



República de Cuba
Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez

**TESIS EN OPCION AL GRADO CIENTIFICO DE MASTER EN CIENCIAS
TECNICAS**

**Titulo: Procedimiento para evaluar eficiencia en motores de Ventiladores de
tiro Forzado en Central Eléctrica Felton.**

Autor: Ing. Carlos G. Góngora Tamayo

Tutor: Dr. Luís Delfín Rojas Purón

Moa- 2008

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE
MASTER EN CIENCIAS TÉCNICAS**

**Procedimiento para evaluar eficiencia en motores de Ventiladores de tiro
Forzado en Central Eléctrica Felton.**

Ing Carlos G. Góngora Tamayo

Moa – 2008

Pensamiento

“Un País con Energía es un País con Futuro”

¿Y qué es el hombre sin energía? ¿Nada, nada en absoluto?

Mark Twain

Dedicatoria

A mis padres, mi querido hijo y esposa.
A toda mi familia,
A mi inolvidable tutor.
A mis buenos amigos,
y a todas aquellas personas
que de una forma u otra me apoyaron y estuvieron conmigo en los buenos y malos
momentos.

Deseo hacer llegar mis más sinceros agradecimientos:

A mi tutor por su ayuda desinteresada Dr. Luís Rojas Purón, quien ha sido mi guía y ayuda durante todo el tiempo que duró la realización de este trabajo. Le agradezco además por todos los conocimientos que me legó, Muchas Gracias.

A mi esposa Marianela Torres Escobar, a mi hijo Carlos Rafael por estar siempre a mi lado y por apoyarme y ayudarme en lo que necesité.

Y a todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron y que no hayan sido mencionadas aquí, mil gracias.

Gracias a todos

RESUMEN

La presente investigación aborda la problemática de mejorar la eficiencia de los motores de los ventiladores de tiro forzado en la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez de Felton. Esto se consigue mediante el cambio del nivel de tensión de trabajo de los motores eléctricos. La metodología ofrece una evaluación de las pérdidas del motor de inducción a diferentes condiciones de operación y su efecto en la eficiencia. Para un 50% de la carga del ventilador se puede ahorrar anualmente \$ 5 839.68 CUC, mientras que para el 75 % la cuantía es de \$ 4 963.42 CUC y para el 100% asciende a \$ 4 050.2 CUC

El trabajo está estructurado en tres Capítulos:

Capítulo I: “FUNDAMENTACIÓN TEÓRICO-METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN”, donde se realiza una caracterización del Motor de Inducción acoplado al ventilador de tiro forzado B del bloque 1 de la CTE.

Capítulo II: “METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE CARGA DE LOS MOTORES DE LOS VENTILADORES DE TIRO FORZADO DE LA CTE”, se caracteriza el régimen de trabajo de los motores a partir de las mediciones de las variables que se necesitan.

Capítulo III: “RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN DEL MOTOR DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO”, se describen los resultados de la experimentación del motor eléctrico que conforma el sistema de accionamiento eléctrico del ventilador de tiro forzado.

ÍNDICE

	página
Introducción.....	1
Capítulo I.	
Fundamentación teórico-metodológico de la investigación.....	6
Introducción.....	6
Caracterización del sistema de accionamiento del ventilador de tiro forzado B del bloque 1 de la CTE.....	6
Trabajos Precedentes.....	15
Conclusiones parciales.....	22
Capítulo II	
Metodología para el análisis del régimen de carga de los motores ventiladores de tiro forzado de la CTE.....	23
Introducción.....	23
Planificación de los experimentos.....	24
Factor de carga.....	33
Variaciones de tensión.....	34
Cuantificación del régimen de trabajo - VTF-A y VTF- Bloque No1...	37
Calentamiento del motor durante su explotación.....	44
Procedimiento para evaluar la eficiencia del motor.....	46
Conclusiones parciales.....	49
Capítulo III	
Resultados experimentales de la investigación del accionamiento del ventilador de tiro forzado.....	50
Introducción.....	50
Identificación de los parámetros del accionamiento eléctrico.....	53
Descripción de los resultados.....	54
Conclusiones parciales.....	61
Valoración económica, ecológica y social.....	62
Valoración económica.....	62

Valoración ambiental.....	63
Valoración social.....	64
Conclusiones.....	65
Recomendaciones.....	66
Referencias bibliográficas.....	67
Anexos.....	69

INTRODUCCIÓN

De todo es conocida la importancia que reviste la Industria Eléctrica para cualquier país; ya que esta constituye un factor estratégico de su funcionamiento interno; de su estabilidad política y de su desarrollo económico e industrial; de ahí que el garantizar la máxima confiabilidad y la eficiencia de sus instalaciones sea una tarea principal del colectivo técnico y administrativo en cada una de las mismas.

En nuestros días es imposible imaginarnos la vida sin electricidad, la energía es el motor de nuestro mundo: mueve nuestros cuerpos, calienta nuestras casas, ilumina nuestras calles, alimenta nuestras industrias, desplaza nuestros vehículos y, en definitiva, es la base de toda la actividad que se produce a nuestro alrededor.

La riqueza y calidad de vida de los países está directamente relacionada con el uso de los recursos energéticos. El consumo de energía se ha tomado como indicador de desarrollo: a más consumo, más desarrollo. Una relación que tendrá que cambiar en el futuro inmediato sobre nuevos conceptos.

El espectacular avance de la humanidad en los dos últimos siglos se debió en gran medida a la posibilidad de acceder a fuentes masivas y baratas de energía. En un principio fue el carbón, luego el petróleo y el gas. La producción industrial a gran escala, el transporte transcontinental y las comodidades que disfrutamos en nuestros hogares dependen de la utilización de energía. Sin embargo, las bases de este modelo ya no podrán sobrevivir por un largo período.

La central eléctrica es una instalación energética que sirve para transformar la energía natural en energía eléctrica. El tipo de central eléctrica se determina ante todo por la especie de energía natural que utiliza. Las más utilizadas son las centrales termoeléctricas (CCEE), en las que se usa la energía térmica que se libera al quemar combustible orgánico (carbón, petróleo, gas y otros). En las centrales termoeléctricas se genera cerca del 76% de la energía eléctrica

producida en el planeta, mientras que en Cuba se genera el 78 %, siendo el petróleo el principal recurso energético para la producción de energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica de forma eficiente tiene un significado especial, pues de ella depende todo el quehacer económico y social en los momentos actuales.

La central termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” consume 13.8 MW como insumo para generar 250 MW. Cada bloque posee un transformador de 25 MVA, denominado transformador de consumo propio, este transformador alimenta a dos barras de 6 kV donde están conectados los 15 motores, la potencia varía entre 300 y 4500 kW y además están conectados tres transformadores que entregan por su secundario 380 V para alimentar en lo fundamental electroválvulas y electrobombas propias del bloque. Para el proceso de arranque existe un transformador de 50 MVA, denominado de arranque alimentando la barra común de 6 kV y que a su vez está enlazada con las barras propias de 6 kV de cada bloque, luego del arranque y cuando el bloque ya genera una potencia superior a los 50 MW, entonces se hace el cambio para el transformador de consumo propio.

La producción de energía utilizando menos recursos y su ahorro es de vital importancia para un país como el nuestro que no tiene grandes reservas de petróleo, que cada vez es mayor el precio del petróleo en el mercado internacional, y que llevamos casi 50 años bajo un bloqueo económico impuesto por la mayor potencia imperialista de todos los tiempos.

Considerando que de la energía total generada en el mundo, aproximadamente el 60% la consumen los motores eléctricos y aproximadamente el 50 % de esa energía eléctrica es consumida por los motores de inducción trifásicos, se puede afirmar que el motor eléctrico más usado es el asíncrono de jaula de ardilla; Por eso surgió entre las medidas más prometedoras para el ahorro de la energía, establecer el incremento obligatorio de la eficiencia de estos motores.

Este propósito se logra sustituyendo los actuales, por motores de alta eficiencia; Aplicación de la Electrónica de potencia, la elección correcta de la potencia de los motores en los accionamientos industriales, y el mantenimiento predictivo.

El término eficiencia ha sido desde siempre parte de la ingeniería en todos sus campos, sin embargo ahora que ya iniciamos el tercer milenio ha adquirido una mayor importancia. La disponibilidad de recursos naturales y energéticos, que es cada vez menor, la necesidad de un proceso de desarrollo sostenible para nuestra sociedad, así como la toma de conciencia que somos parte de un gran ecosistema, han hecho que en toda actividad que desarrollemos busquemos la eficiencia.

Por otra parte el nivel de producción de la energía eléctrica en Cuba está sujeto a los cambios en la demanda que varía de acuerdo a la época del año, a los días de las semanas, a las horas del día y los cambios en el régimen de producción y los ciclos de mantenimiento que requieren nuestras unidades, de acuerdo a su tecnología.

La forma de energía, de uso más diversificada en el país y cuyo costo total tiene mayor influencia en el balance financiero, es la energía eléctrica. Por ello, en el Programa Nacional de Desarrollo de las Fuentes de Energía se señala que la producción continua de esta, ha sido y seguirá siendo un factor decisivo en la recuperación económica, por lo que se presta gran importancia a la explotación de las unidades generadoras instaladas en todo el país.

Cerca del 37 % de los combustibles derivados del petróleo que se consumen en el país se destinan a la generación de energía eléctrica, lo que ha llegado a representar más de 400 millones de dólares anuales.

Trabajar para disminuir este costo mediante el Incremento de la Eficiencia en la producción del kW/h generado en las CCEE, es un objetivo del Programa Nacional de Desarrollo de las Fuentes de Energía en el país. Esto puede lograrse a través

de la reducción de los consumos específicos de combustible, en la reducción del costo del ciclo de mantenimiento, disminuyendo las fallas imprevistas, aumentando la disponibilidad y confiabilidad de las instalaciones energéticas, etc.

Las inversiones para la modernización de las Unidades Generadoras de Cuba y la aplicación de tecnologías de punta en el Mantenimiento de estas son clasificadas como medianas y de bajos períodos de recuperación, con un alto y favorable impacto económico, social y medioambiental.

Problema científico: Necesidad de mejorar los parámetros de operación de los motores de inducción acoplados a los Ventiladores de Tiro Forzado en su régimen de explotación en las condiciones de la termoeléctrica de Felton.

Objeto de estudio: Motores de inducción de los Ventiladores de Tiro Forzado de la CTE “Lidio Ramón Pérez”

Campo de Acción: Comportamiento energético de los motores de los Ventiladores de Tiro Forzado de la CTE “Lidio Ramón Pérez”.

Objetivo General: Desarrollar un procedimiento que permita evaluar el régimen de explotación de los motores de inducción de los Ventiladores de Tiro Forzado de la CTE de Felton.

Objetivo específicos:

- Elaborar una base de datos suficiente que permita evaluar el régimen de explotación de los motores de inducción de los VTF de la CTE de Felton y que pueda ser aplicada a todos los motores de inducción de 6 kV.
- Establecer un procedimiento para evaluar la eficiencia del motor de inducción acoplados a los VTF.

- Ofrecer medidas para el mejoramiento de los índices de eficiencia de los motores de inducción de los VTF.

A partir de este diseño metodológico se definen las siguientes tareas de investigación:

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el régimen de explotación de los motores de inducción con tensión de alimentación de 6000 kV y alta potencia.
- Diagnosticar el objeto para caracterizar el problema de una manera científica.
- Establecer un procedimiento para la evaluación de la eficiencia de los motores de inducción.
- Obtener la valoración técnico-económica de los motores de inducción utilizados en los ventiladores de tiro forzado.
- Proponer las medidas para mejorar la eficiencia energética en los motores de inducción utilizados en los ventiladores de tiro forzado.

Se plantea como hipótesis de trabajo que con la caracterización del régimen de explotación de los motores de inducción acoplados a los Ventiladores de Tiro Forzado utilizados en el proceso tecnológico de la CTE de Felton, se puede establecer el comportamiento adecuado de las variables para mejorar los índices de consumo.

Los métodos de investigación utilizados son los siguientes:

1. Método de investigación documental y bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Método de investigación experimental a escala industrial para describir, caracterizar el objeto de estudio y sus principales regularidades.
3. Método de investigación estadístico.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICO-METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción.

1.2 Caracterización del sistema de explotación del motor de inducción del ventilador de tiro forzado B del bloque 1 de la CTE.

1.3 Trabajos Precedentes.

1.4 Conclusiones parciales.

1.1 Introducción

El marco teórico-metodológico como parte importante en la caracterización del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos presentes en la investigación a realizar.

El objetivo del presente capítulo es establecer el Marco Teórico-Metodológico de la investigación, a partir del estado del arte del tema basado en el análisis de los trabajos precedentes, la metodología seguida para su ejecución así como la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio: accionamiento eléctrico del ventilador de tiro forzado de la CTE "Lidio Ramón Pérez" de Felton.

El marco teórico del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos que están presentes en la investigación.

1.2 Caracterización del sistema del sistema de explotación del motor de inducción del ventilador de tiro forzado B del bloque 1 de la CTE.

Los accionamientos eléctricos con ventiladores de tiro forzado están presentes en el proceso tecnológico para la producción de la energía eléctrica en las centrales térmicas.

El esquema del proceso tecnológico simplificado de la CTE de Felton se muestra en la figura 1.1.

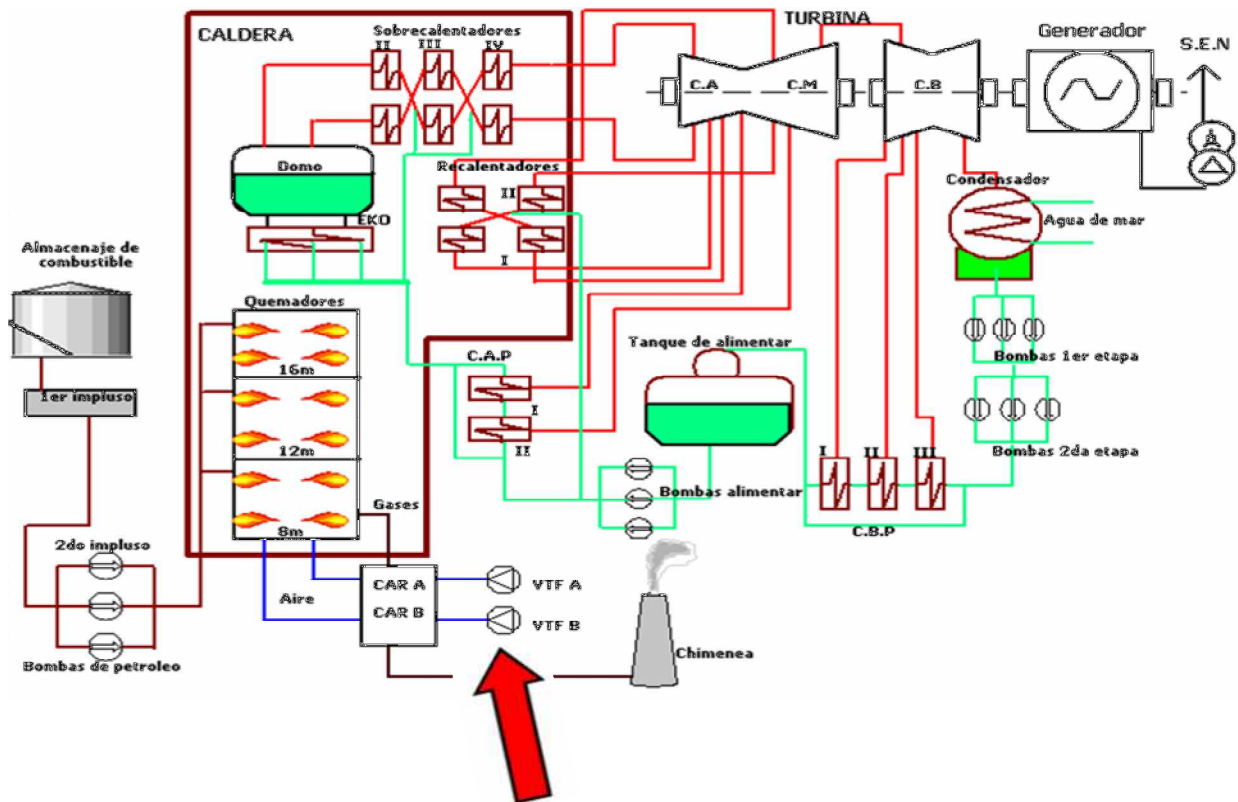


Figura 1.1 Esquema del proceso tecnológico simplificado de la CTE de Felton.

En la figura 1.1 la flecha indica la posición del motor de inducción acoplado al ventilador de tiro forzado (**VTF B**) en el esquema del proceso tecnológico de la CTE, el cual es el objeto de estudio de nuestra investigación.

A continuación reflejamos de manera simplificada el proceso tecnológico para la producción de la energía eléctrica y la intervención de los VTF en este proceso:

La caldera consta de doce quemadores tangenciales, ubicados en tres niveles en las esquinas del Horno, cada uno puede suministrar hasta 5 700 Litros de combustible por hora, para la pulverización son auxiliados con vapor de agua a una presión de 1 MPa y 250 °C.

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: A y B, el aire se precalienta 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 de temperatura.

El vapor producido en la caldera llega a la turbina a través de las tuberías de alta presión controlada por 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 para volver a elevar su temperatura, retornando al cilindro de media presión, desde el cilindro de media presión pasa al cilindro de baja presión desde donde va hacia el condensador, 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, 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.

De las mediciones realizadas, se resumen los siguientes aspectos:

- El motor eléctrico que acciona al ventilador de tiro forzado opera con variabilidad en su carga, debido a las especificidades actuales del proceso tecnológico, cuyos rendimientos se ven afectados.
- La cantidad de aire succionado por el ventilador es regulado por medio de las compuertas de admisión, la magnitud del caudal depende de la potencia de trabajo de la caldera, la cual esta en correspondencia con la potencia de salida del turbogenerador. En condiciones de máxima generación estas compuertas están totalmente abierta, es decir el % de apertura depende de la cantidad de aire que necesite la caldera.
- El ventilador tiene compuerta de descargas, las cuales en el momento de arranque del motor se encuentran cerradas, al igual que las compuertas de admisión; luego en condiciones de trabajo nominal estas compuertas de descargas no se cierran.
- En valor de la tensión de alimentación al motor eléctrico tiene como promedio un valor que supera el 3,6 % el valor nominal.
- El proceso de arranque de este motor de conjunto con en VTF tiene una duración en el tiempo de 19 s.

Tabla 1.1 Datos promedios de los accionamientos eléctricos de los ventiladores de tiro forzado de las CTE.

Componente	Tipo	Parámetros nominales	Tiempo de trabajo promedio [h]
Motor de Inducción	Trifásico con el rotor de jaula de ardilla	U = 6 000 V P = 2 000 kW Cosφ = 0,87 n=1200-1190rpm η = 95%	T _{tr} = 8760 h
Transmisión mecánica	Acoplamiento directo al eje	Para motores de grandes potencia η=96 %	T _{trt} = 8760 h
Ventilador de tiro forzado	centrifugo	P = 1825 kW n=1180 rpm Q=137m ³ /s Diám. del Volante = 2300 mm t = 32 °C η = 90 %	T _{trt} = 8760 h
Flujo	aire	ρ = 10 Kpa Densidad =1,1585 Kg/m ³ t = ambiental	-

(FUENTE, C Góngora, 2008)

Un sistema electromecánico de conversión tiene tres partes esenciales:

- Un sistema eléctrico.
- Un sistema mecánico.
- Un campo que los une.

Un dispositivo electromecánico de conversión de energía es esencialmente un medio de transferencia entre un lado de entrada y uno de salida, como lo muestra la fig. 1.2. En el caso de un motor, la entrada es la energía eléctrica, suministrada por una fuente de poder y la salida es energía mecánica enviada a la carga, en nuestro caso, un ventilador.



Figura 1.2 Diagrama de bloques de dispositivos electromecánicos de conversión de energía, (motor).

La alimentación eléctrica al objeto de estudio, se garantiza durante el proceso de arranque a través de un transformador de uso común para ambos bloques, en la figura 1.3 se muestra el esquema monolineal.

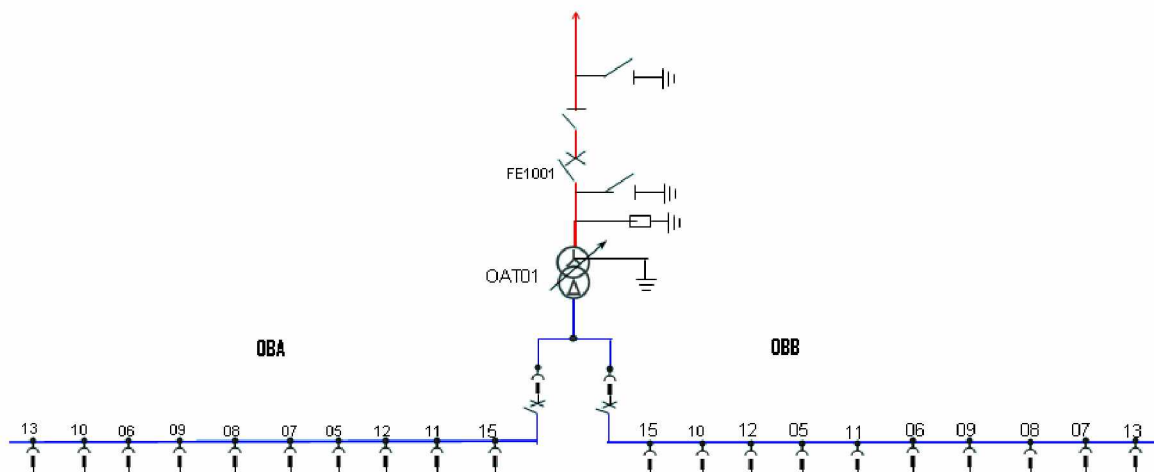


Figura 1.3 Esquema monolineal del transformador de arranque y sus barras.

El transformador es alimentado a través de una línea de 110 kV y entrega por su secundario 6 000 V (parámetros nominales) a las respectivas barras OBA y OBB, posee una potencia nominal de 50 MVA, desde las barras común se enlaza la barra de consumo propio del bloque que se trate, luego del arranque, y cuando el generador se encuentre al 20% (50 MW) de su capacidad de generación, entonces se realiza el cambio para el transformador de consumo propio, el mismo

tiene una potencia de 25 MVA y es alimentado del Generador de su bloque con una tensión primaria de 15,75 KV y una tensión secundaria nominal de 6 KV; ambos transformadores: el de uso común y el de consumo propio tienen mecanismo de regulación de tensión bajo carga.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama monolineal de la sección 1BB de la subestación de 6 KV.

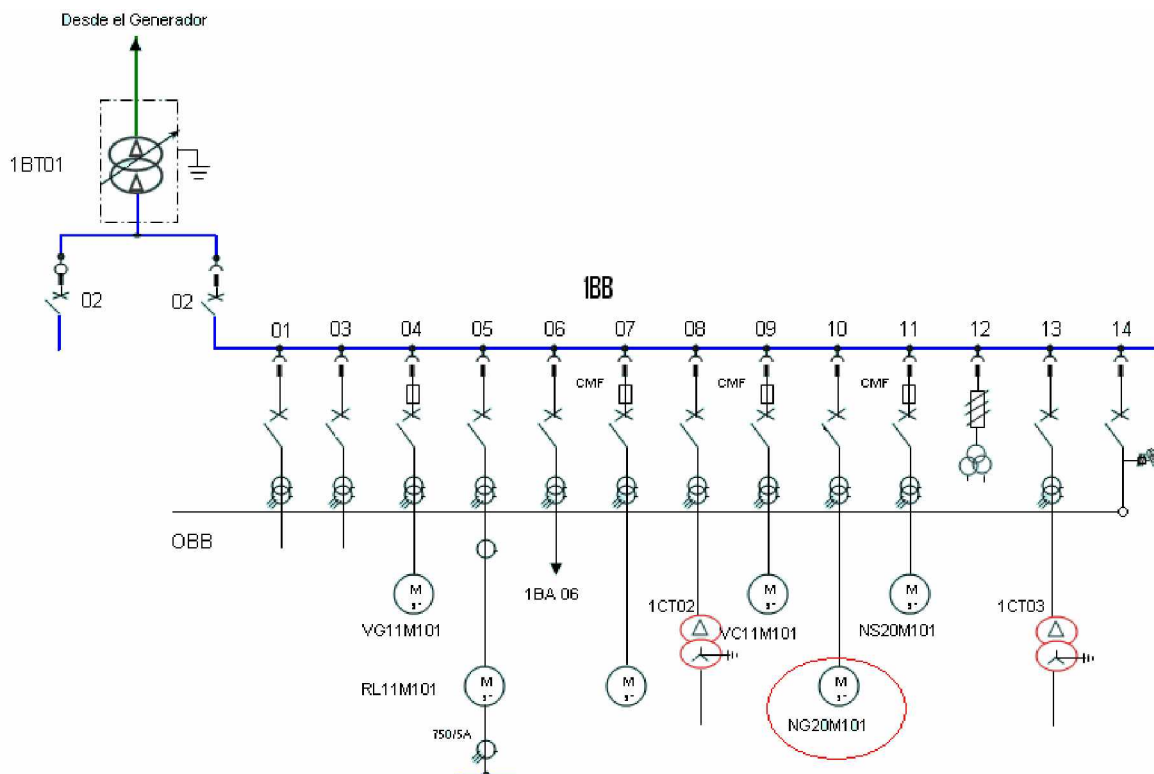


Figura 1.4 Esquema monolineal de la sección A de la subestación de 6 KV.

El motor objeto de estudio es el que se encuentra dentro del círculo. En la subestación se encuentra el sistema de control y protecciones eléctricas, el arranque de los motores se realiza a través de interruptores, el mismo puede ser a distancia y local, este último solo se utiliza salvo casos excepcionales; Las protecciones eléctricas que posee este motor son: protección contra sobrecarga y protección de sobrecorriente instantánea.

Los datos nominales de este motor se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Datos nominales del motor eléctrico del VTF.

Especificaciones técnicas	
Tipo	2V - 222 - 06H
Potencia nominal	2 000 kW
Máquina accionada	Ventilador de tiro forzado
Tipo de rotor	Jaula de Ardilla
Velocidad de sincronismo	1200 r.p.m.
Velocidad a plena carga	1 190 r.p.m.
Tensión	6000 V $\pm$ 5 %
Corriente nominal	232 A
Frecuencia	60 Hz
FP/eficiencia	0,87/0,95
Tipo de Servicio	S1 Continuous
Montaje / Protección / Refrigeración	IM1001 / IP54 / IC 611
Clase de aislamiento	Aislamiento Clase F
Atmósfera potencialmente peligrosa	No
Máx. Temperatura ambiente	40 °C
Sentido de giro nominal	sentido de las manecillas del reloj (CW)
Sentido de giro inverso	120% del sentido de giro nominal
Caja de conexiones principal	Caja de conexiones estándar
Conexión del bobinado del estator	Delta
Peso del rotor	3 065 kg
Peso total	11 365 kg
Momento de inercia	255 kgm ²

(FUENTE datos catálogo)

Los ventiladores son máquinas destinadas a producir un incremento de presión total D_{ptotal} pequeño; convencionalmente se fija el límite de D_{ptotal} para ventiladores en 1 m.c.a., o una relación de compresión.

Si el incremento de presión no excede el valor indicado, la variación del volumen específico del gas a través de la máquina se puede despreciar en el cálculo de la misma, por lo que el ventilador se comporta como una turbomáquina hidráulica. En la actualidad, en el diseño se tiene en cuenta la compresibilidad para incrementos de presión muchos menores, hasta 0,3 m.c.a., por lo que los ventiladores, hasta dicho incremento de presión, se pueden diseñar y considerar como una turbomáquina hidráulica.

En nuestro caso se trata de un ventilador centrífugo el cual consiste en un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral; el aire, que entra a través del ojo del rotor paralelo a la flecha del ventilador, es succionado por el rotor y arrojado

contra la envolvente de descarga por la salida en ángulo recto a la flecha; puede ser de entrada sencilla o de entrada doble, para nuestro caso es de entrada doble. En un ventilador de entrada doble, el aire entra por ambos lados de la envolvente succionado por dos rotores sencillos montados lado a lado. Los rotores se fabrican en una gran variedad de diseños, pudiéndose clasificar, en general, en aquellos cuyas aspas son radiales, o inclinadas hacia adelante, o inclinadas hacia atrás del sentido de la rotación.

Los rotores pueden tener los tres tipos de álabes, en la figura 1.5, se muestra el usado en nuestra CTE y cuyas particularidades son las siguientes: Alabes curvados hacia atrás, $2 < 90^\circ$.- Es el tipo normal de ángulo de salida en los ventiladores centrífugos; Es el que mejor rendimiento posee, ya que si los antiguos álabes de chapa se reemplazan por los más modernos de perfil aerodinámico, se llega a alcanzar un rendimiento del orden del 90%. Su presión y gasto másico son inferiores para una misma velocidad de rotación y número de álabes que en el primer tipo.

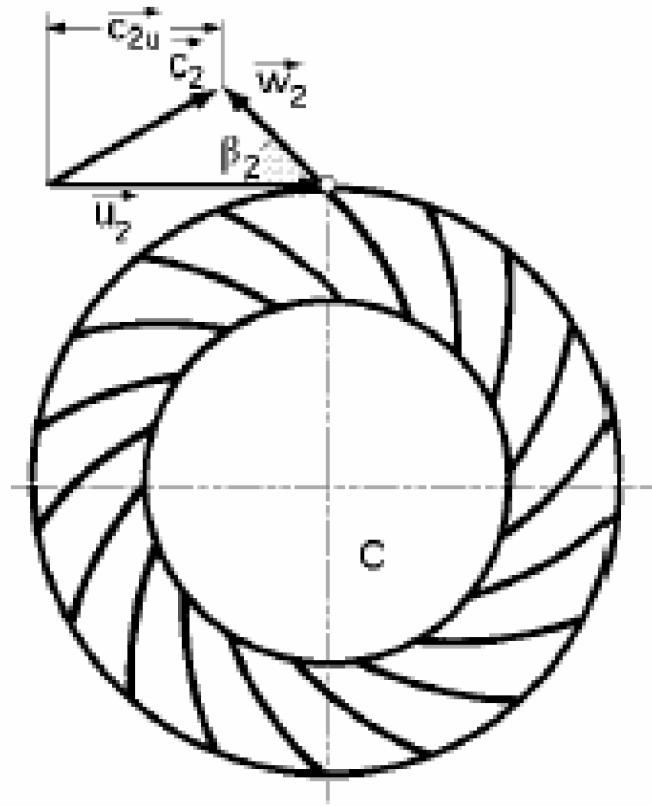


Figura 1.5 Rodetes y triángulo de salida de los ventiladores centrífugos

1.3. Trabajos Precedentes.

Los resultados que se tienen en el mejoramiento de la eficiencia de los de motores de inducción están relacionados con trabajos en el diseño y mejoras en la calidad de los aceros, y el establecimiento de esquemas de control de variables de la máquina de inducción, sin tener en cuenta otros factores operacionales que aparecen debido al comportamiento específico del proceso de transferencia de energía desde la máquina hacia el mecanismo o proceso.

Se estima que más del 60% de la energía eléctrica generada en el mundo es consumida por las máquinas eléctricas [26] [Leonhard, 1996]; y se considera que por lo menos el 20 % del ahorro de energía está en el mejoramiento de los rendimientos de los motores y sistemas eléctricos, el otro 80 % puede ser tomado

de cada una de las partes del accionamiento eléctrico, incluyendo sus cargas mecánicas y el propio proceso.

Las fuentes bibliográficas indican que existe una apreciable reserva de aspectos investigativos en las partes de los mecanismos de producción (figura 1.6), las cuales deben ser más adecuadamente estudiadas desde su proceso. En nuestro trabajo el objeto de estudio es el motor de inducción.

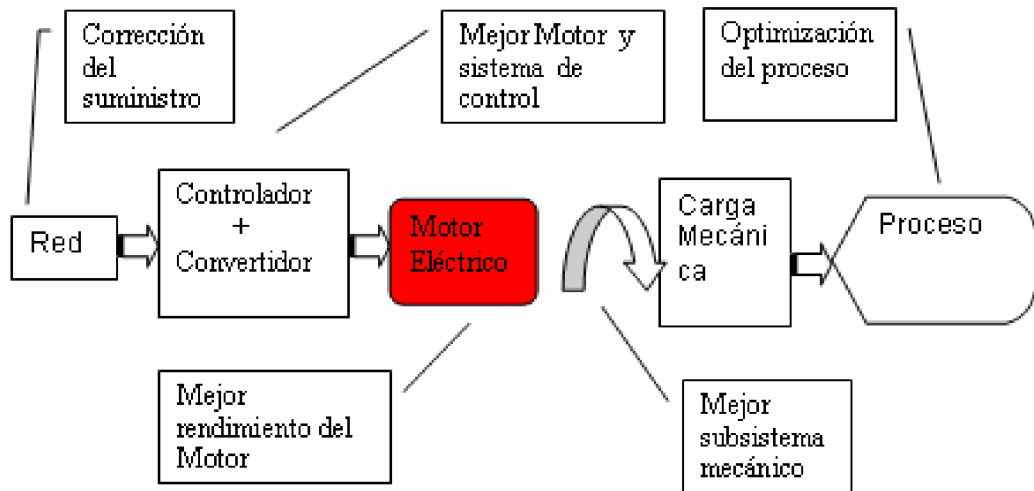


Figura 1.6 Sistema de accionamiento eléctrico y oportunidades de mejoramiento de sus eficiencias.

El sistema de accionamiento eléctrico puede ser estudiado en busca del mejor uso de la energía transferida desde la red de potencia trifásica en sus cuatro principales componentes:

- Fuente de suministro de potencia trifásica: usualmente los análisis parten de un sistema trifásico estable simétrico, con tensiones y corrientes sinusoidales con determinado contenido de armónicos de hasta un quinto orden. [1] [Abrahamsen, 2000].
- Subsistema: Controlador + Convertidor + Motor Eléctrico, cuyo estudios basan sus resultados en la simulación de modelos matemáticos linealizados, pero que en ocasiones presentan serias restricciones en el objeto del convertidor, y funcionan bajo condiciones iniciales de trabajo limitadas en el objeto Motor; y es por esto que el empleo de técnicas

difusas facilitan el estudio con potencialidades de observar el comportamiento del sistema sobre la base de la adecuada identificación del proceso .

- Subsistema Mecánico: constituye la carga mecánica rotacional del accionamiento y está determinado por el enlace del árbol del motor con el mecanismo, que en este caso es el ventilador de tiro forzado. En él existen posibilidades reales de estudio accediendo a las relaciones mecánicas del subsistema y su concatenación con la máquina eléctrica.
- Subsistema Proceso: en nuestro caso es la combustión en el horno de la caldera. posee una de las mayores reservas de oportunidades para obtener elevadas eficiencias.

Una idea integral con la apreciación que se tiene en términos de eficiencia en un motor de inducción, se muestra en la figura 1.7

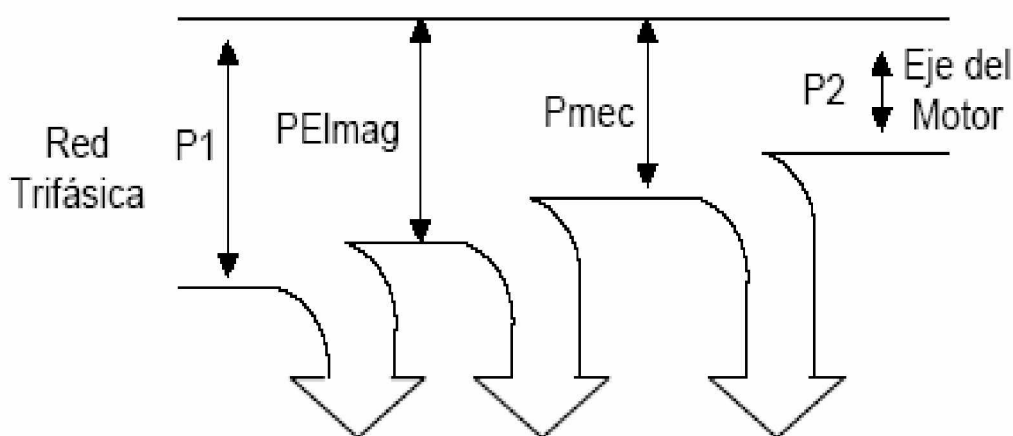


Figura 1.7 Apreciación que se tiene en términos de eficiencia en un motor de inducción.

Como se conoce, los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [8] [Bodson, 1996]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [25] [Kusko y Galler, 1983].

Por otra parte, muchas de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores; y en la mayoría de las cuales, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; la tensión aplicada al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce el campo magnético adicional aumenta las pérdidas del acero, disminuyendo la eficiencia del motor.

La mayor parte de los trabajos en busca del mejoramiento de la eficiencia del motor de inducción basan sus razonamientos sobre el estudio de sus principales pérdidas,

En los motores asíncronos tienen lugar las mismas pérdidas que en otras máquinas eléctricas: pérdidas mecánicas, pérdidas en el acero, pérdidas en el cobre y pérdidas adicionales. Las pérdidas totales en el motor son:

$$\Sigma = p_{cob1} + p_{cob2} + p_{ac} + p_{mec} + p_{ad}$$

(1)

Al aumentar la carga la suma de las pérdidas $p_{ac} + p_{mec}$ disminuye algo a causa de la disminución del flujo principal, así como de la disminución de la velocidad de rotación, generalmente estas pérdidas se incluyen en las pérdidas constantes del motor. En contradicción con las pérdidas en el acero, las pérdidas en el cobre varían proporcionalmente al cuadrado de la corriente.

El mejoramiento ha sido obtenido mediante el balance entre las pérdidas del cobre y el hierro de la máquina manteniendo constante el flujo.

Resultan meritorios los trabajos aportados por [42] P. Van Roy, B. Slaets y Ronnie Belmans, en ICEM-2000, en cuanto a detectar el grado de imprecisiones que contienen las diferentes normas (IEC, IEEE, NEMA, JEC) para establecer Standard de eficiencias. Ellos concluyen que para motores de una misma capacidad y tipo (ver la tabla 1.3), la diferencia puede llegar a ser de hasta un 2 % de la potencia de entrada en la determinación de las pérdidas adicionales de la

máquina, y la eficiencia con carga parcial es tan importante como a plena carga con respecto a la energía consumida.

Tabla 1.3 Rendimientos con carga nominal de cuatro motores del mismo diseño

Carga parcial	Motor A	Motor B	Motor C	Motor D	Promedio
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
50	91.95	92.07	91.75	91.77	91.88
75	92.98	92.86	92.53	93.00	92.84
100	93.75	93.39	93.11	93.84	93.53
125	93.88	93.22	93.19	93.62	93.48

Fuente: Artículo, Induction motor efficiency: a number with many meanings, [Van Roy, Slaets y Belmans, 2000].

En cuanto a los métodos y cálculo del rendimiento en los diferentes motores eléctricos John S. Hsu y otros [19], en 1998 ofrecen un detallado estudio en el que explican ocho formas diferentes de evaluar el rendimiento en estas máquinas, desde la inclusión de las pérdidas mediante el uso de un circuito equivalente, el método estadístico, el método de la medición de la corriente, del deslizamiento y hasta el método del torque en el entrehierro que permite conocer las asimetrías y contenidos de armónicos desde el sistema. Pero estos autores no tienen en cuenta las especificidades de carga del mecanismo industrial.

Varios artículos han sido publicados por diferentes investigadores en cuanto a la selección, explotación y eficiencia de los motores eléctricos de los cuales podemos citar:

- Elias de la Rosa Masdueño, José E Montejo Sivilla, Miguel Tassé Caballero; (2001); Universidad de Camagüey. Con la investigación sobre la "Eficiencia de motores asincrónicos en condiciones industriales.
- EASA's Technical Services Committee. GUIDELINES FOR MAINTAINING MOTOR EFFICIENCY DURING REBUILDING. Publicado en 1992 y revisado luego en 1999)

- Mujal Rosas Ramón Mari (2003) Universidad: POLITECNICA DE CATALUÑA con la investigación sobre la eficiencia en los motores eléctricos.
- Alina M. Pimienta Dueñas. (2006), Pinar del Río, Cuba. Esboza los Conceptos básicos de máquinas eléctricas.
- T.M.Empson (1998). Energy Saving systems for Induction motors.
- Dra. Miriam Vilaragut Llanes, (2007). CIPEL. Artículo sobre Motores eléctricos, su uso y control eficiente, esboza además: Ahorro de energía en motores de inducción.
- M. Sc. Ing. Ignacio Romero Rueda, (2004). Dpto. Ingeniería Eléctrica, Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa, artículo: Una aplicación de Matlab al Motor de Inducción

Mejoramiento de eficiencias de los motores eléctricos desde sus diseños.

Si observamos algunos estudios realizados en la eficiencia de los motores eléctricos atendiendo al costo desde su etapa de diseño y montaje, es significativo el hecho de que para entregar motores eléctricos preparados para operar con elevadas eficiencias, se necesita para incrementos desde un 92 % a un 95,5 % un costo productivo desde 1000 a 8000 USD, con gastos en inversiones de hasta 2,8 USD por cada KW [3] [Appelbaum, Khan y Fuch, 1987], y entre más grandes son las máquinas mayor es su costo. Se establecen correlaciones en las que se incluyen $\eta_{\max} = f(\text{costos (USD)})$, $\eta_{\max} = f(\cos \varphi)$, $\eta_{\max} = f(\Delta p)$, así como los efectos del cambio de tensión en el rendimiento y el factor de potencia. Es decir, la mejor eficiencia puede venir desde la etapa de diseño, pero la máquina eléctrica una vez puesta en explotación va teniendo su propio rendimiento determinado también por las condiciones operacionales asociadas al proceso productivo de las plantas.

Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control.

La eficiencia de los accionamientos de motores eléctricos ha estado enmarcado en función del estudio de las pérdidas en relación con la potencia de entrada del sistema, la velocidad, el torque, el flujo en el entrehierro, la corriente del estator, el

factor de potencia y el cálculo por diferentes métodos del rendimiento del motor, tal como lo reflejan las publicaciones de diferentes autores como. [19] [Hsu y otros, 1998] y [42] [Slaets, Van Roy y Belmans, 2000].

Usualmente en los accionamientos eléctricos, los motores operan manteniendo el flujo en sus valores nominales o con radio de tensión / frecuencia (V/Hz) sostenidamente constante para las condiciones de cargas de diseño, ofreciendo un favorable trabajo con respuestas rápidas ante los transitorios del sistema. Pero cuando el accionamiento pasa a trabajar con cargas más bajas o ligeras, estas aproximaciones causan pérdidas en el núcleo o pérdidas en el hierro que pueden llegar a ser excesivas comparadas con las pérdidas en el cobre de la máquina, comportándose en condiciones de eficiencias mucho menores.

Las pruebas más comúnmente utilizadas están comprendidas en las normas:

- IEEE 112-1984 (Estados Unidos).
- IEC 34-2 (Comisión Electrotécnica Internacional).
- JEC –37 (Comité Electrotécnico Japonés).
- BS –269 (Asociación de Estándar Canadiense).
- ANSI C50.20 igual que IEEE 112 (Estados Unidos)

Las normas de la IEC e IEEE permiten evaluarlas con un elevado nivel de exactitud, pero requieren retirar el motor del servicio y contar con un laboratorio equipado con costosos instrumentos y equipos de medición.

La norma BS-269 no reconoce otro método que no sea el de separación de pérdidas debido a la precisión que se alcanza con el mismo.

Se han desarrollado diferentes métodos, aplicables en las condiciones de la industria, que permiten tener el nivel de exactitud requerido.

Estos métodos pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- o Métodos de datos de chapa y de catálogo.
- o Métodos de corriente.

- o Métodos de deslizamiento.
- o Métodos de circuito equivalente.

Todos ellos se clasifican sobre la base de dos indicadores la Intrusividad y la Exactitud.

El nivel de intrusividad está dado por el tipo de datos requerido para cada método, el costo asociado con el equipamiento instalado y la recolección y procesamiento de los datos y las posibles interrupciones del servicio del motor.

La exactitud generalmente se evalúa comparándolo con los métodos directos, de los cuales el método 112 B de la IEEE ha demostrado ser el más exacto. Aspecto muy importante en la evaluación, es el consumo de potencia reactiva, está probado que muchas medidas o cambios propuestos para ahorrar potencia activa aumentan el consumo de potencia reactiva, lo cual debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar el análisis técnico económico.

1.4 Conclusiones parciales.

-- Al observar y describir el flujo tecnológico donde se desarrolla el accionamiento eléctrico, donde el motor es parte de él, en que las condiciones de operación son únicas de las centrales eléctricas; se aprecia que las variables que inciden en la eficiencia del motor de inducción acoplado al ventilador son: la potencia de entrada, la tensión, la corriente y el factor de potencia.

Capítulo II. . Metodología para el análisis del régimen de carga de los motores de los ventiladores de tiro forzado.

- 2.1 Introducción.
- 2.2 Planificación de los experimentos.
- 2.3 Factor de carga.
- 2.4 Variaciones de tensión.
- 2.5 Cuantificación del régimen de trabajo - VTF-A y VTF- B Bloque No 1.
- 2.6 Calentamiento del motor de inducción durante su explotación.
- 2.7 Procedimiento para evaluar la eficiencia del motor.
- 2.8 Conclusiones parciales.

2.1 *Introducción.*

Para la medición de la eficiencia en los motores de inducción se utilizan dos formas fundamentales que son los métodos directos o entrada - salida y los métodos sin medir la potencia de salida ó indirectos. [4,6]

Dentro de estas formas existen a la vez múltiples variantes e inclusive mezclas de distintos métodos, dependiendo estas de como es posible realizar la medición, bajo que condiciones y de la potencia del motor. [2]

En el mundo existen varias normas relativas a la medición de la eficiencia, algunos con mayores exigencias que otros y que se diferencian fundamentalmente en qué métodos específicos reconocen, cómo son tratadas las pérdidas, en especial las pérdidas adicionales y las concesiones realizadas a los instrumentos, así como el uso o no de la corrección de la temperatura durante la medición.

Los métodos directos son sencillos y se basan en medir la potencia de salida y la de entrada, entre estos está el método del freno, el que consiste en medir el par de salida y la velocidad, obteniendo así la potencia de salida, la potencia de entrada se obtiene eléctricamente. Este método sólo se aplica cuando la eficiencia del motor es muy baja.

Los métodos indirectos de medición de eficiencia que están normados internacionalmente, exigen ciertas condiciones que normalmente no pueden ser obtenidas en una industria. Es difícil tener algunos de los equipos necesarios como el dinamómetro, fuentes de tensión variable trifásica, etc.

Además es necesario medir la temperatura de la máquina trabajando para corregir pérdidas de cobre, realizar pruebas para separar pérdidas y otros procedimientos que no siempre son posibles por falta de tiempo o la imposibilidad de parar un equipo en un momento dado solo para hacer pruebas, por lo que es necesario desarrollar métodos que permitan la medición de la eficiencia con precisión aceptable.

El **objetivo** del capítulo es:

Analizar las técnicas en la temática para obtener resultados más profundos y argumentar parte experimental de la investigación.

2.2 Planificación de los experimentos.

Para el desarrollo experimental de la investigación se utilizó el objeto de estudio en cuestión; es decir el motor de inducción acoplado al ventilador de tiro forzado, para obtener las mediciones de las variables, nos auxiliamos de un software que recibe el nombre de **Active Factory Trend**, el cual va registrando en tiempo real todas las variables que intervienen en el proceso tecnológico y guarda un historial de todos los eventos. Con este software nos auxiliamos para tomar las medidas de potencia y corriente del motor del VTF y el caudal de aire descargado por el ventilador; en la figura 2.1 se muestra la ventana de esta aplicación.

A continuación se muestra una gráfica (figura 2.2) que representa el comportamiento de la potencia generada por el Bloque No1, la corriente de carga de cada uno de los motores de los VTF y el caudal de aire que descarga en la caldera en un día, cuando la disponibilidad es de 230 MW

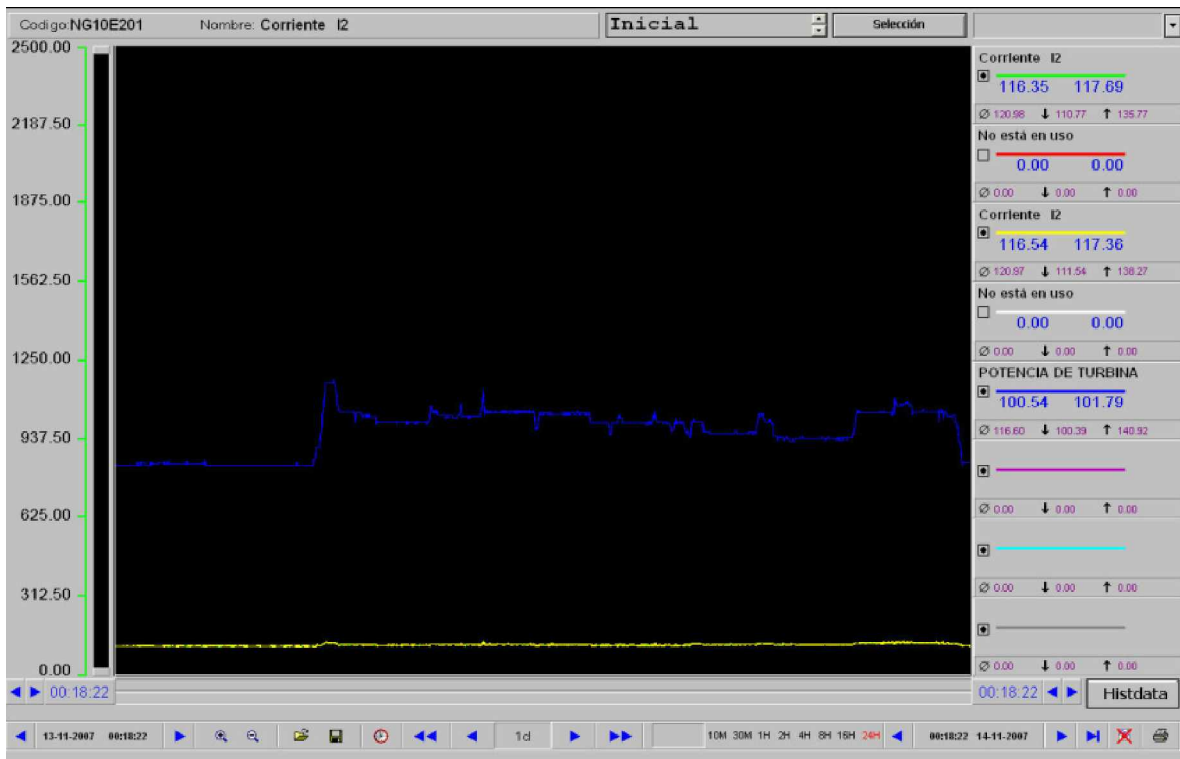


Figura 2.1 Ventana de visualización del Software Active Factory Trend.

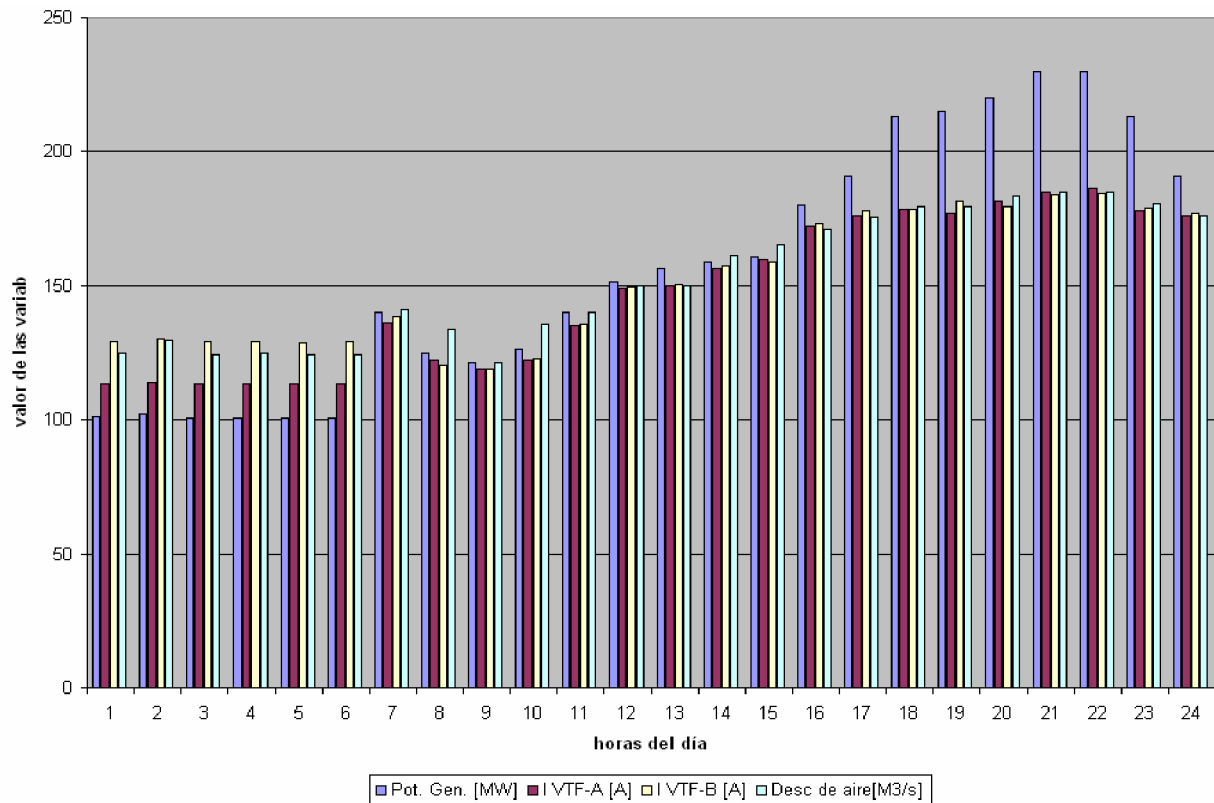


Figura 2.2. Comportamiento de las variables en un día.

Para la comprobación de la corriente de carga de cada VTF se realizaron muestreo de comparación con las protecciones multifuncionales para motores de la firma italiana **AREVA**, del tipo **MX3AJM30A**, mostrado en la figura 2.3. La diferencia entre estas mediciones y las obtenidas por el Software Active Factory Trend, es de 0, 03%.

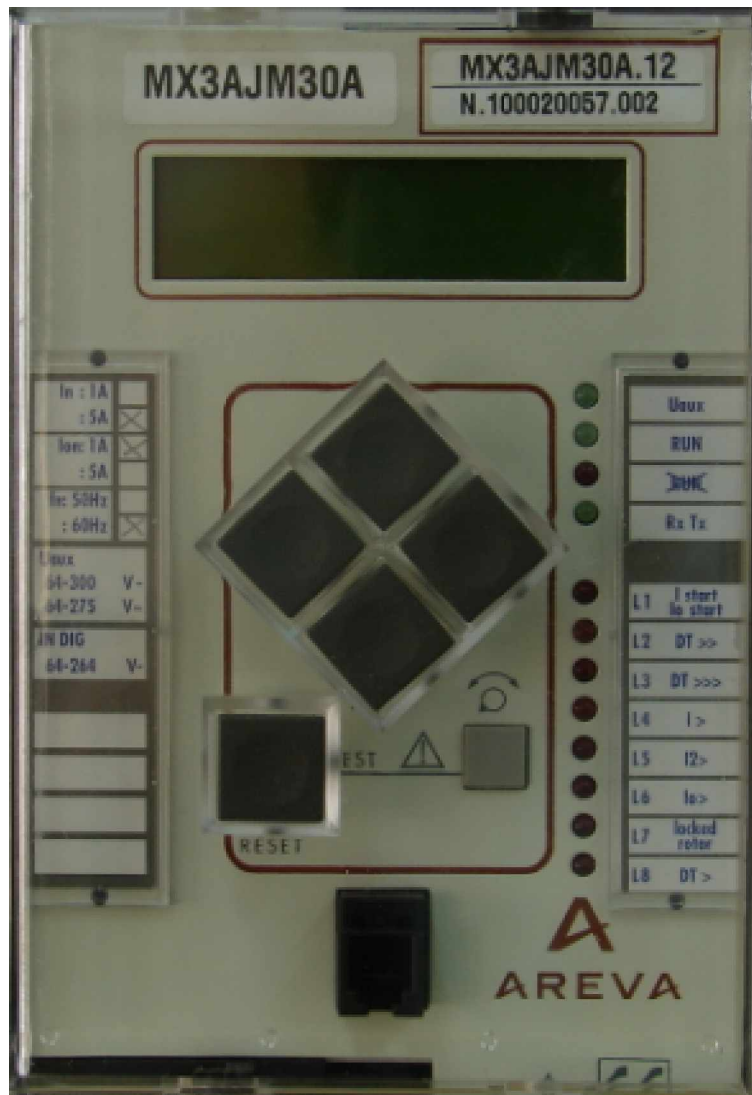


Figura 2.3 Protección multifuncional **MX3AJM30A**.

Para la toma de los valores del tensión de trabajo del VTF, así como el consumo de las potencias incluyendo el factor de potencia, se utilizó un modulo de medición digital denominado **DIRIS A 40** de la firma **SOCOME**C. Este instrumento se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4 Modulo de medición digital **DIRIS A 40**

El estudio consiste en utilizar el modelo del motor de inducción (MI), para demostrar una de las vías de mejorar la eficiencia del motor eléctrico por el control de sus pérdidas producto de las variaciones de cargas y de niveles de tensión por encima de sus valores nominales durante el trabajo del Ventilador de Tiro forzado (VTF).

Para esto buscamos el vínculo entre la potencia eléctrica de entrada del motor, su desarrollo como potencia electromagnética en los devanados del motor, hasta que es convertida en forma de potencia mecánica rotacional en el eje.

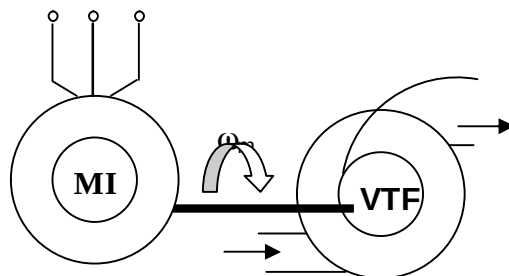


Figura 2.5 Grupo Motor de inducción (MI) con Ventilador de Tiro Forzado (VTF).

La transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional está asociada con las componentes activas y reactivas de la potencia desarrollada por el motor de inducción: MI.

La componente activa de la potencia eléctrica que se convierte en trabajo útil (dado en W ó kW) está determinada por:

$$P_{MI} = \sqrt{3}.U.I \cos\varphi \quad (2.1)$$

donde:

U es la tensión de alimentación de línea del motor de inducción, [V]

I es la corriente de alimentación de línea del motor de inducción, [A]

Cos φ es el factor de potencia del motor de inducción.

φ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente, [°]

y la potencia reactiva (dada en VAR o kVAR) es la encargada de intercambiar la energía electromagnética que se produce en la máquina de inducción con la fuente y crea el campo magnético rotacional que gira de acuerdo a la frecuencia de la corriente de alimentación del motor (MI) y viene dada como:

$$Q_{MI} = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi \quad (2.2)$$

Y partiendo que la eficiencia del motor de inducción está definida como la relación entre la potencia de salida P_s y la potencia de entrada P_e :

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (2.3)$$

donde:

P_s – es la potencia de salida en el árbol del motor de inducción, [kW].

P_e – es la potencia eléctrica de entrada del motor de inducción, [kW].

Δp – son las pérdidas totales en el motor de inducción, [kW].

Las pérdidas totales Δp del motor de inducción están determinadas principalmente por:

$$\Delta p = \Delta p_{cus} + \Delta p_{cur} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{mec} + \Delta p_{ad} \quad (2.4)$$

Δp_{cus} - son las pérdidas del cobre en el devanado del estator del motor, [kW].

Δp_{cur} - son las pérdidas del cobre en el devanado del rotor del motor, [kW].

Δp_{ac} – son las pérdidas del acero en el núcleo del motor de inducción, [kW].

Δp_{mec} - son las pérdidas mecánicas del motor de inducción, [kW].

Δp_{ad} - son las pérdidas adicionales en el motor de inducción, [kW].

La potencia electromagnética P_{em} y también llamada potencia en el entrehierro P_{AG} es la encargada de enlazar, la potencia eléctrica de entrada del motor P_e con la potencia mecánica rotacional de salida P_s que se manifiesta en el eje del ventilador, teniendo en cuenta las pérdidas Δp que va teniendo a través de las principales partes de la máquina eléctrica.

Desde la potencia electromagnética se genera el momento electromagnético M_{em} a una frecuencia angular sincrónica ω_s que entrega la potencia convertida P_{conv} en el árbol del motor con la frecuencia angular de rotación del rotor ω_r [13] [Chapman, 2003], tal como se indica en la expresión (2.5):

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (2.5)$$

donde:

M_{em} es el momento electromagnético del motor de inducción, [N.m]

P_{conv} es la potencia convertida por el motor existente en su árbol, [kW]

ω_r es la frecuencia angular de rotación del rotor, [rad/s]

ω_s es la frecuencia angular sincrónica del motor, [rad/s]

P_{AG} – es la potencia del entrehierro del motor, [kW]

La potencia del entrehierro P_{AG} es la que se transfiere del circuito del estator al circuito del rotor y es igual a la potencia que se disipa en la componente R_r/s en el conocido circuito equivalente por fase del motor de inducción.

$$P_{AG} = I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (2.6)$$

donde:

s – es el deslizamiento del motor de inducción, [%].

I_r – es la corriente del rotor del motor de inducción, [A].

R_r – es la resistencia óhmica de los devanados del rotor, [ohm]

Y la potencia del entrehierro total será:

$$P_{AG} = 3 \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad (2.7)$$

Que para regiones de bajos deslizamientos, esta potencia del entrehierro puede ser escrita en función de la tensión aplicada en los terminales del motor como:

$$P_{AG} = 3.s.\frac{U^2}{R_r} \quad (2.8)$$

Y el par producido por el motor se convierte en:

$$M_{em} = 3.s.\frac{U^2}{R_r.\omega_s} = 3.\frac{I_r^2.R_r}{\omega_s}.\left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (2.9)$$

Y este par electromagnético, para condiciones de estado estacionario, se corresponde con el par resistivo de la carga mecánica M_c desarrollada por el ventilador, y está relacionado con la potencia de salida P_s por la expresión (2.10):

$$P_s = M_c.\omega_r \quad (2.10)$$

El momento electromagnético tiene componentes activa y de magnetización por el lado de la corriente, que de acuerdo con [10] [Cerovski y Javurek, 1997] se escribe como la expresión (2.11):

$$M_{em} = p.\frac{m_1}{2}.\frac{L_m}{L_r}.\Psi_r.I_M \quad (2.11)$$

siendo:

p – es el número par de polos del motor.

m_1 – es el número de fases del motor.

L_m – es la inductancia mutua del motor, [mH].

L_r – es la inductancia del rotor, [mH].

Ψ_r – es el flujo magnético del rotor, [Wb]

I_M – es la componente activa de la corriente del torque electromagnético del Motor, [A].

El módulo de la corriente del estator está dado como:

$$I = \sqrt{(I_M)^2 + (I_{mag})^2} \quad (2.12)$$

donde:

I_{mag} – es la corriente de magnetización del torque electromagnético, [A]

En la expresión (2.11) el torque electromagnético está en función del flujo del rotor Ψ_r , el cual está determinado por la corriente de magnetización I_{mag} , como (2.13):

$$\Psi_r = I_{mag} \cdot L_m \quad (2.13)$$

Y de esta forma podemos controlar el torque electromagnético desarrollado por el motor de inducción a través del flujo magnético del rotor Ψ_r con un comando que maneje el módulo de la corriente de magnetización I_{mag} de la máquina; o mediante la tensión aplicada en los terminales de alimentación del motor de inducción, de acuerdo a la expresión (2.14) ofrecida por [37][Romero, 2000].

$$\Psi_r = \frac{U}{\omega_s} \quad (2.14)$$

Es decir, con el manejo de estas variables se puede ir adecuando la potencia del entrehierro de la máquina de tal forma que sean menores sus pérdidas. Las pérdidas del acero del motor Δp_{ac} están determinadas por (2.15):

$$\Delta p_{ac} = 3 \cdot \frac{E_1^2}{R_{mag}} \quad (2.15)$$

donde:

E_1 – es la f.e.m. de respuesta del motor a la tensión aplicada, [V].

R_{mag} – es la resistencia magnética del circuito magnético del motor, [ohm].

Siguiendo las expresiones (2.13), (2.14) y (2.15); con cambios en la corriente de magnetización I_{mag} , esencialmente porque garantizando el nivel de tensión nominal del motor se modifica su reactancia de magnetización X_m , y entonces varía la f.e.m. E_1 de la máquina, pudiéndose disminuir así las pérdidas en el acero Δp_{ac} .

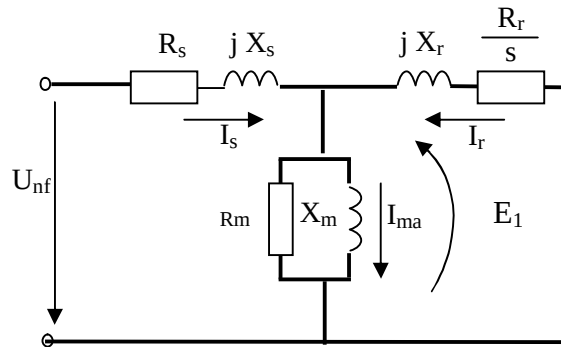


Figura 2.6 Circuito equivalente simplificado del motor de inducción.

FUENTE: [23] Costa Montiel y otros, 2004.

Con el uso del circuito equivalente simplificado del motor de inducción (fig 2.6), y a partir del cálculo de sus parámetros por datos de catálogo del motor [14] [Costa Montiel y otros, 2004], se pueden evaluar las pérdidas.

Las pérdidas totales de este motor trabajando a valores nominales ascienden a 95,1 Kw.

2.3 Factor de carga.

La eficiencia de un motor depende del estado de carga con que se encuentre trabajando. Los motores de fabricación estándar tienen su eficiencia máxima alrededor del 75% de su carga nominal y los de alta eficiencia alrededor del 85%. Es necesario entonces conocer el estado de carga de un determinado motor para conocer aproximadamente en que punto de eficiencia está trabajando.

Para ello se determina el FACTOR DE CARGA, definido como:

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\text{Potencia} \cdot \text{Medida}}{(\text{Potencia} \cdot \text{de} \cdot \text{Placa} / \text{Eficiencia} \cdot \text{a} \cdot \text{Plena} \cdot \text{Carga})} \times 100 \quad (2.16)$$

Como es prácticamente imposible medir la potencia real entregada el factor de carga se calcula dividiendo la potencia real demandada entre la potencia nominal. Los motores tienen una curva de comportamiento de eficiencia de acuerdo al factor de carga (FC) al que están operando. En la figura 2.7 se puede apreciar la curva de comportamiento.

Esta curva la define el diseño del fabricante y generalmente existen diferencias entre ellos, a veces de gran consideración.

Se toma como ejemplo una curva de eficiencia de un motor típico.

Si se tuvieran los datos de eficiencia a diferentes valores de carga, es decir, al 25, 50, 75 y 100%, se podría hacer una interpolación:

$$\text{Factor de Interpolación} = \frac{FC1 - FC_x}{FC1 - FC2} \quad (2.17)$$

donde:

FC1: FC superior conocido

FC2: FC inferior conocido

FCx: FC al que se encuentra trabajando el motor

El Factor de Ajuste es: $Y = Y1 - \text{Fac de Int. } (Y1 - Y2)$, donde:

Y es la Eficiencia Actual

Y1 es la eficiencia al valor superior

Y2 es la eficiencia al valor inferior

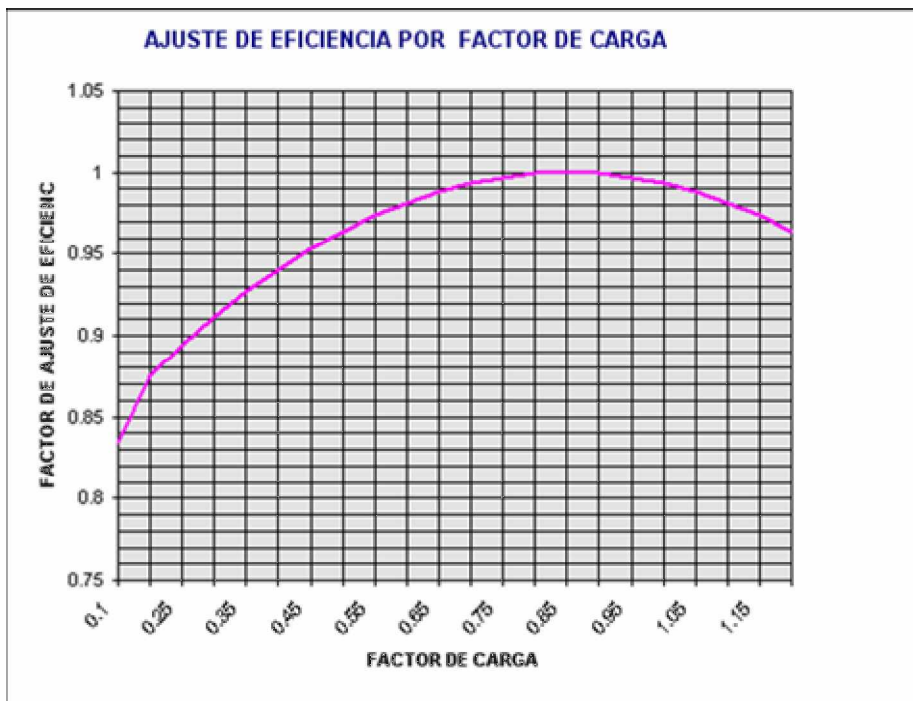


Figura 2.7 Comportamiento de eficiencia de acuerdo al factor de carga

FUENTE: Dra. Miriam Vilaragut Llanes. 2007. CIPEL, CUJAE

2.4 Variaciones de tensión.

Motor con Sobretensión:

Provoca reducción en la eficiencia, incremento en el factor de potencia y se incrementa también la corriente de arranque, ya que las corrientes magnetizantes se incrementan exponencialmente.

Motor con Bajo tensión:

Provoca un mayor consumo de corriente para compensar la potencia solicitada por el par, se incrementa el factor de potencia, el motor se sobrecalienta dañando prematuramente sus aislamientos y disminuyendo su vida útil.

El par de arranque disminuye con el cuadrado de la tensión. En la figura 2.8 se puede apreciar el comportamiento de la corriente, el factor de potencia y la eficiencia al variar la tensión de alimentación, y en la tabla 2.1 se puede apreciar los cambios en las características de operación del motor por este concepto.

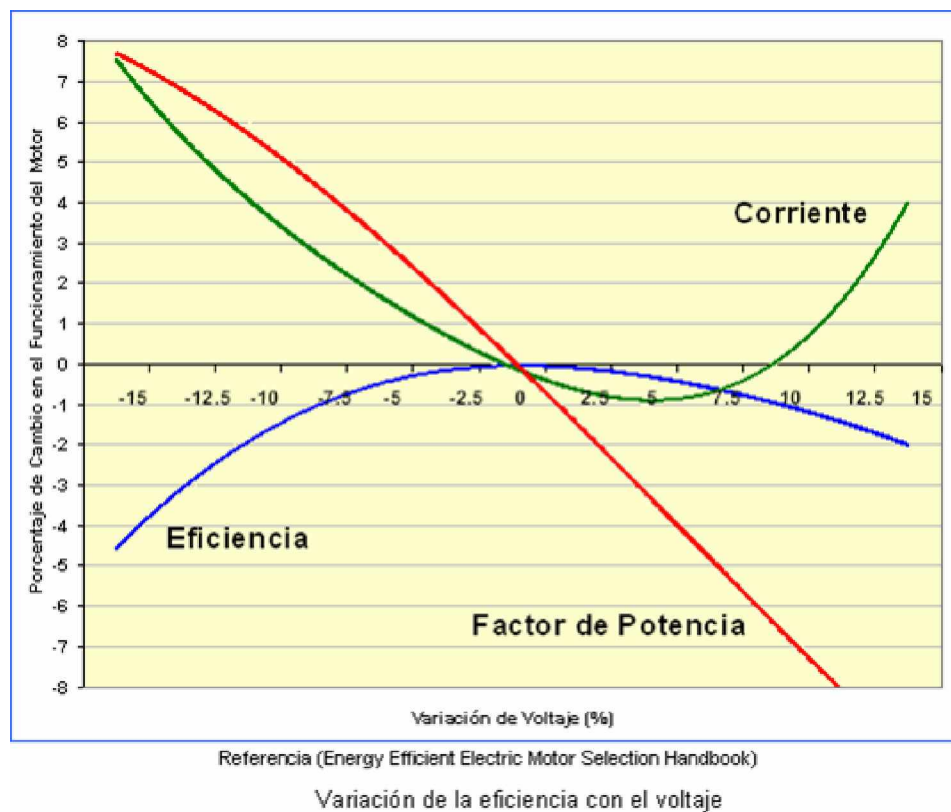


Figura 2.8 Comportamiento de la eficiencia al variar la tensión de alimentación.

Tabla 2.1 Cambios en las características de operación de motores de inducción variando el tensión de alimentación. (Para Motores de 2, 4, 6 y 8 Polos)

característica	110% de la tensión	90% de la tensión
par al arranque par operando	21% de incremento	19% de decremento
velocidad a plena carga % de deslizamiento	1% de incremento 17% de decremento	baja 1.5% sube 23%
eficiencia a plena carga 75% de carga 50% de carga	aumenta 0.5 a 1 punto ligero cambio decrece 1 a 2 puntos	baja 2 puntos ligero cambio sube 1 a 2 puntos
Factor de pot. a plena carga 75% de carga 50% de carga	disminuye 3 puntos disminuye 4 puntos disminuye 5 a 6 puntos	sube 1 punto sube 2 a 3 puntos sube 4 a 5 puntos
corriente al arranque a plena carga	sube 10 a 12% disminuye 7%	disminuye 10 a 12% 11% de incremento
temperatura	disminuye 3 a 4 grados	se incrementa 6 a 7 grados
capacidad de sobrecarga máxima	21% de incremento	disminuye 19%
ruido magnético	ligero incremento	ligera disminución

(FUENTE: Dra. Miriam Vilaragut Llanes. 2007. CIPEL, CUJAE)

Metodología para la Evaluación de Motores Eléctricos:

Se calcula por la expresión:
$$DESB\ DE\ VOLTAJE = \frac{Máx.\ Dif.\ Respecto\ al\ Voltaje\ Promedio}{Voltaje\ Promedio} \times 100$$
 (2.18)

La máxima diferencia es el mayor valor entre:

Tensión Máximo - Tensión Promedio o

Tensión Promedio - Tensión Mínimo

Diferencia de Tensión:

Se calcula por la expresión:
$$DIF\ DE\ VOLTAJE = \left(\frac{Voltaje\ Medido}{Voltaje\ de\ Placa} - 1 \right) \times 100$$
 (2.19)

Conociendo estos porcentajes, en las gráficas vistas al estudiar estos aspectos se determina el factor de ajuste correspondiente a cada caso.

Variaciones de la tensión a frecuencia constante, el par de arranque y el par motor máximo varía con el cuadrado de la tensión. La intensidad de arranque varía proporcionalmente con la tensión, con variaciones de $\pm 5 \%$ se obtiene la potencia nominal.

Evolución de la tensión y la corriente en el arranque del motor.

Al arrancar un motor hay una caída de tensión en la línea, esta es debida a la resistencia del cable entre el interruptor de conexión hasta los bornes de alimentación del motor. Esta caída de tensión depende de la potencia del motor ya que como más grande sea la potencia más grande será la caída de tensión, debido a que la intensidad será más grande. Luego esta caída se irá estabilizando en la misma medida que la intensidad, ya se ha comentado con anterioridad que la intensidad del motor evoluciona desde la intensidad de arranque (aproximadamente 6 o 7 veces la intensidad nominal) hasta la intensidad de vacío o nominal.

2.5 Cuantificación del régimen de trabajo - VTF-A y VTF-B; Bloque No 1.

Observemos en las figuras 2,9 y 2,10 la generación en el año 2006 y los últimos 10 meses del 2007, obtenida a partir de los datos de las tablas de los anexos 2,6 y 2,7.

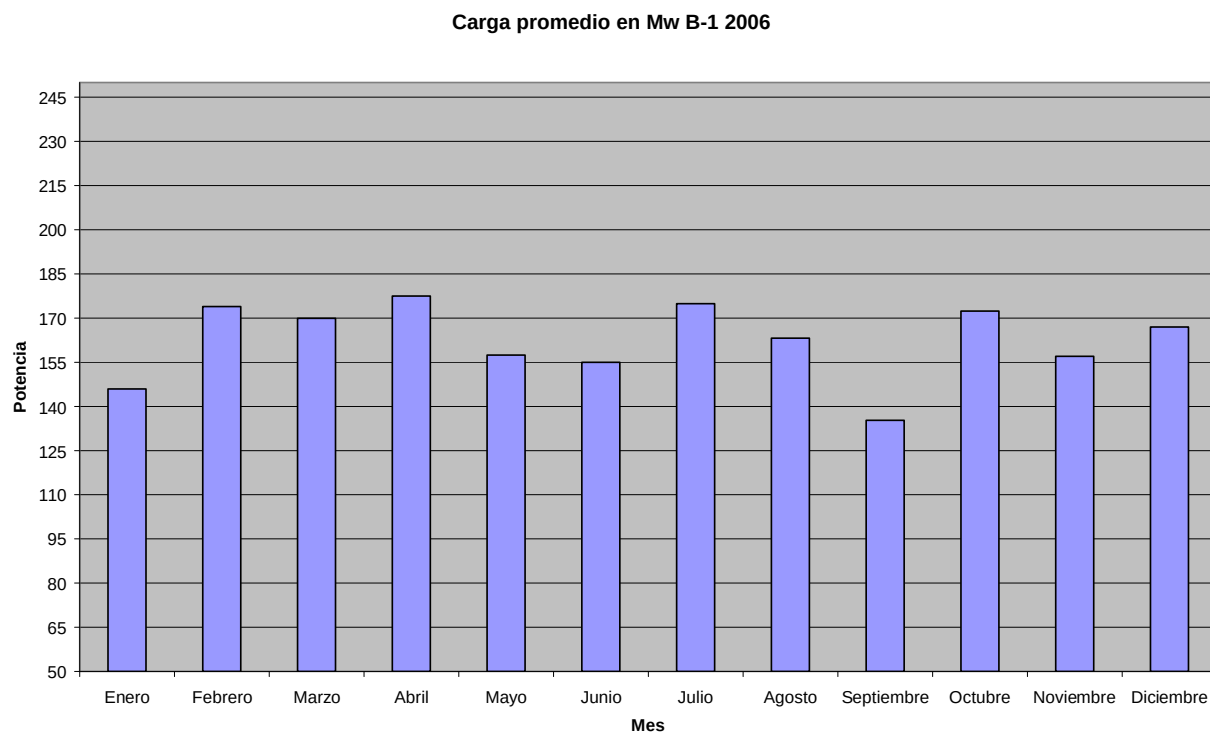


Figura 2.9 Generación promedio por mes en MW del bloque No 1 en el año 2006.

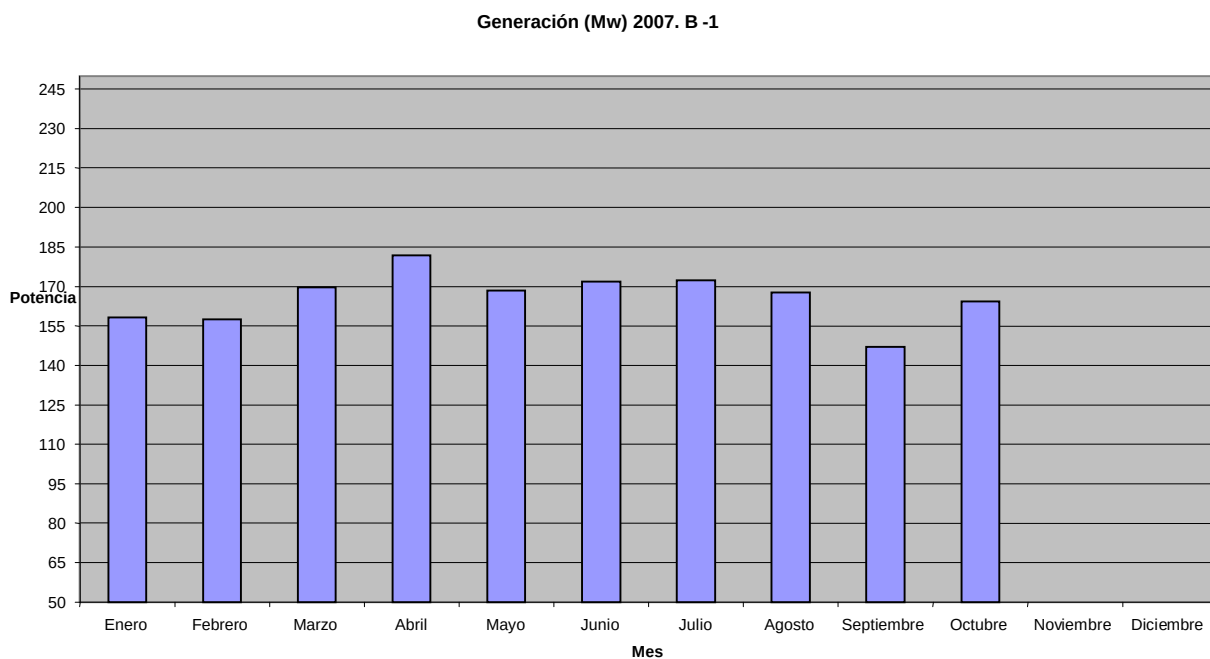


Figura 2.10 Generación promedio por mes, en MW del bloque No 1 en el año 2007.

Como puede apreciarse en las dos figuras anteriores la generación fluctúa bastante, como ya se ha planteado la capacidad de generación de un bloque es de 250 Mw. El mayor valor alcanzado es de 174,9 Mw en el año 2006, mientras que en el año 2007 el mayor valor es de 181,9 Mw, esto representa el 71,96 % y el 72,76 % de la capacidad de generación respectivamente. Vamos a señalar que estos valores de generación se obtienen por las diferentes limitaciones que ha presentado el bloque, esencialmente por el trabajo ineficiente del generador de vapor (caldera). Independientemente de las limitaciones, también la fluctuación obedece al comportamiento de la demanda del SEN, por ejemplo a continuación, en la figura 2,14 mostramos la generación en un día del bloque No1.

Se puede apreciar que en las horas de la madrugada la generación esta por debajo de los 125 Mw, hay incremento ligero a partir de las 7.00 horas, así como a partir de las 10.00 horas, luego a partir de las 17.00 hora comienza a incrementarse hasta llegar a la máxima disponibilidad y ya a partir de las 23.00 horas comienza el decrecimiento. Este comportamiento obedece a la situación concreta en cuanto a disponibilidad y demanda durante las diferentes horas del día del SEN.

En dependencia de la generación, es la cantidad de vapor a producir y con ello la cantidad de aire que se necesita para la combustión, este aire que es suministrado por los ventiladores de tiro forzado se regula interactuando en el ángulo de abertura de las compuertas de admisión.

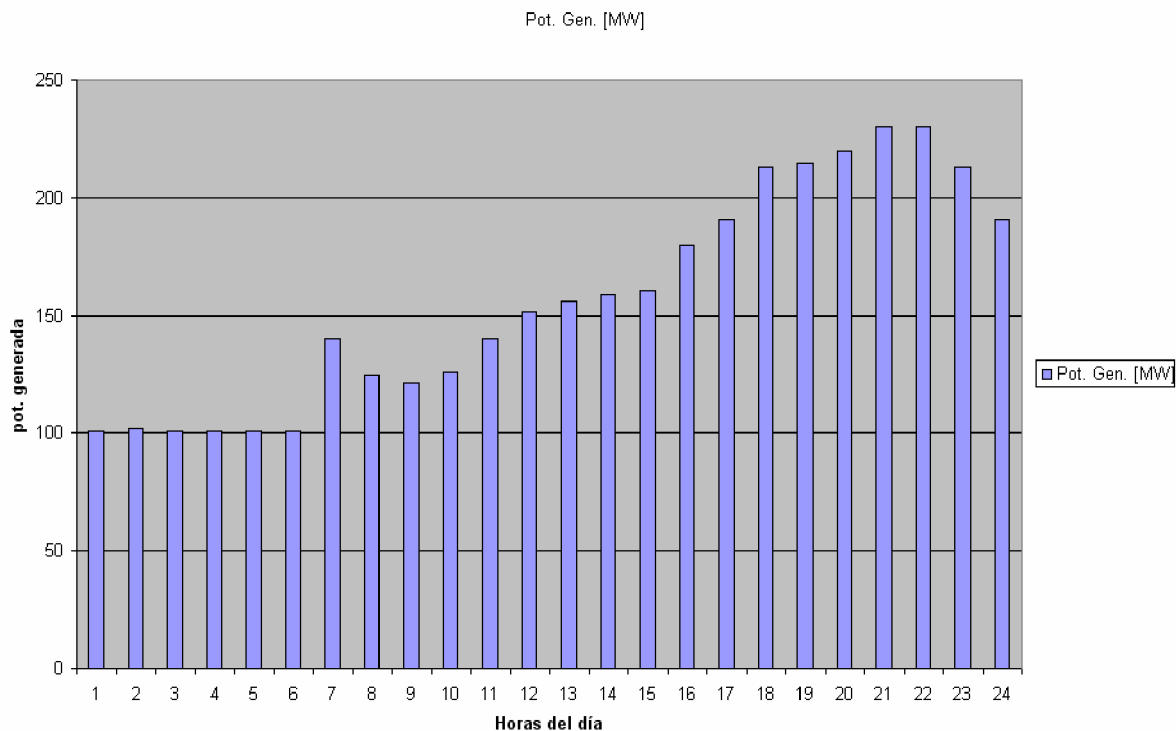


Figura 2,11 Generación en MW del bloque No 1 durante un día. (11-03-07)

Pudiera entenderse que en este tiempo en que la potencia de generación esta por debajo del 50 % de la capacidad nominal, con un motor (VTF) es suficiente para producir la cantidad de aire que se necesita, en vez de regular las aberturas de las compuertas de admisión de ambos VTF y sacar de servicio el otro motor; en realidad habría que valorar técnicamente, estos motores que son de gran potencia y tensión de trabajo de 6000 V, no deben exponerse a arranque sistemáticos. Además la concepción de esta tecnología es que produzca la potencia de generación nominal, que los diferentes tipos de mantenimiento durante el año se ejecuten y con ello se alcance la máxima disponibilidad.

Obtengamos el comportamiento de la corriente en el VTF en un día (11-03-07). Analicemos esta variable partiendo de un arranque, en la figura 2.12 se muestra las corrientes de los motores de los VTF A y B del bloque No1.

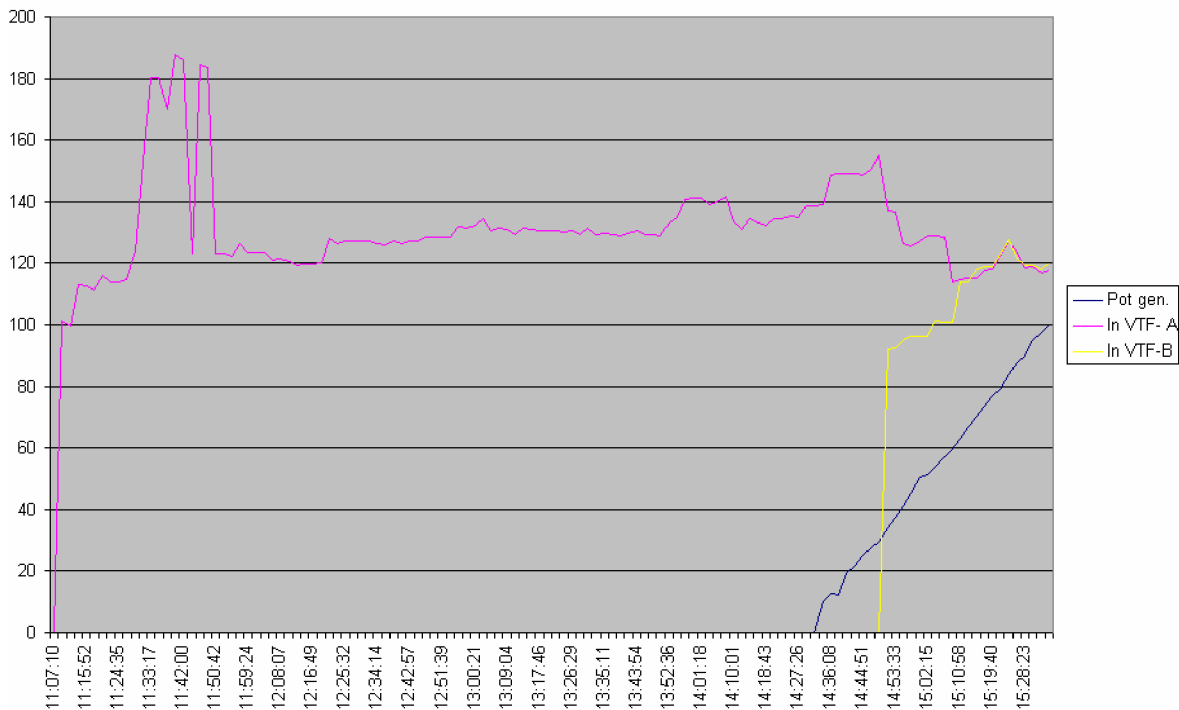


Figura 2.12 Corriente en los VTF y potencia generada en un arranque del bloque.

Este arranque corresponde al 06 de junio del año 2007, a las 11.07 horas se arranco el motor acoplado al VTF A, recordamos que el arranque de estos motores esta condicionado por el cierre tanto de las compuertas de admisión del aire de la atmósfera y de descarga al conducto que lo transporta hacia los precalentadores, luego al CAR (calentadores de aire regenerativos) y finalmente hasta el hogar de la caldera, donde se manifiesta la combustión, este arranque es en caliente, es decir el bloque salió de línea por una falla de comunicación 231 minutos (3 horas 51 minutos) ante de iniciar.

Como se aprecia se arrancó el motor del VTF – A a las 11:07:10 horas, se crearon las condiciones y el generador sincronizó a las 14:33:58 horas, cuando este alcanzó 34 MW de carga, entonces se dio la orden de arrancar el motor del VTF- B, es decir a las 14:51:22 horas, la tardanza de la sincronización depende del tipo de arranque que se trate. Este motor tiene un arranque pesado, requiere de aproximadamente 19 segundos para lograrlo, el peso de su rotor es de 3 065 kg más el peso del rotor del ventilador que es de 2 745 Kg, por lo que se puede asegurar que independientemente de la cantidad de aire que suministre,

prácticamente no tiene marcha en vacío, cuando las compuertas están cerradas, no hay descarga de aire, no obstante el consumo de corriente es del orden de los 102 A, representando el 44 % de la corriente nominal del motor, luego de 36 segundo del arranque del motor, se abre la compuerta de descarga y se mantiene abierta, independientemente de la potencia de generación, solo se regula, como hemos planteado con anterioridad la compuerta de admisión; El consumo de corriente del motor del VTF- B, se muestra en la figura 2.13

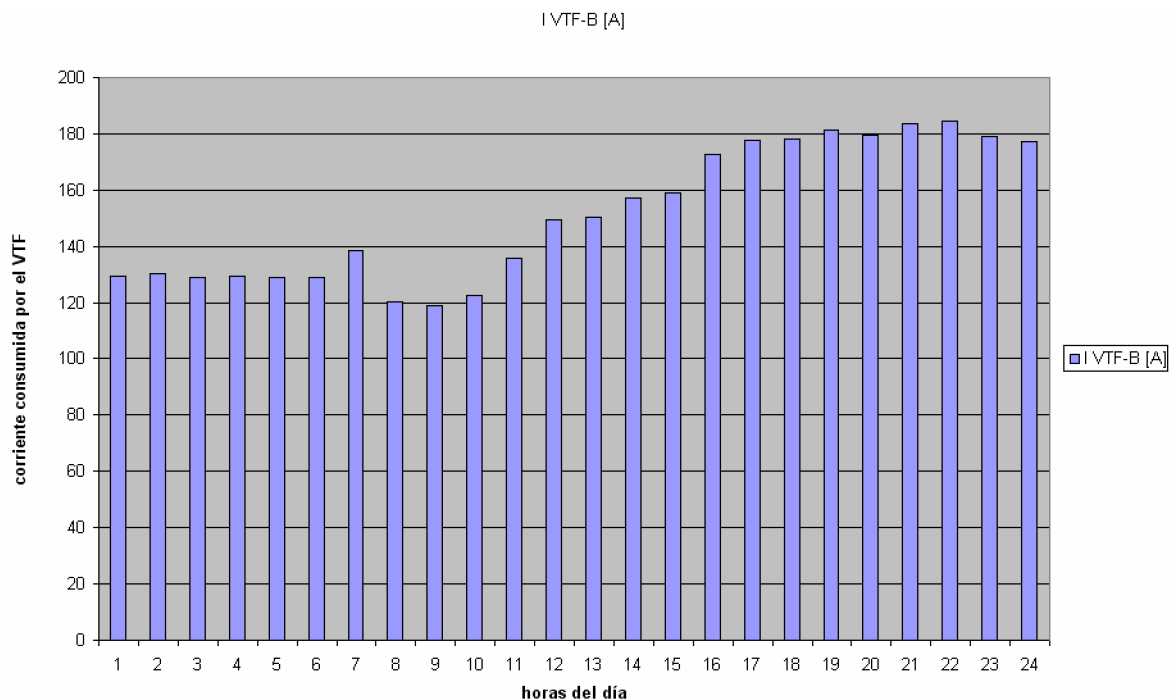


Figura 2.13 Comportamiento de la corriente en el VTF-B el mismo día (11-03-07).

En la figura 2.14 representamos la cantidad de M^3/s de aire descargado por los VTF - A y B y la potencia generada, el mismo día, es decir el 11-03-07

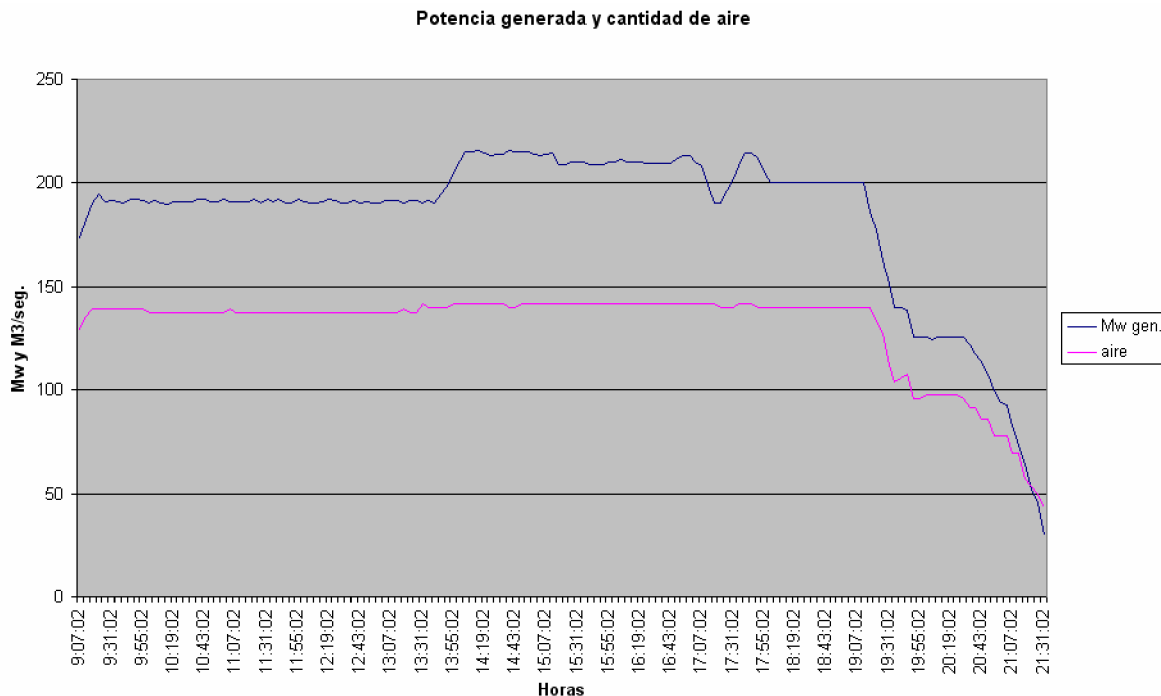


Figura 2.14 Cantidad de m^3/seg de aire y potencia de salida del generador.

En la tabla 2.1 se muestra el comportamiento del motor para diferentes valores de la potencia generada por el bloque para la tensión de trabajo promedio de 6219 V. Igualmente en la tabla 2.2 se muestra el comportamiento del motor para diferentes valores de carga con U nominal y por último en la tabla 2.3 se muestran las pérdidas para diferentes valores de carga.

Tabla 2.1 Potencia demandada del sistema por el motor del VTF, para diferentes valores de potencia generada.

Vmed [V] (promedio)	I1 med [A]	P1 med [kW]	Pgen [MW]
6219	190,76	1765,03	245
6219	186,22	1711,00	230
6219	176,92	1610,33	215
6219	174,26	1578,62	200
6219	171,9	1551,69	180
6219	157,11	1250,84	160
6219	150	1126,45	151
6219	123,85	827,47	126
6219	117,12	779,99	100
6219	118,04	788,66	75

(FUENTE, C Góngora, 2008)

Tabla 2.2 Comportamiento del motor para diferentes valores de carga con U_{trabajo} .

Valores obtenido con carga a U_{trabajo} .						
c. m.	% de carga	Vn [V]	I1 [A]	P1 [kw]	Cos fi	P2 [kw]
1	38	6219	143,56	945	0,61	856
2	50	6219	156	1244	0,73	1150
3	67	6219	179	1492	0,77	1404
4	80	6219	200	1792	0,83	1694
5	91	6219	226	2053	0,84	1949

(FUENTE, C Góngora, 2008)

Tabla 2.3 Obtención de la eficiencia y las pérdidas totales del motor para diferentes cargas.

c.m.	Eficiencia [%]	Pérdidas Totales [kw]
1	0,906	89,29
2	0,924	93,93
3	0,940	88,87
4	0,945	97,76
5	0,949	103,83

(FUENTE, C Góngora, 2008)

2.6 Calentamiento del motor durante su explotación.

El sistema de ventilación de esta máquina está diseñado para una temperatura del aire de 40°C, posee dos tipos de enfriamiento: interior y exterior. El circuito interior de enfriamiento está asegurado por un ventilador radial. Por medio de canales axiales debajo de la culata del rotor y los canales radiales en el rotor con ayuda del efecto de ventilación del rotor el aire de enfriamiento es introducido hacia el espacio de aire y por los canales radiales del estator hacia el circuito exterior del estator de donde es succionado por el ventilador que empuja el aire hacia los enfriadores aire –aire.

En el enfriamiento exterior, el aire calentado se enfría en los enfriadores y se lleva de regreso hacia el motor. El aire de enfriamiento entra hacia los enfriadores desde la parte inferior, pasa por los tubos del enfriador desde donde es succionado por el ventilador superior y soplado fuera de la máquina.

Para el control de la temperatura del bobinado del estator este motor posee tres detectores (termoresistencias PT 100)

El principal problema que provocará el desbalance de tensión (VUB) a un motor eléctrico en marcha, es el aumento de la temperatura del motor. Ello, debido a la aparición de corrientes de secuencia negativa en sus arrollados. Estas corrientes, producirán un campo electromagnético contrario al que impulsa el sentido de giro que posee el motor. Este campo electromagnético contrario, provocara una perdida de la potencia relativa del motor y dicha perdida se convertirá en más calor para los arrollados.

Planteamos que la tensión promedio de las barras de 6 kV es de 6.19 kV. Aquí la dispersión de los datos con respecto a la media es de 0.98 % según análisis estadísticos.

Una variación del -10% de la tensión de operación especificado por el fabricante del motor, se traducirá en un peligroso incremento de las corrientes y un sobrecalentamiento de los arrollados del mismo.

Una variación +10%, de la tensión especificada por el fabricante del motor, se traducirá en un peligroso e innecesario sobrecalentamiento de los arrollados.

Estos motores permiten exigirles un esfuerzo mecánico adicional sin poner en peligro su integridad física. Esa capacidad de sobre esforzarse sin peligro alguno, se llama factor de servicio. Tal sobre esfuerzo provocara que la corriente de trabajo sea mayor que la corriente nominal. Esta se conoce como corriente de factor de servicio.

Estos motores es muy difícil que alcancen un régimen de trabajo cercano al factor de servicio. Por eso la temperatura de los devanados no es preocupante.

Normalmente la temperatura del devanado para cualquier potencia de generación es de 76.90 °C. En la figura 2.15 se aprecia la dispersión de los datos con respecto a la media aritmética con un coeficiente de variación del 1.6 %, lo que quiere decir que los datos están disperso con relación a la media en 1.6 %. La ecuación matemática que rige esta línea de tendencia es la siguiente:

$$y= 0.0799 + 78.974 \quad (2.20)$$

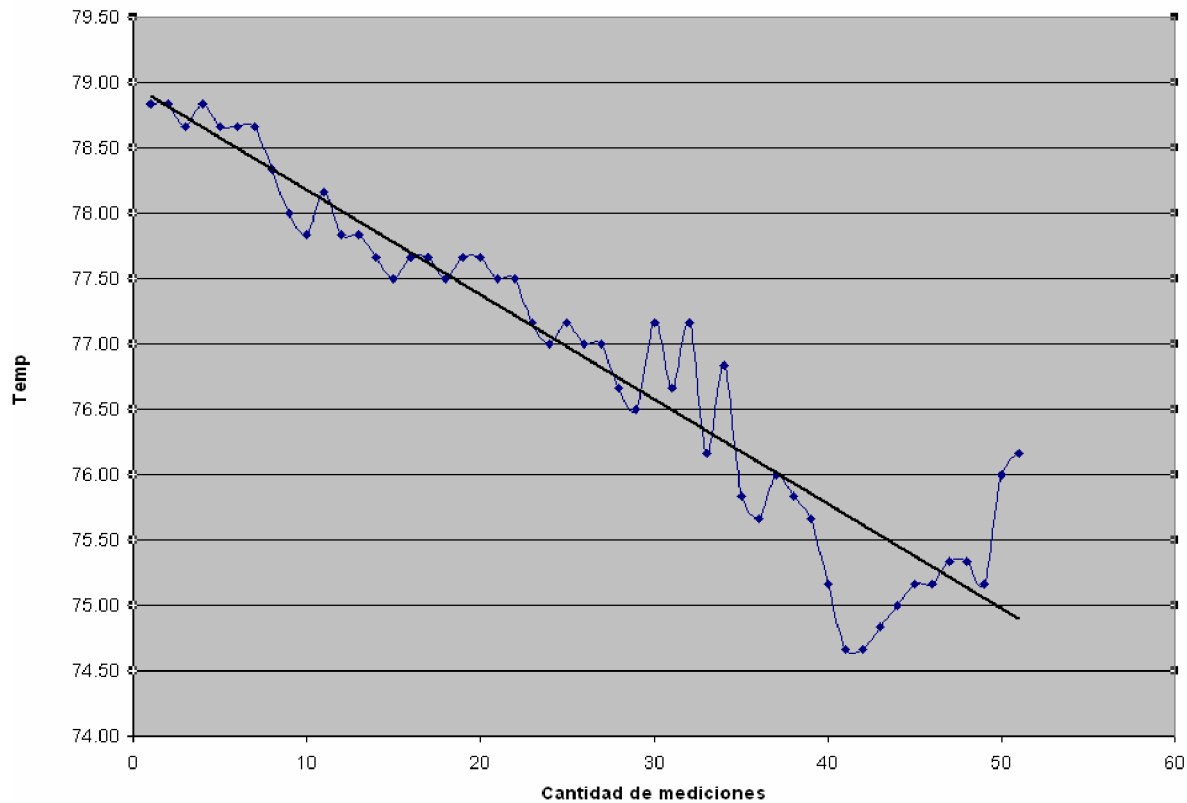


Figura 2.15 Representación gráfica de la dispersión de la temperatura del motor.

2.7 Procedimiento para evaluar la eficiencia del motor.

Características de funcionamiento del Motor de Inducción

Datos nominales

- Tensión (V)
- Potencia (W)
- Rendimiento (v.r)
- Velocidad (rev/min) -Frecuencia (Hz)
- Factor de potencia (v.r)
- Temperatura ambiente (GC)
- Conexión y Clase de Diseño según IEC

Los datos nominales representan el punto de partida para el cálculo y trazo de las características principales del Motor, ya que varios resultados gráficos se ofrecen

en valores p.u. En este paso se calculan otras magnitudes como son Corriente, Momento, Número de pares de polos y Deslizamiento, todos nominales. Además se tiene en cuenta la conexión.

De acuerdo con la conexión del estator, se calcula la tensión de fase nominal

Estrella

$$U_f = U_n / \sqrt{3} \quad (2.21)$$

Delta

$$U_{s1} = U_n; \quad (2.22)$$

- Selección de la clase de diseño

A B C D

- Velocidad del rotor para 60 Hz.

$$N_n = n_r * 60 / f_n \quad (2.23)$$

- Potencia reactiva nominal

$$Q_n = P_n * \tan(\arccos(F_{pn})). \quad (2.24)$$

- Obtención de número de polos:

$$\begin{aligned} &\text{Si, } N_n > 1800; p=1; \text{ si } N_n > 1200; p=2; \text{ si } N_n > 900; p=3; \text{ si } N_n > 750; p=4; \\ &\text{si } N_n > 600; p=5; \text{ si } N_n > 514; p=6; \text{ si } N_n > 450; p=7; \text{ si } p=8. \end{aligned} \quad (2.25)$$

- Velocidad del campo para la frecuencia nominal.

$$n_1 = 60 * f_n / p \quad (2.26)$$

- Obtención del deslizamiento nominal.

$$S_n = (n_1 - n_r) / n_1 \quad (2.27)$$

- Cálculo de la corriente nominal

$$I_n = P_n / (\sqrt{3} * R_n * U_n * F_{pn}); M_n = (60 * P_n) / (2 * \pi * n_r) \quad (2.28)$$

- cálculo de las pérdidas totales nominales

$$\text{Sumperd} = P_n * (1 - R_n) / R_n; \% \quad (2.29)$$

CIRCUITO EQUIVALENTE Y SUS DATOS

El circuito equivalente es el reflejo más exacto del Motor de Inducción. Se debe obtener los datos del circuito equivalente en T, sin corrección de temperatura, esta

se tendrá en cuenta en los cálculos referida a 25 y 75 grados, de forma general dentro del clima tropical.

En principio existen varias vías para el cálculo de los parámetros principales del motor, que permita disponer de una metodología general, aplicada en adelante. Se conocen de varios métodos empleados con resultados aceptables dentro del marco de explotación de motores a nivel industrial, proponemos en caso de no disponer de los datos del circuito equivalente, el método de DATOS DE CATALOGO Y PASAPORTE

Este método no ofrece bastante exactitud. Se aplica cuando no se tiene datos del circuito equivalente, ni tampoco se puede hacer la experimentación. Se aplica mucho más a nivel industrial.

Los datos del circuito equivalente a obtener son los siguientes:

Resistencia de estator (Ohm)

Reactancia del estator (Ohm)

Resistencia del rotor (Ohm)

Reactancia del rotor (Ohm)

Resistencia magnetica (Ohm)

Reactancia magnetica (Ohm).

Datos nominales y de pasaporte del Motor de Inducción. Principales datos del motor:

Coef. Sobrecarga (M_m/M_n)

Coef. Arranque (M_{arr}/M_n)

Corriente (I_{arr}/I_n)

Resistencia de estator, Ohm

En caso de no conocer la resistencia del devanado del estator se considera igual a cero.

Coeficiente de temperatura

$$K_{temp}=1+0.004*(75-T_a) \quad (2.30)$$

Resistencia a 75 grados, suponiendo ensayo a 25 grados.

$$R_r = r_2 * K_{temp}; \quad R_s = 1.05 * r_{10} * K_{temp}; \quad (2.31)$$

$$S_m = R_r / (\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}) \quad (2.32)$$

Pérdidas adicionales nominales y Pérdidas adicionales en vacío:

$$pad_n = 0.02 * P_n / 100; \quad (2.33)$$

$$pad_{vacio} = (I_{on} / I_n)^2 * pad_n; \quad (2.34)$$

Pérdidas en el acero y Pérdidas mecánicas

$$pac_n = 3 * I_o^2 * r_m. \quad (2.35)$$

$$p_{mecanica} = P_{bo_m} - pac_n - pad_{vacio}; \quad (2.36)$$

2.8 Conclusiones parciales.

-- El motor eléctrico acoplado al ventilador de tiro forzado (B) del bloque No 1 esta sometido a un régimen de carga intermitente, el cual varía desde un 38% hasta un 83% (para los valores de generación analizados), esta variación obedece al comportamiento de la potencia de generación, que en la inmensa mayorías de las veces obedece a limitaciones técnicas y tecnológicas del bloque de producción (caldera de vapor) y en menores cuantías al comportamiento del sistema eléctrico nacional.

-- La máxima potencia mecánica que puede ser conectada al árbol de motor objeto de estudio es de 1825 Kw, mientras que el motor posee una potencia nominal de 2000 Kw, es decir en condiciones nominales de trabajo, este motor trabaja al 91,25 % de su potencia.

-- Con una media anual de 178 MW de generación, implica también como media que el motor demande una potencia de 1554 MW, constituyendo el 73,8 % de su potencia mecánica. Cuando el motor ha superado el tiempo de arranque y aún se mantienen las compuertas de admisión de aire cerradas el consumo de potencia es de 764 kW.

-- Por poseer el rotor del motor una masa de 3 065 kg, más el peso propio del ventilador el arranque tarda alrededor de 19 seg y este se realiza directo a línea.

-- La tensión de alimentación del motor es de 6219 V, superando en 3,65 % el valor nominal.

Capítulo III: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN

DEL ACCIONAMIENTO DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO.

3.1 Introducción

3.2 Identificación de los parámetros del accionamiento eléctrico

3.3 Descripción de los resultados.

3.4 Medidas para mejorar la eficiencia de los motores de inducción de 6 kV

3.5 Conclusiones parciales

3.1 Introducción

En este capítulo se plantean los resultados de la experimentación del motor eléctrico que conforma el sistema de accionamiento eléctrico del ventilador de tiro forzado.

Para esto se establece una comparación entre el comportamiento de la eficiencia del motor trabajando bajo sus condiciones nominales de trabajo, y su comportamiento cuando existe fluctuación en el régimen de carga.

Como se conoce la eficiencia en los motores de inducción está dada por la relación entre la potencia de salida P_s ó potencia mecánica en su árbol y la potencia de entrada ó eléctrica P_e , que puede ser tomada en los terminales del estator.

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \quad (3.1)$$

Y puede ser determinada también a partir de la medición de una de estas potencias y el cálculo de las pérdidas totales; expuestas en las expresiones siguientes:

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} \quad (3.2)$$

$$\eta = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (3.3)$$

Usualmente para este cálculo se toman en formato rms ó muestreadas digitalmente:

Lectura de datos.

Medición de la velocidad de rotación.

Medición de corriente por un transductor.

Medición de tensión.

Medición de potencia de entrada.

Lectura de la resistencia del devanado del estator.

Datos de temperatura del devanado.

Datos de las medidas sin carga en el árbol desacoplado.

Mediciones del torque en el árbol del motor.

Varios autores han desarrollado [19] [Hsu y otros, 1998]. Algunos métodos de cómo determinar la eficiencia, entre los más divulgados están:

Método de los valores nominales, que consiste en el cálculo mediante:

$$\eta = \frac{P_s}{P_{nom}} = \frac{P_{med}}{\sqrt{3}U_n I_n \cos\phi} \quad (3.4)$$

donde,

P_{snom} – es la potencia de salida nominal del motor, [kW].

P_{med} – es el valor de la potencia media medida en rms, [kW].

U_{nom} – es el valor de la tensión nominal de chapa del motor [V].

I_{nom} – es el valor de la corriente nominal de chapa del motor, [A].

Método de la corriente, que se realiza calculado la potencia de salida con la medición de la corriente media y la de marcha al vacío:

$$P_s = \frac{I_{med}}{I_{nom}} . P_{snom} \quad (3.5)$$

$$P_s = \frac{(I_{med} - I_{mv})}{(I_{nom} - I_{mv})} . P_{snom} \quad (3.6)$$

donde,

I_{med} – es la corriente media en rms [A].

I_{mv} – es la corriente de marcha al vacío en rms, [A].

Método estadístico, basado en archivar el recorrido histórico de las pérdidas en el motor, considerando por ejemplo un por ciento de aquellas pérdidas que habitualmente no pueden ser calculadas.

Método del circuito equivalente, tiene en cuenta el cálculo partiendo de las componentes del circuito eléctrico equivalente del motor de inducción, tomando los valores de las resistencias, reactancias e inductancias a una determinada temperatura de trabajo de la máquina.

$$\Delta p_{\text{totales}} = I^2 \cdot R \quad (3.7)$$

Método de las pérdidas incluidas, que tienen en cuenta todo tipo de pérdidas, ya sea de origen electromagnético como mecánico.

Método del torque o momento de carga, es un de los más difundido porque relaciona tanto la potencia electromagnética, el número de revoluciones y las pérdidas totales:

$$\eta = \frac{\left[(M_{em} \cdot \frac{2\pi \cdot n_r}{60}) - \Delta p_{\text{fricción}} - \Delta p_{\text{carga}} \right]}{P_e} \quad (3.8)$$

donde:

n_r - es el número de revoluciones del rotor, [rpm].

$\Delta p_{\text{fricción}}$ – son las pérdidas por fricción en el motor eléctrico, [W].

Δp_{carga} – son las pérdidas producto de la carga, [W].

En nuestro estudio se ha considerado esta expresión (3.6) en la evaluación de la eficiencia de los motores durante la simulación, ya que tiene en cuenta la potencia de entrada e incluye las pérdidas mecánicas y de carga, así como el número de revoluciones.

Es bueno indicar que existen dos aproximaciones de mejorar la eficiencia en los accionamientos eléctricos [2][Abrahamsen, Pedersen y Blaabjerg, 1996]:

Aproximación basada en un modelo de las pérdidas.

Aproximación basada en la medición de la potencia.

Si el modelo de pérdidas del motor es viable [2][Abrahamsen, Pedersen y Blaabjerg, 1996], [19][García et. Al, 1994], [22][Kioskeridis y Margaris, 1996] la

minimización de las pérdidas por flujo óptimo se calcula analíticamente. Su principal ventaja es la simplicidad del método. Sin embargo, la exactitud del conocimiento de los parámetros del motor puede ocasionar inexactitudes por los efectos de cambios de la temperatura, efecto de saturación magnética, efecto pelicular, etc.

La aproximación basada en la medición de la potencia es bastante objetiva porque brinda una fiel medida de la capacidad del accionamiento, y es por eso que enfocar el algoritmo de control a la búsqueda del flujo óptimo de acuerdo a la potencia demandada por la carga permite mejorar la eficiencia en límites posibles. Esta aproximación no requiere del conocimiento de los parámetros del motor. Su desventaja sólo está dada para los casos de muy altas potencias y en las oscilaciones que pueden aparecer en zonas de muy pequeñas cargas.

En este trabajo se evalúa la eficiencia por medio de la aproximación con la medición de la potencia, utilizando el modelo de pérdidas en los subsistemas eléctrico.

3.2 Identificación de los parámetros del motor eléctrico

Para la correcta evaluación de la eficiencia del motor de inducción en su trabajo con el ventilador de tiro forzado, es necesario identificar sus parámetros para visualizar sus características en estado estacionario, y a partir de los mismos parámetros y sus ecuaciones dinámicas, se puede observar todo su comportamiento.

Para esto, se utiliza el método " Cálculo de los parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo ", propuesto y validado por Costa Montiel y otros [14][Costa Montiel, 2004], donde los parámetros son obtenidos mediante el cálculo de su circuito equivalente sobre la base a datos de catálogos y una estimación de las pérdidas.

De forma resumida, en la siguiente tabla 3.1, se muestran los valores del motor de inducción investigado

Tabla 3.1 Parámetros del motor de inducción investigado.

P_{nom} [kW]	n_n [rpm]	M_c/M_n	M_{arr}/M_n	I_{arr}/I_n	$\cos \phi_n$	I_n [A]	R_s [ohm]	X_s [ohm]	I'_r [A]	R'_r [ohm]	J [kg.m ²]
2000	1190	1,7	1,4	3,67	0,87	232	0,2636	1,1067	242	0,014	255

(FUENTE, C. Góngora, 2008)

Para conocer los parámetros de la carga accionada (VTF), se ofrece la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Datos del Ventilador accionado.

Capacidad [m ³ /s]	Presión [Kpa]	Temp. [°c]	Densidad de admisión [Kg/m ³]	Speed [Rpm]	[Power] Kw
137	10	32	1.1585	1180	1825

(FUENTE, C. Góngora, 2008)

3.3 Descripción de los resultados.

Los motores (tipo 2V-222 – 06 H) son fabricado según **EN 60034-1** norma básica (equivalente **IEC 34-1**) **EN 50014**, **EN 50016** y según las normas correspondiente relacionadas con la operación de las máquinas rotatorias, están diseñado para una marcha continua con una carga nominal, tensión y frecuencia (anexo 2.2) con las diferencias permitidas según la norma **Čsn EN 60034-1**

Las paradas y puestas en operación frecuentes disminuyen su vida útil, especialmente las bobinas eléctricas, por eso están concebidos para una operación permanente, como máximo se permite tres arranques desde el estado frío o dos desde el estado caliente. En el caso del siguiente arranque es necesario mantener un intervalo mínimo de 30 minutos.

Teniendo en cuenta estos argumentos y considerando que la potencia de generación este por debajo del 50 % no se debe prescindir del servicio de un VTF,

ya que esta planta posee respuesta de potencia al déficit en el SEN bastante rápida. Para el sistema representa una reserva en caliente.

Es bueno recalcar que estos tipos de accionamientos eléctricos por el destino donde se encuentran instalados están concebidos para trabajar con una carga constante, nuestro caso es particular, por limitaciones tecnológicas y otras, trabajan con fluctuaciones en la carga que bien pueden resolverse con la aplicación consecuente en tiempo de la política de mantenimiento, además de otros estudios para factibilizar en dependencia de las horas del día que plantas sacar del sistema en dependencia de su capacidad. Por tal razón no ha existido la necesidad de realizar investigaciones para disminuir por vías desde el Subsistema: Controlador - Convertidor - Motor Eléctrico.

Teniendo en cuenta que la tensión de alimentación de trabajo del motor objeto de estudio es superior en 3.65 % al valor nominal (esta dentro de la tolerancia permisible), pero tratándose de un motor de potencia y tensión considerable, es necesario valorar las perdidas de potencia para este nivel de tensión y compararlo con el nominal para establecer consideraciones de trabajo eficiente, ya que se puede incursionar en el cambia taps de los transformadores y establecer los valores de tensiones nominales de 6000V.

Los resultados de las variables analizadas para diferentes valores de carga, trabajando con la tensión de alimentación especificada por el fabricante (U_n) son mostrados en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Comportamiento del motor para diferentes valores de carga con U_n .

Valores experimentales con carga a U_n .						
c. m.	% de carga	V_n [V]	I_1 [A]	P_1 [Kw]	$\cos \phi$	P_2 [Kw]
1	37,80	6000	144,54	832,11	0,626	756,06
2	49,60	6000	157,29	1069,30	0,757	991,99
3	66,78	6000	180,35	1416,06	0,792	1335,62
4	79,99	6000	201,52	1685,92	0,851	1599,77
5	95,48	6000	227,69	2004,79	0,863	1909,56
6	100,42	6000	237,25	2106,76	0,868	2008,33
7	108,99	6000	254,13	2285,35	0,873	2179,77
8	138,92	6000	318,44	2923,66	0,881	2778,36

(FUENTE C Góngora, 2008)

Teniendo como antecedentes los resultados de la tabla 3.3, se expresa en la tabla 3.4 los valores de eficiencia y las pérdidas totales.

Tabla 3.4 Pérdidas totales en el motor a tensión eléctrica nominal.

c.m.	Eficiencia [%]	Pérdidas [kW]
1	0,908	76,05
2	0,927	77,3
3	0,943	80,4
4	0,948	86,22
5	0,952	95,29
6	0,9532	98,4
7	0,9538	106
8	0,950	145,3

(FUENTE C Góngora, 2008)

La comparación de las pérdidas totales de potencia trabajando el motor con la tensión eléctrica de trabajo actual, de 6219 V y con la tensión de alimentación en valores nominales, es decir 6000 V, se muestra en la tabla 3.5. Solo se refleja hasta el 91% de la potencia nominal del motor, porque es la máxima potencia en carga conectada al motor.

Tabla 3.5 Comportamiento de las pérdidas para U_{trabajo} , U_{nominal} y la diferencia.

% de carga	Pérdidas [Kw] para U_{trabajo}	Pérdidas [Kw] para U_{nominal}	Diferencia
38	89,29	76	13,29
50	93,93	77	16,93
67	94,87	80,4	14,47
80	97,76	86	11,76

91	103,83	92	11,83
----	--------	----	-------

(FUENTE C Góngora, 2008)

Para valores nominales de la tensión y siguiendo procedimientos de normas respecto a las especificaciones técnicas, resumimos las características del motor con carga trabajando con tensión nominal en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Característica del motor con carga.

Carga %	Corriente [A]	Rendimiento %	FP
100	232	95	0,87
75	188,3	94,6	0,84
50	134,3	93	0,76

(FUENTE C Góngora, 2008)

La potencia del ventilador es de 1825 Kw, constituyendo el 91,25% de la potencia mecánica que puede entregar el motor. Quiere decir esto que nuestro motor esta concebido para este régimen de trabajo y las características se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Característica de trabajo del motor.

Carga %	Corriente [A]	Rendimiento %	FP
91,25	219	95	0,87

(FUENTE C Góngora, 2008)

De las comparaciones se establece que creando las condiciones para que el motor trabaje con tensión eléctrica nominal por concepto de pérdidas se puede dejar de consumir 11,83 Kw/h para el 100% de la carga, cuando se encuentre trabajando al 75 % de la carga se disponen de 14.5 kW/h, mientras que para el 50% se ahorra 16.93kW/h.

Además la corriente de arranque es menor en comparación para cuando el motor está trabajando con 6219V.

El arranque estatístico directo a plena tensión, se emplea en los motores asíncronos con rotor de jaula y los motores síncronos. La punta de corriente de

arranque es del orden de 4 a 7 In, según las características del motor, y su duración puede variar de 1 a 10 segundos, aproximadamente, en función del momento de inercia total (motor + máquina), del par motor y del par resistente. [9][Blanc J. Y, 1996].

La utilización de este modo de arranque exige, pues, que la red pueda soportar esta sobrecarga de la corriente sin que resulten perturbados otros receptores y que la máquina arrastrada pueda soportar el choque mecánico debido al par motor. Lo económico que resulta hace que este método de arranque sea muy utilizado y aún aconsejado en la medida en que la caída de tensión en la red, durante el arranque, sea aceptable. El factor determinante es la relación de la potencia del motor a potencia de cortocircuito.

Si la relación entre la potencia de la red de alimentación y la potencia del motor es inferior a 5, se deberá de prestar un cuidado particular a la elección del método de arranque. [9][Blanc J. Y, 1996].

En el momento de arranque, en las condiciones actuales la caída de tensión es de aproximadamente 300V, equivalente al - 5% de la $U_{nominal}$. Considerando, que cuando el arranque se ejecute a la $U_{nominal}$, la corriente de arranque disminuye, se infiere que la caída de tensión entonces es menor.

A continuación mostramos en la figura 3.1, la curva de arranque del VTF en función de la velocidad, trabajando a U_n .

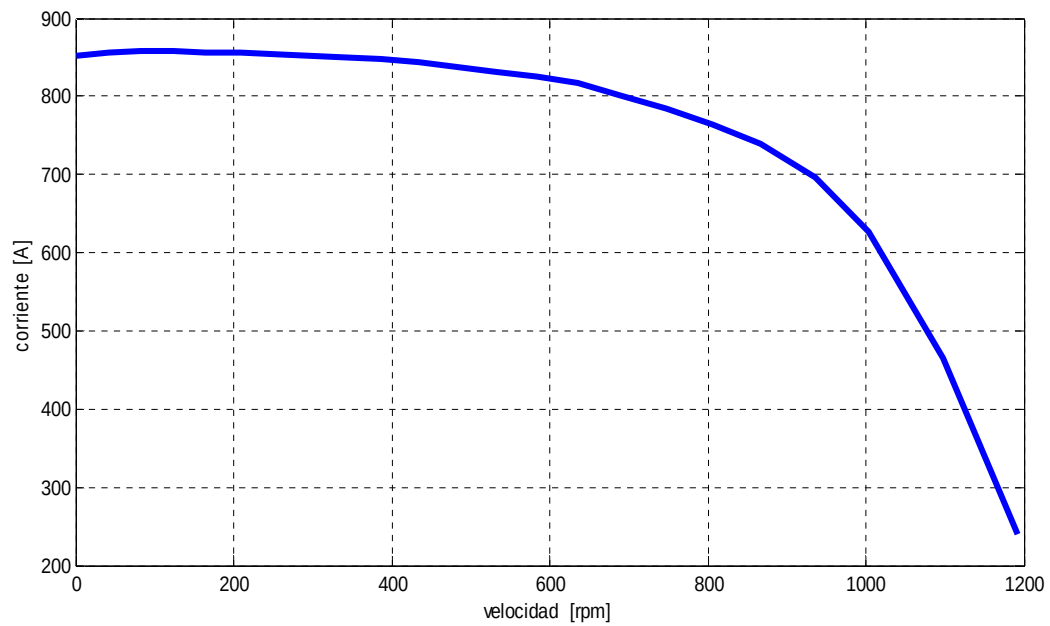


Figura 3.1 Corriente en función de la velocidad a Un.

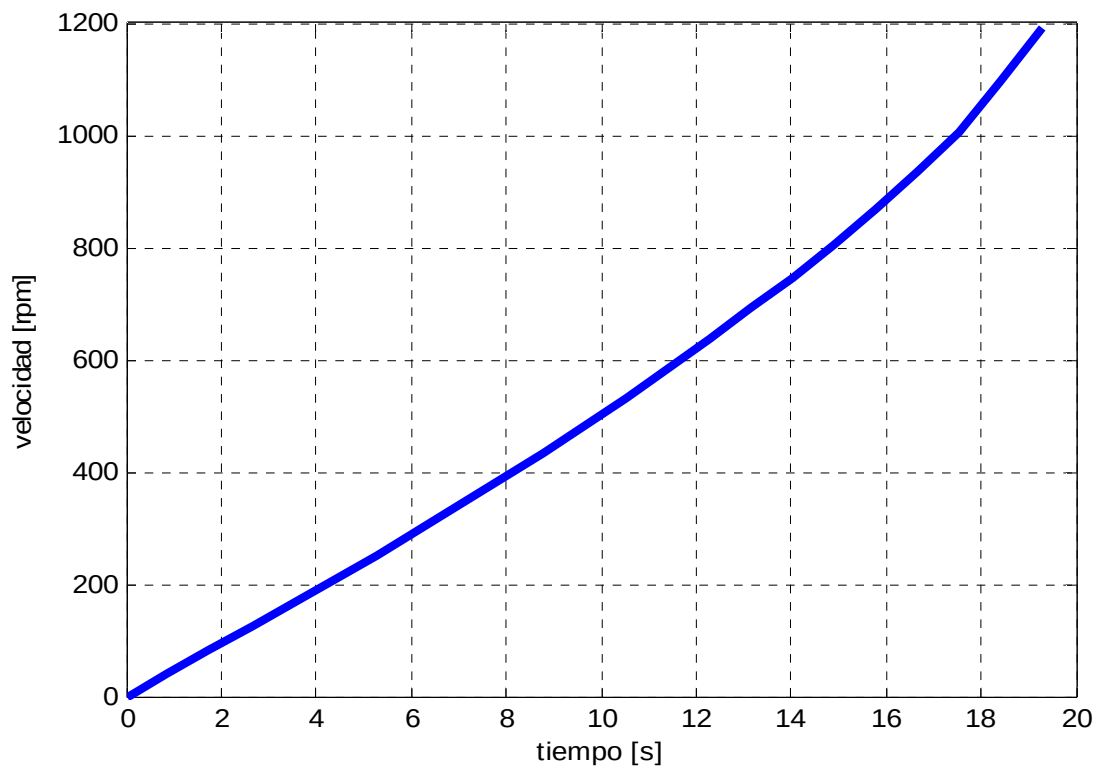


Figura 3.2 velocidad en función del tiempo, en el momento de arranque.

Medidas para mejorar la eficiencia de los motores de inducción de 6 kV

3.4 Medidas para mejorar la eficiencia de los motores de inducción de 6 kV

-- Interactuar en el algoritmo del sistema de regulación automático del cambia taps de los transformadores que están interrelacionado con la subestaciones de 6kV para establecer la referencia de la tensión de 6kV.

-- Realizar un estudio con la ayuda de aplicaciones informáticas del estado actual de la eficiencia de los motores de 6kV y la toma de decisiones en lo caso que lo requiera.

-- En correspondencia con el estado de generación del SEN, en horario de baja demanda y teniendo como elementos, las estadísticas, realizar previa coordinación con el despacho nacional la parada de un Ventilador de tiro forzado, evitando arranque y paradas repetitivas.

-- Ejecutar los mantenimientos concebidos según las especificaciones del fabricante.

-- Realizar los cambios de accesorios cuando haya llegado a la vida útil y no cuando se deterioren.

-- Ejecutar estudio minucioso de ofertas en cuanto a la correcta selección de los motores en cuanto a requisitos técnicos y de explotación.

-- Aplicación de tecnologías de punta en el Mantenimiento.

3.5 Conclusiones parciales

-- Se obtuvo de forma experimental, que la eficiencia del motor de inducción bajo el efecto de restablecer los niveles nominales de tensión ahorra en función de la carga los valores siguientes:

% de carga del ventilador	Ahorro
50	\$ 5 839.68 CUC
75	\$ 4 963.42 CUC
100	\$ 4 050.2 CUC

-- Las pérdidas disminuyen considerablemente debido a que el factor de potencia disminuye

Valoración económica, ecológica y social.

Se tiene un estudio económico, ecológico y social del sistema de accionamiento eléctrico de los Ventiladores de Tiro Forzado, con el objetivo de mostrar el impacto que puede dejar el solo hecho de llevar el nivel de tensión eléctrica de 6219 V a 6000V, y para esto se cuantifican las pérdidas que se tienen en el mismo y el costo que representa su implementación.

Valoración económica

Se realizó el cálculo económico para diferentes valores de carga; 50%, 75% y 100%.

- Consumo de petróleo por kW/h (C) = 285 gramos.
- Tiempo en horas de trabajo del motor anual (ta) = 7 800 horas.
- Precio de la ton de petróleo (P) = \$154.00 CUC

Para el 50 % de la carga:

- Potencia dejada de consumir (Pnc) = 16,93 kW
- Cantidad de energía no consumida (Enc)
$$\text{Enc} = t_a * P_{nc} = (7\,800 * 16,93) = 132\,054 \text{ kW/h} = 132,054 \text{ MW/h.}$$
- Cantidad de combustible ahorrado
$$\text{Comb} = (C) * (\text{Enc}) = 285 * 132054 = 37\,635\,390 \text{ g} = 37,92 \text{ ton [métrica].}$$
- Valor en CUC ahorrado = $C * P = 37,92 * 154 = \text{\$ } 5\,839.68 \text{ CUC}$

Para el 75 % de la carga:

- Potencia dejada de consumir (Pnc) = 16,93 kW
- Cantidad de energía no consumida (Enc)
$$\text{Enc} = t_a * P_{nc} = (7\,800 * 14,5) = 113\,100 \text{ kW/h} = 113,100 \text{ MW/h.}$$
- Cantidad de combustible ahorrado
$$\text{Comb} = (C) * (\text{Enc}) = 285 * 113\,100 = 32\,233\,500 \text{ g} = 32,23 \text{ ton [métrica].}$$
- Valor en CUC ahorrado = $C * P = 32,23 * 154 = \text{\$ } 4\,963.42 \text{ CUC}$

Para el 100 % de la carga:

Potencia dejada de consumir (Pnc) = 11,83 kW

-- Cantidad de energía no consumida (Enc)

$$\text{Enc} = t_a * P_{nc} = (7\ 800 * 11,83) = 92274 \text{ kW/h} = 92,274 \text{ MW/h.}$$

-- Cantidad de combustible ahorrado

$$\text{Comb.} = (C) * (\text{Enc}) = 285 * 92274 = 26\ 298\ 090 \text{ g} = 26,3 \text{ ton [métrica].}$$

$$\text{Valor en CUC ahorrado} = C * P = 26,3 * 154 = \$ 4\ 050.2 \text{ CUC}$$

Valoración ambiental.

Los ventiladores son con frecuencia fuente de ruidos que atentan contra el confort del medio ambiente, por lo que su comportamiento acústico constituye muchas veces un factor decisivo en la selección del mismo.

Las causas del ruido en ventiladores esta asociado a los álabes los cuales crean a su alrededor un campo de presión que varía de un punto a otro del espacio, originándose unas ondas acústicas que interaccionan entre sí, propagándose por el aire, las paredes, el suelo, y en general por la estructura del edificio.

Por debajo de los 45 dB se considera una zona de bienestar y a partir de los 55 dB las personas empiezan a considerar molesto el ruido. Cuando se sobrepasan los 85 dB se manifiestan los efectos nocivos.

Por fatiga de los huesecillos del oído se producen momentáneamente sorderas, el ruido alto persistente puede volvernos, momentáneamente, sordos, ciegos y mudos. Hipertensión, molestias digestivas y vasculares, disfunciones nerviosas y endocrinas, vértigos, estrés, insomio e irritabilidad son las agresiones al organismo que puede producir el ruido. Además de afectar la calidad del trabajo y al rendimiento intelectual. Se realizaron mediciones del nivel de ruido, pero aún los resultados no están disponibles en la CTE. Estos ventiladores comprenden un accesorio para amortiguar el ruido (silenciador), que precisamente este no tiene, y es el que más cerca esta de una vía peatonal influyendo más directamente sobre los trabajadores, de acometer trabajos para disminuir el ruido producido por los VTF, sería muy bien asimilados por todos los implicados.

Uno de los inconvenientes del uso de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica son las emisiones contaminantes locales y de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono (CO₂).

La emisión de dióxido de carbono por las Centrales termoeléctricas (CO₂) afecta el clima produciendo un aumento en el efecto de invernadero, este incremento en la temperatura de la tierra trae consecuencias dramáticas para nuestros ecosistemas: pérdida de volumen de los glaciares, aumento de los niveles del mar, inundaciones, daños irreparables en los arrecifes de corales, expansión de enfermedades tropicales, desplazamientos de especies, desaparición de los principales humedales, pérdida de playas y costas debido a la subida del nivel del mar, aumento de las temperaturas medias.

Valoración social

La introducción de estos resultados permite dejar de expulsar a la atmósfera una gran cantidad de gases lo que constituye una atenuación al efecto tan dañino que produce al medio ambiente y en definitiva a los pobladores que viven en el radio de acción de la CTE, pero mucho más, si lográramos garantizar una generación por encima del 80 %, estaríamos contribuyendo a garantizar energía eléctrica tanto para uso residencial como para las industrias.

CONCLUSIONES

--Con la utilización del procedimiento desarrollado en la presente Tesis es posible evaluar la eficiencia en los motores de inducción para ventiladores de tiro de forzado a partir de las siguientes variables:

- La potencia de entrada del motor de inducción.
- La tensión de alimentación del estator.
- La corriente que consume el motor
- Factor de potencia.
- Eficiencia.
- Número de polos.
- Velocidad.

-- De las mediciones realizadas se corroboró la variabilidad de la carga mecánica en el árbol de los motores, debido a las fluctuaciones del aire de alimentación (irregularidades del proceso productivo).

-- Con el ajuste de la tensión de alimentación de los motores de inducción, se alcanza mejorar la eficiencia a través de la disminución de pérdidas, en particular las del acero de las máquinas.

.

RECOMENDACIONES

En la presente investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- Continuar la presente investigación en el campo de la eficiencia integral de todo el accionamiento con el uso de las herramientas de inteligencia artificial.
- Implementar a través de una aplicación informática el cálculo de la eficiencia aplicable a todos los motores de inducción.
- Aplicar para el caso de los motores de 6Kv las técnicas del mantenimiento predictivo para aumentar su confiabilidad y con ello su vida útil.
- Al sustituir los motores de los ventiladores de tiro forzado del bloque I, que se adquieran los motores de la misma firma pero del tipo 2V - 222 – 06V, que tienen un FP de 0,89 y con ello se reduce la In de 232 A a 225 A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abrahamsen F. Energy optimal control of induction motor drives. Doctoral thesis. Aalborg, Denmark. February 2000. pp 224.
2. Abrahamsen J., Pedersen J., Blaabjerg. State of the art of optimal efficiency control of low cost induction motor drives. PEMC – 96. Vol. 2. Budapest, Hungary. September 2 – 4. 1996. pp 163 – 170.
3. Appelbaum J., Khan I., Fuchs E. Optimization of three phase induction motor design part II: The efficiency and cost of an optimal design. Transaction on Energy conversion. Vol. 2. No. 3. September 1997.
4. Atia Y. A. Enhanced efficiency pumping system operating with photovoltaic source. Doctoral thesis. Cairo University. Nov 11. 2000.
5. Blanuja B., Vukosani S. Losses minimization algorithm in vector control of asynchronous drives. II International Symposium on Power Electronics. Novi Said. October 31 – 2 November. 2001.
6. **Bezdek J. C, Pal S. K., Fuzzy Models for Pattern Recognition, IEEE Press, Piscataway, N.J., 1992.**
7. Becnel C L "Determining efficiency by field testing" IEEE trans on I.A. Vol 23 #3, May-Jun 87, pp 440-443.
8. Bodson J. Digital control improves variable speed drives. EPE Journal. Vol. 2. No. 4. December 1992. pp 243 – 248.
9. Blanc J. Y. Control, mando y protección de los motores AT. Schneider Electric .España S.A, cuaderno técnico no 165. 1996.
10. Cerovski Z., Javurek J. Converter control of asynchronous motor drive with minimum current consumption. EPE European Power Electronic Conference. Groendheim, Norway. Vol 3. p807-812. 2-10 september. 1997.
11. Cummings, Paul G and others "Induction motors efficiency test methods " IEEE trans on I.A. Vol 17 #3, May-Jun 81, pp 253-272.
12. Cummings. P.G. "Comparison of IEC and NEMA - IEEE motor standards". Part I. IEEE Trans.on I. A. Vol I.A.-18 #5 set/oct 82, pp 471-478.

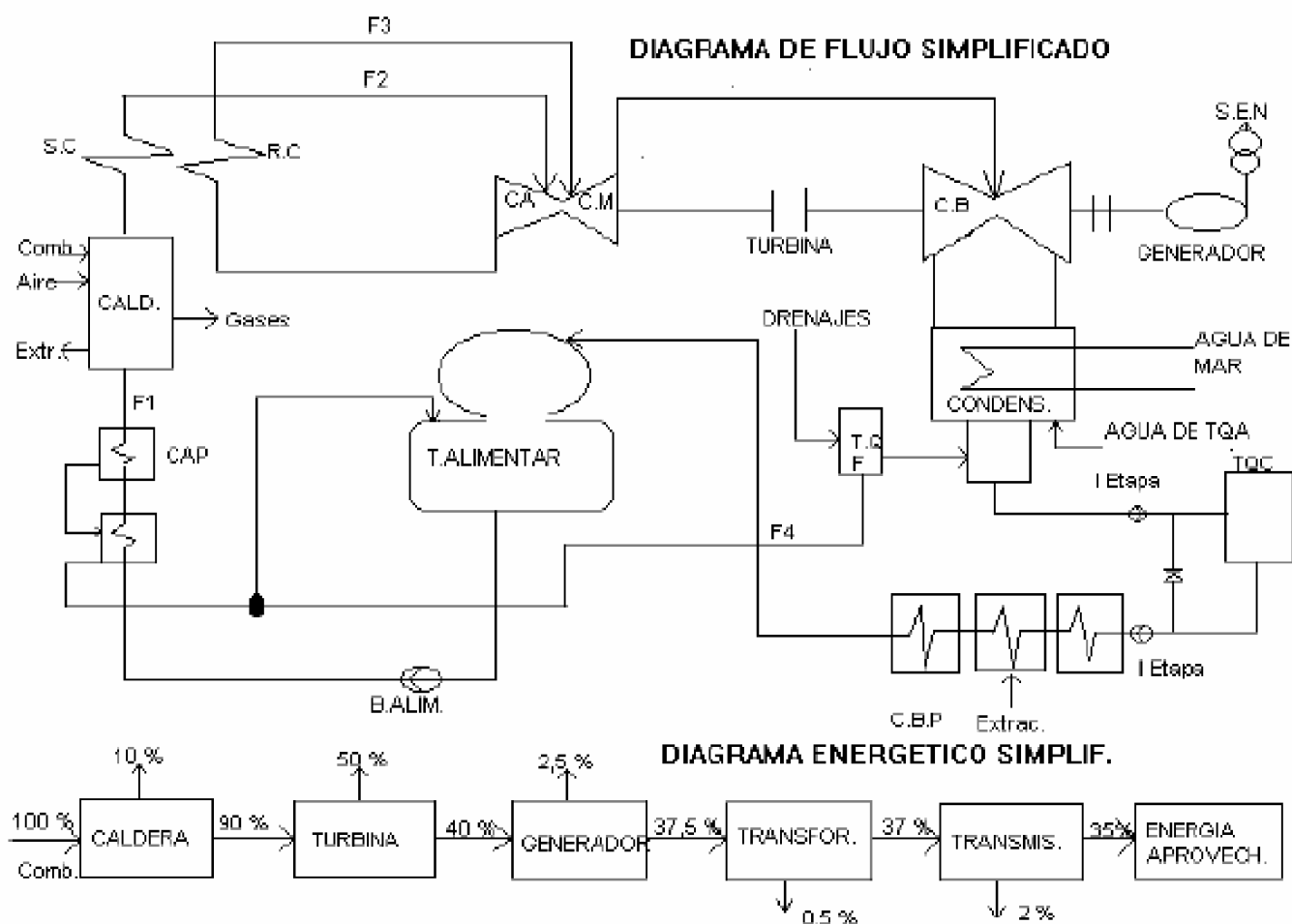
13. Chapman S. Máquinas Eléctricas. Editorial McGraw Hill. New York. 2003
14. Costa Montiel A., Galan N., Ciumbulea G., López X. M. Cálculo de los parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo. Edición 22. Vol 12. No. 2. Revista Energía y Computación. Colombia. 2004.
15. Cleland J. Turner W. McComick V.. Efficiency optimisation control of AC induction motors initial laboratory results. Project. EPA. Mayo 1997.
16. Famouri P, Cathey J. J., "Loss Minimization Control Induction Motor Drive," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, January/February 1991.
17. Fitzgerald A., Kingsley Ch., Umans S., Electric Machinery. Editorial McGraw Hill. New York. 2000.
18. García G., Mendes J., Stephan L., Watanabe E., An efficient controller for an adjustable speed induction motor drive. IEEE Transaction on Industrial Electronics. Vol. 41. No. 5. Pp 533 – 539. October 1994.
19. Hsu J., Kueck J., Olszewski M., Casada D., Otaduy J. Tolberg L.
Comparasion of induction motor field efficiency evaluation methods.
IEEE Trans. On Ind. Applications. Vol. 34. No.1. Jan. / Feb. 1998. pp 117-125. 1998.
20. Jansen R, Lorenz R., Novotny D. Observer-based direct field orientation: analysis and comparison of alternative methods. IEEE Trans on Ind. Application. Vol.30. No.4. July/August 1994. pp 945-953. 1994.
21. Jung J., Lim S. Nam K. A PI type decoupling control scheme for high speed operation of induction motors; in Proc. IEEE PESC-97. pp 1082-1085. 1997.
22. Kioskeridis I, Margaris N., "Loss Minimization in Scalar Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, No. March 1996, pp. 213-219.
23. Kostenko M., Piotrovski L., Máquinas Eléctricas. Tomo II. Editorial Mir. Moscú 1976.
24. Keing, John R. and others "Nema Nominal Efficiency. What is it and why" IEEE trans on I.A. Vol 17 #15, Sep-Oct 81 pp 253-272.

25. Kusko A., Galler D., Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 19, No. 4. pp 561 – 570. July – august 1983.
26. Leonhard, W., *Control of Electrical Drives*, 2nd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
27. Levi E., Sokola M., Vukosavic N. A method for magnetizing identification in rotor flux oriented induction machines. IEEE Transaction on Energy conversion. Vol. 15. No. 3. June 2000.
28. Mestizo C. J. Evaluación energética sobre el empleo del variador de frecuencia como método de regulación de flujo en bombas centrífugas accionadas por motor eléctrico de corriente alterna. Centro Azúcar. 1994.
29. Moreira C., Lipo T. A., Blasko V., “Simple Efficiency Maximizer for an Adjustable Frequency Induction Motor Drive,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. No. 5, September/October 1991, pp. 940-945.
30. Morera H M, “Accionamiento Eléctrico Automatizado Tomo I”, Editorial Pueblo y Educación, 1988.
31. M Vigodsky “Mathematical Handbook. Higher Mathematics”.. Mir 1975
32. -Norma Británica (BS - 269).
33. Norma Soviética (11828-75).
34. Nordin B., Novotny D. W., Zinger D. S, “The Influence of Rotor Parameters Deviations in Feedforward Field Orientation Drive Systems,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, July/August 1985.
35. Ramírez J. Control óptimo U/f para motores de inducción. Revista Energía y Computación. Vol. IX. No. 2. Octubre 2000. pp 20 – 25.
36. Ramírez J. Contribución a la commande optimale des machines asynchrones. Tesis de Doctorado. Institut National Polytechnique de Grenoble. Francia 1998. pp 17 – 27.
37. Romero Rueda I. Estudio del motor de inducción de rotor de jaula de ardilla sujeto a la Teoría del Campo Orientado. Tesis de Maestría. ISMM. Junio del 2000.

38. Rojas Purón L., Morera Hernández M. Supervisor gráfico de accionamiento eléctrico asistido por MATLAB. Taller Nacional de NTIC aplicadas a la Ingeniería Eléctrica. ISPJAE. Ciudad de la Habana. Junio del 2003.
39. Rojas Purón L. Accionamiento eléctrico asincrónico para transporte eficiente de pulpa laterítica. Tesis doctoral ISSMMM. 2007.
40. SIE-2001. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Julio 2001.
41. Rojas Purón L., Morera Hernández M. Control de eficiencia de accionamiento de bomba centrífuga usando lógica difusa. SIE-2003. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Nov. 2003. .
42. Slaets B., Van Roy P., Belmans R. Energy efficiency of induction machines. ICEM-2000. 28 – 30 August 2000. Expoo. Finland.
43. Vas P. Sensorless vector and DTC. Oxford University Press. 20

ANEXOS

Anexo 1 Diagrama de Flujo simplificado de la CTE.



Descripción del Flujo tecnológico simplificado.

Recepción y preparación del combustible.

El combustible llega a la Central Eléctrica por medio de barcos, los cuales con sus equipos de bombeo lo trasladan hasta los tanques de recepción y almacenamiento del mismo en tierra.

Existen dos tanques para la recepción, almacenaje y preparación del combustible que se utiliza en la CTE, estos tienen capacidad de 15000 m³ 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 5700 Litros de combustible por hora, para la pulverización son auxiliados con vapor de agua a una presión de 1 MPa y 250 °C.

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 a vapor hasta 75 °C y finalmente se eleva su temperatura hasta 315 °C en los calentadores de aire regenerativos.

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.

Sala de Maquinas

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 perdidas 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.

Hasta aquí hemos visto el Ciclo Térmico de la Central Termoeléctrica, ahora veamos que sucede después de convertir la energía térmica del vapor en energía mecánica en el eje de la turbina.

Generador Eléctrico.

El rotor del Generador Eléctrico esta directamente acoplado al eje de la turbina por lo que gira a la misma velocidad que esta (3600 r.p.m.), es un generador trifásico con una potencia activa nominal de 250 MW y máxima de 275 MW, la potencia aparente de 294.12 MVA, el factor de potencia de 0.85, tensión nominal 15,7 KV., es enfriado por Hidrogeno por la parte exterior de las bobinas y además de esto posee un sistema de enfriamiento con agua desmineralizada por el interior de varios conductores del estator.

Los conductores de salida del Generador Eléctrico están conectados a un Transformador de Tensión trifásico con una Potencia aparente de 325 MVA, la tensión de entrada al mismo es de 15.7 KV., la tensión en la parte secundaria es de 242 KV, este transformador es el encargado de elevar el nivel de tensión para la transmisión de la electricidad a largas distancias con el mínimo de perdidas, la salida del mismo esta conectada a través de interruptores al Sistema Electroenergético Nacional de Cuba.

Datos técnico de la Caldera

Potencia Nominal del vapor (Ton/H), 855

Presión Nominal del vapor Sobrecalentado (MPa) 13,9

Temperatura Nominal del vapor Sobrecalentado (°C), 525 ± 8

Presión Nominal del vapor recalentado (MPa), 3.46

Temperatura del vapor recalentado (°C) 335\525

Flujo del vapor recalentado (Ton/H), 733.4

Temperatura del agua de alimentar a la salida del CAP (°C), 240

Temperatura del aire ambiente, (°C) 32

Cantidad de quemadores, 12

Etapas de sobrecalentamiento, 4
Etapas de recalentamiento, 2
Cantidad de ventiladores de tiro forzado, 2
Cantidad de recirculadores de gases, 2
Cantidad de precalentadores, 2
Cantidad de calentadores de aire regenerativos, 2
Etapas de atemperamiento, 3
Flujo de agua para la inyección N°1(Ton/H), 1,0
Flujo de agua para la inyección N°2(Ton/H), 23,9
Flujo de agua para la inyección N°3,(Ton/H), 0
Eficiencia de la caldera. 94 %

Datos técnicos de la turbina

Potencia nominal; (MW) 250
Revoluciones por minuto; (r.p.m.). 3600
Temperatura nominal del vapor; (°C). 520.
Presión nominal del vapor (antes de la válvula de cuello); (MPa). 13,24
Presión de vapor a la salida del CAP; (MPa). 3,23
Temperatura del vapor a la salida del CAP; (°C). 335-315
Presión vapor a la entrada del CMP(antes de la válvula de cuello de MP); (MPa). 3,003
Temp del vapor a la entrada del CMP(antes válvula de cuello MP) (°C). 520
Presión en el condensador a parámetros nominales; (MPa). 0,0111
Temperatura del agua de mar; (°C). 33
Flujo de vapor sobrecalentado (Ton/h) 810

Datos técnicos del generador

PARAMETROS NOMINALES DEL GENERADOR

Potencia aparente (MVA), 294.12
Factor de potencia, 0.85
Tensión nominal (KV),15.75
Corriente nominal en el estator (Amp) 10782

Anexo 2. Especificaciones técnicas del motor acoplado a los VTF

Especificaciones técnicas	
Tipo	2V - 222 - 06H
Potencia nominal	2 000 kW
Máquina accionada	Ventilador de tiro forzado
Tipo de rotor	Jaula de Ardilla
Velocidad de sincronismo	1200 r.p.m.
Velocidad a plena carga	1 190 r.p.m.
Tensión	6000 V $\pm$ 5 %
Corriente nominal	232 A
Frecuencia	60 Hz
FP/eficiencia	0,87/0,95
Tipo de Servicio	S1 Continuous
Montaje / Protección / Refrigeración	IM1001 / IP54 / IC 611
Clase de aislamiento	Aislamiento Clase F
Atmósfera potencialmente peligrosa	No
Máx. Temperatura ambiente	40 °C
Sentido de giro nominal	sentido de las manecillas del reloj (CW)
Sentido de giro inverso	120% del sentido de giro nominal
Caja de conexiones principal	Caja de conexiones estándar
Conexión del bobinado del estator	Delta
Peso del rotor	3 065 kg
Peso total	11 365 kg
Momento de inercia	255 kgm ²

Anexo 3. Programa para visualizar los parámetros del accionamiento

```
% -- Programa para visualizar parámetros del Accionamiento
%  motor - ventilador --
wm;          % velocidad del rotor (rad/s)
Is;          % corriente del estator (A)
Ir;          % corriente del rotor (A)
Tem;         % Torque eletromagnética (N.m)
Uab;         % Tensión en los terminales del estator (V)
plot(wm(:,1),wm(:,2)),grid
xlabel('      tiempo [s]')
ylabel('Velocidad angular rotor [rad/s]')
title('wm = f(t)')
pause
plot(Is(:,1),Is(:,2)),grid
xlabel('      tiempo [s]')
ylabel('Corriente estator [A]')
title('Is = f(t)')
pause
plot(Ir(:,1),Ir(:,2)),grid
xlabel('      tiempo [s]')
ylabel('Corriente rotor [A]')
title('Ir = f(t)')
pause
plot(Tem(:,1),Tem(:,2)),grid
xlabel('      tiempo [s]')
ylabel('Torque eletromagnético [N.m]')
title('Torque = f(t)')
pause
plot(Uab(:,1),Uab(:,2)),grid
xlabel('      tiempo [s]')
ylabel('Tension en estator [V]')
title('Uab = f(t)')
```

Anexo 3. Generación bruta año 2006

Generación (Mw) Bruta año 2006. Bloque No 1			
Mes	Total	P. Diario	Carga promedio
Enero	87404	2819,48	145,9
Febrero	116891	4174,68	173,9
Marzo	126105	4067,90	169,9
Abril	54195	1806,50	177,5
Mayo	117139	3778,68	157,4
Junio	98521	3284,03	155
Julio	123655	3988,87	174,9
Agosto	112237	3620,55	163,2
Septiembre	51955	1731,83	135,3
Octubre	121908	3932,52	172,4
Noviembre	88255	2941,83	157
Diciembre	88099	2841,90	167
Total	1186364	3249,07	162,45

Anexo 4. Generación bruta año 2007

Generación Bruta (Mw) año 2007. Bloque No 1			
Mes	Total	P. Diario	Carga promedio
Enero	91921	2965,19	158,2
Febrero	69209	2386,52	157,5
Marzo	98041	3162,61	169,8
Abril	95450	3181,67	181,9
Mayo	111437	3594,74	168,5
Junio	96919	3230,63	171,8
Julio	101532	3275,23	172,2
Agosto	116226	3749,23	167,6
Septiembre	91390	3046,33	146,9
Octubre	85569	2760,29	164,2
Noviembre			
Diciembre			

Anexo 5. International Protection”

“

El código IP, “International Protection”, permite describir los grados de protección proporcionados por las envolventes contra la proximidad de las partes peligrosas, la penetración de cuerpos sólidos extraños y contra los efectos nocivos del agua.

El grado de protección se designa con las letras IP seguidas de dos cifras independientes y a veces de letras (Ej. IP 55)

La primera cifra (1 a 6): indica simultáneamente la protección de las personas contra el acceso a las partes peligrosas (contactos bajo tensión y/o piezas en movimiento en el interior), así como la protección de la máquina frente a la penetración de cuerpos sólidos extraños.

El motor del VTF tiene IP 54.

IP 5X – Permite la penetración de polvo solo donde no sea nocivo para el buen funcionamiento de la máquina.

IP X4 – Protección contra el agua proyectada desde cualquier dirección. Es la protección que se considera para lluvia fuerte y salpicaduras.

Anexo 6. Vista del motor eléctrico acoplado al VTF.



Anexo 6. Comportamiento de la corriente del VTF A y B

Fecha	Tiempo	I (A) VTF - A	I (A) VTF - B	MW
11/13/07	0:18:22	116,35	116,54	100,54
11/13/07	1:20:46	116,73	116,15	100,54
11/13/07	2:18:22	116,54	116,35	101,95
11/13/07	3:20:46	116,35	117,12	100,54
11/13/07	4:18:22	115,96	115,77	100,54
11/13/07	5:20:46	115,77	116,35	100,54
11/13/07	6:18:22	130,19	130,19	139,82
11/13/07	7:20:46	121,73	120,00	124,55
11/13/07	8:18:22	120,00	120,58	121,27
11/13/07	9:20:46	122,31	123,85	125,17
11/13/07	10:18:22	122,31	123,08	123,77
11/13/07	11:20:46	124,23	124,04	125,33
11/13/07	12:18:22	123,27	122,12	125,33
11/13/07	13:20:46	121,54	120,77	125,33
11/13/07	14:18:22	119,23	119,23	120,81
11/13/07	15:20:46	118,27	118,85	120,18
11/13/07	16:18:22	119,42	120,77	117,85
11/13/07	17:20:46	122,69	122,69	115,35
11/13/07	18:18:22	121,73	121,15	116,29
11/13/07	19:20:46	122,69	122,69	111,92
11/13/07	20:18:22	120,96	121,15	114,26
11/13/07	21:20:46	128,27	126,92	125,48
11/13/07	22:18:22	130,77	130,19	128,60
11/13/07	23:20:46	131,73	131,54	125,80
11/14/07	0:18:22	117,31	116,15	101,79

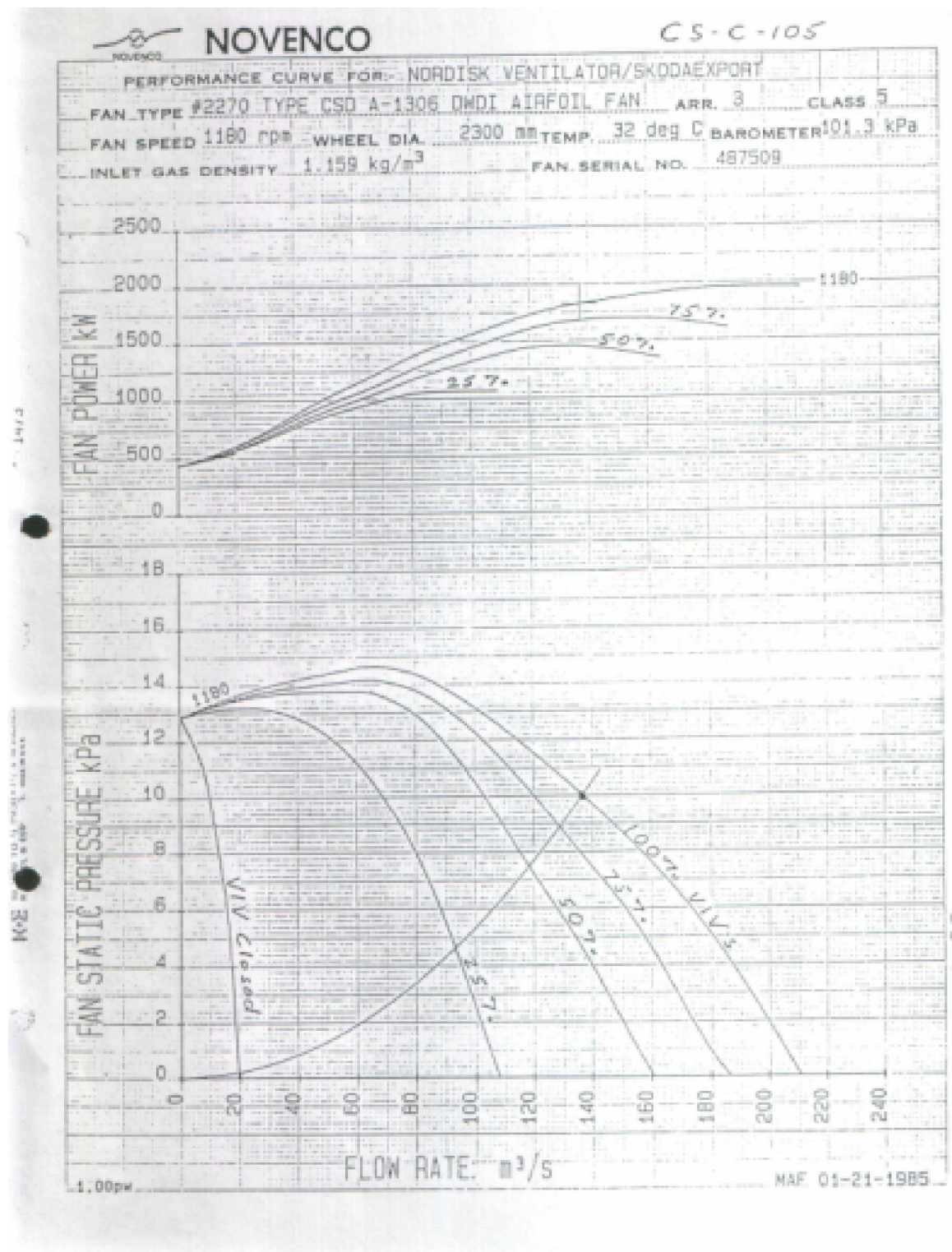
Anexo 7. Arranque y parada del bloque y el consumo de los motores.

Fecha	Tiempo	Mw B - 1	I (A) VTF - A	I (A) VTF - B	Aire (m3/s)
04/02/2007	22:33:26	0	0	0	37,77138
04/03/2007	2:33:26	0	101,1538	0	43,89948
04/03/2007	2:57:26	0	123,4615	0	83,23074
04/03/2007	3:55:02	0	131,5385	0	83,78784
04/03/2007	4:52:38	0	137,3077	0	94,26132
04/03/2007	5:55:02	0	134,6154	0	92,25576
04/03/2007	6:57:26	14,18508	135,1923	0	88,0218
04/03/2007	7:02:14	19,17324	110,9615	100,1923	92,14434
04/03/2007	7:11:50	30,24072	110,7692	105	100,1666
04/03/2007	7:26:14	47,23164	113,0769	109,8077	110,1944
04/03/2007	7:45:26	67,49604	113,4615	135,7692	132,9241
04/03/2007	7:55:02	82,46052	113,4615	135,9615	132,9241
04/03/2007	8:04:38	100,8544	113,4615	129,4231	124,7904
04/03/2007	8:14:14	120,0276	129,0385	127,5	136,8238
04/03/2007	8:33:26	137,4862	135,1923	135,9615	148,9685
04/03/2007	8:52:38	145,2802	138,4615	138,2692	153,0911
04/03/2007	9:07:02	173,4944	154,0385	153,8462	167,13
04/03/2007	9:21:26	194,3824	176,9231	180,5769	177,1578
04/03/2007	10:04:38	191,5765	176,7308	176,5385	175,1522
04/03/2007	11:02:14	190,7971	175,9615	175,9615	177,2692
04/03/2007	12:04:38	190,0177	177,8846	178,2692	175,2637
04/03/2007	13:02:14	191,4206	177,3077	175,7692	175,2637
04/03/2007	13:55:02	205,1381	177,5	181,7308	179,4976
04/03/2007	13:59:50	210,7498	178,4615	182,6923	179,4976
04/03/2007	14:04:38	214,9585	176,9231	181,5385	179,4976
04/03/2007	14:09:26	215,2703	176,5385	185,1923	179,4976
04/03/2007	14:38:14	216,0497	178,6538	176,3462	177,4921
04/03/2007	15:35:50	210,1262	177,8846	177,3077	179,4976
04/03/2007	16:33:26	209,8145	176,1538	175,9615	179,4976
04/03/2007	17:35:50	208,2557	176,1538	180	179,4976
04/03/2007	18:33:26	200,4617	178,8462	178,8462	177,4921
04/03/2007	19:31:02	151,6712	137,6923	137,8846	149,4142
04/03/2007	20:33:26	121,8982	126,9231	125,3846	129,3586
04/03/2007	21:35:50	14,8086	103,4615	99,80769	79,21962
04/03/2007	21:40:38	0,31176	102,5	94,61538	78,10542
04/03/2007	21:45:26	0,31176	122,3077	0	86,3505
04/03/2007	22:09:26	0,31176	115,1923	0	74,20572
04/03/2007	22:23:50	0,31176	112,5	0	64,0665
04/03/2007	22:28:38	0,31176	0	0	31,53186

Anexo 8. Distribución porcentual de las pérdidas.

Pérdidas	porcentaje
p_{cu1}	35-40%
p_{fe}	15-25%
p_{cu2}	25-30%
p_{mec}	5-10%
p_{ad}	10-15%

Anexo 9. Característica del VTF.



Anexo No 10. Comportamiento de la temperatura del motor.

No	temp 1 2NG10T205	temp 2 2NG10T206	temp 3 2NG10T207	Pot del Gen.(MW) 2SP10E201	tem promedio
1	81.5	77	78	153.6	78.83
2	82	77	77.5	147.45	78.83
3	82	77	77	147.3	78.67
4	82	77	77.5	143.55	78.83
5	81	77.5	77.5	140.1	78.67
6	82	77	77	137.1	78.67
7	81	77.5	77.5	133.35	78.67
8	81	77	77	129.6	78.33
9	80.5	77	76.5	126.45	78.00
10	80.5	76.5	76.5	123	77.83
11	81	76.5	77	120.6	78.17
12	80.5	76	77	120.3	77.83
13	80.5	76.5	76.5	120.45	77.83
14	80.5	76.5	76	120.45	77.67
15	80.5	76	76	121.35	77.50
16	80.5	76.5	76	121.5	77.67
17	81	76	76	121.2	77.67
18	80.5	75.5	76.5	120.9	77.50
19	80.5	76	76.5	120.6	77.67
20	80.5	76.5	76	121.05	77.67
21	80.5	75.5	76.5	120.75	77.50
22	80.5	76.5	75.5	120.6	77.50
23	80	75.5	76	121.05	77.17
24	79.5	75.5	76	120.6	77.00
25	80.5	75	76	120.9	77.17
26	80	75	76	120.75	77.00
27	80	75.5	75.5	120.6	77.00
28	80	75	75	122.55	76.67
29	79.5	75	75	124.65	76.50
30	80.5	75.5	75.5	124.65	77.17
31	80	75	75	130.05	76.67
32	81	74.5	76	126.45	77.17
33	79	74.5	75	123	76.17
34	79	75.5	76	121.05	76.83
35	79.5	74	74	116.25	75.83
36	78	74.5	74.5	113.85	75.67
37	79	74.5	74.5	111.3	76.00
38	79	74.5	74	115.2	75.83
39	78.5	74	74.5	119.25	75.67
40	78.5	73	74	120.75	75.17
41	77.5	73	73.5	132.45	74.67
42	77.5	73	73.5	134.55	74.67
43	77.5	73.5	73.5	135.75	74.83

44	78	73	74	138.45	75.00
45	78.5	73.5	73.5	143.1	75.17
46	78	73.5	74	147.75	75.17
47	78.5	73.5	74	151.35	75.33
48	78.5	73.5	74	155.55	75.33
49	78	73.5	74	157.05	75.17
50	79	74.5	74.5	159	76.00
51	79.5	74	75	159.75	76.17