



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA

TEMA: Propuesta de sistemas de excitación para los motores síncronos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

AUTOR: Silvio Basulto Barrientos

TUTORES: M.Sc. Wilbert Acuña Rodríguez

M.Sc. Ignacio Romero Rueda

Ing. Carlos Cuenca Moreno

Año 53 De la Revolución

Moa, 2011

Declaración de autoridad

En decisión conjunta, el autor Silvio Basulto Barrientos y los tutores M.Sc. Wilbert Acuña Rodríguez, M.Sc. Ignacio Romero Rueda y el Ing. Carlos Cuenca Moreno, certificamos nuestra propiedad intelectual en este Trabajo de Diploma con el título, “Propuesta de sistemas de excitación para los motores sincrónicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”. El Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, para hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Pensamiento

La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.

Albert Einstein

Dedicatoria

A mis padres Silvio Basulto Ramírez y Maritza Barrientos Cala y a mi hermana Anisley Basulto Barrientos, por ser mi razón de ser y por el inmenso amor que han brindado. Sin ellos tanto sacrificio no hubiese sido posible. Les debo todo lo que he alcanzado hasta hoy.

De Silvio Basulto Barrientos.

Agradecimiento

Agradezco infinitamente a todas las personas que de una forma u otra han estado involucradas en la realización y terminación de este trabajo de diploma.

A Nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro y a la Revolución por permitirme culminar mis estudios y formarme como un profesional.

A mis tutores M.Sc. Wilbert Acuña Rodríguez, M.Sc. Ignacio Romero Rueda y a al Ing. Carlos Cuenca Moreno por haberme transmitido sus conocimientos y ayudarme a desarrollar esta trabajo.

A los compañeros del taller eléctrico de Empresa Ernesto Che Guevara, por las informaciones ofrecidas que son la base de este resultado y dedicarme tantas horas de su valioso tiempo.

A mis vecinos que me brindaron todo su apoyo.

Resumen

Este trabajo se realiza a partir de un registro de incidencias de los sistemas de excitación del año 2010, que afectó directamente la producción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. El trabajo consta de 3 capítulos, en él se efectúa una propuesta de sistemas de excitación para los motores sincrónicos de la empresa.

Se evalúan los distintos tipos de sistemas de excitación para motores sincrónicos, los sistemas que se fabrican en la actualidad, los requisitos de los sistemas de excitación y la teoría necesaria para el desarrollo de este trabajo, con la caracterización de los sistemas de excitación instalados en la empresa, determinación de los parámetros de los motores y se grafican las características de carga de los motores.

Selección de los sistemas de excitación más adecuados para los distintos accionamientos, la comparación de los sistemas instalados con los escogidos. Se hace una valoración económica de la propuesta.

Abstract

This paperwork it is made from a registry of incidences of the excitation of systems of the year 2010 that directly affected the production of the Commandant Company Ernesto Che Guevara. The paperwork consists of 3 chapters; in him will take place a proposal excitation of systems for the synchronous motors of the company.

The different types from of excitation systems for synchronous motors, the systems are evaluated that make in the present time, the requirements of the excitation of systems and the necessary theory for the development of this work, with characterized the installed excitation of systems in the company, determination of the parameters of the motors and you would show graph the characteristics of motors load.

Selection of the suitable excitation of systems more for the different drives, the comparison of the systems installed with the chosen ones. And becomes of the offers economic valuation.

Índice

Introducción General.....	1
Situación Problémica	2
Problema	2
Hipótesis.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Tareas	3
Métodos a emplear en el desarrollo de la investigación.	3
En el diseño de la investigación se tuvieron en cuenta los siguientes métodos	3
Capítulo 1. Marco Teórico.....	5
1.1 Sistemas de Excitación:	5
1.2 Tipos de Sistemas de Excitación.....	6
1.2.1 Sistemas de Excitación de Corriente Continua	6
1.2.2 Sistemas de Excitación de Corriente Alterna	7
1.2.2.2 Sistemas de excitación de corriente alterna con rectificadores rotativos.....	9
1.2.3 Sistemas de Excitación Estática.....	10
1.2.3.1 Sistema de excitación de fuente de potencial y rectificador controlado	11
1.2.3.2 Sistema de fuente compuesta y rectificador no controlados	12
1.2.3.3 Sistema de excitación de fuente compuesta y rectificador controlado.....	12
1.3 Modernos sistemas de excitación.....	13
1.3.1 Comunicación.....	14
1.3.1.1 Conexión óptica para la puesta en servicio y mantenimiento	14
1.3.1.2 Conexión óptica al nivel de jerarquía superior	15
1.3.2 Diagnóstico.....	15
1.4 Configuraciones básicas de los sistemas de excitación modernos.....	15
1.5 Funcionalidad del software.....	16
1.5.1 Funciones básicas de protección y monitoreo	16
1.5.2 Registrador de datos	16
1.5.4 Funciones de control y protección	17
1.5.4.1 Limitador de sobrecitación	17
1.5.4.2 Limitador de subexcitación	18
1.5.4.3 Circuitos de cortocircuito del devanado de campo	19
1.6 Análisis del desempeño de los sistemas de excitación.....	20

1.6.1 Caracterización del Desempeño de Señales Grandes	20
1.6.2 Caracterización del Desempeño de Pequeña Señal	22
1.7 Requisitos para la excitación de los motores sincrónicos	23
1.8 Secuencia de arranque y parada.....	24
1.10 Método para el cálculo de reactancia en por ciento y en por unidad.....	26
1.10.1 Ventajas de las cantidades en por unidad y en por ciento.	26
Capítulo 2. Caracterización y Parámetros.....	28
2.1 Caracterización de los sistemas de excitación instalados en la empresa	28
2.1.1 Principio Básico de Operación.....	28
2.1.2 Destinación de los sistemas de excitación	28
2.1.3 Tipos excitatrices instaladas	28
2.1.4 En la excitatriz están previstos los regímenes: automático, manual y de emergencia de la corriente de excitación.	30
2.1.5 La excitatriz tiene protección contra:	30
2.1.6 Sistemas electrónicos que componen la excitatriz.	30
2.2 Arranques de los motores sincrónicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara .	31
2.3 Los sistemas electrónicos de mando aseguran:	31
2.4 La estructura de la excitatriz es un armario metálico de servicio bilateral.	32
2.5 Datos de los motores sincrónicos de la Empresa.	32
2.6 Cálculo de los parámetros de los motores.....	35
2.6.1 Cálculo del Torque y representación de las características de carga.....	35
2.6.2 Cálculo de las reactancias de los motores de la Empresa Ernesto Che Guevara. ..	40
2.6.3 Cálculo de las constantes de tiempo de los motores.....	43
2.6.4 Cálculo del flujo magnético	44
Capítulo 3. Resultados y Valoración Económica.....	47
3.1 Selección del sistema de excitación	47
3.1.1 Análisis de las ofertas de los sistemas de excitación.	47
3.2 Ventajas de los sistemas de excitación propuestos.....	52
3.3 Valoración Económica.....	52
3.4 Tiempo de recuperación de la inversión	55
Conclusiones Generales.....	57
Recomendaciones	58
Referencia Bibliográfica	59
Anexos	60



Introducción General

Los motores sincrónicos son requeridos en sectores de la industria, donde se requiera alta potencia, como por ejemplo, en la industria papelera, la metalurgia, la del cemento, la azucarera, la de aceites y la industria del gas, como unidad motriz para bombas, cilindros, ventiladores, molinos etc. En todas estas aplicaciones expuestas se precisa de un regulador automático de tensión que garantice un servicio estable durante la conexión a la red eléctrica. Además de la función original, que consiste en mantener la tensión constante en los bornes del motor, los sistemas de excitación de motores que fabrican hoy en día pueden llevar a cabo muchas funciones.

En la actualidad la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara una de las fábricas productoras de níquel de nuestro país, desarrolla diversos proyectos para la renovación y modernización de los equipamientos que componen el sistema eléctrico.

Debido al tiempo de explotación y al ambiente corrosivo los sistemas de excitación de los motores sincrónicos están presentando fallas y averías consecutivas, afectando así la producción de la empresa. Por lo que se quiere remplazar los sistemas de excitación existentes por sistemas modernos más confiables y con mayores prestaciones.

Desde el punto de vista de su funcionamiento, el sistema de control de excitación (SCE) debe ser capaz de responder a perturbaciones, tanto transientes como estacionarias, sin alterar la operación normal del motor. Asimismo, debe ser capaz de integrarse con el resto de los sistemas de protección de los motores, tales como las protecciones ante fallas de aislamiento en el rotor debido a altos voltajes, calentamientos en el rotor debido a corrientes de campo, calentamientos en el estator debido a corrientes de armadura, calentamiento por baja excitación de operación y debido a exceso de flujo, etc.

Se realizará un estudio de los distintos accionamientos que poseen sistemas de excitación en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara para seleccionar el tipo de excitador moderno que cumpla con todos los requisitos del motor sincrónico para aumentar la eficiencia y la productividad del sistema.



Situación Problemática

Las excitatrices de los motores sincrónicos en la fábrica Ernesto Che Guevara, están sometidas a un régimen de operación continuo, con más de 25 años de explotación, en ella hay focos de averías producto al mal estado físico en que se encuentran sus partes y accesorios, ocasionado por el envejecimiento moral; por ejemplo ellas están constituidas por cuatro bloques extraíbles a través de plug de conexión que crean falso contacto producto al desgaste de los mismos, por los años de explotación que tienen, no poseen buena hermeticidad las puertas, lo cual provoca la entrada de gases que provocan la corrosión de todas sus conexiones, así como la entrada de polvo y humedad relativa a la que están expuestas. Su accionamiento eléctrico, está compuesto también por seis relés electromecánicos que crean focos de averías por falso contacto y desgastes en sus mecanismos.

Problema

Fallas y averías sistemáticas de los sistemas de excitación de los motores sincrónicos, no se cuenta con registro de fallas, ni medición de los todos parámetros eléctricos.

Hipótesis

De proponer y sustituir el sistema actual por un sistema de excitación moderno se podrá mejorar el trabajo de los motores sincrónicos garantizando mayor confiabilidad, productividad y registro histórico de funcionamiento en las plantas correspondientes.

Objetivo general

Sustituir los sistemas de excitación para los motores sincrónicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivos específicos

- Analizar causas de las fallas del sistema actual de excitación.
- Proponer un sistema de excitatriz que cuente con sistema de regulación, medición de los parámetros eléctricos, así como los registros de fallas.
- Evaluar técnica y económicamente la variante propuesta.



Tareas

- Revisión de la literatura referida al tema de estudio.
- Realizar un estudio de las principales desventajas de las excitatrices instaladas con respecto a la moderna.
- Determinación de las magnitudes del motor incluyendo la reactancia, constante de tiempo, datos del campo, torque y características de carga de los motores sincrónicos.
- Seleccionar el tipo de excitatriz a utilizar en los diferentes accionamientos según el tipo de motores sincrónicos teniendo en cuenta.
 - Método de arranque
 - Secuencia de arranque y parada
 - Concepto Operativo.

Métodos a emplear en el desarrollo de la investigación.

En el diseño de la investigación se tuvieron en cuenta los siguientes métodos.

- Análisis y Síntesis: para el análisis del comportamiento de los sistemas de excitación que poseen los motores sincrónicos montados en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
- Hipotético Deductivo: para la elaboración de la hipótesis, cuya veracidad se intentara materializar en la investigación.
- La observación científica: para estar al tanto del desarrollo y el comportamiento de la investigación y para la certificación de los resultados esperados en la investigación.
- La entrevista: para recopilar informaciones referentes a nuestro tema de estudio, con el fin de diagnosticar el estado de los sistemas de excitación, teniendo en cuenta las necesidades que proporcionan el camino correcto en la elaboración de un plan de acciones en función de seleccionar el sistema más adecuado para lograr los objetivos trazados.



- Criterios de expertos: en la proporción de los sistemas a implementar como resultado de la investigación, de acuerdo con los resultados esperados en el proceso investigativo y en el proceso de implementación

Capítulo 1. Marco Teórico.

1.1 Sistemas de Excitación:

Se llama sistema de excitación de una máquina síncrona al conjunto de máquinas, dispositivos y mecanismos utilizados para la alimentación del enrollado de excitación con corriente directa (I_f) y para la regulación de la magnitud de esta corriente. La etapa de excitación es la encargada de controlar las variaciones o perturbaciones temporales que se presentan en la tensión de una máquina síncrona, modificando la corriente que circula por su devanado de campo.

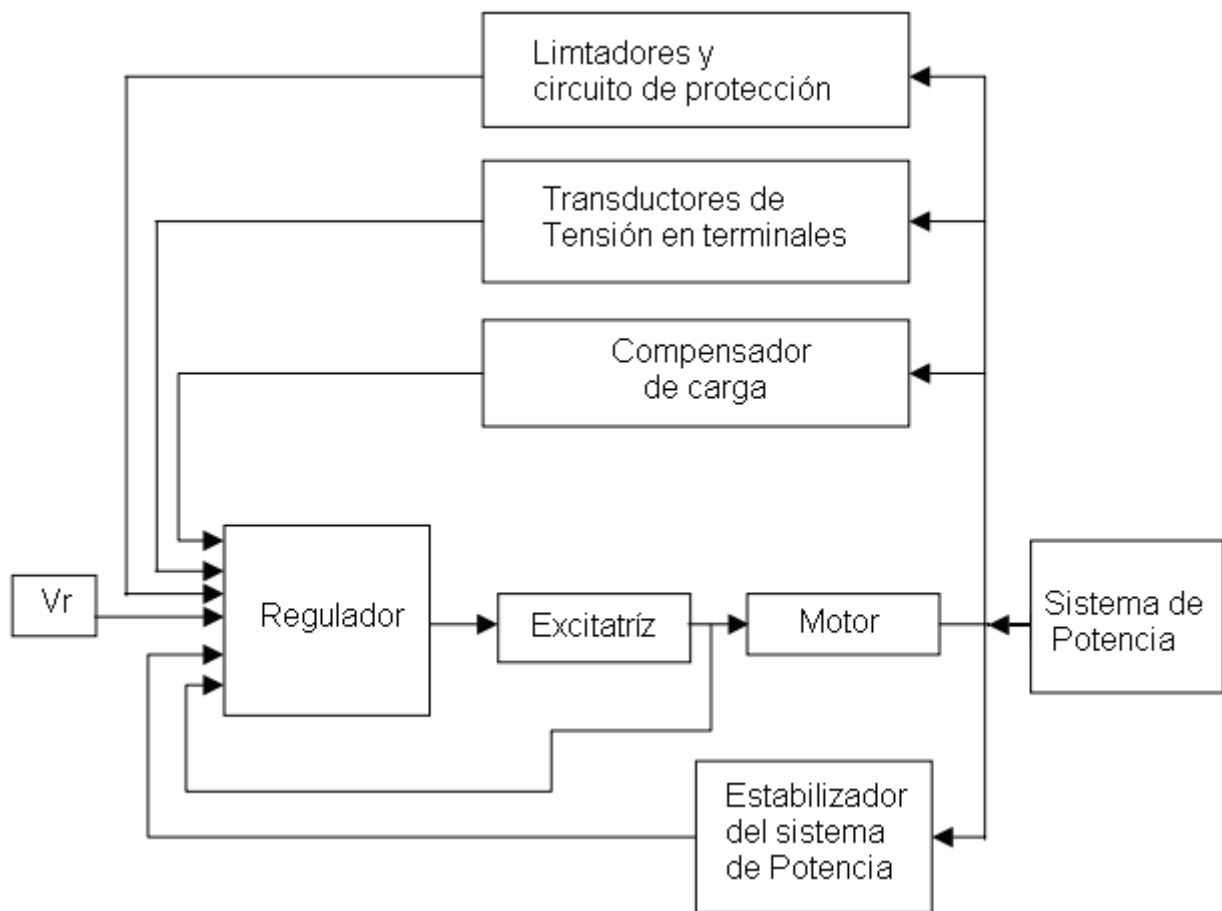


Fig. 1.1 Diagrama de bloques de un sistema de excitación

La función de cada bloque es la siguiente:

- **Excitador:** Este bloque proporciona la energía eléctrica de alimentación del campo rotatorio del motor síncrono, constituyendo la fuente de poder del SCE.



- Regulador: Este bloque procesa y amplifica la señal de entrada a un nivel y forma apropiada para el control. Este incluye ambas regulaciones y funciones de estabilidad del SCE.
- Terminal de Voltaje Transductor y Compensador de Carga: Mide el voltaje en bornes del motor. Posteriormente rectifica y filtra estos valores a una cantidad DC.
- Estabilizador de Potencia del Sistema: Este bloque provee una señal de salida adicional hacia el regulador, la cual se usa para amortiguar las oscilaciones del sistema. Es opcional su activación.
- Limitadores y circuitos de protección: Esta unidad incluye un extenso arreglo de control y funciones de protección para garantizar que los límites de capacidad del excitador y el motor no se excedan. Algunas de las funciones más usadas son los limitadores de corriente de campo, límite máximo de excitación, limitador de voltaje, regulación y protección de Volts/Hertz y limitador de bajo voltaje.

1.2 Tipos de Sistemas de Excitación

Los sistemas de excitación han tomado muchas formas a través de los años de su evolución. En términos generales, dependiendo de la fuente de poder usada en la excitación se pueden clasificar en tres categorías:

- Sistemas de Excitación de Corriente Continua.
- Sistemas de Excitación de Corriente Alterna.
- Sistemas de Excitación Estática

1.2.1 Sistemas de Excitación de Corriente Continua

La excitación de este tipo utiliza generadores DC como fuentes de excitación de poder para proveer la corriente al rotor de la máquina síncrona. El excitador puede ser impulsado por un motor o aprovechando la energía del rotor, por el mismo eje del motor. Puede ser excitada por si misma o excitada en forma separada.

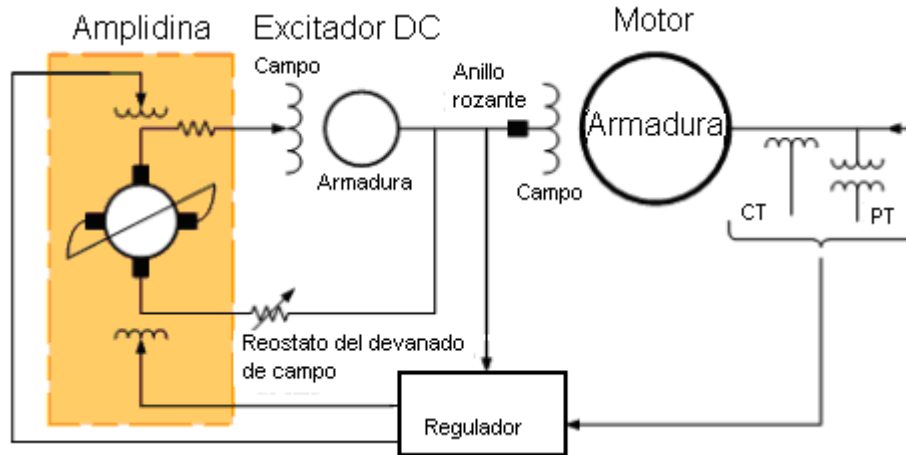


Fig. 1.2 Sistemas de Excitación de Corriente Continua

En la figura se muestra una representación esquemática simplificada de un sistema de excitación típico con una amplidina como regulador de voltaje. Consiste de un excitador conmutable que provee la corriente directa al devanado de campo del motor principal a través de anillos rozantes. El campo de excitación está controlado por la amplidina.

1.2.2 Sistemas de Excitación de Corriente Alterna

Con el advenimiento de la tecnología de estado sólido y la disponibilidad de rectificadores confiables de alta corriente, emergió otro tipo de sistema de excitación. Los sistemas de excitación de corriente alterna utilizan alternadores (generadores de corriente alterna) como fuente de potencial para el motor principal. Usualmente, el excitador está en el mismo eje que el promotor. La salida de corriente alterna del excitador es rectificada por rectificadores (controlados o no controlados por compuerta) para producir la corriente directa necesaria para el devanado de campo del motor principal.

Los rectificadores pueden ser estacionarios o rotativos. Los primeros sistemas de excitación de corriente alterna utilizaban una combinación de amplificadores magnéticos y estáticos como regulador de voltaje automático. Los sistemas modernos utilizan reguladores de amplificadores electrónicos, es decir de estado sólido, cuya respuesta global es bastante rápida.

Los sistemas de excitación de corriente alterna pueden tomar muchas formas dependiendo del arreglo de rectificadores, el método de control de la salida del



excitador y la fuente de excitación para el excitador. Las siguientes categorías describen a los sistemas de excitación según su arreglo de rectificadores. [4]

1.2.2.1 Sistemas de excitación de corriente alterna con rectificadores estacionarios

Cuando se utilizan rectificadores estacionarios, la salida de corriente directa alimenta al devanado de excitación del motor principal a través de anillos rozantes. En los sistemas de rectificación estacionarios la etapa de rectificación se realiza fuera del motor mediante rectificadores estacionarios. Cuando se utilizan rectificadores no controlados, el regulador automático de tensión controla el devanado de campo del excitador de corriente alterna, al mismo tiempo que el excitador de AC controla el voltaje de salida del excitador. Este alternador excitador (AC Exciter), el cual a su vez es un generador sincrónico, está impulsado por el eje del motor principal. El excitador opera en la modalidad autoexcitado, esto es, su campo se obtiene a través de un rectificador con tiristores que toma la energía en bornes del propio excitador. De esta forma, los rectificadores tienen control sobre la excitación del alternador excitador, el cual modifica el voltaje en bornes y en consecuencia, cambia el voltaje continuo de alimentación del campo del motor principal. Notar que los diodos no tienen posibilidad de control, sólo rectifican la señal de entrada. Otra alternativa es usar un excitador dirigido como fuente para el excitador de campo del motor.

Cuando se usan rectificadores controlados, el regulador controla directamente el voltaje de salida DC del excitador. En este sistema la salida del alternador es rectificadora y conectada al campo del motor por medio de anillos rozantes. El excitador del alternador está autoexcitado en paralelo y es controlado electrónicamente por medio del ajuste del ángulo de disparo de los tiristores. Este utiliza una fuente independiente de voltaje para mantener su voltaje de salida. Debido a que los tiristores controlan directamente la salida del excitador, tienen una velocidad de respuesta muy rápida.

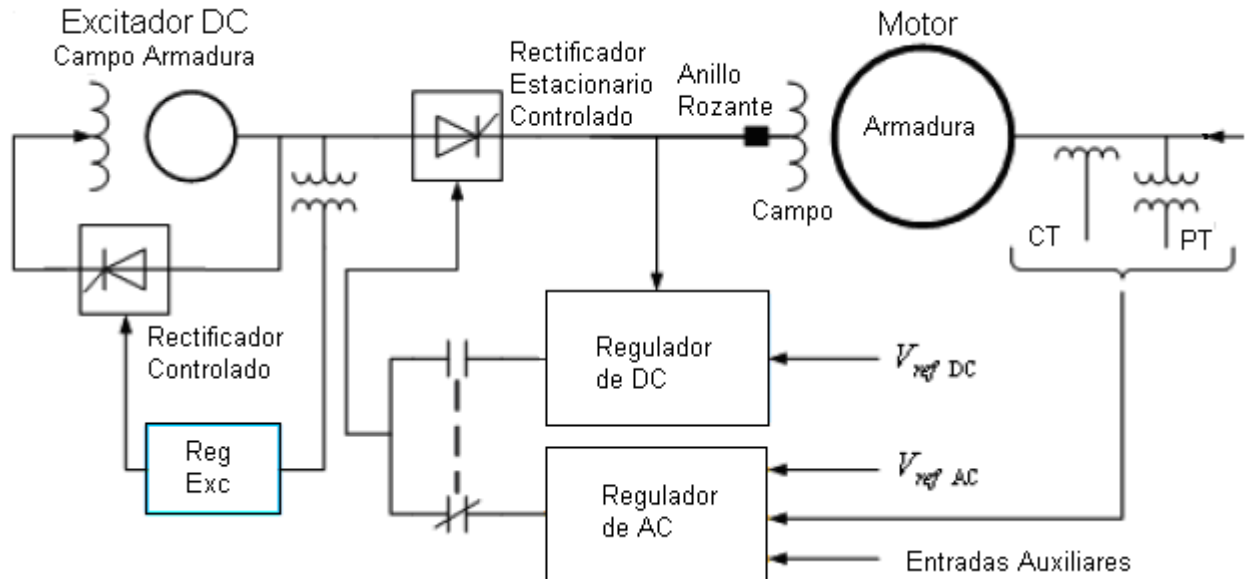


Fig. 1.3 Sistema de excitación de corriente alterna con rectificación estacionario

Ambos sistemas tienen un regulador de corriente alterna que compara el voltaje en los terminales del motor con el de referencia, variando el ángulo de disparo de los tiristores y a la vez regulando la corriente de excitación, y el regulador de corriente directa que mantiene constante el voltaje del devanado de campo del motor determinado por la referencia de corriente directa. El regulador de corriente directa y el control manual, también se proveen para situaciones donde el regulador de corriente alterna tiene fallas o necesita ser deshabilitado. Las señales de entrada del regulador de corriente alterna incluyen entradas auxiliares que proveen control adicional y funciones de protección.

1.2.2.2 Sistemas de excitación de corriente alterna con rectificadores rotativos.

El uso de rectificadores rotatorios permite prescindir de las escobillas y anillos rozantes que se utilizan en sistemas estáticos pues los rectificadores están rotando con el eje del motor principal. Para su construcción se hace necesario el uso de un excitador piloto, el cual tiene un rotor de imanes permanentes, este rota con la armadura de la excitatriz de corriente alterna y los rectificadores para proveer la corriente al devanado estacionario del excitador de corriente alterna; esto significa que la salida rectificada del excitador piloto energiza el campo estacionario del excitador de corriente alterna. Por lo tanto, todo el acoplamiento entre las componentes estacionarias rotativas es electromagnético. Se debe notar que esta característica imposibilita la medición de

cualquiera de las variables de campo del motor de manera directa ya que estos componentes están moviéndose con el rotor de la máquina y no existen anillos rozantes. El regulador de voltaje controla el devanado de excitación del excitador de corriente alterna, este a la vez controla el devanado de campo del motor principal. Un sistema como el mencionado se refiere como *sistema de excitación sin escobillas*. Fue desarrollado para eludir los problemas derivados del uso de escobillas que fueron percibidos cuando se alimentaron altas corrientes a los devanados de campo de los motores.

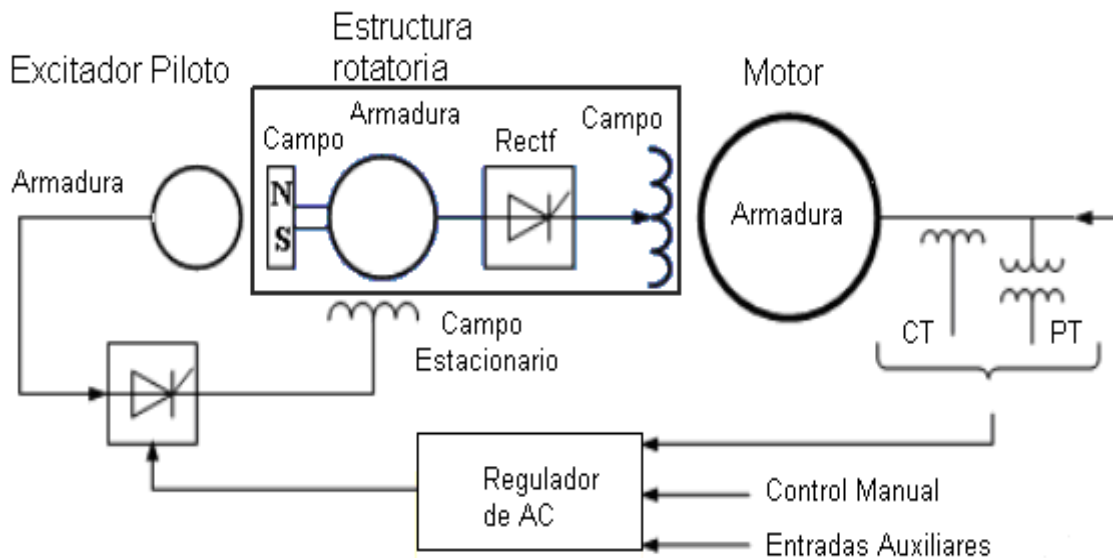


Fig.1.4 Sistema de excitación de corriente alterna con rectificador rotatorio.

1.2.3 Sistemas de Excitación Estática

Todas las componentes en este sistema son estáticas o estacionarias, tanto los rectificadores estáticos, controlados o no controlados, proveen corriente de excitación directamente al devanado de campo del motor sincrónico principal a través de anillos rozantes. La fuente de alimentación para los rectificadores se obtiene de la red principal a través de un transformador que reduce el voltaje a un nivel apropiado.

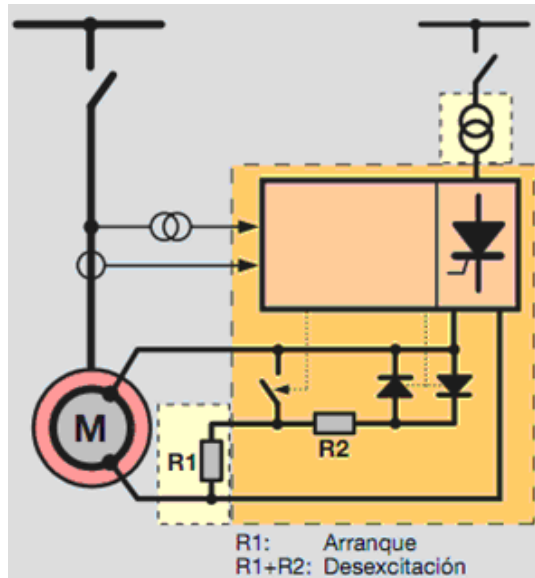


Fig. 1.5 Sistemas de Excitación Estática

1.2.3.1 Sistema de excitación de fuente de potencial y rectificador controlado

En este sistema, la excitación del motor síncrono es abastecida a través de un transformador o desde una estación auxiliar, y son regulados por medio de rectificadores controlados. Este tipo de sistema de excitación también se conoce como sistema estático alimentado por barras o sistema estático alimentado por transformadores.

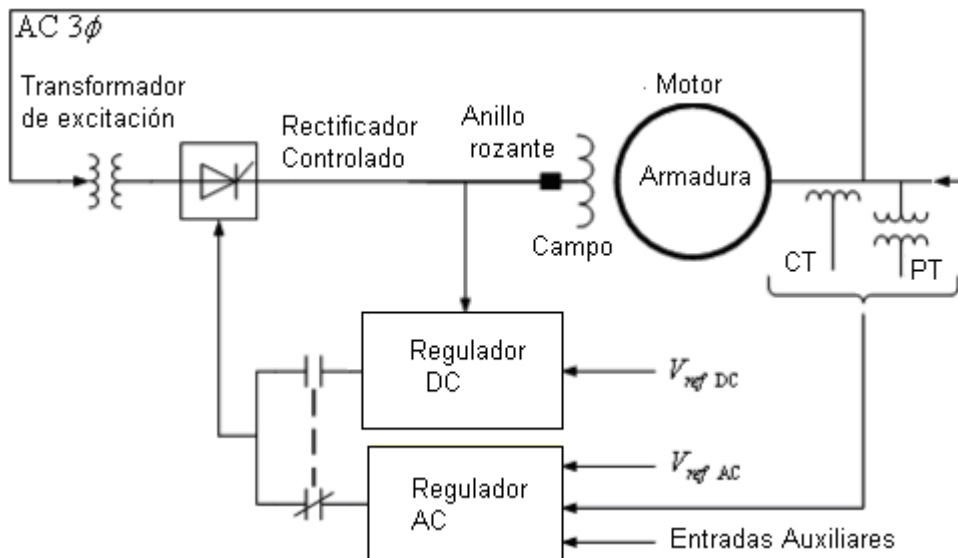


Fig. 1.6 Sistema de excitación de fuente de potencial y rectificador controlado

Una de las particularidades de este sistema es que tiene una constante de tiempo muy pequeña. El voltaje máximo de salida del excitador es, sin embargo, dependiente de la entrada de corriente alterna. De aquí parte la razón de que el voltaje máximo del excitador se reduce en condiciones de falla, pues existe un voltaje menor en los terminales del motor. Esta limitación del sistema de excitación es superada casi completamente gracias a su respuesta instantánea y a la alta capacidad de esfuerzos post-falla del devanado de campo. Además el sistema es poco costoso y de fácil mantenimiento, lo que los hace comunes en sistemas de potencia de gran dimensión.

1.2.3.2 Sistema de fuente compuesta y rectificador no controlados

La potencia para el sistema de excitación, en este caso, esta provista por la utilización de la corriente y el voltaje del motor sincrónico principal. Esta puede ser ejecutada por medio de un transformador de potencial (TPP) y un transformador de corriente con núcleo saturable (TCS).

Alternativamente, la fuente de voltaje y de corriente puede ser combinada por la utilización de un solo transformador, llamado como transformador de corriente saturable y potencial.

El regulador controla la salida del excitador a través del control de saturación del transformador en la excitación. Durante condiciones de falla, con una gran caída de voltaje en bornes de la armadura del motor, la entrada de corriente permite que la excitatriz mantenga una gran capacidad para forzar el campo, es decir, el excitador refuerza la corriente de excitación.

1.2.3.3 Sistema de excitación de fuente compuesta y rectificador controlado

Los sistemas de fuentes compuesta y rectificadores controlados utilizan rectificadores controlados en la salida del excitador y la composición de fuentes de voltaje y corriente dentro del motor del estator para proveer la potencia de excitación de la máquina. El resultado de dicha configuración es una respuesta muy rápida del sistema y muy alta capacidad de esfuerzo. La fuente de voltaje esta formada por un conjunto de devanados trifásicos incorporados en tres ranuras del estator del motor y un reactor lineal en serie. La fuente de corriente se obtiene de transformadores de corriente montados en el terminal neutral de los devanados del estator. Estas fuentes se comunican por el

principio de transformación y la salida resultante de corriente alterna se rectifica por medio de semiconductores de potencia estacionarios. El medio de control se provee por una combinación de diodos y tiristores conectados a un tipo puente en paralelo.

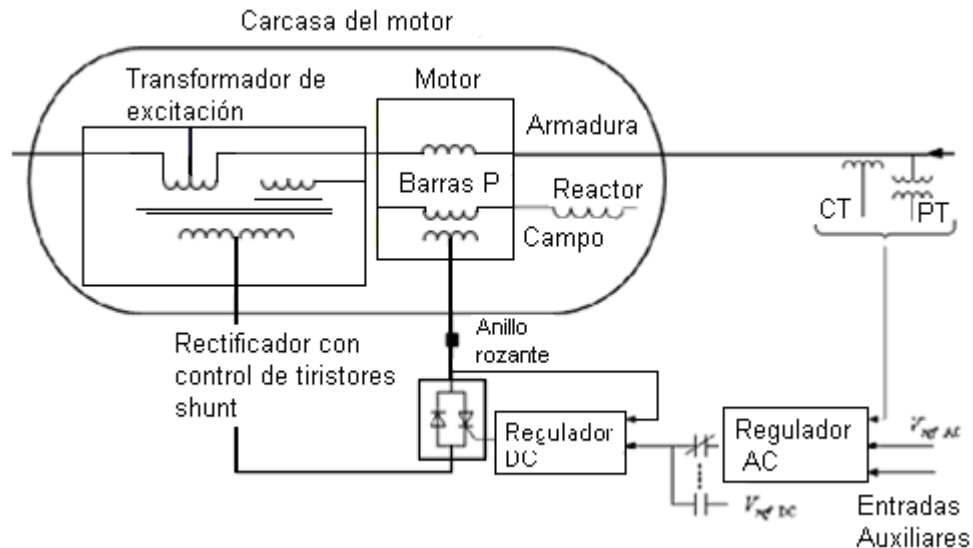


Fig. 1.7 Sistema de excitación de fuente compuesta y rectificador controlado

Un regulador estático de corriente alterna controla los circuitos de disparo de los tiristores y de esta manera regula la excitación hacia el devanado de campo del motor. El transformador de excitación consiste de tres unidades monofásicas con tres devanados: devanados primarios de corriente y de voltaje; y un devanado secundario de salida. Durante condiciones de falla, la corriente fluye a través del devanado de corriente del transformador de excitación, la cual provee la capacidad de esfuerzo del devanado de campo cuando el voltaje en los terminales del motor cae. El reactor realiza dos funciones: contribuir a la característica deseada de composición del sistema de excitación y la reducción de las corrientes de falla en el mismo sistema de excitación. Los transformadores de excitación y reactores están contenidos en un domo de excitación sobre la carcasa del motor, formando una parte integral de la misma.

1.3 Modernos sistemas de excitación

Los avances en los sistemas de control de excitación a través de los últimos 30 años han influido por el desarrollo de la electrónica de estado sólido. El desarrollo en circuitos análogos integrados ha hecho posible la implementación de estrategias de control más complejas. El desarrollo más reciente en los sistemas de excitación ha introducido la



tecnología digital. Los tiristores continúan siendo utilizados para la etapa de potencia. Las funciones de control, protección y la lógica han sido implementadas digitalmente, esencialmente duplicando las funciones que previamente brindaban los circuitos analógicos. Los controles digitales seguirán siendo comunes en el futuro pues proveen una alternativa más económica y más confiable que los circuitos analógicos. Tienen la ventaja adicional de ser más flexible, permitiendo la implementación sencilla de estrategias de control más complejas, la posibilidad de interfaces con otros controles y funciones de protección del motor.

Estos sistemas capaz de proporcionar regulación automática de tensión (AVR) y un sistema excitación estática (SES) para máquinas sincrónicas a 50/60 Hz mediante un convertidor de tiristores y de forma completamente digital.

El sistema de excitación posee un microprocesador, que le proporciona un tiempo de reacción muy rápido y con una regulación fina, un panel de control para operación local y monitoreo que permite cambiar parámetros de funcionamiento durante la operación trabajando a distancia y realizar oportunamente la detección de fallas, mediante una conexión serial de comunicación que transfiere datos entre los canales y el panel de control. Además, cuenta con sistemas automáticos de un canal o de doble canal (cada uno con módulos de excitación, convertidor de potencia y controlador), un registrador de eventos o alarmas y una serie de pantallas que indican el estado operativo del equipo.

1.3.1 Comunicación

En adición al conjunto de interfaces de entradas/salidas requeridas para el funcionamiento desde la sala de control, los sistemas de excitación modernos pueden ser suministrados con una vía de comunicación serial, la cual soporta varios protocolos de control de operación remota y monitoreo. Todas las interfaces de entradas / salidas están galvánicamente aisladas a través de relés y optocopladores.

1.3.1.1 Conexión óptica para la puesta en servicio y mantenimiento

Los sistemas de excitación pueden ser conectados a través de una conexión óptica con un PC en la cual el software debe de estar instalado. Esto posibilita una rápida y segura comunicación con el sistema. Esta conexión permite la funcionalidad al software con

una velocidad de transmisión desde 1 a 1.5 MBaud y permite una operación del sistema de excitación desde el computador.

1.3.1.2 Conexión óptica al nivel de jerarquía superior

La comunicación con sistemas superiores (Máster) es posible. Para ello se requieren MODBUS o Profibus. Para cada canal del sistema de excitación se necesita un adaptador bus para la conexión con el máster vía el cable RS485.

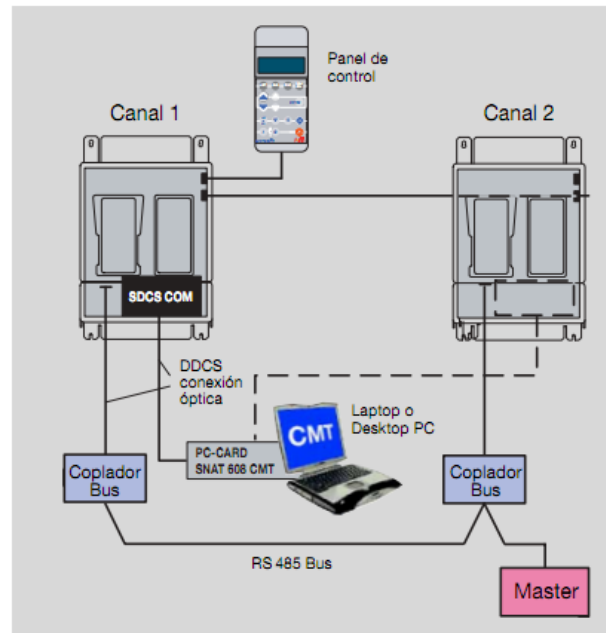


Fig. 1.8 Comunicación óptica con un sistema de doble canal

1.3.2 Diagnóstico

La tecnología de los microprocesadores facilita un amplio diagnóstico de fallas al usuario. Los defectos fácilmente localizados por el panel de control por la utilización del software.

1.4 Configuraciones básicas de los sistemas de excitación modernos

- Sistema monocanal automático con un módulo de excitación, incluyendo un convertidor de potencia y un controlador para ambos modos de control automático y manual.
- Sistema de doble canal automático con dos módulos de excitación idénticos, cada uno con un convertidor de potencia y controlador. Cada canal puede ser operado en modo automático o manual.

El control de seguimiento automático garantiza un cambio imperceptible de un modo para otro.

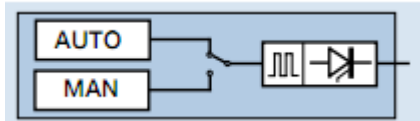


Fig.1.9 Sistema monocal

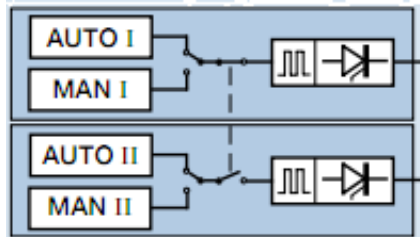


Fig.1.10 Sistema de doble canal

1.5 Funcionalidad del software

1.5.1 Funciones básicas de protección y monitoreo

- Tiempo de excitación inicial.
- Protección de sobrecorriente (instantánea / tiempo inverso).
- Protección de pérdida de excitación.
- Monitoreo de la temperatura del convertidor.
- Monitoreo de la conducción de los tiristores.
- Monitoreo del transformador de medición.
- Subtensión en la alimentación principal.
- Subtensión en la alimentación auxiliar.

1.5.2 Registrador de datos

El software de los excitadores modernos también incluye un registrador de eventos con capacidad para registrar cronológicamente hasta 100 eventos y alarmas. Los registros pueden ser consultados para lectura o análisis vía el panel de control. Hasta seis señales de medición pueden ser almacenadas en el registrador de datos, que para diagnóstico pueden ser desplegadas en la pantalla gráfica del software.



1.5.3 Funciones opcionales de protección y monitoreo.

- Temperatura del rotor (solo para sistemas de excitación estáticos)
- Protección V/Hz.

Las funciones de monitoreo y protección son categorizadas en tres diferentes niveles de actuación:

- Solo Alarma.
- Conmutación para el segundo canal (si existe) para evitar paradas innecesarias.
- Apagado instantáneo de la excitación por motivos de protección.

1.5.4 Funciones de control y protección

Debido al avance en los lazos de control realimentados se automatizaron e incorporaron masivamente a los sistemas. El siguiente paso fue la introducción de la electrónica de potencia, con la cual se usaron rectificadores de gran eficiencia. En la actualidad existen sofisticados esquemas de control de excitación, basados en numerosos lazos de control y electrónica de potencia de última generación.

Un sistema de excitación moderno considera muchas más funciones que solo la de regulación de la corriente de campo del rotor. El sistema incluye un sinnúmero de funciones de control, limitación y protección. Cualquier sistema de excitación puede incluir solo algunas de las funciones, dependiendo de los requisitos de alguna aplicación específica y del tipo de excitador. La filosofía, es tener funciones de control que regulen variables específicas a cierto nivel y que las funciones de limitación prevengan que ciertas variables excedan sus límites establecidos. Si algunos de los limitadores fallaran, entonces las funciones de protección removerían el servicio a las componentes apropiadas o a la unidad.

1.5.4.1 Limitador de sobreexcitación

El limitador de sobreexcitación es proteger al motor del sobrecalentamiento que se produce al exponer al devanado de campo a una sobrecorriente. Este limitador también se conoce como limitador de máxima excitación. El devanado de campo es diseñado para operar continuamente a un valor correspondiente a las condiciones nominales de carga. La función del limitador de sobreexcitación varía en dependencia del fabricante y

la antigüedad del motor sincrónico. Típicamente esta función detecta una condición de alta corriente en el devanado de campo y, después de un retardo de tiempo, actúa a través del regulador de AC para disminuir la excitación.

Si la disminución de la excitación es insuficiente, el regulador de AC será disparado, se transfiere el control al regulador de DC, y este reajusta la comanda a un valor correspondiente al valor nominal de la unidad. Si esto no reduce la excitación a un valor seguro, el limitador iniciará una liberación del interruptor del devanado de campo y de la unidad.

Existen dos tipos de retardos de tiempo utilizados para esta función: de tiempo fijo y de tiempo inverso. Los limitadores de tiempo fijo operan cuando la corriente de campo excede el punto de recogida para un tiempo dado, y sin tomar en cuenta el grado de excitación. Los limitadores de tiempo inverso actúan con un retardo de tiempo que hace juego con la capacidad térmica del devanado de campo y por lo tanto, es particular para cada motor.

1.5.4.2 Limitador de subexcitación

El limitador de subexcitación se utiliza para prevenir la reducción de la excitación del motor a un nivel donde no se exceda el límite de estabilidad de pequeña señal y el calentamiento del núcleo. La señal de control para el limitador de subexcitación se deriva de una combinación de voltaje y corriente o potencia activa y reactiva. Los límites están determinados por el exceso de señal del nivel de referencia. Existe una gran variedad de métodos de implementación para la función del limitador de subexcitación. Algunas aplicaciones del limitador de subexcitación actúa en la señal de error de voltaje. Cuando se alcanza el límite ajustado del limitador de subexcitación, un elemento no lineal (por ejemplo un diodo) comienza a conducir, la señal de salida del limitador es combinada con otras señales que controlan el sistema de excitación; el limitador controla completamente el sistema de excitación hasta que la señal del limitador es menor que el límite ajustado. Los ajustes pueden basarse en la necesidad de protección, por ejemplo, la inestabilidad del sistema o protección contra pérdida de campo.

1.5.4.3 Circuitos de cortocircuito del devanado de campo

En el caso de los excitadores de AC y estáticos, debido a que los semiconductores no pueden conducir en dirección inversa, la corriente del excitador no puede ser negativa. Cuando existen cortocircuitos en el sistema, la corriente inducida en el campo del motor puede ser negativa. Si no se provee de un camino para dirigir el flujo de corriente negativa se pueden dar sobrevoltajes muy altos a través del devanado de campo. Por lo tanto, usualmente se dispone de un circuito especial que coloca un puente sobre el excitador para permitir que las corrientes fluyan. Esto toma la forma de un circuito de cortocircuito o comúnmente referidos como crowbar o un varistor.

El crowbar consiste en un tiristor y resistor de descarga de campo conectado a través del campo del motor. El tiristor es accionado como respuesta a una condición de sobrevoltaje que es creada por la corriente inducida que inicialmente no tiene un camino para dirigir su flujo. El tiristor accionado conduce la corriente de campo inducida a través del resistor de descarga del campo.

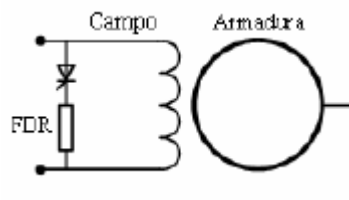


Fig.1.11 Esquema de descarga de campo por crowbar

Un varistor es una resistencia no lineal. Se conecta en paralelo con el devanado de campo, es un medio efectivo para realizar un puente para el excitador bajo condiciones de alto voltaje inducido. Cuando existe un voltaje normal del excitador a través del varistor, debido a que este tiene una alta resistencia, conduce una corriente extremadamente pequeña mientras que el voltaje a través del varistor aumenta más allá de un valor umbral, la resistencia disminuye y la corriente aumenta muy rápido. Por lo tanto, el varistor proporciona un camino de baja resistencia para corrientes negativas inducidas en el devanado de campo y limita el voltaje a través del campo y el excitador.

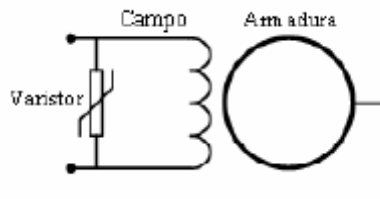


Fig.1.12 Esquema de descarga de campo por varistor

En algunos casos, no existen circuitos especiales de cortocircuito de campo. Los devanados de amortiguación asociados con rotores de hierro sólido proveen caminos para las corrientes negativas. Esto es suficiente para limitar el voltaje inducido a un nivel que está debajo de las capacidades de soporte del devanado de campo del motor y del excitador. Debido a que el campo no está cortocircuitado, no conduce ninguna corriente en dirección negativa.

1.6 Análisis del desempeño de los sistemas de excitación

En esta sección se presenta la caracterización de los sistemas de excitación en el mejoramiento de la estabilidad de un sistema de potencia.

El desempeño del sistema de control de excitación depende de las características del sistema de excitación, el motor sincrónico, y el sistema de potencia. Dado que los sistemas de potencia son no lineales, es conveniente clasificar su funcionamiento en dos categorías: desempeño dinámico de grandes señales y desempeño dinámico de pequeñas señales. En señales “grandes” la no linealidad de las componentes es significativa, mientras que para pequeña señal, la respuesta es aproximadamente lineal.

1.6.1 Caracterización del Desempeño de Señales Grandes

Las mediciones de desempeño dinámico de gran señal provee de un medio para evaluar el desempeño de los sistemas de excitación para transitorios severos tales como aquellos encontrados en los problemas de estabilidad transitoria, estabilidad de mediano plazo y estabilidad de largo plazo. Para permitir una máxima flexibilidad en el diseño, manufactura y aplicación de equipos de excitación, se ha caracterizado el desempeño de los SCE mediante los siguientes parámetros:

Voltaje Máximo (o Tope) del sistema de excitación: Es el máximo voltaje directo que el sistema de excitación es capaz de administrar desde sus terminales bajo condiciones



específicas. El voltaje máximo es indirectamente un indicador de la capacidad del campo electromagnético al interior de la máquina para almacenar energía; el voltaje máximo tiende a mejorar la estabilidad transitoria o de gran señal. Para sistemas de excitación con excitadores rotatorios, el voltaje máximo está determinado por la velocidad nominal.

Corriente Máxima: Es la máxima corriente continua que el sistema de excitación es capaz de administrar desde sus terminales para un tiempo específico. Cuando las perturbaciones prolongadas son de preocupación, la corriente máxima se basa en el esfuerzo térmico máximo del sistema de excitación.

Respuesta del voltaje del sistema de excitación en el dominio del tiempo: El voltaje de salida del sistema de excitación como función del tiempo bajo condiciones específicas.

Tiempo de respuesta del voltaje del sistema de excitación: Tiempo en segundos para que el voltaje del sistema de excitación obtenga un 95% de la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje nominal bajo condiciones específicas.

Sistema de excitación con alta respuesta inicial: Aquel sistema que tiene una respuesta de tiempo de voltaje de 0.1 segundo o menor a éste. Representa una respuesta alta y un sistema de acción rápido.

Respuesta nominal del sistema de excitación: La razón del aumento de la salida del voltaje del sistema de excitación determinada por la curva de respuesta de voltaje del sistema de excitación, dividida por el voltaje de campo nominal. Esta razón si se mantiene constante, desarrolla la misma área de voltaje – tiempo obtenida en la curva actual a través del intervalo del primer segundo.

Ante una perturbación severa la oscilación de ángulo del rotor normalmente alcanza el valor de pico entre 0.4 y 0.75 segundos, el sistema de excitación debe actuar en este período, para efectivamente mejorar la estabilidad transitoria de tiempo nominal igual a 0.5 segundos en la definición de la respuesta nominal. En los sistemas de excitación con una alta respuesta inicial, la tensión de techo y el tiempo de respuesta son los parámetros más representativos.



1.6.2 Caracterización del Desempeño de Pequeña Señal

Esta caracterización entrega una manera de evaluar la respuesta de lazo cerrado del sistema de control de excitación para cambios incrementales pequeños en condiciones de operación normal del sistema. Además provee una manera conveniente para determinar y verificar los parámetros del modelo del SCE para el sistema en estudio. El comportamiento de pequeña señal utiliza índices clásicos de la teoría de control realimentado de sistemas, por ello se los clasifica en:

Índices asociados con la respuesta en el tiempo.

Tiempo de crecimiento t_r

Tiempo de establecimiento t_s

Máximo sobrepaso (5% - 15%)

Índices asociados con la respuesta en frecuencia.

Índices asociados a la respuesta en frecuencia de lazo abierto:

Ganancia a baja frecuencia G : valores mayores de G aportan una mejor regulación en estado estable.

Frecuencia de cruce de ganancia ω_c : valores mayores de ω_c indican una respuesta más rápida.

Márgenes de fase ϕ_m y ganancia G_m : valores mayores de márgenes indican una mayor estabilidad del sistema de excitación en lazo cerrado. Un buen criterio de diseño es obtener $\phi_m \geq 40^\circ$ y $G_m \geq 6$ dB para obtener una respuesta estable no oscilatoria del sistema.

Índices asociados a la respuesta en frecuencia de lazo cerrado:

Ancho de banda ω_B : valores mayores de ω_B indican una respuesta más rápida.

Describe la característica de rechazo de ruido.

Pico de resonancia M_p : criterio de diseño $1.1 \leq M_p \leq 1.5$.

M_p , ϕ_m , G_m y máximo sobrepaso son indicadores de la estabilidad del sistema de excitación con la máquina sincrónica en vacío o alimentando una carga local.



1.7 Requisitos para la excitación de los motores sincrónicos

Los requisitos de funcionamiento de los sistemas de excitación están determinados por consideraciones de los motores sincrónicos así como los sistemas de potencia.

Consideraciones de los motores sincrónicos: el requerimiento básico es que el sistema de excitación provea y automáticamente ajuste la corriente de campo del motor. En adición el sistema de control de excitación debe ser capaz de responder a disturbios transitorios con esfuerzos en el devanado del campo consistentes con las capacidades instantáneas y de corto plazo del motor. Las capacidades del motor están limitadas por varios factores como aislamiento y calentamiento del rotor, calentamiento del estator, etc. Los límites térmicos tienen características dependientes del tiempo, y la capacidad de sobrecarga de corto plazo puede tardar hasta sesenta segundos. Para asegurar la mejor utilización del sistema de excitación, este debe ser capaz de sobreponer las necesidades del sistema tomando las ventajas de corto plazo del motor, sin exceder los límites.

Consideraciones de los sistemas de potencia: desde el punto de vista de los sistemas de potencia, los sistemas de excitación deben contribuir al control efectivo de la corriente de campo del motor y a la mejora de la estabilidad del sistema. Debe ser capaz de responder lo suficientemente rápido ante un disturbio para mejorar la estabilidad transitoria y modular el campo del motor de manera que se mejore la estabilidad de pequeña señal.

Para cumplir con estas exigencias satisfactoriamente el sistema de excitación debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- Satisfacer el criterio de respuesta especificado (velocidad de respuesta).
- Proveer límites y protección para prevenir daños propios, de la máquina o de otro equipamiento.
- Satisfacer requerimientos de una operación flexible.
- Satisfacer una deseable disponibilidad y confiabilidad, con la incorporación del nivel de redundancia necesario y de funciones de detección y aislamiento de fallas internas.



1.8 Secuencia de arranque y parada

Arranque: al conectar el interruptor de aceite que alimenta el motor, comienza el proceso de arranque y en el circuito del rotor se induce una tensión variable con frecuencia de deslizamiento, en este mismo instante la llave de tiristores comienza a conducir siempre que el voltaje generado supere el umbral de los diodos zener y conecta la resistencia de arranque que esta en paralelo con el rotor, permitiendo la marcha asincrónica y el arranque del motor sincrónico, así como limitando los sobrevoltaje propios de este régimen en la unidad rectificadora hasta valores admisibles, en el instante del proceso de arranque no hay suministro de pulsos al puente rectificador controlado de potencia. Cuando la corriente de arranque cae por debajo de 2.5 corriente nominal, entonces ya el motor esta cerca de la velocidad sincrónica y se le suministra corriente de excitación esta lo lleva a velocidad sincrónica en el instante en que el motor se encontraba en su velocidad subsincrónica (cerca de la velocidad sincrónica) la tensión generada es insuficiente para desbloquear los tiristores y desconecta la resistencia de arranque.

Parada: al desconectar el interruptor de aceite se inicia la operación de parada del motor, se coloca el excitador en inversión y el puente de tiristores de potencia devuelve a la línea la energía acumulada en el rotor del motor. El ángulo de los pulsos en la unidad electrónica se ajusta para 160° .

1.9 Métodos de arranque para motores sincrónicos.

Una máquina sincrónica no tiene par de arranque. Por lo tanto, en general se fabrican de forma de que pueda desarrollar un suficiente par de inducción para el arranque por medio de jaulas auxiliares, hasta una velocidad próxima al sincronismo en la que la corriente de excitación desarrolle un par de sincronización conveniente. En algunos casos las corrientes parásitas en los polos proveen el par asincrónico suficiente para el arranque, pero en otros casos debe instalarse un bobinado especial.

Las formas de arranque son semejantes a las del motor asincrónico, aunque se suele conectar una resistencia intercalada en el bobinado de excitación, para evitar sobretensiones en los terminales cuando hay movimiento relativo entre el flujo del inducido y el bobinado del campo. Si el campo del motor es excitado por rectificadores,



esta tensión inducida podría producir una componente de continua y un par pulsatorio, que podría causar trastornos en el arranque.

Cuando se necesita un par de arranque muy elevado, los bobinados de arranque (amortiguadores) se disponen con anillos rozantes para intercalar resistencias externas.

Para generar el campo magnético del rotor, se suministra una CC al devanado del campo; esto se realiza frecuentemente por medio de una excitatriz que puede ser estática o rotatoria; para obtener un par constante en un motor eléctrico, es necesario mantener los campos magnéticos del rotor y del estator constante el uno con relación al otro. Esto significa que el campo que rota electromagnéticamente en el estator y el campo que rota mecánicamente en el rotor se deben alinear todo el tiempo.

Su velocidad máxima de sincronismo es 3600 rpm cuando trabaja con una AC de 60Hz. Si funciona con una AC de 50Hz, su velocidad de sincronismo será de 3000 rpm. Mientras la carga no sea demasiado pesada, un motor síncrono gira a su velocidad de sincronismo y solo a esta velocidad. Si la carga llega a ser demasiado pesada, el motor va disminuyendo velocidad, pierde su sincronismo y se para.

Existen distintas técnicas para el arranque del motor, basada en los siguientes principios:

1. Arranque por medio de un motor de lanzamiento hasta la conexión en paralelo con la red.
 2. Arranque como motor asincrónico y su posterior sincronización al excitar el circuito inductor.
 3. Arranque por reducción de frecuencia en el estator hasta un valor suficientemente bajo para que el rotor pueda enganchar con el campo giratorio antes de que cambie de sentido el par.
- El procedimiento de arranque por medio de un motor auxiliar se basa en la conexión del motor a la red como generador. Una vez conectado, prescinde del motor de lanzamiento, el rotor se desacelera y el campo magnético del rotor se retrasa respecto del campo resultante, pasando a funcionar como motor.
 - El arranque como motor asincrónico es el procedimiento más generalizado, utilizando para ello el devanado amortiguador. El devanado rotórico



amortiguador da al motor sincrónico las características de arranque de un motor asincrónico, y como tal se pone automáticamente en marcha al conectarlo a la red. El motor en estas condiciones de funcionamiento no alcanza la velocidad de sincronismo pero si una velocidad muy próxima a ella si funciona en vacío. En este instante se procede a la alimentación del circuito de excitación.

- Arranque por control de frecuencia consiste en alimentar el estator de la máquina con una frecuencia suficientemente baja para que el rotor pueda seguirlo. Posteriormente se incrementa de forma paulatina la frecuencia hasta llegar a sus valores nominales. Cuando el motor sincrónico funciona a una menor frecuencia, la fuerza electromotriz (F.E.M) generada será menor, por lo que la atención aplicada al estator deberá reducirse de la misma forma para mantener la corriente del estator en niveles admisibles. [5]

1.10 Método para el cálculo de reactancia en por ciento y en por unidad.

Los sistemas eléctricos y las instalaciones operan en sistemas en donde la unidad de voltaje más común es el kilovolt (kV) y en donde se manejan valores de potencia tales que, el kilo-volt-ampere (kVA) en una unidad común en los sistemas trifásicos. Estas cantidades, junto con la corriente y los valores de impedancia, se expresa en forma común en por unidad o en por ciento para simplificar notación de cálculo, especialmente en un mismo sistema eléctrico se manejan distintos valores de voltaje y distintos valores de potencia en los equipo.

1.10.1 Ventajas de las cantidades en por unidad y en por ciento.

- Su representación resulta una forma más directa de comparar datos, ya que las magnitudes relativas se pueden comparar directamente.
- El método por unidad, es independiente de los cambios de voltaje y de los defasamientos.
- Los fabricantes de equipos eléctricos, por lo general especifican la impedancia de los mismos o en por ciento a la base de los datos de placa (potencia en kVA, voltaje en kV), por lo que estos datos se pueden usar directamente en sus propias bases.



- Los valores en por unidad de impedancias de los equipos caen dentro de una banda muy estrecha, en tanto que los valores en ohm lo hacen en un rango muy amplio. Por esta razón, es más frecuente encontrar valores característicos de impedancia de los equipos en por unidad.
- Hay menos posibilidad de confusión entre valores trifásicos o monofásicos o entre voltajes entre fase o de fase a neutro.
- Los valores en por unidad, resultan ideales para los estudios por computadora.

Capítulo 2. Caracterización y Parámetros.

2.1 Caracterización de los sistemas de excitación instalados en la empresa.

Esta empresa ha implementado 23 excitatrices estáticas, destinadas a alimentar el devanado de excitación de los motores sincrónicos, a través de escobillas que se deslizan sobre dos anillas situadas en el rotor de la máquina.

Estas unidades se encuentran ubicadas actualmente en las Plantas Termoeléctrica y Preparación de Mineral de la siguiente manera:

- 9 en los motores de bombas de torre de enfriamiento del tipo **TE8- 320/48**.
- 3 en los motores de los compresores 2BM-10 del tipo **TE8-320/48**.
- 5 en los motores de los compresores 5HK del tipo **TE8-320/75**.
- 2 en los motores de los compresores K-500 del tipo **TE8-320/115**.
- 4 en los motores de los molinos del tipo **TE8-320/48**.

Estos tipos de excitatrices garantizan en el momento de arranque de los motores la conexión en paralelo del devanado de excitación de forma automática a través de una llave de tiristores que conecta una resistencia garantizando el momento de arranque del motor.

2.1.1 Principio Básico de Operación

El elemento vital del excitador es un puente rectificador trifásico de media onda controlado con terminal al neutro y consta de 3 tiristores de tipo TA-250, el cual opera con corriente alterna suministrado a través de un interruptor que lo enlaza con el transformador de potencia.

2.1.2 Destinación de los sistemas de excitación

La excitatriz se destina para alimentar el arrollamiento de excitación y de mando de la corriente de excitación de los motores sincrónicos durante la puesta en marcha directa o con reactor y ante anomalías eléctricas en la red de suministro. Su régimen de funcionamiento es continuo.

2.1.3 Tipos excitatrices instaladas

Las excitatrices instaladas en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara son del tipo TE8-320-5 (TE8-320/48, TE8-320/75, TE8-320/115)



Tabla. 2.1 Datos Técnicos Excitatriz

Tipo de excitatriz	Corriente rectificadora nominal (A)	Tensión rectificadora nominal (V)	Potencia Rectificada Nominal (kW)	Tensión rectificadora máxima con tensión nominal de la red de alimentación (V)	Circuito de rectificación	Rendimiento con carga Nominal (%)	Valor de la Resistencia de arranque (Ω)
TE8-320/48	320	48	15.4	80	R 3 Φ M.O. C	91.0	0.8
TE8-320/75	320	75	24	130	R 3 Φ M.O. C	92.5	0.8
TE8-320/115	320	115	36.8	200	R 3 Φ M.O. C	93.7	0.8

R 3 Φ M.O. C: Rectificador trifásico media onda controlado

Tabla. 2.2 Datos Técnicos de los Transformadores

Tipo de transformador	Potencia (kVA)	Tensión del primario	Tensión del secundario	Pérdidas Vacío (kW)	Pérdidas Corto-circuito (kW)
TC3B-40/0.5	51	380	160	0.3	1.15
TC3B-63/0.5	74	380	230	0.36	1.5
TC3B-100/0.5	112	380	350	0.6	2.1



2.1.4 En la excitatriz están previstos los regímenes: automático, manual y de emergencia de la corriente de excitación.

Funcionamiento a régimen manual de mando la excitatriz:

- Asegura (directo o de reactor) el arranque del motor sincrónico con alimentación automática de la excitación en función de la corriente del estator.
- El ajuste de la corriente de excitación en un rango de [0.3-1.4] corriente nominal y los límites máximo y mínimo es ajustable.
- La intensificación de la corriente de excitación funciona al producirse la caída de tensión de la red del estator de 15 - 20% del valor nominal.
- Extinción del campo del motor en caso de desconexiones del estator.
- Desconecta al motor sincrónico ante falla asincrónica y cortocircuito en el rotor.

Funcionamiento en régimen de mando automático: El excitador asegura en este régimen la estabilización de la corriente de excitación.

Funcionamiento a régimen de mando de emergencia: El excitador solo permite el ajuste nominal completo de la corriente de excitación en todo el rango de 0 - 500A y los límites máximo y mínimo son ajustable.

2.1.5 La excitatriz tiene protección contra:

- Los cortocircuitos interiores.
- Los cortocircuitos exteriores por el lado de la corriente continua.
- La pérdida de la corriente de excitación.

2.1.6 Sistemas electrónicos que componen la excitatriz.

Bloque fuente de alimentación: Es el encargado de suministrar energía a los circuitos electrónicos de la excitatriz, así como la tensión de sincronización para el bloque conformador de pulsos.

Bloque de pulsos: Es la encargada de conformar los pulsos y enviarlos al terminal de control de los tiristores.

Bloque regulador y de protección: Es el encargado de regular la corriente de excitación y proteger al excitador en cuanto a sobrecarga, cortocircuito y fallas asincrónicas.



Bloque automático: Es encargado regular la corriente de excitación de manera automática. Esta señal va al bloque de regulación.

2.2 Arranques de los motores sincrónicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

Arranque directo: se conecta el estator del motor directo a la red, es un arranque brusco. (Motores de los compresores y los motores de las bombas).

Arranque por reactor: El Arranque con reactor tiene la ventaja de la simpleza y la transición cerrada, pero resulta en menor torque de arranque por los kVA que el arranque de auto-transformador. El torque relativo, sin embargo mejora al acelerar el motor. El arranque de reactor generalmente no se usa excepto para motores de alto voltaje o alta corriente. Los reactores deben tener el tamaño correcto para lo HP y voltaje y pueden tener disponibilidad limitada. Típicamente el arranque con reactor es más costoso, pero es más simple y menos costoso para motores de mayor potencia. El factor de potencia de arranque es excepcionalmente bajo. El arranque con reactor permite un arranque suave sin interferencia observable en la transición y se adapta bien a aplicaciones con bombas centrífugas o ventiladores. (Motores de los molinos).

2.3 Los sistemas electrónicos de mando aseguran:

- La conformación de la señal de impulso de cebado de los tiristores.
- Llegada de la señal de impulso de cebado a los electrodos de mando de los tiristores en correspondencia del momento de tiempo.
- El suministro automático de excitación en el proceso de arranque del motor sincrónico.
- Régimen de inversión en caso de desconexiones normales y de emergencia de motor sincrónico.
- Regulación automática y a mano de la excitación del motor sincrónico.
- Protección del rectificador tiristorizado contra las corrientes de cortocircuito.
- Intensificación necesaria de la corriente de excitación del motor sincrónico.
- Protección del rotor contra la prolongada sobrecarga de corriente.



2.4 La estructura de la excitatriz es un armario metálico de servicio bilateral.

El armario de la excitatriz contiene:

- Interruptor principal.
- Rectificador de media onda trifásico controlado a través de tiristores protegidos de sobrevoltaje por circuito RC.
- Resistencia de arranque con llave de tiristor (5 resistencia conectadas en serie, éstas se conectan en el circuito del rotor durante el arranque por medio de una llave de tiristores antiparalelo).
- Panel de relé que está constituido por seis relés.
- Sistema electrónico compuesto por cuatro bloques ante expuesto.

El transformador de fuerza se instala por separado.

2.5 Datos de los motores sincrónicos de la Empresa.

Compresor 5HK.

Tensión Nominal Estator: 10kV

Corriente Nominal Estator: 107A

Potencia Nominal: 1600kW

Velocidad Nominal: 3600rpm

Tensión de Excitación Nominal: 48V

Corriente de Excitación Nominal: 240A

Conexión: Estrella

Eficiencia: 91.4%

Factor de Potencia: 0.9

Frecuencia de la red: 60Hz

TME320/75

Compresor K-500.

Tensión Nominal Estator: 10kV

Corriente Nominal Estator: 166A

Potencia Nominal: 2500kW

Velocidad Nominal: 3600rpm

Tensión de Excitación Nominal: 70V

Corriente de Excitación Nominal: 218A

Conexión: Estrella

Eficiencia: 91.4%

Factor de Potencia: 0.9

Frecuencia de la red: 60Hz

TME320/115

Compresor K-2BM-10.

Tensión Nominal Estator: 6kV

Corriente Nominal Estator: 37A

Potencia Nominal: 320kW

Velocidad Nominal: 514rpm

Tensión de Excitación Nominal: 30V

Corriente de Excitación Nominal: 246A

Conexión: Estrella

Eficiencia: 91.4%

Factor de Potencia: 0.9

Frecuencia de la red: 60Hz

TME320/48



Motores de la bomba de torre enfriamiento.

Tensión Nominal Estator: 6kV

Corriente Nominal Estator: 71,4A

Potencia Nominal: 630kW

Velocidad Nominal: 900rpm

Tensión de Excitación Nominal: 30V

Corriente de Excitación Nominal: 231A

Conexión: Estrella

Eficiencia: 94.3%

Factor de Potencia: 0.9

Frecuencia de la red: 60Hz

TME320/48

Motor Síncrono del Molino de Bolas ML-21, Planta de Preparación del Mineral

Motor tipo: CDC3-15-4910T2

Potencia nominal: 800kW

Tensión nominal: 10kV

Corriente nominal: 54.6A

Frecuencia de giro nominal: 720rpm

Tensión de excitación: 50V

Corriente de excitación: 215A

Conexión: Estrella

Eficiencia: 93.4%

Factor de potencia: 0.9

Frecuencia de la red de alimentación: 60Hz

TME 320/48

2.6 Cálculo de los parámetros de los motores.

2.6.1 Cálculo del Torque y representación de las características de carga.

El momento máximo de un motor sincrónico es proporcional a la tensión, por eso durante la caída de voltaje, el motor sincrónico conserva una gran capacidad de carga. Además, la utilización de la posibilidad de aumento de la corriente de excitación de los motores sincrónicos, permite aumentar su confiabilidad de trabajo durante la caída de voltaje de la red por averías y mejorar en estos casos la condición de trabajo del sistema energético en conjunto.

$$P_m = W_s \times M \quad (1)$$

Dónde:

P_m : Potencia mecánica desarrollada por el motor.

W_s : Velocidad angular de rotación en rad/s.

M : Momento o torque desarrollada por el motor.

$$W_s = W_n \times 0.105 \quad (2)$$

Dónde:

W_n : Velocidad nominal de rotación en rpm.

0.105: Constante.

Para determinar las características de carga de los motores se tomarán valores diferentes de velocidad nominal.

Para el motor **Compresor 5HK**.

Tabla 2.3 Valores de torque y Velocidad

W_n (rpm)	3600	3500	3400	3300
W_s (rad/s)	378	367.5	357	346.5
M (kN/m)	4.23	4.35	4.48	4.62

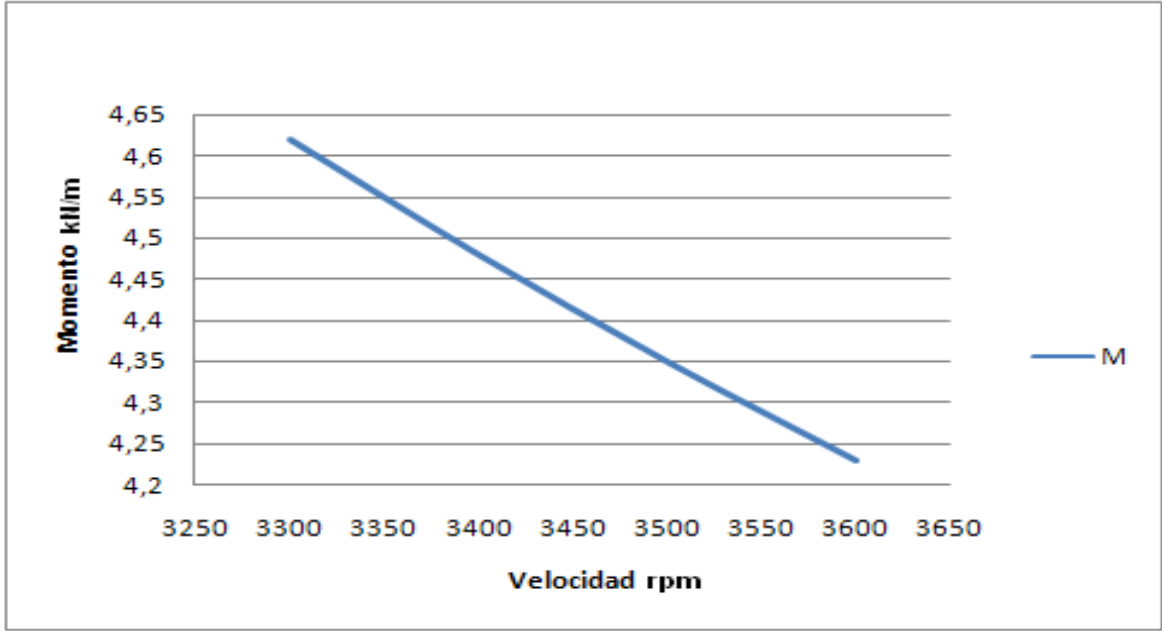


Fig. 2.1 Característica de carga Compresor 5HK

Compresor K500

Tabla 2.4 Valores de torque y Velocidad

W_n (rpm)	3600	3500	3400	3300
W_s (rad/s)	378	367.5	357	346.5
M (kN/m)	6.61	4.35	4.48	4.62

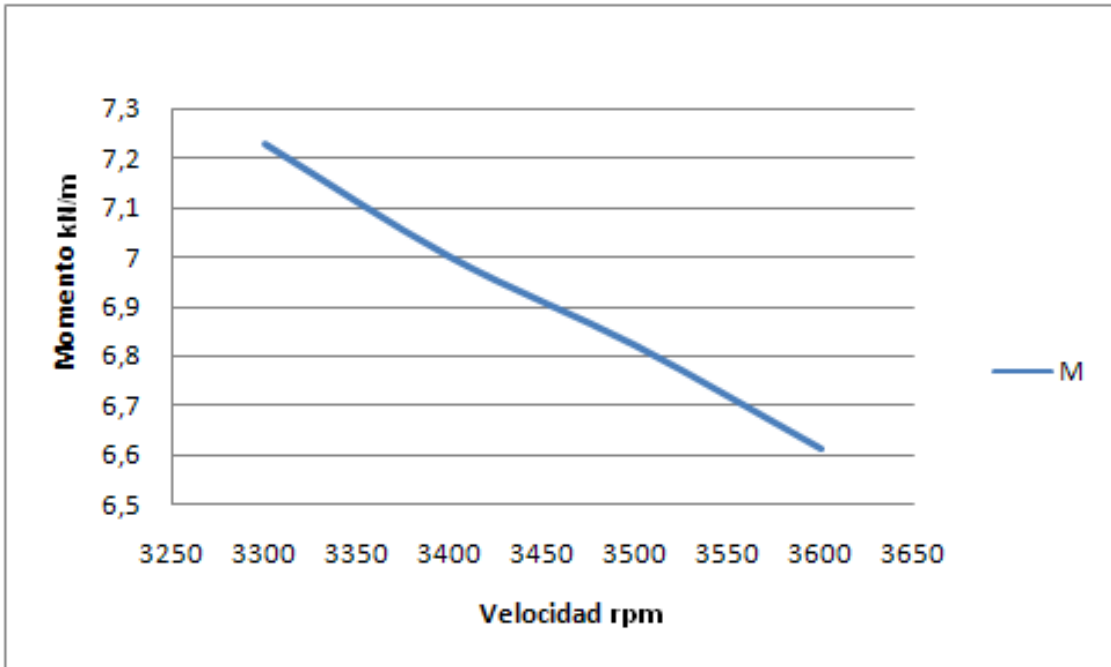


Fig. 2.1 Característica de carga Compresor 5HK.

Compresor k-2BM-10

Tabla 2.5 Valores de torque y Velocidad

W_n (rpm)	514	500	480	460
W_s (rad/s)	53.97	52.5	50.4	48.3
M (kN/m)	5.93	6.09	6.35	6.63

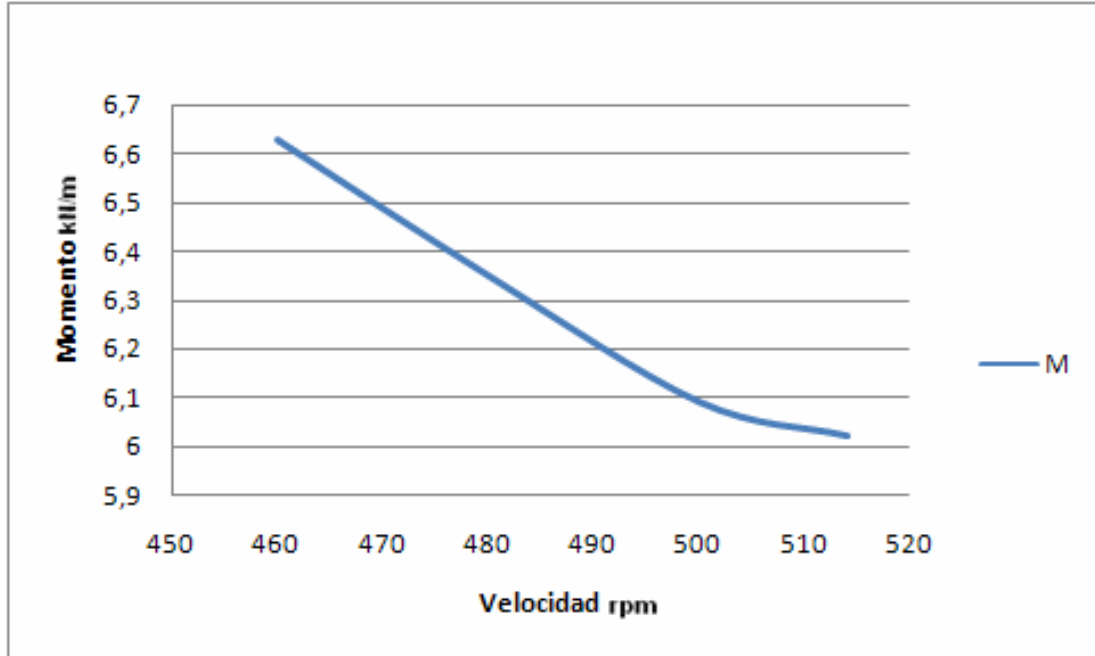


Fig. 2.3 Característica de carga Compresor k-2BM-10.

Motores de las Bombas de la torre de enfriamiento

Tabla 2.6 Valores de torque y Velocidad

W_n (rpm)	900	860	830	800
W_s (rad/s)	94.5	90.3	87.15	84
M (kN/m)	6.6	6.97	7.2	7.5

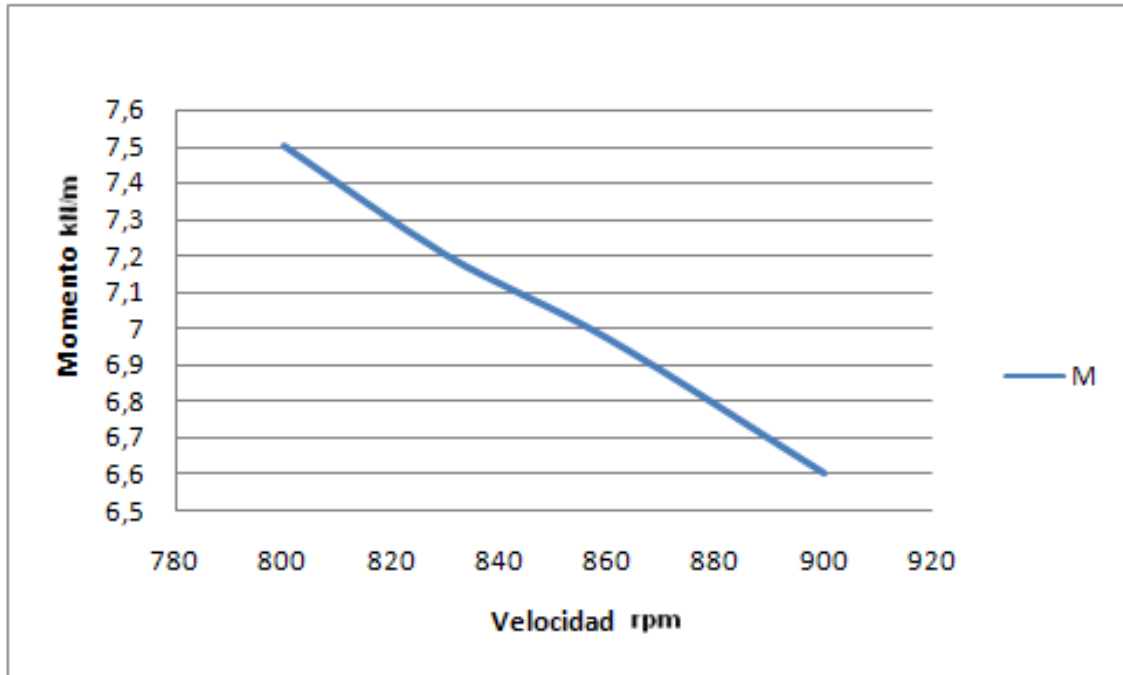


Fig. 2.4 Característica de carga motores de las bombas.

Motor Sincrónico del Molino de Bolas ML-21, Planta de Preparación del Mineral

Tabla 2.7 Valores de Torque y Velocidad

W_n (rpm)	720	700	680	660
W_s (rad/s)	75.6	73.5	71.4	69.3
M (kN/m)	10.58	10.88	11.2	11.5

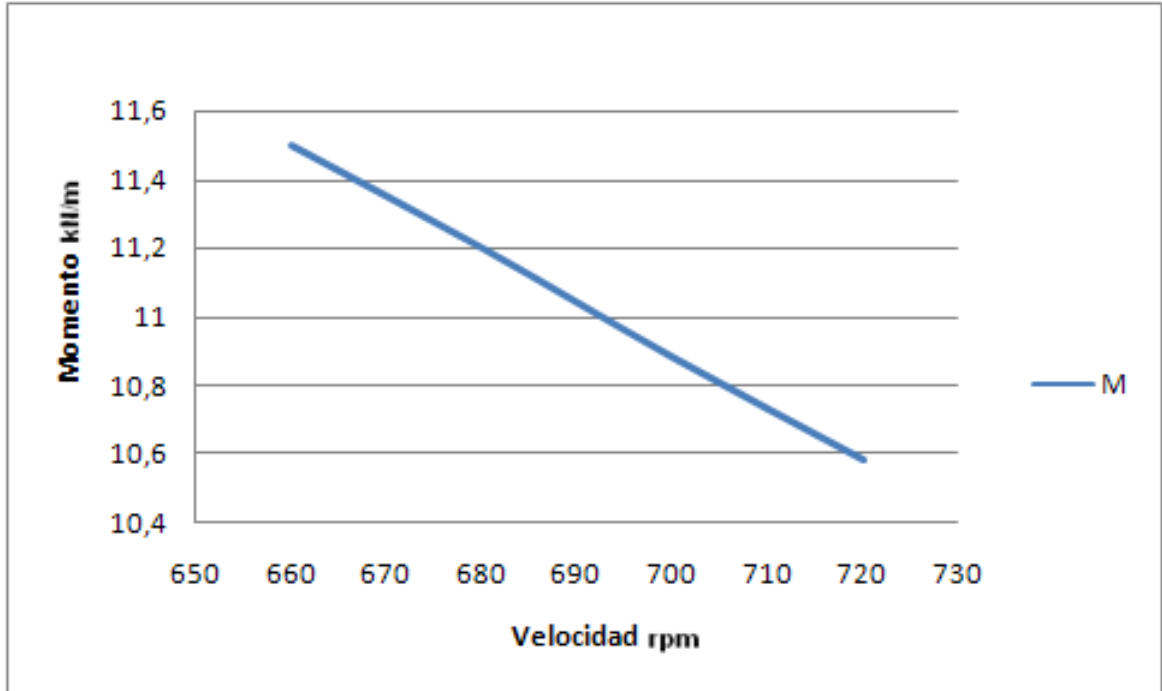


Fig. 2.4 Característica de carga Molino de Bolas ML-21.

2.6.2 Cálculo de las reactancias de los motores de la Empresa Ernesto Che Guevara.

La necesidad de considerar varias reactancias en la máquina síncrona obedece a las siguientes razones:

- Los circuitos amortiguadores hacen que sumado de funcionar sea distinto durante intervalos de tiempo muy cortos (llamado estado subtransitorio), durante intervalos cortos (llamado estado transitorio) y en estado de régimen permanente.
- El circuito magnético en el eje de los polos (llamado eje directo) es diferente al de los entrepolos (llamado eje en cuadratura) lo que produce la necesidad de designar dos valores distintos de reactancia.
- Los estudios sobre estabilidad de los sistemas eléctricos o sobre cortocircuitos, requiere el uso de las componentes simétricas, de modo que las reactancias deben separarse en sus componentes directa, inversa y homopolar.
- La saturación del circuito magnético puede afectar los valores anteriores.



Es decir, las reactancias de las máquinas van a influir en:

- a) Tensiones transitorias por conexión y desconexión bajo grandes cargas.
- b) Regulación de tensión a régimen permanente.
- c) Potencia del sistema bajo condiciones de fallas.

Debido a que los valores de reactancia están en por unidad, el cálculo de éstas se hará por este método.

$$X_{pu} = \frac{X_{real}}{X_{base}} \quad (3)$$

Dónde:

X_{pu} : Reactancia en por unidad.

X_{real} : Reactancia real en ohm.

X_{base} : Reactancia base de cada motor.

$$X_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} \quad (4)$$

Dónde:

U_{base}^2 : Tensión base de cada motor.

S_{base} : Potencia Aparente base de cada motor.

Despejando la fórmula (3) se obtiene

$$X_{real} = X_{pu} \times X_{base} \quad (5)$$

$$S_{base} = \frac{P_n}{\cos \varphi} \quad (6)$$

Dónde

P_n : Potencia nominal de motor.

$\cos \varphi$: Factor de potencia.

- Reactancia inductiva a eje directo sincrónica X_d .
- Reactancia inductiva transversal sincrónica X_q .
- Reactancia inductiva a eje directo de reacción de armadura X_{ad} .
- Reactancia inductiva transversal de la reacción de armadura X_{aq} .
- Reactancia inductiva de dispersión del enrollado de la armadura $X_{\sigma a}$.
- Reactancia X_s .

Compresor 5HK.

Tabla 2.8 Valores de reactancia del compresor 5HK

$X_{base}(\Omega)$	$S_{base}(kVA)$	$X_d(\Omega)$	$X_q(\Omega)$	$X_{ad}(\Omega)$	$X_{aq}(\Omega)$	$X_{\sigma a}(\Omega)$	$X_s(\Omega)$
56	1777.7	33.6	22.4	28	16.8	5.6	22.4

Compresor K500

Tabla 2.9 Valores de reactancia del compresor K 500

$X_{base}(\Omega)$	$S_{base}(kVA)$	$X_d(\Omega)$	$X_q(\Omega)$	$X_{ad}(\Omega)$	$X_{aq}(\Omega)$	$X_{\sigma a}(\Omega)$	$X_s(\Omega)$
36	2777.7	18	14.4	15	10.8	3.6	14.4

Compresor k-2BM-10

Tabla 2.10 Valores de reactancia del compresor k-2BM-10

$X_{base}(\Omega)$	$S_{base}(kVA)$	$X_d(\Omega)$	$X_q(\Omega)$	$X_{ad}(\Omega)$	$X_{aq}(\Omega)$	$X_{\sigma a}(\Omega)$	$X_s(\Omega)$
101.4	355	60.84	40.56	50.7	30.42	10.14	40.56

Motores de las Bombas de la torre de enfriamiento

Tabla 2.11 Valores de reactancia del motores de bombas

$X_{base}(\Omega)$	$S_{base}(kVA)$	$X_d(\Omega)$	$X_q(\Omega)$	$X_{ad}(\Omega)$	$X_{aq}(\Omega)$	$X_{\sigma a}(\Omega)$	$X_s(\Omega)$
51.42	700	30.85	20.57	25.71	15.43	5.14	20.57

Motor Sincrónico del Molino de Bolas ML-21, Planta de Preparación del Mineral

Tabla 2.12 Valores de reactancia del ML-21

$X_{base}(\Omega)$	$S_{base}(kVA)$	$X_d(\Omega)$	$X_q(\Omega)$	$X_{ad}(\Omega)$	$X_{aq}(\Omega)$	$X_{\sigma a}(\Omega)$	$X_s(\Omega)$
112.5	888.8	67.5	45	56.25	33.75	11.25	45

2.6.3 Cálculo de las constantes de tiempo de los motores.

La constante de tiempo transitoria, este valor de tiempo oscila entre 0.6 y 3 segundos.

$$T'_d = \frac{L'_{exc}}{R_{exc}} \quad (7)$$

La constante de tiempo transitoria, este valor de tiempo oscila entre 0.02 y 0.08s.

$$T''_d = \frac{L''_{am}}{R_{am}} \quad (8)$$

R_{am} : La reactancia del devanado amortiguador

L''_{am} : Inductancia equivalente del devanado amortiguador.

Constante de tiempo de corriente aperiódica de la armadura, este valor oscila entre 0.03 y 0.4s.

$$T_a = \frac{L''_d}{R_a} \quad (9)$$

Se puede decir que como la corriente periódica y aperiódica del rotor y el estator están relacionados, la constante de tiempo de una de ellas influye en la otra. Así la componente periódica del estator se amortigua con la constante de tiempo que amortigua la componente aperiódica del rotor T'_d ó T''_{am} .

Debido que R_{am} es considerablemente mayor que la r_{exc} la constante de tiempo $T''_d < T'_d$, por lo cual el salto de las corrientes en el devanado amortiguador se amortigua rápidamente.

2.6.4 Cálculo del flujo magnético

Las resistencias de armadura y del rotor de cada motor se midieron con un microhmímetro.

Los valores del número de vuelta y el coeficiente del devanado se encontraron en los catálogos de los motores.

Tabla 2.12 Datos para el cálculo del flujo magnético

Parámetros	K-500	K-2BM-10	5-HK	ML-21	M.T.E
Resistencia Estator	0,084	0,63	0,49	1,03	0,54
Resistencia Rotor	0,51	0,38	0,87	0,49	0,098
# de vueltas(N)	9	19	12	15	20
Coeficiente del devanado(K_{dev})	0.907	0.938	0.91	0.942	0.96

Para el cálculo del flujo magnético se requiere determinar la FEM de armadura.

$$\phi_m = \frac{E_a}{4.44 f N K_{dev}} \quad (10)$$

Dónde:

ϕ_m : Flujo magnético.

E_a : FEM de armadura.

K_{dev} : Coeficiente del devanado.

N : Número de vueltas.

f : Frecuencia.

4.44: Constante.

$$E_a = V_f - I_n(R_a + jX_s) \quad (11)$$

$$V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Dónde:

V_l : Voltaje de línea.

V_f : Voltaje de fase.

Compresor K-500

Tabla 2.13 Valores de flujo magnético

E_a (V)	ϕ_m (Wb)
$4233.5e^{-10.4}$	1.95

Compresor K-2BM-10

Tabla 2.14 Valores de flujo magnético

E_a (V)	ϕ_m (Wb)
$2085e^{-10.9}$	0.44

Compresor 5-HK

Tabla 2.15 Valores de flujo magnético

E_a (V)	ϕ_m (Wb)
$3376.6e^{-11.3}$	1.16

Motor Síncronico del Molino de Bolas ML-21, Planta de Preparación del Mineral

Tabla 2.16 Valores de flujo magnético

E_a (V)	ϕ_m (Wb)
$3316e^{-11.4}$	0.88

Motores de las Bombas de la torre de enfriamiento

Tabla 2.17 Valores de flujo magnético

E_a (V)	ϕ_m (Wb)
-----------	---------------



$1994e^{-11.6}$	0.4
-----------------	-----



Capítulo 3. Resultados y Valoración Económica.

3.1 Selección del sistema de excitación

3.1.1 Análisis de las ofertas de los sistemas de excitación.

Se analizaron las ofertas de diferentes firmas extranjeras como:

Uit-Agro Service LTD (Rusia)

INNTAG Engineer (Brazil)

Fuan Parbeau Electronica (China)

Viroex, S.L (España)

ABB (Suiza)

Todos estos proveedores ofertan buenos sistemas de excitación, pero muchos de estos sistemas solo se le pueden instalar a motores cuya potencia no exceda los 500kW. Se decidió escoger a ABB (Suiza) porque sus sistemas de excitación abarcan un amplio rango de potencia y se adaptan en dependencia del accionamiento. Sus productos poseen una excelente calidad, fidelidad y tienen en cuenta las especificaciones técnicas del comprador de los sistemas de excitación.

ABB ofrece soluciones para la excitación de motores, dentro de este grupo de excitadores se encuentran los equipos y sistemas UNITROL.

UNITROL 1000: regulador de tensión compacto, para sistemas simples con menores requerimientos de potencia. Puede suministrarse como una unidad individual, o bien puede ser suministrado sobre una placa de montaje que incluye todos los componentes periféricos asociados. Incluyen todos los elementos de control de excitación incorporados en el mismo. Un poderoso procesador de señales, en el que corre un software de control extensivo, garantizando una estabilidad excelente bajo todas las condiciones. La etapa de potencia tipo chopper con semiconductores IGBT, que puede ser alimentada desde una fuente de corriente alterna o corriente directa, posibilita el uso en varias aplicaciones. Empleados en los sistemas de excitación rotatorios (sin escobillas). [8].

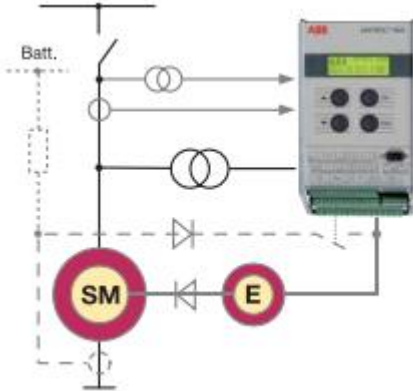


Fig.3.1 Sistema de excitación UNITROL 1000.

Características del UNITROL1000

- Regulador de tensión digital microprocesado con regulador de potencia reactiva y de coseno phi.
- Varios limitadores evitan la sobrecarga del motor.
- Las funciones de monitoreo integradas protegen al motor y la excitación.
- Programa para computadora CMT1000 para simplificar la puesta en servicio, mantenimiento y optimización.

A pesar de la funcionalidad del UNITROL 1000, para un sistema de excitación se requieren componentes periféricos adicionales tales como: interruptores, relés, etc. Por ello se suministran en un gabinete ya cableado y ensayado en la fábrica, para ser instalada en la vecindad del motor.

UNITROL 6080



Fig.3.2 Sistema de excitación UNITROL 6080.

Los sistemas de excitación UNITROL 6080 son sistemas de doble canal, más un canal de respaldo en caso de que se vea afectada la alimentación de los dos canales principales. Posen un alto nivel de comunicación, vía óptica con 64 salidas digitales y 48 entradas, software de mayor disponibilidad, memoria capaz de almacenar 2000 eventos, nivel de protección mayor, debido a la alta funcionalidad de estos sistemas son usados en Centrales Nucleares. Sistemas de excitación más costosos.

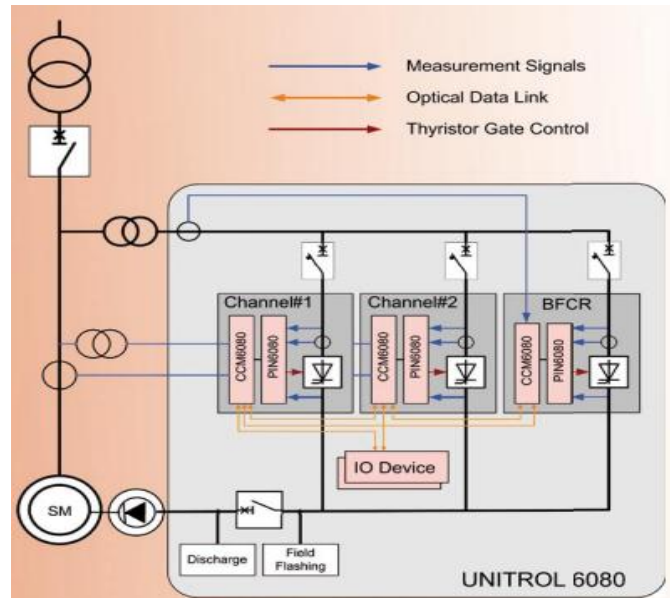


Fig.3.3 Esquema de excitación UNITROL 6080.

UNITROL F

El sistema de excitación es monocanal con regulador digital, con puente de tiristores totalmente controlado, y circuito de desconexión de excitación con protección de sobretensión en el rotor. El regulador incluye software específico para motores con secuencia de arranque programable, y regulación de coseno phi o potencia reactiva, dependiendo del método de arranque, modo operativo y carga del motor. [8]

Características de UNITROL F

- Regulador de tensión digital microprocesado, con regulación de potencia reactiva o de coseno phi.
- Varios limitadores evitan la sobrecarga del motor.
- Las funciones de monitoreo integradas protegen al motor y a la excitación.
- Operación simple (incluso la modificación de parámetros y programas), utilizando el panel de control local.

- Registro de datos integrado con 6 canales, cada uno para 1000 valores.
- Registro de eventos integrado, para 99 eventos, con estampa de tiempo.
- Programa para computadora CMT 5000 para simplificar la puesta en servicio, mantenimiento y optimización.
- Es posible el diagnóstico remoto vía modem.



Fig.3.4 Sistema de excitación UNITROL F.

Después de haber caracterizado los equipos y sistemas de excitación UNITROL se decidió escoger UNITROL F (Sistemas de Excitación Estáticos).

Tabla 3.1. Datos técnicos y opciones de UNITROL F.



Tipo	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Ancho del gabinete [mm]	830	1230	1230	1430	1430	1430
I_{EN} [A]	45	107	187	373	538	776
U_{1max} [V _{CA}]	500	500	500	500	500	500
I_{fn} [A _{CC}]	41	97	170	339	489	705
I_{fpl} [A _{CC}]	53	126	221	441	636	917
T_u [°C]*	40	40	40	40	40	40
Grado de protección*	IP21	IP21	IP21	IP21	IP21	IP21
f_n [Hz]	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60

I_{EN} : Corriente de salida nominal de excitación.

U_{1max} : Tensión de entrada máxima.

I_{fn} : Corriente nominal de campo del motor.

I_{fpl} : Corriente de techo (máx. 10 segundos).

T_u : Temperatura ambiente.

f_n : Frecuencia nominal.

Se eligió el sistema M4 porque la corriente nominal de excitación es mayor que la exigida por los distintos accionamientos. (Ver tabla 3.1).

Opciones

- Transformador de excitación fuera del gabinete.
- Resistor de arranque.
- Marcado de cables.
- Iluminación interior del gabinete.
- Ventilación forzada.
- Instrumentos sobre el frente (voltímetro y amperímetro).
- Botón de parada de emergencia sobre el frente.

Nota: Para los transformadores de excitación la tensión del primario es 440V.



3.2 Ventajas de los sistemas de excitación propuestos.

- Regulación más exacta.
- Memoria para guardar eventos (de fallas o monitoreo).
- Monitoreo de los elementos que componen el excitador.
- Permite el control por medio de señales digitales, con opción de control remoto (distancia).
- Medición de los parámetros eléctricos del motor (V, I, Q, P, Torque) y medición de la temperatura del rotor.
- Secuencia de arranque programable.
- Comunicación serial con sistemas de control de mayor jerarquía.
- Configuración utilizando PC.
- Consta de entradas digitales y analógicas.
- Consta de salidas digitales y analógicas.

Desventajas

- Circuito más complejo.
- Reparaciones más costosas.
- Mantenimiento más complicado.

3.3 Valoración Económica.

Para el análisis de las pérdidas por concepto de producción se examinaron los reportes de incidencias de fallos eléctricos ocurridos en los sistemas de excitación de los motores sincrónicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara en el año 2010.

Ver Anexo 1.

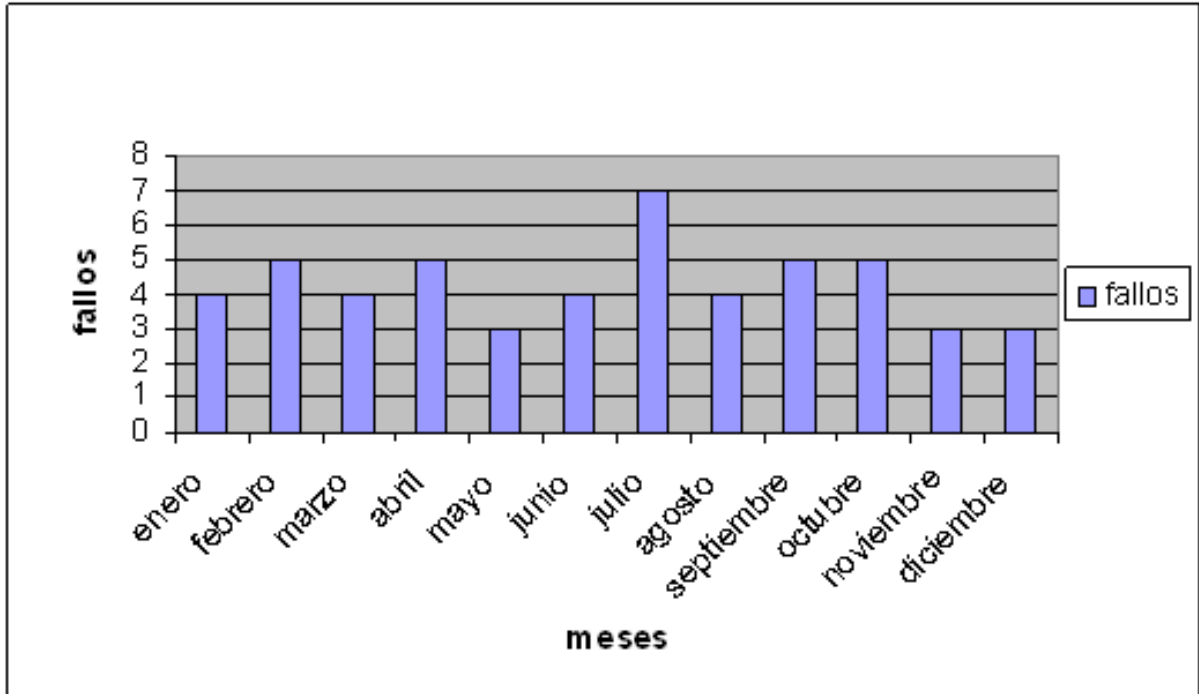


Fig.3.5 Análisis de fallos

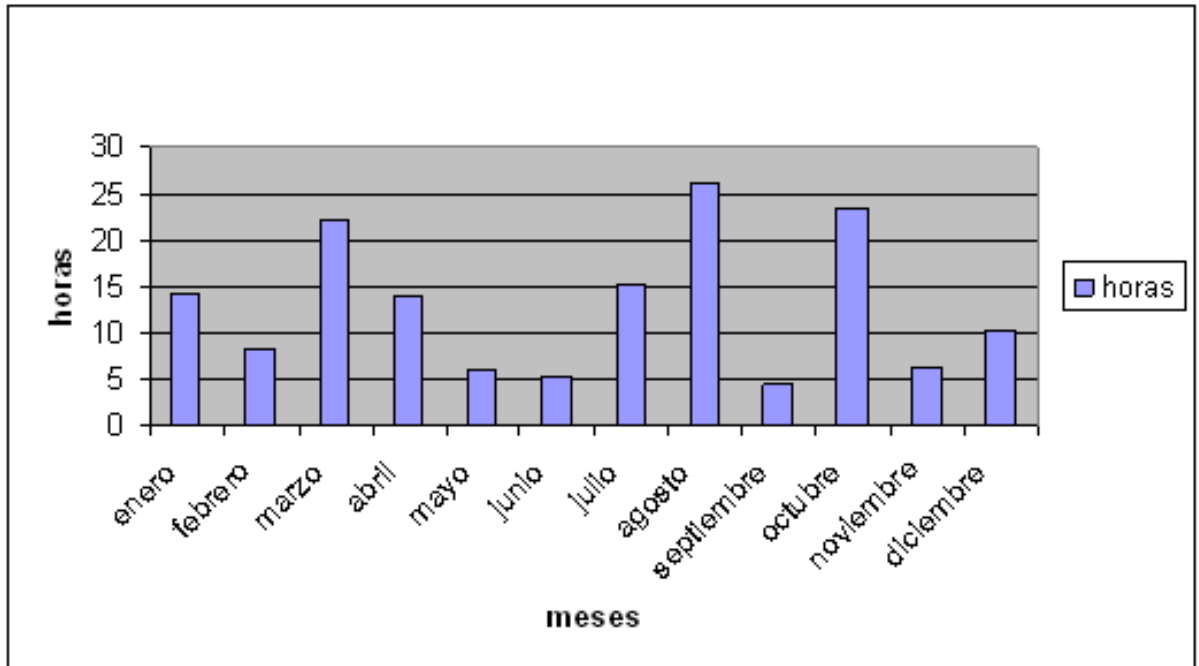


Fig.3.6 Análisis de horas

Los motores sincrónicos de las bombas no influyen directamente en la producción, debido a que en caso de un fallo del sistema de excitación de un motor, arranca otro motor automáticamente, es decir, no afecta el suministro de agua de la empresa.

Afectación de los compresores:

Bombas en Silos

Bombas en Molinos

Bombas en elect. Hornos

Bombas en elect. Secaderos

Transporte Neumático

Filtros de Cobalto

Turboareadores de Lixiviación y Lavado

Las válvulas y reguladores neumáticos

Afectación en los molinos: Afecta el proceso de molienda de mineral.

Afectación de la producción: 15 toneladas de níquel en el año 2010.

Precio promedio de la tonelada de níquel en el año 2010: 22 358.41CUC

Afectación total de producción: 338 376.15 CUC

Gastos de transportación desde el Puerto Moa hacia la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara:

Tabla 3.2. Gasto de transporte.

Cantidad de contenedores	Precio Unitario (CUC)	Costo Total (CUC)
2	42	84

Gastos de salario del personal de montaje de los sistemas de excitación.

Para evaluar los gastos relacionados con el montaje y ajuste de los sistemas de excitación, se estima un tiempo 26 días, con el empleo de 3 trabajadores.

Tabla 3.2. Gasto de salario 1.

Descripción	Costo diario (CUP)	Costo total (CUP)
Técnico superior (1)	15.2	395.4
Técnico montaje (2)	11.8	613.6
Total	17	1009

Gastos de salario: 40.36 (CUC)

Gastos de inversión

Tabla 3.3 Costo de excitadores 1.

Excitadores	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)	Precio (CUC)
23	95 680.00	2 200 640.00	3 168 921.6

Adiestramiento: para 2 técnicos por un período de 15 días en nuestras instalaciones con el fin de adquirir prácticas y conocimientos en: mantenimiento, montaje de accesorios y pruebas.

Importe.....12 000,00.- €

Fletes y seguros.....1679,00.- €

Gasto total de inversión

Tabla 3.3 Gasto total de inversión.

Gastos total (€)	Gastos total (CUC)
2 200 640	3 169 005.6

3.4 Tiempo de recuperación de la inversión

El tiempo de recuperación de la inversión está dado por la relación entre la inversión de la instalación y el ahorro que esta ocasiona.

$$T_a = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro}} \tag{13}$$

$$T_a = \frac{3\ 169\ 005.6}{338\ 376.15}$$

$T_a = 9.36$ años

El tiempo de recuperación de la inversión es de 9 años 4 meses y 3 días.

La inversión no es factible debido a que tiene un período de recuperación muy extendido, es decir, la inversión deja pérdidas.

Se decidió escoger los accionamientos más importantes para el flujo productivo de la empresa:

3 excitadores para los motores de los molinos

5 excitadores para los compresores 5-HK

1 excitador para un compresor K-500

1 excitador para un compresor 2-BM-10

3 excitadores para los motores de bombas (1 para el ciclo 1 de bombeo y 2 para el ciclo 2 de bombeo).

Con un total de 13 excitadores.

Cálculo de tiempo de recuperación de la inversión

Gastos de transporte: 42 (CUC)

Gastos de salario: Se estima un tiempo 15 días, con el empleo de 3 trabajadores.

Tabla 3.4. Gasto de salario 2.

Descripción	Costo diario (Mn)	Costo total (Mn)
Técnico superior (1)	15.2	228
Técnico montaje (2)	11.8	354
Total	17	582

Gastos de salario: 23.28 (CUC)

Gastos de inversión

Tabla 3.5 Costo de excitadores 2.

Excitadores	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)	Precio Total (CUC)
13	95 680.00	1 243 840.00	1 791 129.60

Los gastos de importe, fletes y seguros no varían.

Gasto total de inversión

Tabla 3.6 Gasto total de inversión.

Gastos total (€)	Gastos total (CUC)
1 257 519.00	1 810 892.50

Aplicando la fórmula (13)

$$Ta = \frac{1810892.50}{338376.15}$$

$$Ta = 5.35 \text{ años}$$

El tiempo de recuperación de la inversión es de 5 años 4 meses y 3 días.



Conclusiones Generales

1. Los sistemas de excitación son capaces de mejorar la estabilidad de un sistema de potencia por medio de la amortiguación de las oscilaciones del mismo a través de un diseño adecuado y cuidadoso de sus parámetros de funcionamiento.
2. Se seleccionaron sistemas de excitación **UNITROL F** para los motores sincrónicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara suministrados por el proveedor ABB fabricados en Suiza. Equipados con una alta tecnología, en cuanto a sistemas de excitación.
3. Se propone la compra de 13 sistemas de excitación **UNITROL F-M4**.
4. La inversión se recupera en 5 años 4 meses y 3 días.
5. Para ejecutar la inversión se necesitan 1 810 892.50 (CUC).



Recomendaciones

1. Continuar el estudio de los sistemas de excitación a implementar, para lograr una explotación óptima de estos sistemas.
2. Proponer a la empresa la compra de los sistemas de excitación restantes en el período 2015 - 2020.



Referencia Bibliográfica

- [1]. Anónimo, "Descripción técnica e instrucciones de servicio", Excitatriz TE8-320-5, URSS.
- [2]. Anónimo, "Fabricantes de sistemas de excitación y características de sus equipamientos" Ofertas.
- [3]. Anónimo, "Manual de Instrucciones", ABB (Catálogo).
- [4]. Vanfretti Fumagalli, Luigi. "Modelación y simulación de la máquina sincrónica y su operación en sistemas de potencia," (Trabajo de Diploma) Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005.
- [5]. Haiper Enrique, Gilbrto, "Elementos de diseño de instalaciones eléctricas" Editorial Noriega, España, 2000.
- [6]. Pherson. Mc, Ad Introduction to Electrical Machines and Transformes, Editorial Félix Varela, 2006.
- [7]. Stevevenson, W D. Análisis de Sistemas de Potencia. Edición Revolucionaria. 1986.
- [8]. Voldek. A.I." Máquinas Eléctricas, "Tomo II, Editorial Pueblo y Educación, 1974.

Páginas de Internet.

- [1]. [http:// www ABB/UNITROL.com](http://www.ABB/UNITROL.com)
- [2]. [http:// www.biblioteca.usac.edu.st](http://www.biblioteca.usac.edu.st)
- [3]. [http:// www.book google.com.cu](http://www.book google.com.cu)
- [4]. [http:// www. ingenieria.udec.edu.co/grups](http://www.ingenieria.udec.edu.co/grups)
- [5]. [http:// www.nicherrs.com/sincrónico](http://www.nicherrs.com/sincrónico)
- [6]. [http:// www.was.cec.uchile.cl/rpascal](http://www.was.cec.uchile.cl/rpascal)
- [7]. [http:// www.wey net/file/producto](http://www.wey net/file/producto)
- [8]. [http:// www.wikipedia.org.es/wiki](http://www.wikipedia.org.es/wiki)

Anexos

Anexo1. Reportes de incidencias del año 2010

Enero

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
CTE	Compresor K500	Estaba en operación y se disparó al quedarse sin corriente de excitación, se revisó por los técnicos y se detectó una avería en el bloque de pulsos de la excitatriz. Se cambió el bloque y se puso en marcha el motor.	2.35
Secaderos	Molino 3	Se sacó en V/L por emergencia por bajo aislamiento de los semiconductores.	1.06
CTE	Compresor 2 BM-10	Estaba en operación y se disparó por falla asincrónica.	5.00
CTE	Compresor K500	Estaba en operación y se disparó por sobreexcitación.	5.43

Febrero

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
CTE	Bombas 2	Avería producto de falso contacto de la tarjeta de regulación.	1.30
CTE	Compresor 1	Se sacó en V/L para revisar los conductores internos del excitador.	0.20
Secadero	Molino 3	Estaba en operación y se disparó al quedarse sin corriente de excitación, se revisó por los técnicos y se detectó una avería en un transformador del bloque de alimentación de la excitatriz. Se cambió el transformador y se puso en marcha el motor.	4.09
CTE	Compresor K 500	Estaba en operación y se disparó por cortocircuito, se revisó por los técnicos y se	3.15

		detectó un tiristor averiado.	
CTE	Compresor 21	Estaba parado por el PAEC y al tratar de arrancarlo se disparaba debido a que no entraba la excitación; el operador de control desconectó y conectó nuevamente el Breacker de control y entró normal la excitación quedando en operación el compresor.	0.49

Marzo

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
CTE	Compresor 21	Estaba en operación y se disparó por falla en el sistema de excitación. Se revisó por los técnicos y se detectó que la tarjeta de control automático estaba averiada.	4.00
CTE	Bomba 5	El transformador de corriente que censa la corriente del estator, se averió.	2.27
CTE	Bomba 2	Estaba en operación y se disparó por cortocircuito en el devanado secundario del transformador de excitación. Se cambió por uno de reserva.	1.30
CTE	Compresor K 500	Estaba en operación y se paró por ausencia de la corriente de excitación. Al ser revisado por los técnicos, se detectó que el bloque fuente de alimentación no estaba entregando voltaje.	15

Abril

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
CTE	Compresor 24	El motor se dispara por sobrecalentamiento del rotor.	1.06
CTE	Compresor 23	El motor estaba en operación y se dispara por protección de sobreexcitación. Al ser revisado el instrumento de medición de la corriente de campo estaba en mal estado.	1.50

CTE	Bomba 9	Se decidió sacar vía libre, producto de sobrecalentamiento de los tiristores.	4.38
Secadero	Molino 2	Se dispara el motor y se detecta falta de corriente de excitación. Al ser revisado el plug que conecta el bloque de regulación con el bloque de pulsos, estaba quemado.	4.00
CTE	Compresor 24	El motor estaba en operación y se dispara por falta de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos, el bloque de conformación de pulsos estaba averiado.	2.36

Mayo

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
CTE	Compresor K-500	Se detectó oscilación en la corriente de campo y se decidió sacar una vía libre para revisar el problema. Se detectó un tiristor averiado, se cambió y se puso en marcha nuevamente.	3.13
CTE	Bomba 5	El motor estaba en operación y se dispara por falta de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos, el bloque de regulación estaba dañado.	2.01
Secadero	Molino 1	Se detiene el motor por falla asincrónica. Es revisado por los técnicos y detectan que el relé de marcha asincrónica estaba dañado.	0.48

Junio

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
CTE	Compresor 24	El motor estaba operando en régimen automático y se disparó. Al ser revisado por el técnico se detectó un elemento dañado en el bloque automático. Se arrancó el motor en régimen manual.	0.47
CTE	Compresor 13	El de interruptor principal de la excitariz se desconectó por cortocircuito interno en excitador. Se revisó por los técnicos, se aislaron los cables que alimentan al bloque rectificador. Se puso en	3.23

		marcha nuevamente.	
Secadero	Molino 4	El motor estaba operando y se disparó por ausencia de la corriente de excitación. Al revisar el excitador el bloque de alimentación estaba defectuoso, se sustituyó por uno de reserva y se puso en marcha el motor.	0.37
CTE	Compresor 12	El motor se disparó por sobreexcitación. El técnico reguló la corriente de campo por el potenciómetro al valor nominal.	0.34

Julio

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
Secadero	Molino 1	El motor estaba trabajando y se disparó, se revisó por los técnicos, detectando que el circuito de descarga del campo estaba conectado. Se cambió el contactor y se arrancó el motor.	3.05
Secadero	Molino 4	El motor estaba en operación y se paró señalizando falta de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos y el cable de alimentación del bloque fuente estaba averiado, se sustituyó por otro y se procedió al arranque del motor.	1.15
Secadero	Molino 3	El transformador de excitación se averió, se sustituirá por otro.	7.28
CTE	Compresor 21	El motor estaba trabajando y se disparó, se revisó por el técnico y el circuito de fuerza tenía dos tiristores averiados.	5.09
CTE	Bomba 9	El motor estaba en operación y se dispara por oscilaciones de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos detectando que los bornes del transformador estaban sulfatados.	0.43
CTE	Compresor 12	El motor estaba trabajando y se dispara por ausencia de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos y el bloque conformador de pulsos tenía componentes averiados, se sustituyó la tarjeta y se arranco el motor.	0.38
Secadero	Molino 3	El motor estaba en operación y se disparó. Al ser	0.33

		revisado por los técnicos el bloque de regulación tenía falsos contactos, se limpió la tarjeta, quedando listo el excitador y se procedió al arranque del motor.	
--	--	--	--

Agosto

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
Secadero	Molino 3	El circuito de limitación y protección disparó el excitador sin ocurrir fallo. Se limpiaron los plug de conexión y se arrancó el motor nuevamente.	4.30
Secadero	Molino 3	El motor estaba operando y se disparó. Los técnicos revisaron el excitador y el bloque fuente de alimentación tenía componentes averiados.	3.18
CTE	Compresor 21	Ocurrió un cortocircuito interno en el excitador. Se revisó por los técnicos, los tiristores estaban averiados al no actuar el circuito de protección (RC) de los tiristores. Se va a proceder al cambio de los tiristores.	15.36
CTE	Bomba 3	El motor estaba operando en modo automático y se disparó. Se revisó por los técnicos y el bloque automático estaba averiado y se pasó a regulación manual.	3.02

Septiembre

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
CTE	Compresor 21	El motor estaba operando se disparó por falta de corriente de campo, se revisó por el técnico el interruptor principal que estaba abierto, se cerró el interruptor y se arrancó el motor.	0.13
CTE	Compresor 11	El motor presentaba oscilaciones de régimen asincrónico, se decidió para el motor, revisar el excitador. Se arrancó nuevamente el motor.	0.10
CTE	Bomba 6	El regulador de tensión del rotor presentó problemas, al se revisado por los técnicos, se detectó que el indicador del panel frontal estaba	1.18

		defectuoso.	
CTE	Compresor K-500	El motor estaba operando y se disparó por ausencia de la corriente de excitación. Los técnicos revisaron el excitador y detectaron una avería en el circuito de protección de la excitatriz.	0.35
Secadero	Molino 4	El motor estaba operando y se disparó. Se revisó por los técnicos y el bloque de regulación tenía un elemento averiado.	2.30

Octubre

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
Secadero	Molino 2	El motor estaba operando y se disparó por ausencia de la corriente de excitación. Al ser revisado por los técnicos se detectó que la protección contra sobrecalentamiento del rotor tenía falsos contactos.	7.43
Secadero	Molino 1	El motor estaba operando y se disparó. Al revisarse por los técnicos se detectó que el bloque de pulsos estaba averiado. Se sustituyó por otro y se arrancó el motor.	4.52
Secadero	Molino 3	El motor estaba operando y se disparó por ausencia de la corriente de excitación. Al ser revisado por los técnicos se detectó un tiristor averiado. Se sustituyó por otro y se arrancó el motor.	6.58
CTE	Bomba 2	Se disparó producto de un cortocircuito en el armario del excitador.	2.42
CTE	Compresor 12	El motor estaba operando y se disparó. Al ser revisado por los técnicos, detectaron falsos contactos en el plug del bloque de regulación.	2.44

Noviembre

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
Secadero	Molino 1	El motor estaba operando y se disparó por falla asincrónica. Se decidió arrancar el motor.	0.40
CTE	Compresor 21	El motor estaba operando y se disparó por ausencia de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos y detectaron que el interruptor principal estaba averiado. Se sustituyó por otro y se arrancó el motor nuevamente.	2.25
CTE	Compresor K-500	El motor estaba operando y se disparó por ausencia de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos y se detectó una avería en el bloque fuente.	3.28

Diciembre

Plantas	Equipos	Incidencia	Tiempo de afectación(h)
Secadero	Molino 4	El motor estaba operando y se disparó por falta de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos y detectaron una avería en el bloque de control automático. Se decidió pasar el excitador al régimen de control manual y nuevamente se arranca el motor.	0.45
Secadero	Molino 1	El motor estaba operando y se disparó por falta de corriente de excitación. Se revisó por los técnicos y detectaron que el relé de descarga de campo estaba averiado, se sustituyó por otro y se arrancó el motor.	2.21
CTE	Bomba 1	El motor estaba presentando oscilaciones de la corriente de excitación. Se decidió sacar vía libre para revisar el excitador.	7.52