación y a una alta eficiencia es muy utilizado y casi no se entran a analizar otras variantes, el control por variación de la frecuencia, ahora bien esta decisión se refiere a los métodos de control por variación de la velocidad y no es tan categórico cuando la cuestión es decidir entre aplicar el método de variación de la velocidad y el método de estrangulación. La selección óptima del método de regulación del caudal se realiza a partir de los resultados que se obtengan de un exhaustivo proceso de análisis técnico-económico en el cual se incluyan todas las variantes y cuyo resultado final dependerá mucho de las condiciones específicas de donde se aplicará el control.

La ventaja fundamental que se logra al utilizar variadores de velocidad en el accionamiento de bombas centrífugas es de carácter energético, ahora bien, existen otras consideraciones tecnológicas importantes que también están a favor de la utilización de este tipo de accionamiento. Entre ellas podemos señalar las siguientes:

- La característica de arranque suave elimina la caída de tensión asociada a los arranques de los motores suavizando el choque de arranque en motores, acoplamientos, engranajes y el equipamiento en general del accionador.
- Es permisible la realización de arranque repetido sin afectaciones mecánicas.
- Dado que estos accionamientos entregan en cada momento exactamente el caudal requerido por el sistema, se logra alargar la vida útil de todos los dispositivos que forman parte del mismo, se conservan elementos de control de flujo eliminando el

mantenimiento intensivo. Entre estos dispositivos están los amortiguadores, válvulas de cuello, etc.

- El accionamiento de velocidad ajustable puede ser diseñado para que no se altere el funcionamiento cuando ocurren perturbaciones en el sistema electro energético. Cuando un fallo de baja tensión ocurre, el accionamiento puede ajustarse de forma tal que disminuyan el consumo de potencia hasta que la tensión nominal sea restablecida, al mismo tiempo el accionamiento puede reaccelerarse hasta la velocidad de referencia.

Es posible alcanzar rangos de velocidad que excedan las 3600 rpm sin la utilización de engranajes, con inversores de C.A se logra operando a frecuencias mayores de 60 Hz.

- El rango permisible de control de flujo es generalmente superior con velocidad ajustable.

## **2.6. Velocidad como una forma de controlar un proceso**

El control de procesos y el ahorro de la energía son las dos de las principales razones para el empleo de variadores de velocidad. Históricamente, los variadores de velocidad fueron desarrollados originalmente para el control de proceso pero el ahorro energético ha surgido como un objetivo tan importante como el primero. Bien puede ser designado como variador de velocidad. Entre las diversas ventajas en el control del proceso proporcionadas por el empleo de variadores de velocidad destacan:

- Operaciones más suaves.
- Control de la aceleración.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Compensación de variables en procesos variables.
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.
- Ajuste de la tasa de producción.
- Permitir el posicionamiento de alta precisión.
- Control del par motor (torque).

## CAPITULO III: USO DE VARIADORES DE VELOCIDAD EN LOS ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS.

### 3.1. Introducción

La maquinaria industrial generalmente es accionada a través de motores eléctricos, a velocidades constantes o variables, pero con valores precisos. No obstante, los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante o casi-constante, y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad. Los variadores de velocidad se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, como en ventiladores y equipo de aire acondicionado, equipo de bombeo, bandas y transportadores industriales, elevadores, llenadotas, tornos y fresadoras, etc.

### 3.2. Posibilidades de controlar la velocidad de un motor asincrónico.

El control de la velocidad de los motores asincrónico se encuentra en la actualidad en el centro de atención de los investigadores. Esto se debe a que el motor asincrónico es el más sencillo, confiable y económico de los motores eléctrico. Es más ligero y significativamente más barato, el control de velocidad de estos motores tiene dificultades derivadas de su misma esencia física. La velocidad de rotación de un motor asincrónico se calcula a partir de la siguiente formula.

$$w = w_0(1-s) = 2 \cdot \phi \cdot f / p$$

El procedimiento para controlar la velocidad de los motores asincrónicos se dividen en dos clases: Controlando la velocidad del campo magnético del motor. Esto se puede lograr variando la frecuencia primaria o variando el número de pares de polo del motor y controlando al deslizamiento del motor para  $w_0 = \text{constante}$  lo que acostumbramos a llamar, método paramétrico de control de la velocidad.

### 3.3. Concepto de variadores de velocidad.

El **Variador de Velocidad** (VSD, por sus siglas en inglés *Variable Speed Drive*) es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores. También es conocido como Accionamiento de Velocidad Variable (ASD, también



por sus siglas en inglés *Adjustable-Speed Drive*). De igual manera, en ocasiones es denominado mediante el anglicismo Drive, costumbre que se considera inadecuada.

Se utiliza este equipo cuando las necesidades de la aplicación son las siguientes.

- ❖ Dominio par velocidad.
- ❖ Regulación sin golpes mecánico.
- ❖ Movimientos complejos

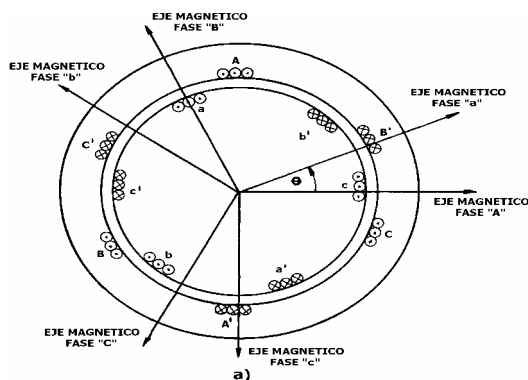
### 3.4. Principio de funcionamiento del motor de inducción trifásico.

Los accionamientos con motor de inducción pueden ser clasificados en dos categorías amplias basado en sus aplicaciones:

1. Accionamientos con velocidad ajustables. Una aplicación importante de estos accionamientos es en el control de procesos usando ventiladores, compresores, bombas, secadores, etc.
2. Accionamientos con servomotores. Mediante control sofisticado, motores de inducción pueden ser utilizados en accionamientos con servomotores en periféricos de computadores, herramientas de maquinas y robóticas, etc.

En la figura 3.1 se muestra el esquema y el circuito eléctrico de conexión del motor de inducción trifásico. En el estator existe un devanado trifásico (fases A-A', B-B' y C-C') en el cual se produce un campo magnético giratorio cuya velocidad ( $\omega_s$ ) depende del número de polos (P) y de la frecuencia ( $f_1$ ) de la red eléctrica que lo alimenta:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{P/2} \quad (3.2.1)$$



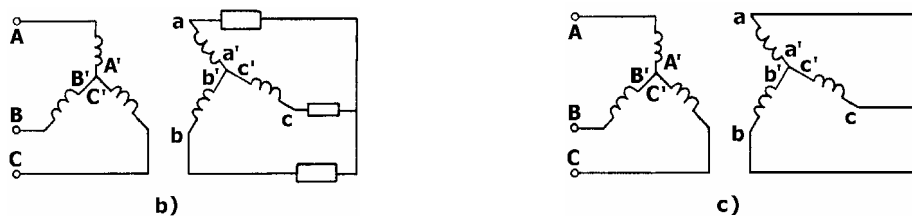


Figura 3.1: a) Corte transversal del motor de inducción trifásico

b) Esquema circuital del motor con resistencias externas.

c) Esquema circuital del motor sin resistencias externas.

El rotor puede ser de dos tipos: Rotor Bobinado o De Anillos y Rotor Jaula De Ardilla o En Cortocircuito. El rotor bobinado tiene un devanado trifásico del mismo número de polos y fases que el del estator y cuyos terminales se conectan a tres anillos deslizantes sobre los cuales descansan tres escobillas a través de las cuales pueden introducirse resistencias externas (tal como se muestra en la figura 3.1 b) o conectarse a otro circuito exterior. Por otra parte, el rotor de jaula consta de un número determinado de barras, de cobre o aluminio, cortocircuitadas a través de anillos situados en los extremos del rotor. Como puede apreciarse, el rotor bobinado permite modificar las características de comportamiento del rotor y el de jaula no, pero este último tiene la gran ventaja de ser más pequeño y barato y necesitar menos mantenimiento siendo, por esta razón, el más utilizado en la industria. Aunque el rotor sea de jaula, para su estudio puede suponerse un rotor bobinado equivalente, con sus terminales cortocircuitados, tal como se muestra en la figura 3.1c).

Para analizar el principio de operación de esta máquina se supondrá primero que el circuito del rotor está abierto y que, por tanto, sólo circula corriente por el devanado del estator. Esta corriente sirve para producir el campo magnético de acoplamiento (despreciando las pérdidas de núcleo) y es denominada Corriente Magnetizante, o sea, para cada fase se cumple que:

$$i_s = i_M \quad (3.2.2)$$

donde  $i_M$  es el valor instantáneo de la corriente magnetizante.

Esta corriente provoca una fuerza magnetomotriz giratoria  $\vec{F}_m$  y un flujo  $\phi_m$  que induce una fuerza electromotriz en el estator igual a:

$$E_s = 4,44 \cdot f_1 \cdot W_s \cdot K_{devS} \cdot \phi_m \quad (3.2.3)$$

donde  $W_s$  es el número de espiras por fase del devanado del estator y  $K_{devS}$  el factor de devanado del estator. También, en cada fase del rotor se induce una fem  $E_r$  dada por:

$$E_R = 4,44 \cdot f_1 \cdot W_R \cdot K_{devR} \cdot \phi_m \quad (3.2.4)$$

En este caso el rotor no gira debido a no estar circulando corriente por él.

Si ahora se cierra el circuito del rotor comienza a circular corriente por él. Esta corriente reacciona con el flujo giratorio del entrehierro ( $\phi_m$ ) y crea un momento (torque o par) que hace girar al motor, acelerándolo. Esta rotación se produce en el mismo sentido que la del flujo giratorio, trayendo como consecuencia que la velocidad relativa de los conductores del rotor, con respecto al flujo del estator, disminuya, disminuyendo, por tanto, la fem inducida en el rotor y la corriente. Este proceso de disminución de corriente y aumento de la velocidad continúa hasta que el valor de corriente es tal, que el momento o par que ella produce equilibra el momento externo de la carga mecánica del motor. Entonces, la velocidad y el valor efectivo de la corriente se hacen constantes y se alcanza el estado estacionario. Esta velocidad estable  $\omega_m$  tiene que ser menor que la velocidad sincrónica  $\omega_s$  a la cual se mueve el flujo giratorio para que exista movimiento relativo entre el flujo y los conductores del rotor. A mayor carga mecánica externa mayor velocidad relativa, mayor fem inducida y mayor corriente, implicando esto menor velocidad del rotor. El valor de la velocidad relativa en por unidad se denomina Deslizamiento y está dado por:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (3.2.5)$$

Debido a que la caída de tensión en el estator de la máquina es muy pequeña, la tensión aplicada es prácticamente igual a la fem inducida dada por (3.3). Esto quiere decir que si la tensión permanece constante, la fem inducida también lo hace y el flujo del entrehierro no varía, por tanto, el vector de fuerza magnetomotriz  $\vec{F}_m$  no varía tampoco y la suma vectorial de las fuerzas magnetomotrices del estator y el rotor es siempre igual a aquel, independientemente de la carga del motor. Esto se observa en el diagrama vectorial de las figuras (3.2 a) y b), donde se cumple siempre que:

$$\vec{F}_S + \vec{F}_R = \vec{F}_m \quad (3.2.6)$$

En el instante de arranque (velocidad cero y deslizamiento igual a uno) y a valores de deslizamiento relativamente altos la reactancia del rotor es alta ya que depende de la frecuencia y ésta es muy cercana a la de la red. Esto provoca un ángulo de factor de potencia del rotor alto y una corriente grande, como se muestra en la figura 3.2 c), a la que corresponde el diagrama vectorial de 3.2 a). Por otra parte, cuando la velocidad aumenta y

el deslizamiento es pequeño la frecuencia del rotor es muy baja y la reactancia es prácticamente nula, con lo cual la corriente casi está en fase con la fem del rotor, siendo el valor de ésta y de la corriente mucho más pequeña. Esta es la condición de trabajo estable del motor, a la cual corresponde el diagrama vectorial de 3.2 b) y fasorial 3.2 d).

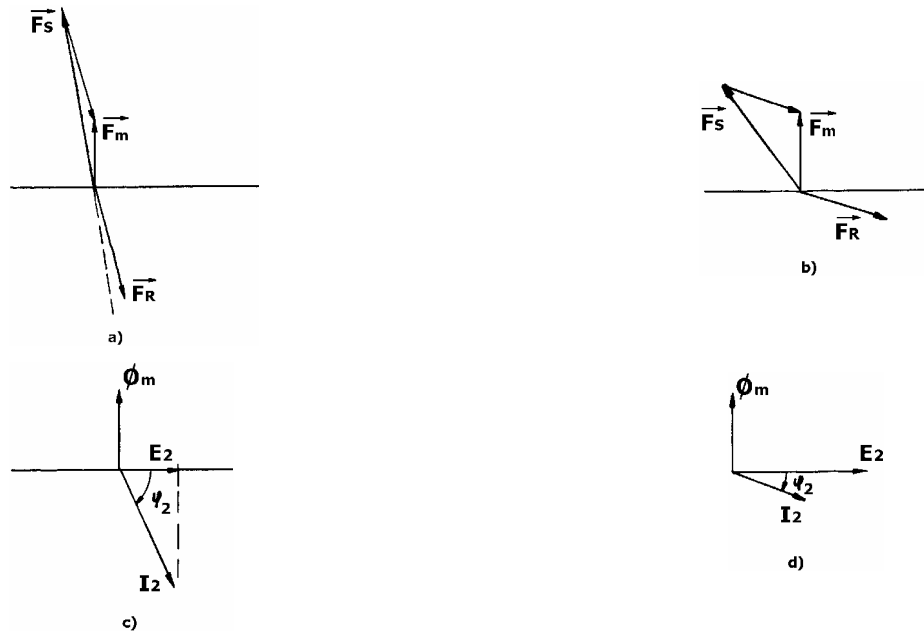


Figura 3.2: a) Diagrama vectorial de la máquina de inducción trabajando como motor en la zona inestable.  
 b) Diagrama vectorial de la máquina de inducción trabajando como motor en la zona estable.  
 c) Diagrama fasorial del circuito del rotor del motor de inducción en la zona inestable.  
 d) Diagrama fasorial del circuito del rotor del motor de inducción en la zona estable.

La frecuencia de la fem y la corriente del rotor depende de la velocidad relativa de éste y del flujo giratorio del entrehierro y es, por tanto, igual a:

$$f_2 = s \cdot f_1 \tag{3.2.7}$$

Es importante demostrar también que la fuerza magnetomotriz (fmm) del rotor gira con respecto al estator a la velocidad sincrónica, independientemente del valor del deslizamiento y, por tanto, de la frecuencia del rotor.

La velocidad de la fmm del rotor con respecto al rotor  $\omega_{FRR}$  depende de la frecuencia de la corriente del rotor y es igual, por tanto, a:

$$\omega_{FRR} = s.\omega_S \quad (3.2.8)$$

Por otra parte, la velocidad de esta fmm con respecto al estator es igual a su velocidad con respecto al rotor más la velocidad del rotor:

$$\omega_{FRS} = \omega_{FRR} + \omega_R \quad (3.2.9)$$

De (1.1.1.5) la velocidad del rotor en función del deslizamiento es igual a:

$$\omega_R = \omega_S.(1-s) \quad (3.2.10)$$

Sustituyendo (3.2.8) y (3.2.10) en (3.2.9):

$$\omega_{FRS} = s.\omega_S + \omega_S.(1-s) = \omega_S \quad (3.2.11)$$

con lo cual queda demostrado lo que se quería probar.

La máquina de inducción trifásica, al igual que cualquier otro convertidor electromecánico, puede también trabajar como generador. Para esto es necesario que un motor primario acoplado al eje de la máquina lleve la velocidad del rotor a un valor superior al de la velocidad sincrónica. Los diagramas vectoriales y fasorial del rotor para esta condición se muestran en las figuras 3.3 a) y b), respectivamente.



Figura 3.3: a) Diagrama vectorial de la máquina de inducción trabajando como generador en la zona estable.

b) Diagrama fasorial del generador de inducción trabajando en la zona estable.

En la figura 3.4 se muestra la característica mecánica (velocidad del rotor contra momento electromagnético) del motor de inducción trifásico. Para velocidades altas y deslizamientos pequeños la velocidad del motor disminuye al aumentar la carga mecánica y trabaja, por tanto, de manera estable. En esta zona la reactancia es muy pequeña y sucede lo mostrado en la figura 3.2 c). Aquí, al aumentar la carga mecánica del motor (el momento resistivo), la

velocidad disminuye y aumenta el deslizamiento, con lo cual aumentan la fem y la corriente del rotor y aumenta el momento electromagnético hasta que se equilibra con el momento de la carga, a una velocidad menor. Si la carga sigue aumentando, y el deslizamiento sigue también incrementándose, la reactancia inductiva del rotor se hace cada vez más significativa y aumenta la componente en cuadratura de la corriente del rotor (que no produce momento). Llega a suceder entonces que el rotor tiene un factor de potencia tal, que provoca que aumente la corriente total al aumentar el deslizamiento, pero disminuye la componente de corriente en fase con la fem, que es la que produce el momento. Se llega entonces a la zona inestable de la característica por la cual el motor sólo puede pasar de forma transitoria o trabajando a lazo cerrado. Esta situación corresponde a los diagramas de las figuras 3.2 a) y c). Es importante señalar que, debido a este fenómeno, el motor suministra en estado estacionario un momento electromagnético máximo  $M_{max}$ . Esto quiere decir que el momento resistivo de la carga mecánica nunca puede superar este valor ya que la máquina se detendría si trabaja como motor.

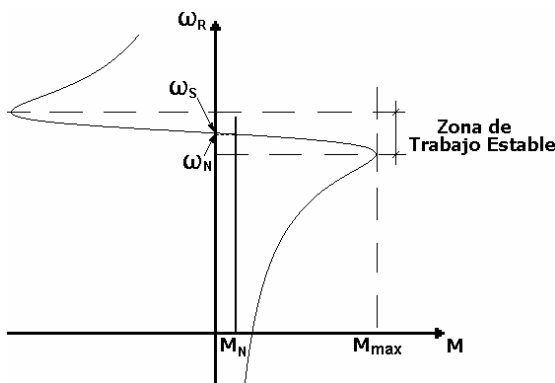


Figura 3.4.- Característica mecánica de la máquina de inducción trifásica.

En la característica mecánica de la figura 3.4 pueden apreciarse también las tres zonas de trabajo, o condiciones de operación del motor de inducción trifásico, que son:

- I. Operación Motora: Corresponde al primer cuadrante de la característica cuando el rotor gira en el sentido del campo giratorio y a una velocidad menor que la sincrónica.
- II. Operación Generadora: Corresponde al segundo cuadrante de la característica donde el rotor gira en el sentido del campo giratorio y a una velocidad mayor que la sincrónica.
- III. Operación en Frenaje por Inversión o Contracorriente: Corresponde al cuarto cuadrante cuando el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio.

Debe señalarse que invirtiendo la secuencia de las corrientes de las tres fases del estator se invierte el sentido de giro del campo y se logra operación motora en el tercer cuadrante, generadora en el cuarto y como frenaje en el segundo.

### **3.5. Control de la velocidad de motores de inducción por variación de la frecuencia**

#### **3.5.1. Generalidades sobre el control de velocidad en los accionamientos eléctricos.**

En la selección y diseño de un accionamiento eléctrico de velocidad variable deben tenerse en cuenta, fundamentalmente, los Requerimientos Impuestos al Accionamiento por el Mecanismo. Estos requerimientos aunque, en general, pueden ser de índole muy diversa respondiendo a la gran variedad de mecanismos que pueden encontrarse, pueden resumirse en seis parámetros fundamentales que sirven también para evaluar cada tipo de variador de accionamiento eléctrico de velocidad variable. Estos requerimientos son:

- 1- El diapasón de control de la velocidad se determina dividiendo la velocidad máxima de operación necesaria entre la mínima:

$$D = \frac{\omega_{m.max}}{\omega_{m.min}} \quad (3.3.1.1)$$

Casi siempre el diapasón se expresa en forma de proporciones tales como 4:1, 20:1, etc.

- 2- La gradación del control indica la cantidad de velocidades estables de operación del método y se expresa cuantitativamente mediante el factor de gradación:

$$K_{gr} = \frac{\omega_{m.n}}{\omega_{m.n-1}} \quad (3.3.1.2)$$

Siendo  $\omega_{m.n}$  la velocidad en el paso n del control y  $\omega_{m.n-1}$  la velocidad en el paso n-1.

Este indicador da idea de lo continuo (suave) o discreto que es un método de control de velocidad.

- 3- La exactitud en estado estacionario se refiere a las variaciones que ocurren en la velocidad ante perturbaciones externas tales como la tensión, la temperatura o la carga mecánica, siendo esta última la más importante de todas, por lo que, generalmente, este indicador se evalúa a través de la denominada Rigidez de la Característica Mecánica a Carga Nominal,  $\beta_N$ . La rigidez de la característica mecánica se define, en general, como:

$$\beta = -\frac{dM}{d\omega_m} \quad (3.3.1.3)$$

Si la característica es como la 2 de la figura 1.2.2 el valor de  $\beta$  es igual al inverso de la pendiente de la característica mecánica en cada punto y debe evaluarse para la carga nominal. Si la característica es lineal y descendente, tal como la 1, la rigidez es constante e igual a:

$$\beta = -\frac{M_N}{\Delta\omega_m} = -\frac{M_N}{(\omega_o - \omega_{mN})} \quad (3.3.1.4)$$

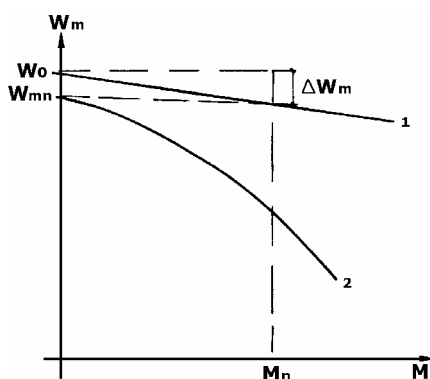


Figura 3.5- Característica Mecánica del Motor en el Accionamiento Eléctrico.

Aunque este parámetro depende de la variación de la velocidad con la carga, no siempre es el mejor para evaluar este indicador, sobre todo cuando el diapasón de control es grande. Para poder apreciar esto se hace referencia a las características de la figura 3.6. En ambas características la rigidez es la misma, sin embargo, la variación de velocidad en la característica 2 es mucho más ostensible ya que de vacío a plena carga se reduce en mucho más de la mitad (el motor casi se detiene). Para tener en cuenta este elemento es mejor evaluar el denominado Porcentaje de Estatismo de la característica, que se define como:

$$\%S = \frac{\omega_o - \omega_{m.n}}{\omega_o} \cdot 100 \quad (3.3.1.5)$$

y, si la característica es lineal

$$\%S = \frac{M_N}{\beta \cdot \omega_o} \cdot 100 \quad (3.3.1.6)$$



A Mayor Porcentaje de Estatismo Peor es la Exactitud de la característica. Como se aprecia, el porcentaje de estatismo de la característica 2 es mucho mayor.

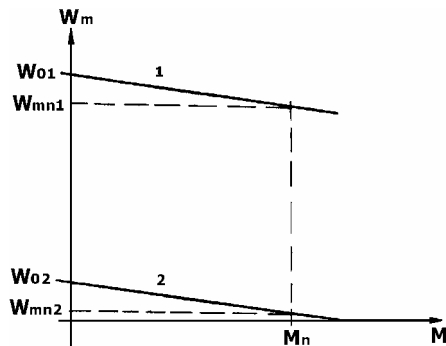


Figura 3.6 - Características de igual rigidez y diferente estatismo.

- 4- La calidad de la respuesta transitoria se refiere a la forma de la respuesta de la velocidad en función del tiempo cuando varía el Comando de Control. Esta variación se supone, generalmente, en forma de escalón, aunque para evaluar sistemas de altas prestaciones dinámicas (sistemas de seguimiento) puede ser necesaria otra señal de prueba a la entrada, tal como la rampa. Este indicador tiene dos aspectos a considerar: la Rapidez de Respuesta y la Oscilatoriedad o Estabilidad Relativa. La rapidez de respuesta se refiere al tiempo en el que se alcanza un nuevo estado estacionario y la estabilidad relativa, al nivel de amplitud de las oscilaciones de la velocidad durante el período transitorio y el tiempo en que ellas se mantienen.
- 5- La dirección del control se refiere a si la velocidad puede variarse por encima, por debajo o en ambos sentidos de la velocidad base, la cual es la correspondiente a la característica mecánica natural en condiciones nominales.
- 6- La carga permisible se refiere al tipo de carga mecánica que debe ser accionada por el variador de velocidad. Esta clasificación puede hacerse en base a tres criterios:
  - 6.1- Sentido de Rotación:

Existen dos tipos de cargas: las No Reversibles, que sólo giran en un sentido, y las Reversibles, que pueden girar en ambos sentidos.
  - 6.2- Carácter de la Carga:

Se dice que es una Carga Pasiva cuando sólo consume energía del accionamiento eléctrico y que es una Carga Activa, cuando puede tanto consumir como entregar energía al accionamiento eléctrico. Este es el caso de los mecanismos o cargas

sometidos a la acción de la gravedad, tales como las grúas y los ascensores o mecanismos de elevación.

6.3- Relación Momento-Velocidad. Existen cargas de:

Momento Constante:  $M_c = cte.$

Momento Variable:  $M_c = M_o + M_1 \cdot \omega_m + M_2 \cdot \omega_m^2$

Potencia Constante:  $P = M_c \cdot \omega_m = cte.$

Por ejemplo: Un ascensor o elevador es una carga reversible, activa y de momento constante; una bomba centrífuga es una carga no reversible, pasiva y de momento variable.

A veces en este punto se especifica también la aceleración máxima o el momento máximo necesario para obtenerla.

### 3.5.2. Fundamentos básicos del control de la velocidad por variación de la frecuencia.

Como se sabe, la velocidad sincrónica, en radianes por segundo, del campo magnético giratorio de un motor de inducción trifásico, está dada por:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{(P/2)} \quad (3.3.2.1)$$

donde P es el número de polos del motor.

La velocidad del rotor del motor es ligeramente menor que la sincrónica y está dada por:

$$\omega_m = \omega_s \cdot (1 - s) \quad (3.3.2.2)$$

donde s es el deslizamiento del motor que varía generalmente, en condiciones estables de trabajo, entre 0,005 y 0,1.

Quiere decir que si se varía la frecuencia de trabajo del motor de inducción, puede variarse su velocidad de rotación. Para controlar por debajo de la velocidad base debe reducirse la frecuencia  $f_1$ . Ahora bien, recuérdese que la fem inducida en el devanado del estator depende de la frecuencia.

Según la ecuación (3.3.1.3):  $E_s = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_s \cdot K_{devs} \cdot \phi_m$

Por otra parte, del circuito equivalente del motor (figura 3.11) se obtiene que el fasor de la tensión aplicada en el estator por fase, es igual a:

$$\bar{U}_s = \bar{E}_s + j\bar{I}_s \cdot (R_s + jX_s) \quad (3.3.2.3)$$

A frecuencias cercanas a la nominal la caída en la impedancia interna del estator es despreciable y puede suponerse aproximadamente igual a la fem:

$$\bar{U}_s \approx \bar{E}_s \quad (3.3.2.4)$$

Quiere esto decir que si la frecuencia disminuye y la tensión no varía, el flujo  $\phi_m$  aumenta, provocando la saturación de la máquina y el consiguiente aumento de la corriente magnetizante y las pérdidas del motor a valores inadmisibles. Por lo tanto, es recomendable operar de forma tal que, al reducirse la frecuencia, la tensión se reduzca proporcionalmente, o sea, con la Ley de Mando Tensión/ Frecuencia Constante:

$$\frac{U_s}{f_1} = K_{u.f} \quad (3.3.2.5)$$

Por lo antes expuesto se comprende que para realizar en la práctica este método es necesario disponer de un Inversor Trifásico, el cual es un dispositivo que convierte corriente continua en corriente alterna trifásica y que será explicado en el siguiente epígrafe, mediante el cual puede controlarse independientemente tanto la tensión como la frecuencia, tal como se muestra en la figura 3.7. Al conjunto formado por el inversor y su control de tensión y frecuencia suele denominársele Modulador.

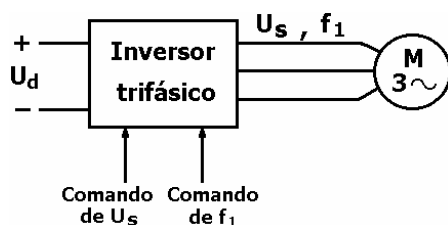


Figura 3.7 - Esquema de control de la frecuencia.

En la figura 3.8 se muestra cómo varía la característica mecánica del motor al reducir la frecuencia con esta ley de mando. Como se observa, cuando la frecuencia disminuye mucho la capacidad de sobrecarga (momento máximo) disminuye también y a velocidades bajas se hace tan pequeña que la operación del motor con carga nominal se hace prácticamente imposible. Esto se debe a que, al reducirse la frecuencia y la tensión, llega el momento en que la caída en la resistencia se hace comparable con la fem  $E_s$  y la tensión aplicada, y al disminuir esta última, la fem y el flujo disminuyen. Recuérdese que, a menor flujo, el motor tiene menos posibilidades de producir momento electromagnético y la capacidad de

sobrecarga o momento máximo cae. Para evitar esto debe trabajarse el motor con la Ley de Mando a Flujo Constante, en la cual se cumple que:

$$\frac{E_s}{f_1} = K_{\phi.f} \quad (3.3.2.6)$$

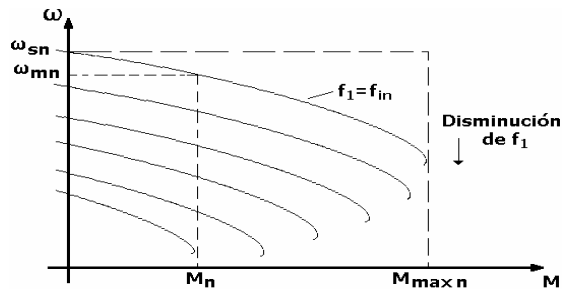


Figura 3.8 - Características mecánicas con ley de mando U/f constante.

En la figura 3.9 a) se muestra cómo varían las características con esta ley de mando, observándose que la capacidad de sobrecarga se mantiene constante. En la

figura 3.9 b) se aprecia cómo debe variar la tensión en función de la frecuencia para obtener esta ley de mando.

Para trabajar con valores de velocidad por encima del nominal es necesario aumentar la frecuencia de alimentación, pero la tensión no puede ser aumentada por encima de la nominal. Esto hace que el flujo, la capacidad de sobrecarga y el momento nominal, disminuyan, operándose en la zona de trabajo de Debilitamiento del Campo, la cual es una zona de Potencia Constante. Esto se observa en la figura 3.10.

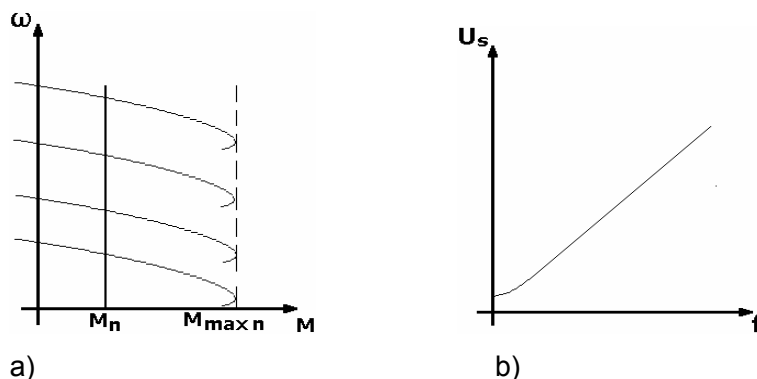


Figura 3.9- Características mecánicas y ley de mando a flujo constante.

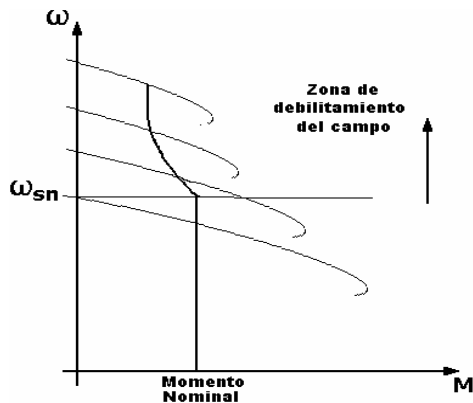


Figura 3.10 - Características mecánicas en las zonas de momento constante y de potencia constante

### 3.5.3. Métodos para variar la velocidad en los motores de inducción.

1. Cambio del número de polos
2. Cambio del deslizamiento
3. Regulación por impulsos
4. Cambio de frecuencia

Con este método de regulación (4) se puede obtener un amplio control de velocidades ampliando la posibilidad de empleo de los accionamientos sobre la base de este tipo de motor en diferentes ramas industriales, con el máximo par disponible en todas las frecuencias con un elevado rendimiento. Si se prolonga la característica al cuadrante generador se puede obtener un frenado muy eficiente por reducción de frecuencia, con una recuperación de energía hacia la red de alimentación. La modificación de la frecuencia se realiza fundamentalmente por medio de variadores estáticos electrónicos que ofrecen una regulación suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas y originando un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes. Digamos que muchas veces el criterio de selección entre el uso de los distintos sistemas de regulación de velocidad pasa fundamentalmente por una consideración de tipo económico. La posibilidad de variación de la velocidad del motor asincrónico surge del análisis de la expresión

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{(P/2)}$$

Donde se ve que la velocidad sincrónica del motor es directamente proporcional a la frecuencia del voltaje de alimentación. el estudio de los convertidores de frecuencia de

motores asincrónico resulta complejo debido a la gran variedad de esquemas de estos convertidores y la complejidad de los procesos que en los mismos ocurren.

### 3.6. Aspectos a tener en cuenta para seleccionar un variador de velocidad:

Para definir el equipo más adecuado para resolver una aplicación de variación de velocidad se deben tener en cuenta los siguientes aspectos.

1. **Tipo de carga:** Par constante, par variable, potencia constante, carga por impulso.
2. **Tipo de motor:** De inducción, rotor jaula de ardilla, ó bobinado, corriente y potencia nominal, factor de servicio, rango de voltaje.
3. **Rango de funcionamiento:** Velocidad máxima y mínima. Verificar necesidad de ventilación forzada del motor.
4. **Par en arranque:** Verificar que no supere lo permitido por el variador. Si supera el 170\*% del par nominal es conveniente sobredimensionar el variador.
5. **Frenado regenerativo:** Carga de gran inercia, ciclo rápido y movimiento verticales requieren de resistencia de frenado exterior.
6. **Condiciones ambientales:** temperatura ambiente, humedad, altura, tipo de gabinete y ventilación.
7. **Aplicación mono ó multimotor:** Prever protección térmica individual por cada motor, la suma de las partes de todos los motores será el nominal del variador.
8. **Consideraciones de la red:** Micro interrupciones, fluctuaciones de voltaje, armónicas, factor de potencia, corrientes de líneas disponibles, **transformadores de aislamiento.**
9. **Consideraciones de la aplicación:** Protecciones del motor por sobre temperatura ó sobrecarga, contactor de aislamiento, bypass, re arranque automático de velocidad.
10. **Aplicaciones especiales:** Compatibilidad electromagnética; ruidos audibles del motor, bombeo, ventiladores y sopladores, izaje, motor con paralelo, etc.

### 3.7. Fomentar el ahorro de energía mediante el uso de variadores de velocidad

Un equipo accionado mediante un variador de velocidad emplea generalmente menor energía que si dicho equipo fuera activado a una velocidad fija constante. Los ventiladores y bombas representan las aplicaciones más llamativas. Por ejemplo, cuando un ventilador es



impulsado por un motor que opera a velocidad fija, el flujo de aire producido puede ser mayor que el necesario. Para ello, el flujo podría regularse mediante una válvula de control dejando estable la velocidad de la bomba, pero resulta mucho más eficiente regular dicho flujo controlando la velocidad del motor, en lugar de restringirlo por medio de la válvula, ya que el motor no tendrá que consumir una energía no aprovechable.

A partir de estas consideraciones se plantea la factibilidad del uso controladores de flujo por medio de variadores de frecuencia en nuestra entidad, para lo cual se realiza una caracterización (**anexo 6**) de los datos nominales de cada uno de los equipos que intervienen en el transporte de los distintos fluidos utilizados en el proceso productivo, se demuestra que existe variación del flujo entregado por estos equipos en dependencia de la potencia generada por las unidades (**anexo 7**), trayendo aparejado que la potencia de estos equipos varíe con las variaciones del flujo (**anexo 8**).

### **3.8. Elección del variador de velocidad.**

Teniendo en cuenta los análisis realizados y el espectro de las potencias de los equipos instalados (**anexo 9**) en la selección de un variador que reúna las características necesarias para que realice trabajo en nuestra entidad entiendo que podemos optar por el modelo Altivar 71, la gama de variadores de velocidad de este modelo permite satisfacer las mayores exigencias. La gama de variadores de velocidad Altivar 71 cubre las potencias de motor comprendidas entre 0,37 y 500 kW con tres tipos de alimentación:

- 200...240 V monofásica, de 0,37 kW a 5,5 kW.
- 200...240 V trifásica, de 0,37 kW a 75 kW.
- 380...480 V trifásica, de 0,75 kW a 500 kW

El variador Altivar 71 integra de forma estándar los protocolos Modbus y CANopen así como numerosas funciones. Estas funciones pueden ampliarse por medio de tarjetas opcionales de comunicación, entradas/salidas e interface de codificador, Toda la gama cumple con las normas internacionales IEC-EN 61800-5-1, IEC-EN 61800-2, IEC-EN 61800-3, está certificada conforme a e, UL, CSA, DNV, C-Tick, NOM 117, GOST y ha sido desarrollada para responder a las directivas sobre la protección del entorno (RoHS, WEEE, etc.). El variador Altivar 71 se inserta en la cadena de seguridad de las instalaciones. Integra la función de seguridad "Power Removal" que prohíbe el arranque intempestivo del motor. Esta función cumple con la norma sobre máquinas EN 954-1 categoría 3, con la norma sobre

instalaciones eléctricas IEC-EN 61508 SIL2 y con el proyecto de norma de accionamiento de potencia IEC-EN 61800-5-2.

### **3.8.1. Herramientas de diálogo**

El variador Altivar 71 se suministra con un terminal gráfico extraíble: El "joystick" de navegación permite un acceso rápido y sencillo a los menús desplegados. La pantalla gráfica muestra de forma clara los textos en 8 líneas de 24 caracteres. Las funciones avanzadas de la visualización permiten acceder fácilmente a las funciones más complejas. Las pantallas de visualización, los menús y los parámetros pueden personalizarse para el cliente o la máquina. Ofrece pantallas de ayuda en línea. Se pueden memorizar y descargar configuraciones, son memorizables cuatro ficheros de configuración. Puede conectarse en enlace multipunto a diversos variadores. Puede instalarse a la puerta de armario con un montaje de grado de protección IP54 o IP65. Se suministra con 6 idiomas instalados de base (español, alemán, inglés, chino, francés e italiano). Se pueden cargar otros idiomas mediante flasheado. Hasta 15 kW, el variador Altivar 71 puede pedirse con un terminal de 7 segmentos integrado. El software de programación PowerSuite permite la configuración, el ajuste y la puesta a punto del variador Altivar 71, así como del conjunto de los demás variadores de velocidad y arrancadores de Telemecanique. Puede utilizarse en conexión directa, a través de Ethernet, por medio de un módem o con una conexión inalámbrica Bluetooth®.

### **3.8.2. Programación rápida Macro configuración**

El variador Altivar 71 ofrece una programación rápida y sencilla por macro configuración que corresponde a aplicaciones o usuarios diferentes: marcha/paro, mantenimiento, elevación, uso general, conexión a redes de comunicación, regulador PID, maestro/esclavo. Cada una de las configuraciones sigue siendo totalmente modificable.

### **3.8.3. Menú "Arranque rápido"**

El menú "Arranque rápido" permite asegurar en pocos pasos el funcionamiento de la aplicación, optimizar el funcionamiento y asegurar su protección.

La arquitectura, la jerarquización de los parámetros y las funciones de acceso directo ofrecen una programación simplificada y rápida, incluso para funciones complejas.

### **3.8.4. Servicios**

El variador Altivar 71 integra numerosas funciones de mantenimiento, de supervisión y de diagnóstico:





1. Funciones de test de variadores integradas con pantalla de diagnóstico en el terminal gráfico extraíble.
2. Imagen de las entradas/salidas.
3. Imagen de la comunicación en los diversos puertos.
4. Función de osciloscopio visualizable con el software de programación Power-Suite.
5. Gestión del parque del variador gracias a los microprocesadores flasheables.
6. Uso de estas funciones a distancia mediante la conexión del variador a un módem a través de la toma Modbus.
7. Identificación de los elementos que constituyen el variador así como de las versiones de software.
8. Históricos de los fallos con el valor de 16 variables cuando aparece el fallo.
9. Flasheado de los idiomas del terminal.
10. Se puede memorizar un mensaje de 5 líneas de 24 caracteres en el variador.

### **3.8.5. Integración en los automatismos**

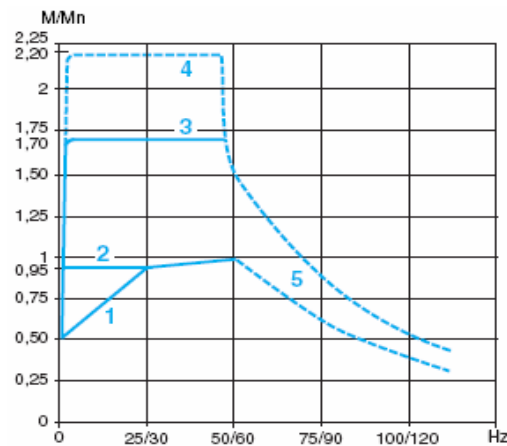
El variador Altivar 71 integra una toma combinada Modbus o CANopen para el control rápido y preciso de los movimientos, la configuración, el ajuste y la supervisión. Una segunda toma permite la conexión de un terminal de tipo Magelis para el diálogo con la máquina. Se puede conectar a otras redes de comunicación mediante el uso de las tarjetas de comunicación. La posibilidad de alimentar por separado el control permite mantener la comunicación (control, diagnóstico) incluso si no existe alimentación de potencia. La tarjeta programable "Controller Inside" transforma el variador en una unidad de automatización: La tarjeta integra sus propias entradas/salidas; también puede gestionar las del variador y las de una tarjeta de extensión de entradas/salidas. Incorpora programas de aplicación concebidos según los lenguajes conforme a la norma IEC 61131-3 que reducen el tiempo de respuesta del automatismo. Permite, gracias a su puerto CANopen maestro, controlar otros variadores y dialogar con módulos de entradas/salidas y captadores. El variador Altivar 71 sólo puede recibir una tarjeta opcional de la misma referencia.

### **3.8.6. Características de par (curvas típicas)**

Las curvas siguientes definen el par permanente y el sobrepar transitorio disponibles, bien con un motor autoventilado, bien con un motor motoventilado. La diferencia reside únicamente en la capacidad del motor para suministrar un par permanente importante inferior a la mitad de la velocidad nominal.

#### **3.8.6.1. Aplicaciones en lazo abierto**

- Motor autoventilado: par útil permanente (1).
- Motor motoventilado: par útil permanente.
- Sobrepar durante 60 s como máximo.
- Sobrepar transitorio durante 2 s como máximo.
- Par en sobrevelocidad, potencia constante (2).

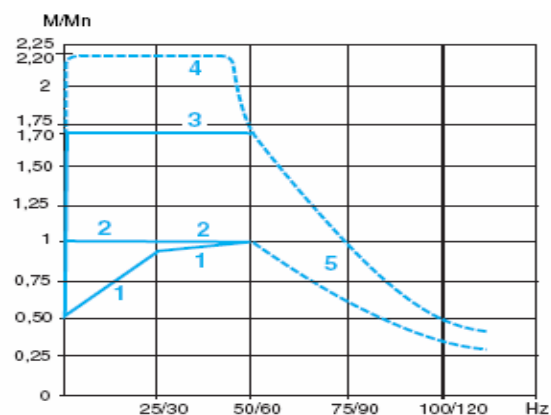


Aplicaciones en lazo abierto.

### 3.8.6.2. Aplicaciones en bucle cerrado

- Motor autoventilado: par útil permanente (1).
- Motor motoventilado: par útil permanente.
- Sobrepar durante 60 s como máximo.
- Sobrepar transitorio durante 2 s como máximo.
- Par en sobrevelocidad, potencia constante (2).

El variador Altivar 71 puede suministrar el par nominal de forma permanente con velocidad cero.



Aplicaciones en lazo cerrado.

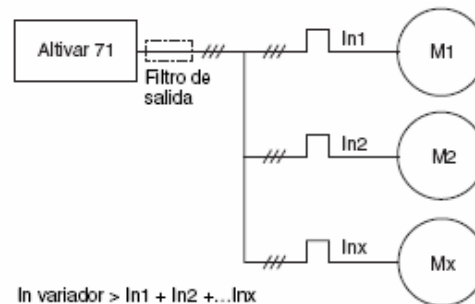
El variador Altivar 71 realiza la protección térmica especialmente estudiada para el funcionamiento del motor de velocidad variable autoventilado o motoventilado. El variador calcula el estado térmico del motor incluso cuando está sin tensión.

Esta protección térmica del motor está prevista para una temperatura ambiente máxima de 40 °C en las proximidades del motor. Si la temperatura alrededor del motor supera los 40 °C, es necesario añadir una protección térmica directa por sondas de termistancias integradas en el motor (PTC). Las sondas se tratan directamente por el variador.

### 3.8.7. Asociación de motores en paralelo

La corriente nominal del variador debe ser superior o igual a la suma de las corrientes de los motores que se van a controlar. En este caso, es preciso prever para cada motor una protección térmica externa por sondas o relés térmicos. A partir de una determinada longitud de cable, teniendo en cuenta todas las derivaciones, se recomienda instalar un filtro de salida entre el variador y los motores o utilizar la función de limitación de sobretensión. Cuando se utiliza en paralelo con varios motores, son posibles 2 casos:

1. Los motores son de potencia equivalente, en este caso, los rendimientos de par siguen siendo óptimos tras ajustar el variador.
2. Los motores son de potencias diferentes, en este caso, los rendimientos de par no serán óptimos para el conjunto de los motores.



$I_n \text{ variador} > I_{n1} + I_{n2} + \dots + I_{nx}$   
Asociación de motores en paralelo.

### 3.8.8. Modelo seleccionado

Motor		Red				Altivar 71			Referencia	Peso
Potencia indicada en la placa (1)		Corriente de línea (2)		Potencia aparente	lcc línea presumible máx.	Corriente máxima permanente (1)	Corriente transitoria máx. durante			
		380 V	480 V	380 V	kA		60 s	2 s		
kW	HP	A	A	kVA		A	A	A		kg
Tensión de alimentación trifásica: 380...480 V 50/60 Hz										
30	40	66	56	43,4	22	66	99	109	ATV 71HD30N4 (3)	26,000
90	125	166	134	109,3	35	179	269	295	ATV 71HD90N4 (5) (6)	60,000
160	250	289	233	190,2	50	314	471	518	ATV 71HC16N4 (5) (6)	110,000



### **3.8.9. Software de programación PowerSuite**

El software de programación PowerSuite presenta las siguientes ventajas:

1. Visualización clara de los mensajes en 5 idiomas (español, francés, inglés, alemán e italiano).
2. Preparación del trabajo en la oficina técnica sin que el variador se conecte al PC.
3. Copia de las configuraciones y los ajustes en disquete o en el disco duro, así como su telecarga en el variador.
4. Impresión.
5. Conversión de los archivos de seguridad de un variador Altivar 58 o Altivar 58F para transferirlos a un variador Altivar 71.
6. Visualización de oscilogramas.

### **3.8.10. Presentación**

La resistencia de frenado permite el funcionamiento del variador Altivar 71 en frenado de parada o en marcha frenada, disipando la energía de frenado. Permite el par máximo de frenado transitorio. Las resistencias se han previsto para montarse en el exterior del armario, la ventilación es natural y las entradas y salidas de aire no deben estar obstruidas, ni siquiera parcialmente. El aire no debe tener polvo, gases corrosivos ni condensación.

### **3.8.11. Mantenimiento, diagnóstico**

El variador Altivar 71 integra nuevas funciones que permiten un mantenimiento rápido y sencillo y, por tanto, una mayor productividad:

#### **3.8.11.1. Comportamiento después de fallo o alarma**

La gestión de las alarmas o la configuración del comportamiento del variador permite aportar acciones correctivas antes de la parada de la máquina.

#### **3.8.11.2. Histórico de los fallos y ayuda**

Tras un fallo, aparece una pantalla de ayuda para identificar rápidamente la causa de la avería. Al aparecer el fallo, magnitudes tales como la velocidad, corriente, estado térmico y contador de tiempo se memorizan y restituyen en el histórico de fallos. Se memorizan los 8 últimos fallos.

#### **3.8.11.3. Menú "IDENTIFICACIÓN"**



El menú "IDENTIFICACIÓN" permite visualizar los números de serie, las versiones de software y gestionar por tanto un parque de aparatos. Esta información, también disponible con el software de programación PowerSuite, puede exportarse a otras aplicaciones de software de tipo base de datos.

#### **3.8.11.4. Funciones de test**

El variador Altivar 71 integra funciones de test:

- a) Detección antes del arranque de un eventual cortocircuito del motor.
- b) Lanzamiento durante las tareas de mantenimiento, a través del terminal gráfico o el software de programación PowerSuite, de los procedimientos automáticos para probar:
  - El motor.
  - Los componentes de potencia del variador.

Los resultados de los tests se indican en el terminal gráfico o con la ayuda del software de programación PowerSuite. Con el terminal gráfico o el software de programación PowerSuite, también es posible escribir y leer un mensaje en el variador.

#### **3.8.11.5. Función de osciloscopio**

El variador Altivar 71 incluye una función de osciloscopio cuyo rastro se visualiza con el software de programación PowerSuite. El software de programación PowerSuite también permite realizar el diagnóstico a distancia mediante el uso de un módem.

#### **3.8.12. Tipos de control motor**

1. Control vectorial de flujo con captador (CVF)

Este tipo de mando permite obtener los mejores resultados de par en estática y en dinámica.

2. Control vectorial de flujo sin captador

En tensión, este tipo de mando puede utilizarse asociado a un único motor o a motores en paralelo. En corriente, los resultados de esta ley son superiores a los de la anterior, pero ésta no puede alimentar los motores en paralelo.

3. Control vectorial de 2 puntos



La zona de funcionamiento a potencia constante puede optimizarse mediante la definición de un punto suplementario en la ley de control. Esta función se utiliza en asociación con motores que ofrezcan una zona de desmagnetización en dos partes. Permite limitar la tensión en las bornas del motor cuando éste se alimente con una red elevada.

#### 4. Ley tensión/frecuencia

Este tipo de mando está especialmente adaptado a los motores especiales (motores de alta velocidad, motores asíncronos sincronizados, etc.). La ley puede ajustarse por 2 puntos o 5 puntos y permite obtener frecuencias de salida de hasta 1.000 Hz.

#### 5. ENA system

Esta ley se reserva a las máquinas excéntricas (prensa, etc.). Permite reducir las solicitudes de la mecánica, el consumo de energía y evitar el uso de la resistencia de frenado.

#### 6. Motor síncrono

Este tipo de mando se reserva exclusivamente a los motores síncronos de imán permanente y fuerza electrónica (f.é.m.) sinusoidal en lazo abierto.



#### **CAPITULO IV: ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO.**

Partiendo del criterio de que en dependencia de la carga entregada por las unidades existe una variación en los flujos de las distintas sustancias que intervienen en el proceso productivo, lo cual trae aparejado que las potencias de los equipos encargados de transportar estos fluidos varíe, también, en dependencia del flujo entregado.

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado se efectúa el cálculo económico por el ahorro de energía que puede significar cuando utilizamos el variador de velocidad en la estación de petróleo de primer impulso donde trabajan normalmente 2 bombas para cada unidad las cuales operan al máximo de su potencia.

En el caso de la unidad 2 para una carga generada de 240 MW necesita consumir 67,56 m<sup>3</sup>/h de combustible, como una sola bomba de combustible solo puede garantizar 52,2 m<sup>3</sup>/h (con una potencia consumida de 26,5 kW) en necesario mantener en servicio una segunda bomba, lo cual da como resultado que el flujo total entregado por este par sea de 104,4 m<sup>3</sup>/h (consumiendo en total 53,0 kW). Como el consumo para la carga entregada es solo de 67,56 m<sup>3</sup>/h se hace necesario recircular un flujo de 36,84 m<sup>3</sup>/h a través de una válvula reguladora, por lo que la potencia consumida por este par de bombas está muy por encima de los valores necesarios.

Para alcanzar los 67,56 m<sup>3</sup>/h cada bomba debe de bombear un flujo de 33,78 m<sup>3</sup>/h, el cual se garantiza con una potencia que será determinada haciendo uso de las leyes de afinidad como se muestra a continuación:

$$Q_1 = 52,2 \text{ m}^3 / h$$

$$Q_1 = 33,78 \text{ m}^3 / h$$

$$P_1 = 26,5 \text{ kW}$$

$$n_1 = 875 \text{ rpm}$$

A partir de estos datos se determina la velocidad a que deben de operar las bombas para garantizar el flujo de 33,78 m<sup>3</sup>/h.



$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Despejando: 
$$n_2 = \frac{n_1 * Q_2}{Q_1} = \frac{875 * 33,78}{52,2} = 567 \text{ rpm}$$

Una vez calculada la nueva velocidad, se determina la potencia esperada que debe consumir cada bomba como sigue:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3$$

Despejando: 
$$P_2 = \frac{P_1}{\left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3} = \frac{26,5}{\left( \frac{875}{567} \right)^3} = 7,21 \text{ kW}$$

Como operan dos bombas la potencia consumida para estas nuevas condiciones es de 14,42 kW.

El ahorro en potencia del par de bombas se determina como la diferencia que existe entre la potencia empleada actualmente y la potencia esperada al controlar el flujo con el variador de frecuencia, el cual asciende a 38,58 kWh.

$$\text{Ahorro en potencia} = \text{Potencia actual} - \text{Potencia esperada} = 50,0 - 14,42 = 38,58 \text{ kW}$$

Dado que estas bombas operan las 24 horas del día y en el año se mantienen en servicio unas 7680 horas, se determina el ahorro por consumo como sigue:

$$\text{Ahorro por consumo}_{\text{anual}} = \text{Ahorro en potencia} * \text{Tiempo de operación}_{\text{anual}}$$

$$\text{Ahorro por consumo}_{\text{anual}} = 38,58 * 7680 = 296294,4 \text{ kWh/año}$$

Teniendo en cuenta que el costo del kW generado es de \$ 0,0578 se determina el ahorro económico anual como sigue.

$$\text{Ahorro económico}_{\text{anual}} = \text{Ahorro por consumo}_{\text{anual}} * \text{costo kW}$$

$$\text{Ahorro económico}_{\text{anual}} = 296294,4 * 0,0578 = 17125,82 \text{ \$/año}$$





Teniendo en cuenta que el costo de inversión del variador de velocidad es de \$ 800.00, se determina el tiempo de recuperación de la manera siguiente:

$$\text{Tiempo recuperación} = \frac{\text{Costo inversión}}{\text{Ahorro económico anual}} = \frac{800}{17125,82} = 0,046 \text{ años}$$

Como se puede apreciar la recuperación de esta inversión se alcanza en los primeros 5 meses de su puesta en servicio.



## Conclusiones

Los resultados de la aplicación de controladores de flujo con variadores de velocidad por frecuencia muestran la conveniencia de instalar este adelanto científico en el sistema de bombeo de combustible de la CTE . Los ahorros de energía por este medio serian significativos en la eficiencia de la producción de energía eléctrica. Estos resultados indican las ventajas de utilizar este dispositivo de control en motores que no necesiten operar a velocidad nominal en sus aplicaciones durante mucho tiempo.

Las tareas desarrolladas permitieron reconocer:

- La posibilidad y necesidad de mejorar la utilización de los datos alrededor del control de velocidad por medio de variador de frecuencia.
- La insuficiencia para canalizar informaciones efectivas de las estructuras de presentación y análisis de datos en el ESCADA para accionamientos y dispositivos de control relacionado con los sistemas de combustible y sistema de condensados de la CTE Lidio Ramón Pérez.
- Con el uso de los variadores de velocidad en los equipos de mayor potencia garantizamos que los mismos operen a velocidades acordes a los valores de carga que permitan asegurar la potencia entregada por las unidades generadoras consumiendo valores de corriente acordes a esta demanda.

Y a partir de ella se logro.

- Una propuesta de estructura que relaciona niveles dispositivos y procesos concurrentes sobre el bombeo de combustible y condensado.
- Establecer nexos primitivos entre la programación interna del variador (modulación) y transferencias paramétricas de datos interprocesos.



## Recomendaciones

Con este trabajo se pretende constituir en nuestra CTE una base de análisis para el estudio de otros sistemas donde es posible la implementación de variadores de velocidad con las posibilidades de obtener resultados satisfactorios y personal preparado para estos equipos, por lo cual se recomienda.

- La adquisición e implementación de variadores de velocidad para aquellos equipos de mayor potencia en la CTE
- Aprovechar la superación universitaria de nuestros trabajadores con el fin de recomendarles investigaciones al servicio de la planta y de nuestra sociedad.
- Realizar el estudio de otros sistemas y máquinas eléctricas donde es posible el funcionamiento de estos dispositivos.
- Preparar al personal de mantenimiento y personal técnico para que aumenten su conocimiento en estos equipos.



## Bibliografía

1. Costa Montiel, Angel. Síntesis de los sistemas de control de movimiento en los accionamientos eléctricos. CIPEL, 2005.
2. Kostenko. A. Plostriki. Maquinas eléctrica y transformadores Editorial pueblo y educación .Ciudad de la Habana, 1990.
3. Kuznetson Fundamento de electrónica Editorial MIR Moscú, 1967.
4. Morera Hernandez, Mario: Accionamientos eléctrico automatizado .Editorial pueblo y educación.
5. Martínez Cautín, Osmanda. Trabajo de Diploma. Estudio de la eficiencia de accionamiento de bombas de hidrotransporte de suspensiones no Newtonianas. Facultad Metalurgia Electromecánica. Departamento Eléctrico, 2004.
6. Msc. Jorge Luis Díaz Rodríguez. Ing. Nidal Alhami. \* Dr. Jorge Sánchez Bermúdez. Msc. Imandra Rojas Díaz. Accionamiento Eléctrico (Control Vectorial por Campo Orientado) y Control adaptable (MRAC
7. Normas y procedimientos de la CTE Lidio Ramón Pérez.
8. Rojas Purón, L. Trabajo de Tesis. Accionamiento Eléctrico Asíncrono para el Transporte Eficiente de Pulpa Laterita. Facultad Metalurgia–Electromecánica. Departamento de Ingeniería Eléctrica. ISMM, 2003.
9. Richard Moss Jared. Propuesta de estructura informativa de accionamientos automatizado con variador, 2006.
10. Voldek. A. I Maquinas Eléctricas tomo II

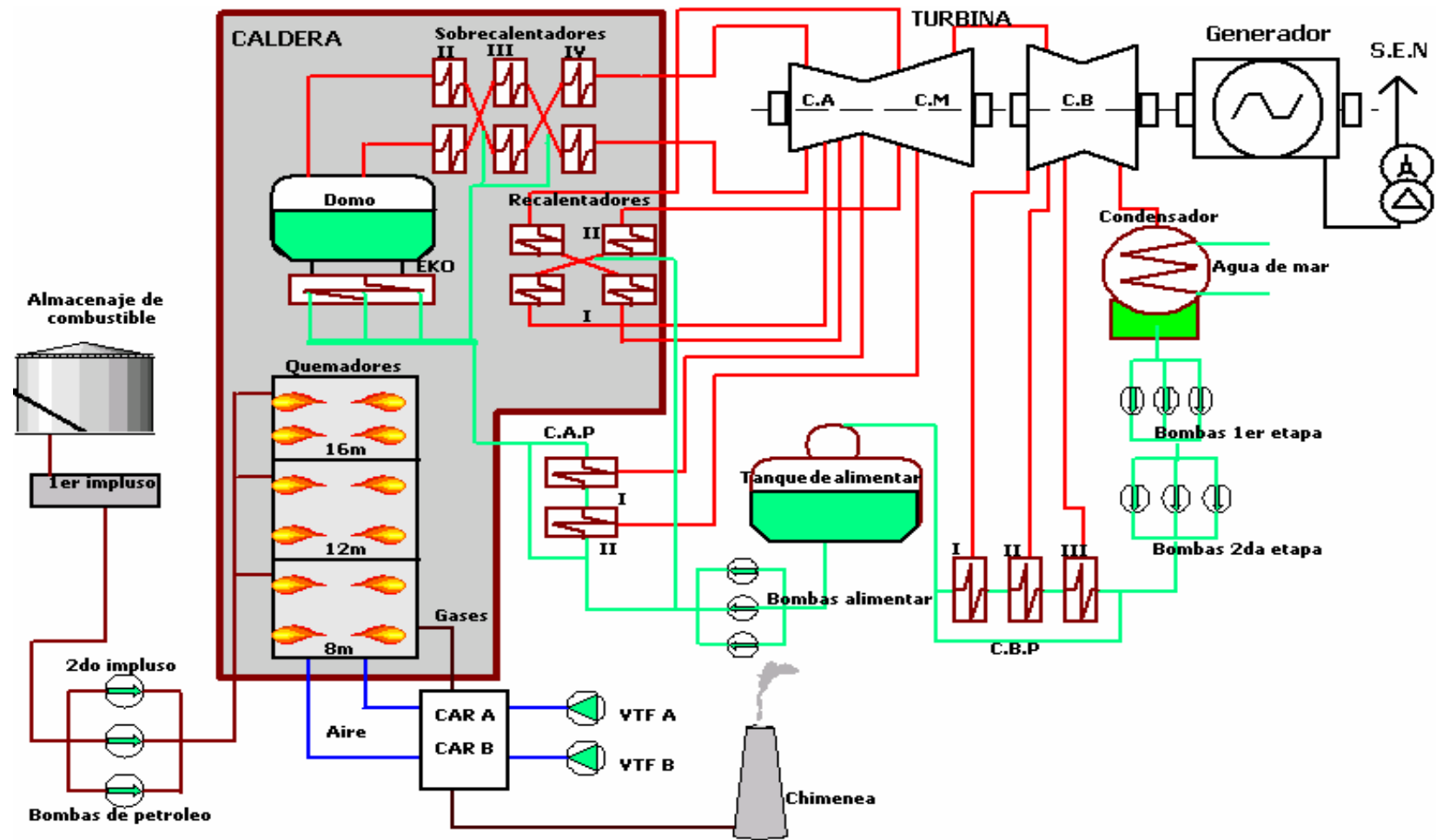
### Páginas Web

11. <http://www.biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/JornadasPreservacionVI/049.pdf>
12. <http://www.Cujae.edu.cu/clca/trabajo/auto46.pdf>
13. <http://www.cotrol.autm.com>
14. [http://www.es.wikipedia.org/wiki/Variador\\_de\\_velocidad](http://www.es.wikipedia.org/wiki/Variador_de_velocidad)
15. <http://www.leroy-somer.com/pdf/lsnews/LSNews19Esp.pdf>.
16. [http:// www.powerelectronics.es](http://www.powerelectronics.es)
17. [http:// www.power-electronics.com](http://www.power-electronics.com)



18. [http://www.schneider-electric.com.ar/recursos/contacto/contacto\\_44.PDF](http://www.schneider-electric.com.ar/recursos/contacto/contacto_44.PDF)

### Anexo 1: Flujo tecnológico de la CTE Lidio Ramón Pérez

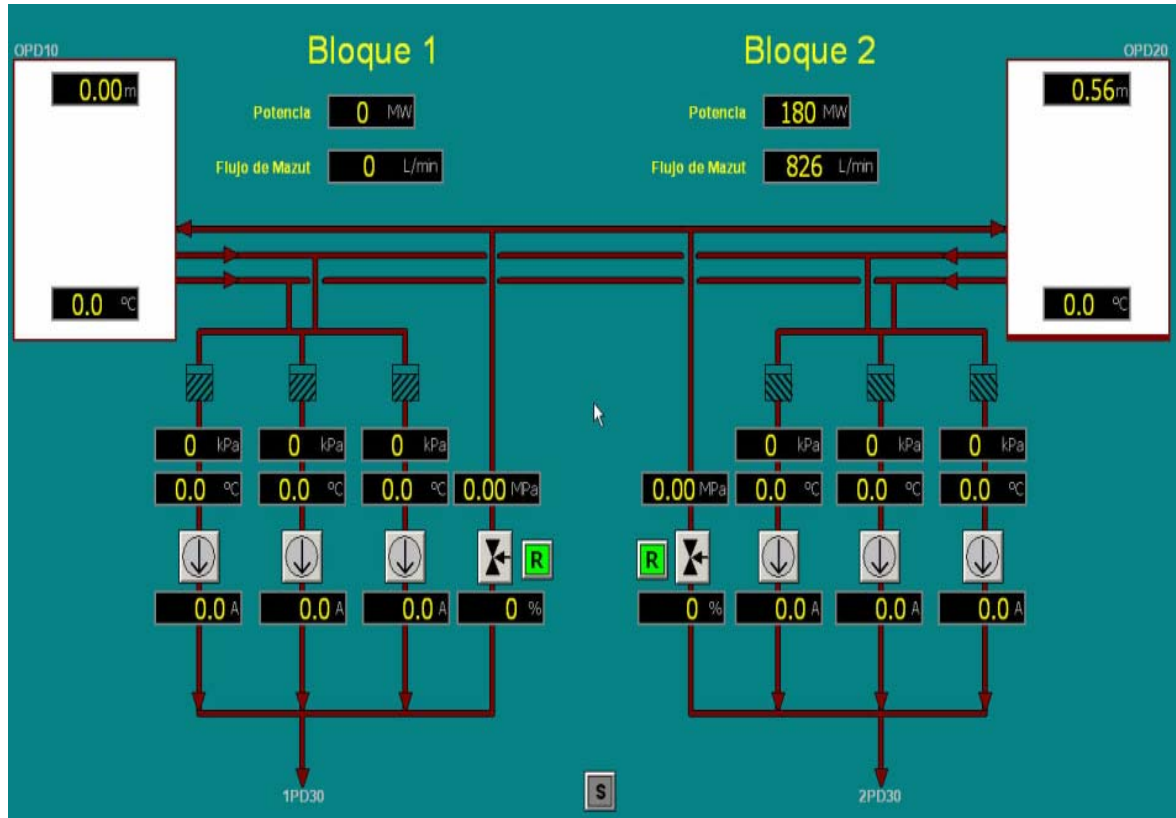




## **Anexo 2: Monolineal**



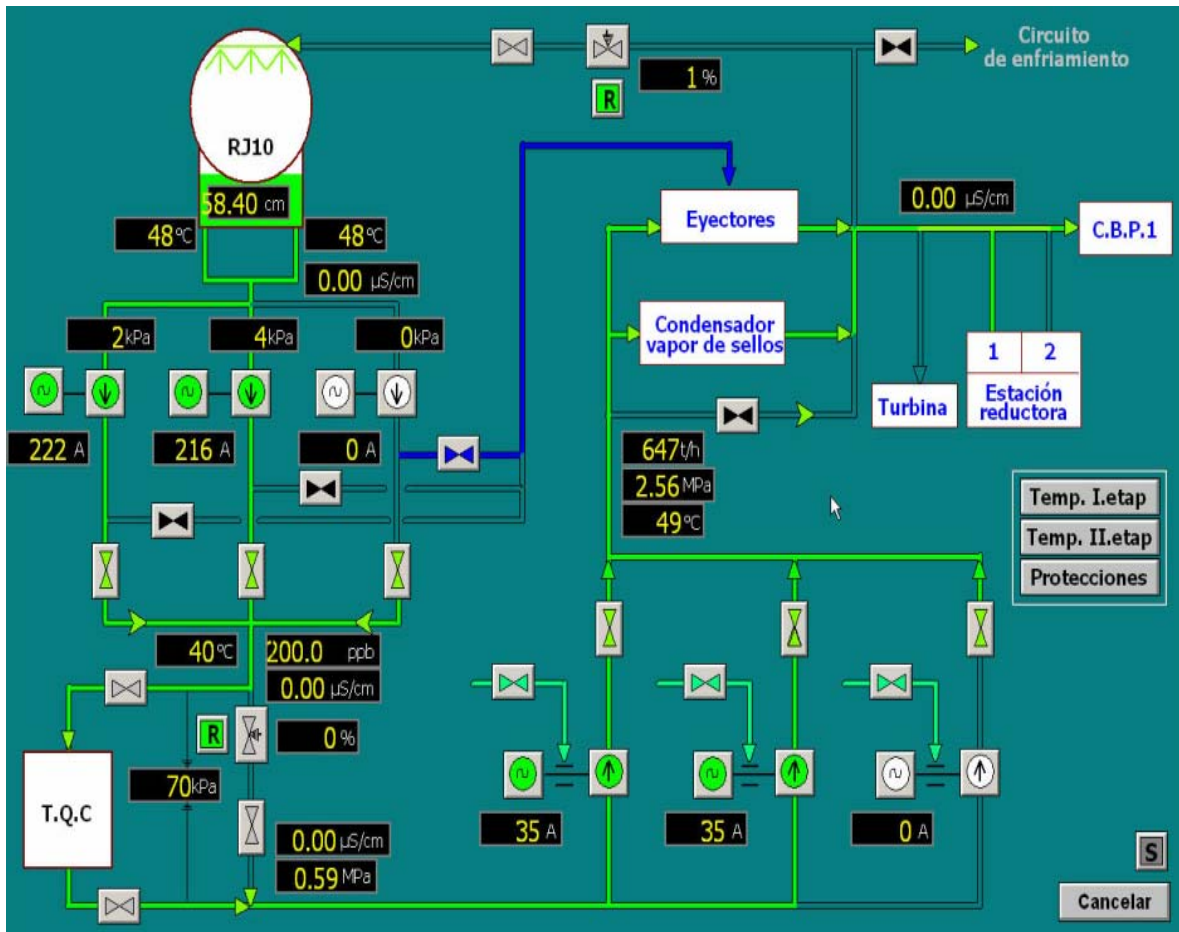
**Anexo 3: Esquema del sistema de suministro de combustible primer impulso de la CTE  
Lidio Ramón Pérez.**





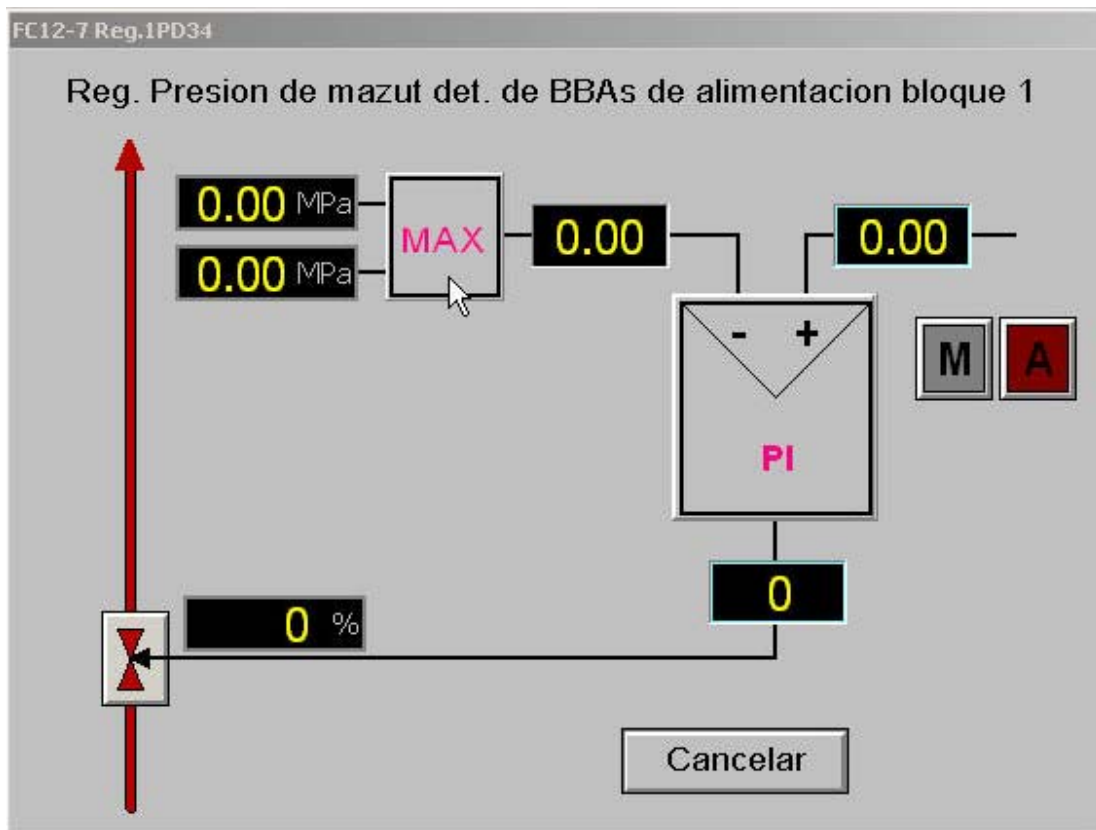


Anexo 4: Esquema del sistema de condensado de la CTE Lidio Ramón Pérez.





**Anexo 5: Lazo de regulación en combustible primer impulso para mantener fija la presión del combustible en la succión de las bombas de segundo impulso.**



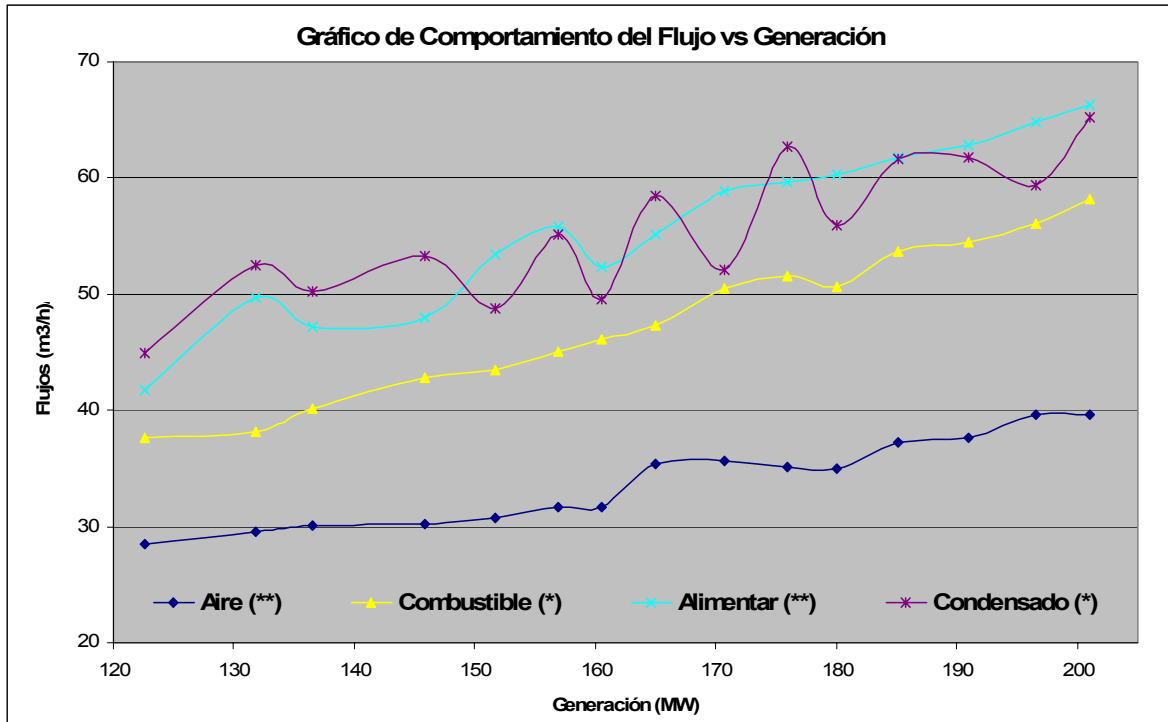


**Anexo 6: Caracterización de los datos nominales de los equipos de transporte de fluidos.**

Equipo	Función	Cantidad E/S	Flujo (m <sup>3</sup> /h)	Potencia (kW)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (rpm)
Bombas de combustible	Suministrar a la caldera el combustible necesario para la combustión, a la presión y temperatura adecuada.	2 de 1 <sup>ra</sup> etapa 2 de 2 <sup>da</sup> etapa	52,2 42,0	22,5 82	380 380	53 162	882 1175
Ventiladores de tiro forzado	Garantizar a la caldera el aire necesario para la combustión.	2	423 200	2000	6000	232	1190
Ventiladores recirculadores de gases	Recircular los gases de la combustión para el enfriamiento del horno y atemperamiento del vapor recalentado.	2	126000	250	6 000		1188
Bombas de circulación	Suministrar el agua de mar necesaria para la condensación del vapor que llega al condensador proveniente de la turbina.	2	18000	710	6000	91	445
Bombas de enfriamiento	Encargadas de hacer llegar el agua de enfriamiento a todos los equipos dinámicos que la usen, así como a los intercambiadores de calor que la necesiten.	1	1 422	300	6 000	38,7	888
Bombas de condensado	Transportar el condensado acumulado en el condensador hacia el tanque de alimentar, haciéndolo pasar por los CBP para su calentamiento.	2 de 1 <sup>ra</sup> etapa 2 de 2 <sup>da</sup> etapa	421,2 410,4	135 370	380 6 000	262 45,4	1180 1777
Bombas de alimentar	Trasegar el agua desde el tanque de alimentar, pasándola por los CAP, a la caldera para la incorporación al ciclo de generación de vapor	2	435,9	4500	6000	510	3580



**Anexo 7: Gráfico del comportamiento de los flujos entregados por los equipos en dependencia de la potencia generada.**

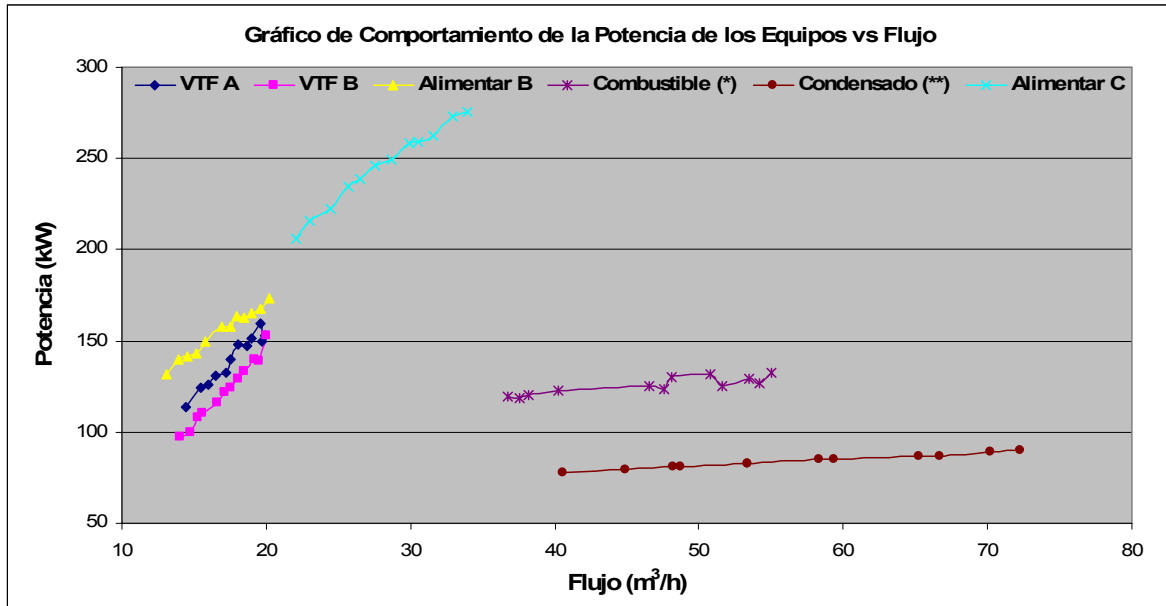


(\*) - En servicio cuatro bombas para garantizar este flujo

(\*\*) - En servicio dos bombas para garantizar este flujo



### Anexo 8: Gráfico del comportamiento de la potencia de los equipos en dependencia del flujo entregado.



(\*) Las mediciones de combustible tiene en cuenta que se encuentran en servicio dos bombas de primera etapa y dos de segunda etapa (todas de 380 V) independientemente del flujo demandado por la caldera ya que estas poseen recirculaciones que garantizan que el combustible no utilizado en la caldera recircule a los cabezales de succión de ambas etapas.

(\*\*) Las mediciones de condensado tienen en cuenta que se encuentran en servicio dos bombas de primera etapa de 380 V y dos de segunda etapa de 6 kV, las cuales entregan un flujo constante y este es regulado por una válvula reguladora en dependencia de la demanda del bloque y el condensado que no se consume retorna nuevamente al condensador.



### Anexo 9: Gráfico del comportamiento de la potencia instalada en los equipos de flujo

