UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

AJUSTES DE REGULADORES ELECTRÓNICOS DE ESTADO SÓLIDO PARA APLICACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE DIRECTA CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

OTTO GABRIEL LÓPEZ ARCHILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 1999

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

AJUSTES DE REGULADORES ELECTRÓNICOS DE ESTADO SÓLIDO PARA APLICACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE DIRECTA CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 6 de marzo de 1998, referencia No. EIME.060.98

OTTO GABRIEL LÓPEZ ARCHILA.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing.	Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1o.	Ing.	José Francisco Gómez Rivera
VOCAL 2o.	Ing.	Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL 3o.	Ing.	Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL 4o.	Br.	Oscar Stuardo Chinchilla Guzmán
VOCAL 5o.	Br.	Mauricio Grajeda Mariscal
SECRETARIA	Inga.	Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing.	Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing.	Julio Roberto Urdiales Contreras
EXAMINADOR	Ing.	Judy Marlene Lone Vásquez
EXAMINADOR	Ing.	Mauro Fernando Oroxom Popá
SECRETARIO	Ing.	Francisco Javier González López

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME.060.98
6 de marzo de 1,998

Señor
Otto Gabriel López Archila
Carnet No. 79-12654
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Estimado señor López.

Me permito hacer de su conocimiento que, esta Dirección de Escuela ha aprobado su protocolo de tesis titulado: **Ajustes de reguladores electrónicos de estado sólido para aplicación en motores eléctricos de corriente directa con excitación independiente.** Asimismo, se aprobó que este trabajo sea asesorado por el Ing. Freddy Armando Veláquez Girón.

Sin otro particular, aprovechomos la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

MASG/sdem.

cc. Archivo.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION ESCUELA DE INGENIERIA
MECANICA ELECTRICA
DE GUATEMALA

Guatemala, 12 de noviembre de 1998

Ingeniero
Angel Jesús García Martínez.
Coordinador Area de Potencia.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Estimado Ingeniero.

*Me dirijo a usted saludándole respetuosamente e informándole que como asesor para el desarrollo del protocolo de tesis titulado "**Ajustes de reguladores electrónicos de estado sólido para aplicación en motores eléctricos de corriente directa con excitación independiente**", del estudiante Otto Gabriel López Archila, carnet No. 79-12654 he procedido a orientar y estimular la iniciativa y creatividad del estudiante, desde el inicio, durante el desarrollo y en la finalización del presente trabajo.*

Como asesor nominado en sesión de coordinadores de fecha 06/03/1998 y considerando que el trabajo llena a cabalidad los objetivos propuestos dentro del protocolo respectivo, procedo a enviarle a usted el mismo para su correspondiente revisión y aprobación.

Por lo tanto, el autor de esta tesis asi como yo, asesor de la misma, somos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Agradeciéndole su amable atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente.

Ing. Freddy Armando Velásquez Girón.

Colegiado No. 4263.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 4 de marzo de 1,999

Señor Director
Ing. Roberto Urdiales Contreras
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Señor Director.

Me permito dar aprobación al traajo de tesis titulado: **Ajustes de reguladores electrónicos de estado sólido para aplicación en motores eléctricos de corriente directa con excitación independiente**, desarrollado por el señor **Otto Gabriel López Archila**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Angel Jesús García Martínez
Coordinador Area de Potencia

AJGM/sdem.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante **Otto Gabriel López Archila**, titulada: **Ajustes de reguladores electrónicos de estado sólido para aplicación en motores eléctricos de corriente directa con excitación independiente**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Roberto Urdiales Contreras
Director

Guatemala, 12 de marzo de 1,999.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION ESCUELA DE INGENIERIA
MECANICA ELECTRICA
DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

El decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: Ajustes de reguladores electrónicos del estado sólido para aplicación en motores eléctricos de corriente directa con excitación independiente, del estudiante Otto Gabriel López Archila, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Guatemala, Julio de 1999.

Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA
DE GUATEMALA

Dedicado:

A Dios, como Supremo Creador.

A mis padres, como el mejor presente a su memoria.

A mis tías Esperanza y Olivia, como un regalo a sus esfuerzos.

A mi hermana, como un obsequio a su gran cariño.

A mi esposa, como un presente de nuestro gran amor.

A mis hijos, como un reto a ser superado.

A mi familia, como un triunfo del gran esfuerzo hecho en conjunto.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

TABLAS

GLOSARIO

Accionamiento

Mecanismo empleado para producir en el acero las diferentes deformaciones que este necesita hasta llegar a ser la varilla de construcción que se conoce. Los accionamientos son:

a. Jaulas de laminación.

b. Cizallas de corte.

c. Rodillos transportadores y/o arrastradores.

d. Frenos mecánicos, etc.

Ángulo de encendido

Ángulo eléctrico que puede tomar o recorrer un tren de impulsos referido a una señal de sincronización que normalmente es una señal de corriente alterna de tipo senoidal y el recorrido o desplazamiento eficaz que puede tener un tren de impulsos oscila de 180° a 0° eléctricos; es decir, equivalente a un semiperiodo de la señal senosoidal.

Ansa

Término en italiano que traducido al castellano significa "lazo", usado para indicar que entre dos puntos del proceso de laminación, existe suficiente holgura de material de tal

TABLAS

para modificar su velocidad.

c. Dar consensos y protecciones para la protección del motor.

Colector — *Está montado sobre el eje del motor y aislado eléctricamente de éste, compuesto de varias barras de cobre aisladas entre sí y del eje. Es el lugar por donde ingresa la corriente eléctrica a través de escobillas de carbón para mantener el movimiento mecánico del motor y forma parte del inducido.*

" Forward " — *Término en inglés que traducido al castellano significa "Adelante" y en el presente trabajo, se refiere al sentido de rotación del eje de un motor de d.c. coincidiendo este con el sentido de rotación de las agujas del reloj. Se usa también para indicar que puente de tiristores o T.P.M. esta en operación y como su efecto hace girar al motor en el mismo sentido de las manecillas del reloj.*

Grupo electrógeno — *Conjunto electromecánico encargado de generar una tensión eléctrica partiendo del movimiento mecánico dado al eje de un generador eléctrico. Éstos pueden ser con frecuencia fija o variable.*

Inducido o armadura *Parte giratoria de un motor de corriente directa compuesta por el eje donde van montados el núcleo del inducido, el devanado inducido y el colector.*

Inductor *Parte fija del motor de corriente directa compuesta por el núcleo inductor, devanado inductor y además aquí también se localizan los devanados de compensación y de estabilización del motor.*

Interfase *Dispositivo electrónico que tiene la capacidad o función de llevar a un nivel de voltaje de tipo digital, una señal de corriente alterna mayor de 15 vac., logrando con ello acoplar una señal de tipo analógica hasta un dispositivo que opere únicamente con señales digitales. Las señales digitales son aquellas señales electrónicas que tienen solo dos posibles niveles, "Nivel alto", (5 ó 12 vdc) y "Nivel bajo", (0 voltios de d.c.).*

Motor eléctrico *Proporciona la fuerza motriz al accionamiento mecánico, mediante la transformación de energía eléctrica en mecánica. Los motores pueden ser en general sincronos, asincronos y de corriente directa y en el presente trabajo se hace especial énfasis en los*

motores de d.c. a excitación separada por ser de uso común en las industrias metalúrgicas.

Osciloscopio — *Instrumento de medición altamente especializado que tiene la capacidad de visualizar en una pantalla, valores instantáneos de señales de voltaje o corriente eléctrica de cualquier tipo. Usado para ver señales que se presentan y sea en una tarjeta lectrónica o en un puente de tiristores, entre otras.*

Oscilografo — *Instrumento de medición altamente especializado que tiene la capacidad de imprimir en un papel continuo, valores instantáneos de señales de voltaje o corriente eléctrica de cualquier tipo. Usado para verificar que tipo de señales se presentan en determinados puntos de tarjetas electrónicas.*

Planta de laminación — *Es el lugar donde el acero al carbono en forma de barras, recibe mediante calentamiento y deformaciones definidas y controladas, la forma final como varilla de construcción de diferentes medidas, para ser usada como refuerzo en columnas y vigas de concreto.*

P.L.C o autómata	*Equipo electrónico altamente especializado capaz de enviar señales eléctricas a diferentes dispositivos electromecánicos para que ejecuten una función física determinada, como resultado de haber procesado una señal electrónica de control proveniente de sensores u otros dispositivos similares que verifican la ejecución de las ordenes de un programa de computo especifico.*
Pri-motor	*Proporciona el movimiento mecánico al generador electrónico de un grupo electrógeno y puede ser un motor eléctrico de corriente alterna o uno de corriente directa.*
Protección	*Sistemas o procedimientos usados con el objetivo de resguardar tanto al equipo como al personal que trabaje en ellas. Las protecciones pueden ser de tipo eléctrico, electrónico así como de tipo mecánico.*
Rampa de aceleración	*Comportamiento seguido por la velocidad de un motor de corriente directa durante el periodo de arranque del mismo. La velocidad incrementa su valor de forma lenta y continua hasta llegar a la velocidad de trabajo lo que ocurre entre 15 y 20 segundos después de alimentar el*

motor.

Regulador electrónico de estado sólido

Es un equipo que tiene la capacidad de poder convertir la corriente eléctrica trifasica en corriente continua para así alimentar ya sea la armadura de un motor de corriente directa o bien su devanado de excitación. Además, tiene la capacidad de poder variar la velocidad del motor, brindar protección eléctrica y electrónica y seguir fielmente una referencia impuesta por otro equipo externo como un p.l.c. o autómata. Para la conversión de la corriente alterna en directa hace uso de dispositivos electrónicos de potencia hechos de materiales como silicio lo que los hace estar exentos de movimiento de tipo mecánico (estado sólido).

Referencia

Término usado para indicar el nivel de voltaje usado para controlar el sistema de un regulador electrónico que gobierna la velocidad de un motor de d.c. normalmente, es una señal de corriente directa variable entre 0 y 10 voltios de d.c. proveniente de un potenciometro de control.

"Reverse"

Término en inglés que traducido al castellano significa "Atrás" y que en el presente trabajo, se refiere al sentido

de rotación del eje de un motor de d.c. coincidiendo este con el sentido opuesto de rotación de las manecillas del reloj. Se usa también para indicar que puente de tiristores o T.P.M. esta en operación y como su efecto hace girar al motor en sentido opuesto al de las manecillas del reloj.

Rodillo de laminación — *Dan las diferentes formas al acero durante el proceso de laminación estos elementos forman parte de las jaulas de laminación.*

Rotosonda — *Es un dispositivo electrónico fotosensible capaz de "observar" la posición física de determinado material caliente (capaz de emitir luz infrarroja), procesar la señal luminosa emitida y convertirla a señal de nivel electrónico para adaptarla a un control automático de velocidad de diferentes motores.*

Solicitud de carga — *Se refiere a los distintos valores de carga de tipo mecánico impuestos a los motores eléctricos en general y en especial en los de corriente directa se habla de: carga nominal y carga máxima.*

T.P.M. (Thiristor Power Module)	*Término usado para indicar el módulo convertidor de potencia a base de tiristores (S.C.R.) que permite a un regulador electrónico convertir la corriente alterna a corriente directa para poder alimentar ya sea la armadura de un motor o su devanado de excitación.*
Transformador de corriente	*Dispositivo electromagnético usado para verificar el nivel de corriente que circula por un conductor como resultado de estar alimentando determinada carga eléctrica. Este dispositivo está localizado en una fase de un sistema de alimentación trifásica y da en su salida un valor proporcional al valor de corriente que circulan en su entrada. Su relación puede ser variada siendo una de las más comunes la de 1000/5 que indica a cada 1000 amperios de corriente que circula por el conductor donde el está colocado, dará a su salida 1 amperio de corriente eléctrica.*

de rotación del eje de un motor de d.c. coincidiendo este con el sentido opuesto de rotación de las manecillas del reloj. Se usa también para indicar que puente de tiristores o T.P.M. esta en operación y como su efecto hace girar al motor en sentido opuesto al de las manecillas del reloj.

Rodillo de laminación — *Dan las diferentes formas al acero durante el proceso de laminación estos elementos forman parte de las jaulas de laminación.*

Rotosonda — *Es un dispositivo electrónico fotosensible capaz de "observar" la posición física de determinado material caliente (capaz de emitir luz infrarroja), procesar la señal luminosa emitida y convertirla a señal de nivel electrónico para adaptarla a un control automático de velocidad de diferentes motores.*

Solicitud de carga — *Se refiere a los distintos valores de carga de tipo mecánico impuestos a los motores eléctricos en general y en especial en los de corriente directa se habla de: carga nominal y carga máxima.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria guatemalteca, usa máquinas eléctricas de distinto tipo y capacidades; entre ellas pueden mencionarse, en forma general, a transformadores de voltaje, y motores y generadores eléctricos.

En cuanto a los motores eléctricos, éstos pueden dividirse en varias categorías dependiendo el tipo de uso que les vaya a dar. Algunas de ellas son:

a. Motores trifásicos de corriente alterna.

b. Motores monofásicos de corriente alterna.

c. Motores de corriente continua.

d. Otros.

En especial, los motores de corriente directa pueden dividirse a su vez en:

a. Motores tipo serie.

b. Motores tipo paralelo.

c. Motores tipo serie-paralelo.

d. Motores a excitación separada o independiente.

En la industria dedicada a la metalurgia, debido a que el proceso de producción es sumamente pesado son necesarios

los motores de gran capacidad especialmente los motores trifásicos de corriente alterna como los motores de corriente directa a excitación separada.

Los motores de corriente directa a excitación separada, al cual esta dedicado este trabajo, tienen en estas plantas especial aplicación ya que su gran versatilidad de poder ajustar su velocidad al proceso productivo los hace hasta el momento insustituibles por lo menos en la región centroamericana.

En general, en Guatemala, se usan estos motores desde hace años, en la fabricas dedicadas a la industria de la laminación del acero al carbono; sin embargo, la información técnica relacionada con su uso es muy reducida, se limita en su totalidad a informar acerca de las características constructivas del mismo mientras que la información técnica relacionada con su uso y aplicación es prácticamente nula.

En la actualidad, el motor de corriente directa es controlado por sistemas electrónicos altamente especializados por lo que el conocimiento tanto del motor en sí como de su alimentador es muy importante. En nuestro medio esto está delegado a muy pocas personas las cuales han tenido que recibir ya sea una especialización en el extranjero o han tenido que recibir el apoyo de personal especializado proveniente de afuera del país en un tiempo muy limitado al grado de que se experiencia se ha afianzado conforme se han ido sucediendo los diferentes problemas inherentes de estas máquinas.

Por lo tanto se plantea la hipótesis ***sí se podría crear un procedimiento para poner a punto un motor de corriente directa a excitación independiente, gobernado por medio de un regulador electrónico de estado sólido, usado en la industria metalúrgica y que además proporcione respuestas y soluciones para enfrentar problemas durante su operación.***

El presente trabajo, toma en consideración la falta de literatura especializada y la experiencia obtenida durante el proceso de puesta a punto de este tipo de motores en una planta de laminación de acero al carbono para la producción de varilla de construcción para concreto reforzado, y por lo tanto enfatiza en los aspectos que se consideran necesarios conocer tanto del motor como del regulador electrónico de estado sólido que lo gobierna.

Por lo tanto, se toman los siguientes aspectos que se han considerado necesarios conocer.

a. Aplicación de motores de corriente directa.

b. Fundamentos teóricos del motor y del regulador electrónico.

c. Reacciones eléctricas de control.

d. Ajustes necesarios del regulador electrónico.

e. Condiciones de operación real.

Cada uno de los capítulos tiene por objetivo, enseñar de una forma técnica pero sencilla los diferentes aspectos

que son imprescindibles conocer para poder ajustar y operar el complejo motor/regulador electrónico, dejando para literatura más especializada las demostraciones científicas de las que aquí se hace uso, ya que el fin primordial de esta obra es dar a conocer la forma de cómo interpretar, utilizar y enfrentar los problemas que se pueden presentar durante la operación de estos motores.

Es el deseo del autor de esta obra, que la misma se convierta en una guía y que además ofrezca respuestas y soluciones sencillas a las dudas de todas aquellas personas que a diario trabajan con estas magníficas máquinas.

1. APLICACIÓN REAL DE MOTORES DE D.C. EN UNA PLANTA DE LAMINACIÓN EN CALIENTE PARA FABRICAR VARILLA DE CONSTRUCCIÓN

La fabricación de varilla de acero al carbono para usarse en la construcción de vigas y columnas de concreto reforzado implica la transformación química y mecánica del acero a altas temperaturas hasta alcanzar las diferentes propiedades físico-químicas del producto final.

La transformación química se refiere directamente a la mezcla de diferentes materiales a temperatura de fusión en los altos hornos tales como hierro extraído de minas o bien de diferentes metales recolectados como chatarra, además de otros materiales como fósforo, azufre manganeso entre otros.

La mezcla de todos estos materiales en las proporciones correctas, definen la calidad del acero que posteriormente será transformado, puede alcanzar aquí las capacidades mecánicas del material:

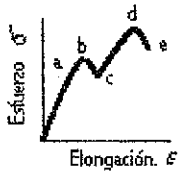
"Esfuerzo a la fluencia": indica la capacidad del acero a soportar esfuerzos en la zona elástica del material antes de alcanzar la zona plástica.

"Esfuerzo a la ruptura": indica la capacidad máxima del acero en la zona plástica antes de fallar catastróficamente.

Expresado en cantidades, el esfuerzo a la fluencia tiene un valor normalizado según el Sistema Ingles, de

40000 libras/pulg² (2812 Kg./cm²) y el esfuerzo a la ruptura tiene un valor normalizado de 70000 libras/pulg² (4922 Kg./cm²).

Fig.1 Características mecánicas de esfuerzo/elongación para aceros grado 40 y grado 60



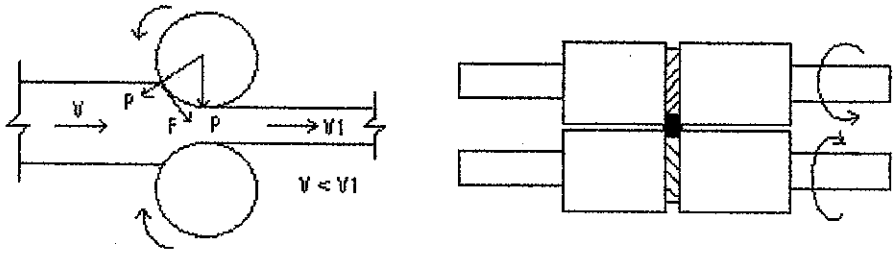
a. Limite Elastico.
b. Limite de Fluencia.
c. Punto de Extricción.
d. Esfuerzo Máximo.
e. Limite de Ruptura.

La transformación química del acero proporciona como producto terminado en los altos horno, palanquilla o "billet" de diferentes dimensiones, que posteriormente resulta ser la materia prima en los trenes de laminación donde finalmente se le da forma como varilla de diferentes medidas.

La transformación mecánica es el paso final en la fabricación de varilla y es aquí en donde después de alcanzar dentro de un horno de calentamiento, la temperatura de laminación adecuada y varios pasos de laminación en los cuales la palanquilla o billet va cambiando de forma y longitud se logra dar el acabado final.

Dicha transformación mecánica, la cual recibe el nombre de "Proceso de laminación en caliente", consiste en disminuir el diámetro o área por medio de sendos rodillos de metal especial.

Fig.2 Proceso de transformación por laminación en caliente

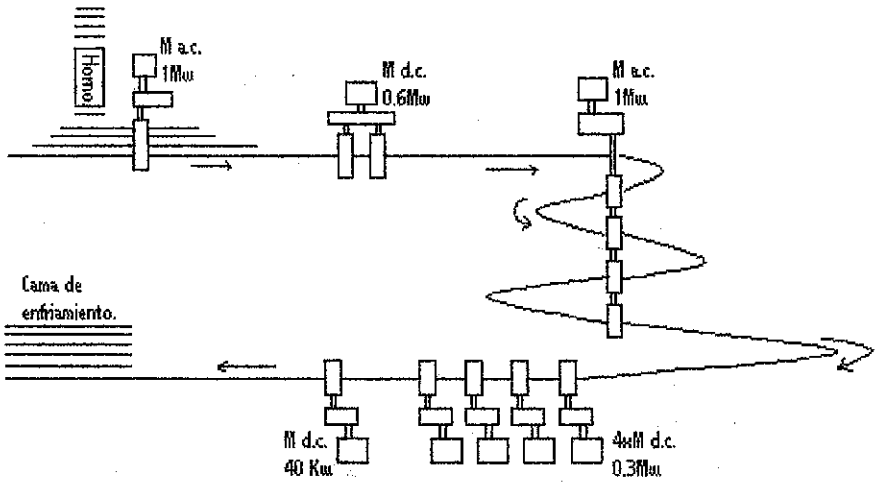


Dicho proceso implica consumos de grandes magnitudes de potencia mecánica, las cuales son proporcionadas tanto por motores de corriente alterna (a.c.) así como de corriente directa (d.c.).

El proceso de laminación en caliente es un proceso en línea, es decir, la materia prima es trabajada por diferentes máquinas en forma continua, que lo hace ser bastante especial ya que si una máquina falla, se para el proceso completo.

En un tren de laminación por lo común el proceso inicial puede darse usando motores de corriente alterna, donde solo es necesaria una fuerte potencia mecánica sin necesidad de ser su velocidad muy precisa; sin embargo, en la medida en que el material va reduciendo su diámetro, va incrementando tanto su longitud como su velocidad por lo que se hace necesario el uso de motores de d.c. para ir compensando dicha velocidad a lo largo del proceso final, ***lo que obliga que dichos motores deban de ser ajustados correctamente.***

Fig. 3 Tren de laminación en caliente



De la figura anterior se desprende que la mayoría de motores de corriente alterna son usados en la parte del proceso que no requiere precisión de velocidad mientras que los motores de d.c. son usados en el sector donde se necesita que la velocidad pueda ser modificada en un amplio rango garantizando a su vez que en cada rango de velocidad exista buena precisión.

En especial, el uso de motores de d.c. dentro del proceso de laminación implica que estos puedan operar en forma individual o bien ya sea gobernados en cascada por un autómata u otro equipo de control electrónico que realice funciones similares.

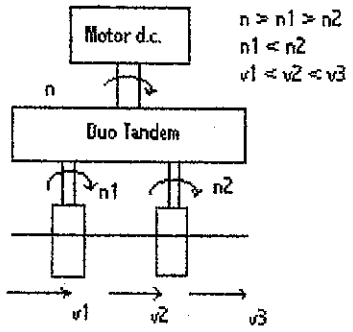
1.1 Operación individual

Debido a su gran versatilidad, los motores de d.c. pueden ser operados en forma individual ya sea para

proporcionar grandes valores de potencia sustituyendo fácilmente a motores de corriente alterna, o bien para ejecutar operaciones a alta velocidad.

En trenes de laminación en caliente los motores de d.c. pueden mover accionamientos individuales o en tandem, cizallas rotatorias, transportadores y arrastradores de producto, frenos mecánicos, grupos electrógenos y otros.

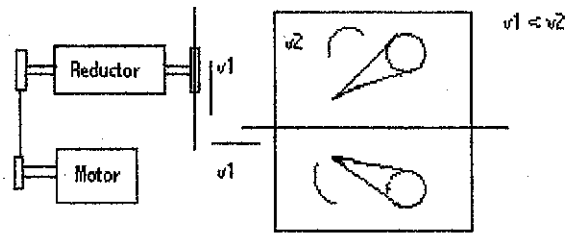
Fig. 4 Motor de d.c. moviendo un accionamiento en tandem



En la figura anterior se observa el esquema de un accionamiento mecánico en tandem trabajando en forma individual y movido por un motor de d.c. a excitación separada.

Esta configuración tiene la ventaja de poder modificar su velocidad y puede proporcionar la potencia mecánica requerida por el accionamiento.

Fig.5 Motor de d.c. moviendo un accionamiento de una cizalla volante



En la figura anterior se observa a un motor de d.c. a excitación separada moviendo el accionamiento mecánico de una cizalla volante para proceder a hacer cortes a medida sobre una barra de acero, que dependiendo de su diámetro puede requerir valores de velocidades considerablemente diferentes.

Una característica especial de esta cizalla radica en que las cuchillas que producen el corte deben llevar una velocidad tangencial superior a la velocidad a la que viaja la varilla, para no producir errores de corte.

Para calcular la velocidad tangencial a la que viajan los extremos de las cuchillas (o de rodillos de laminación) se puede usar la fórmula siguiente.

$$v = (n*D*\pi)/(R*60)$$

Donde:

v = Velocidad tangencial en m/seg.

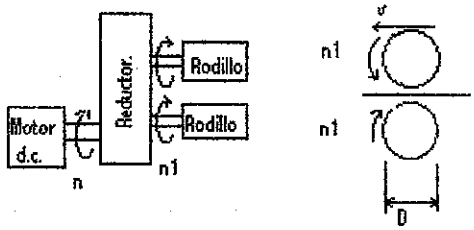
n = Revoluciones por minuto a la que gira el eje del motor.

D = Diámetro del rodillo o de cuchillas en metros.

R = Relación de engranajes o de poleas.

60 = Constante de conversión de radianes a minutos.

Fig. 6 Disposición de los diferentes parámetros para él calculo de la velocidad tangencial de un accionamiento



Ejemplo para él calculo de la velocidad tangencial de un rodillo, tomando los datos siguientes:

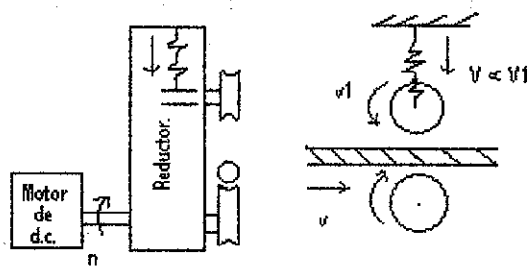
Velocidad del eje del motor: 1800 r.p.m.
 # De dientes del engranaje lado carga: 90
 # De dientes del engranaje lado motor: 30
Diámetro de rodillos: 0.326 mts.

Usando la fórmula anterior, obtenemos:

$v = (1800*0.326*\pi)/(3*60) = 1843.49/180 = 10.24$ *mts/seg.*

Esta fórmula es de primordial importancia, ya que con ella se elaboran tablas de velocidades de acuerdo a cada medida de varilla a ser producida.

Fig. 7 Motor de directa moviendo el accionamiento de un arrastrador de varilla

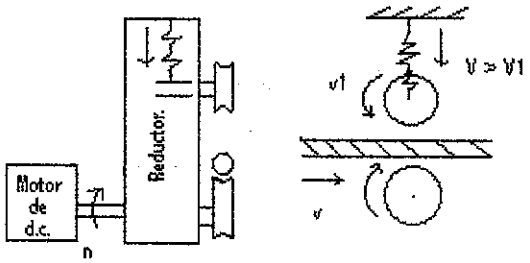


En la figura anterior, se observa el accionamiento mecánico de un arrastrador de varilla localizado en la parte final del proceso.

En este caso, la varilla pasa a través de dos rodillos de arrastre que permanecen separados mientras pasa por ellos el cuerpo de la varilla y cuando la cola de la misma deja de ser impulsada por el último accionamiento acabador, dichos rodillos se cierran para darle el impulso adecuado y llevarla hasta el final del proceso.

Es importante que la velocidad tangencial de los rodillos del arrastrador sea mayor que la velocidad a la que viaja la varilla para así evitar de que los rodillos frenen la barra en el momento de hacer contacto con ella, lo cual debe de suceder a cualquier velocidad impuesta por el proceso de producción.

Fig. 8 Accionamiento de un freno mecánico en laminación

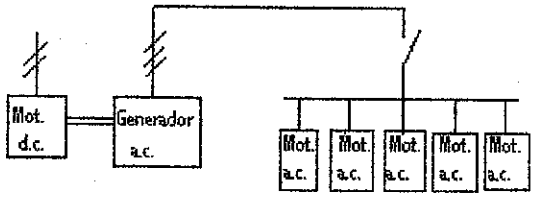


En la figura anterior, se observa a un motor de d.c. impulsando a un accionamiento mecánico encargado de reducir la velocidad a la que viaja una varilla durante el proceso final de laminación.

El proceso de frenado consiste en imponer a la varilla la velocidad tangencial a la que viajan los rodillos del

freno disminuyendo con esto la velocidad de la misma y para lograrlo con efectividad se tiene que tener el sumo cuidado de hacer el frenado sobre el extremo final de cada varilla.

Fig. 9 Grupo electrógeno



En la figura anterior se observa a un motor proporcionando la velocidad y par motriz necesario a un generador trifásico de corriente alterna.

El hecho de ser un motor de d.c. permite la variación de velocidades en un amplio rango por lo que en el generador se pueden lograr valores de frecuencias y de voltajes necesarios para modificar la velocidad de motores de corriente alterna también en un amplio rango.

Tabla I Parámetros eléctricos de un generador movido por un motor de d.c. de 150 kw

Velocidad del pri-motor (r.p.m.)	600	900	1200	1500	1800	2100	2400
Voltaje del generador (Volltios)	110	152	193	235	281	326	372
Voltaje de excitación del generador (Voltios)	37	19.2	16.3	14.6	13.3	13.2	13
Frecuencia del generador (Hz)	20	30	40	50	60	70	80
Velocidad del motor slave (r.p.m.)	380	570	760	950	1140	1330	1520

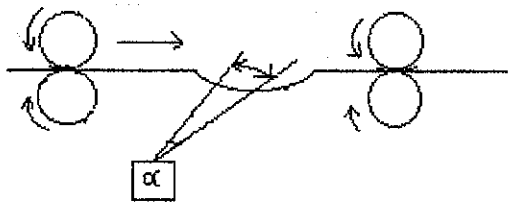
1.2 Operación en cascada

El proceso de laminación en caliente requiere la liberación de esfuerzos mecánicos sobre el material que está en proceso en determinados puntos, en especial en aquellos puntos donde el incremento de longitud obliga a un incremento de velocidad de trabajo, para evitar deformaciones sobre el material que no están contemplados dentro del mismo proceso como puede ser el estiramiento del material y por ende a ya no alcanzar la uniformidad necesaria en el mismo.

Para evitar dichas deformaciones no esperadas en el material, en algunos puntos del proceso se colocan sistemas foto-sensores capaces de observar la posición relativa del material dentro de un espacio de visión específico, garantizando con ello de que el material no se vea expuesto a esfuerzos mecánicos innecesarios.

Dichos sistemas electrónicos reciben el nombre de "Rotosondas" y su función consiste en detectar la posición relativa del material y así poder corregir la velocidad de los motores localizados antes de dicho dispositivo.

Fig. 10 Rotosonda para detección de metal caliente



Cuando la rotosonda observa que el material dentro de su campo de visión se encuentra tenso procede a incrementar

la velocidad de los motores antes de ella, logrando con esto que sea proveído más cantidad de material y por ende se libera el esfuerzo mecánico.

Por el contrario, cuando la rotosonda observa que el material se encuentra muy holgado, envía la señal necesaria para disminuir la velocidad de los motores antes de ella, logrando disminuir la cantidad de material enviada al accionamiento posterior y por lo cual el material se tensa ligeramente.

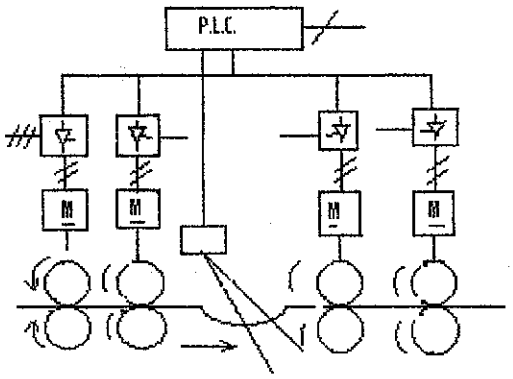
El punto adecuado de operación dentro del espacio visual de la rotosonda es aquel en que el material no está ni tenso ni holgado.

A disminuir y aumentar automáticamente la velocidad se le conoce como operación de motores en "Cascada" y pueden ser gobernados tantos motores como así lo requiera el proceso.

De hecho, cada motor moviendo determinado accionamiento, está gobernado por un regulador electrónico de estado sólido capaz de proveerle la potencia necesaria así como la variación de velocidad esperada.

Para que determinada cantidad de accionamientos mecánicos trabajen en cascada, es necesario que exista un dispositivo electrónico o control maestro que reciba la señal proveniente de la rotosonda y después de procesarla, envíe las señales electrónicas correspondientes a cada regulador electrónico de estado sólido para que cada uno de estos a su vez, modifiquen la velocidad de los motores respectivos en la proporción requerida.

Fig.11 Sistemas de reguladores de estado sólido operando en cascada



En un sistema como el descrito anteriormente, la rotosonda solo modifica la velocidad de los motores que están localizados antes de ella, mientras que los accionamientos localizados posteriores a ella permanecen a una velocidad constante, sin embargo existe la posibilidad de que puedan a su vez existir dos sistemas en cascada operando uno dentro del otro.

Funcionando de esta forma, se puede observar que los reguladores electrónicos de estado sólido, ya sea en forma individual o en cascada, deben de tener la cualidad de responder correctamente a todos los requerimientos ya sea de potencia, de velocidad, de estabilidad y de protecciones eléctricas y electrónicas con el objeto de hacer que el motor responda de acuerdo a los requerimientos del proceso productivo de una planta de laminación por lo que el conocimiento de un procedimiento de ajustes es sumamente importante.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS RELACIONADOS CON LOS MOTORES DE D.C. Y LOS REGULADORES ELECTRÓNICOS DE ESTADO SÓLIDO

La construcción básica de un motor de corriente directa está formada por un devanado inducido que esta situado en el rotor o parte móvil del motor; un colector donde van conectadas las bobinas del devanado inducido siendo por medio de escobillas que pueden ser conectadas al exterior y el devanado inductor que esta localizado en el estator o parte fija del motor y que también se alimenta con corriente continua.

2.1 Descripción de operación del motor

Si se excita el devanado inductor con corriente continua y se alimenta el devanado inducido con un determinado valor de voltaje continuo, nace un par debido a la interacción entre los campos magnéticos del rotor y el estator, que pondrá en movimiento al motor, donde par y movimiento tendrán el mismo sentido.

La velocidad alcanzada por el motor tendrá una relación directa e inversamente proporcional al voltaje de armadura y a la corriente de excitación aplicada, así como al número de pares de polos de la máquina y al número total de espiras en serie de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Wm = Ea*2*\pi*a/P*Za*\phi = 2*\pi*n/60 \qquad (1)$$

Donde:

ϕ = *flujo por polo en el entre-hierro.*

n = *velocidad del eje en r.p.m.*

Wm = *velocidad mecánica en radianes/segundo.*

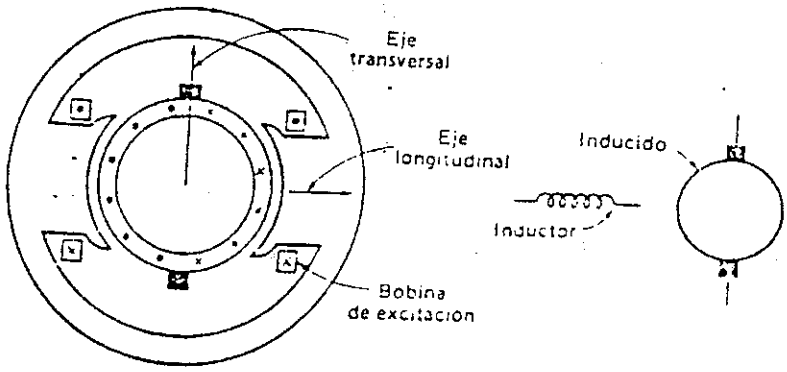
Ea = *tensión media inducida.*

a = *numero de ramales en paralelo en el devanado.*

Za = *numero total de conductores activos.*

p = *numero de polos.*

Fig. 12 Representación esquemática de una máquina de continua



Fuente: Teoría y análisis de las maquinas eléctricas

El devanado inducido crea un campo magnético que siempre será perpendicular con el campo magnético creado en el devanado inductor debido a la construcción física del colector, resultando así un par continuo unidireccional.

En la figura 12, se representa esquemáticamente una máquina de corriente continua siendo el estator de polos salientes, cuyo flujo se distribuye simétricamente en el entre-hierro alrededor del eje de los polos inductores o eje principal del campo.

Las escobillas se sitúan de tal forma que la conmutación tenga lugar cuando los laterales de la bobina correspondiente están en la zona neutra.

2.1.1 Par magnético

Puede ser expresado en función de la interacción del flujo de excitación por polo en el entre-hierro (ϕd) y la componente espacial fundamental ***(Fa)*** *de la onda de f.m.m. del inducido, teniendo para una máquina de* ***P*** *polos la siguiente ecuación:*

$$T = (\pi/2)*(P/2)*\phi d*Fa1 \quad Nt\text{-}m \qquad (2)$$

Si se toma el valor pico de la onda triangular de la f.m.m. del inducido y el de su componente fundamental, la ecuación anterior se puede reducir a la siguiente expresión:

$$T = ((P*Za)/(2*\pi*a))*\phi d*ia = Ka*\phi d*ia \qquad (3)$$

donde ***ia*** *es la corriente en la armadura o inducido del motor,* ***Ka*** *una constante que depende del diseño del devanado.*

2.1.2 Potencia eléctrica

Cuando la armadura del motor se alimenta con una tensión continua o rectificada, se crea en el colector una tensión inducida de valor medio igual a:

$$Ea = (P*Nbob/\pi)*\phi d*Wm \qquad (4)$$

Siendo ***Nbob*** *el número de espiras de una bobina y* ***Wm*** *la velocidad angular mecánica a la que gira el motor y en un devanado distribuido con* ***C*** *bobinas conectadas en* ***a*** *circuitos, la tensión inducida será:*

$$Ea = (P*Nbob*C/(\pi*a))*\phi d*Wm$$

$$Ea = (P*Za/(2*\pi*a))*\phi d*Wm \qquad (5)$$

donde $Za = 2*Nbob*C$ *por lo que la tensión inducida será:*

$$Ea = Ka*\phi d*Wm \qquad (6)$$

Haciendo uso de la ecuación (3), la tensión inducida se puede indicar como:

$$Ea = T*Wm/ia \qquad (7)$$

y la potencia eléctrica instantánea como:

$$Ea*ia = T*Wm \qquad (8)$$

La ecuación (8) indica que la potencia eléctrica instantánea relacionada con la tensión inducida debida al movimiento, es igual a la potencia mecánica instantánea relacionada con el par magnético.

2.1.3 Flujo de excitación y características par-velocidad

La corriente de excitación que circula a través del campo inductor crea un flujo magnético que, para un amplio rango de valores de excitación, es linealmente proporcional a la f.m.m. total de los devanados inductores, siendo la

permeabilidad ***(Pd)*** *en el eje magnético principal del entre-hierro, la constante de proporcionalidad, quedando relacionada de la siguiente forma:*

$$\phi d = Pd^* \; Nf^* if \qquad (9)$$

Las notables ventajas de las máquinas de corriente continua son consecuencia de la gran variedad de condiciones operativas que se pueden obtener seleccionando adecuadamente la forma de excitar los devanados inductores, las que pueden ser:

- *Auto-excitación.*
- *Excitación separada.*

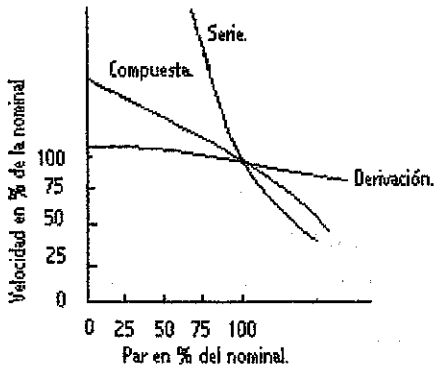
El procedimiento que se adopte, influye enormemente tanto en las características a régimen permanente así como en el comportamiento dinámico de la máquina.

En el caso de excitación separada o independiente, dicha corriente es una fracción muy pequeña comparada con la corriente del inducido.

En las máquinas auto-excitadas, existen tres formas de alimentar los inductores:

- *excitación serie.*
- *excitación derivación o paralelo (shunt).*
- *excitación compuesta.*

Fig. 13 Características de velocidad-par de motores de corriente continua



En los motores excitados en forma independiente o auto-excitados, se obtienen características de "velocidad-par" en régimen permanente estando el inducido alimentado a tensión constante, como se observa en la gráfica de la figura 13.

La relación entre la f.e.m. inducida en la armadura de un motor y la tensión aplicada a los bornes es:

$$Vt = Ea + Ia*Ra \qquad (10)$$

La f.e.m. inducida ***Ea*** *es menor que la tensión aplicada a los bornes de la armadura* ***Vt****, circulando la corriente hacia el interno de los devanados de la armadura por lo que el par magnético actúa en el sentido que tiende a mantener el rotor en movimiento.*

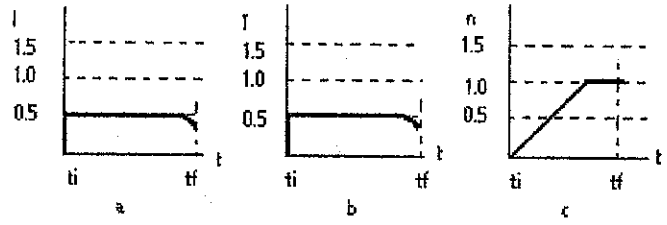
En los motores con excitación independiente o derivación, el flujo es muy constante y un aumento del par, va acompañado de un aumento casi proporcional de la corriente en el inducido y en consecuencia una ligera disminución de la fuerza contra-electromotriz ***f.e.m.****, para permitir el paso de la nueva intensidad aumentada a través*

de la pequeña resistencia de su devanado y ya que esta, está determinada por el flujo y la velocidad, ésta deberá disminuir un poco.

El motor derivación o el independiente son de velocidad casi constante con una variación máxima del orden del cinco por ciento entre su marcha en vacío o a plena carga.

Tanto el par máximo como el de arranque están limitados por la máxima intensidad que pueda ser conmutada correctamente, esto es fácil de maniobrar ya que en el caso de los motores a excitación separada, ***pueden ser operados de tal forma de que el arranque del motor pueda ser lento a discreción (rampa de aceleración) logrando pares de arranque moderados y en consecuencia, corrientes de arranque dentro de rangos aceptables.***

Fig. 14 (a) intensidad en el inducido (b) par electromagnético y (c) velocidad durante el periodo de arranque en rampa de un motor d.c.



La velocidad arriba de la base o nominal, en motores a excitación separada, puede regularse a través de modificar convenientemente la corriente de excitación en el inductor.

Esta variación de flujo magnético provoca una variación inversa de la velocidad para conservar la fuerza

contra-electromótriz en un valor aproximadamente igual a la tensión aplicada.

En los motores serie, un aumento de carga va acompañado de un aumento de la corriente y por tanto de la f.m.m. del campo inductor si el entre-hierro no está totalmente saturado, y ya que el flujo crece con la carga, la velocidad deberá disminuir para conservar el equilibrio entre la tensión aplicada y la fuerza contra-electromótriz.

Los motores a excitación compuesta tienen una característica "velocidad-par" intermedia entre los motores serie y derivación.

No tiene el inconveniente de los motores serie de sufrir una excesiva perdida de velocidad conservando una buena parte de sus ventajas.

2.1.4 Regulación de velocidad

Las máquinas de corriente continua en general se adaptan mejor a la regulación de su velocidad que los de corriente alterna con campos giratorios a velocidad constante; de hecho, esta posibilidad de variar la velocidad dentro de amplios limites ajustándola a las necesidades del servicio es la que a situado a las máquinas de continua en una sólida posición competitiva para muchas aplicaciones industriales modernas.

Los tres procedimientos mas empleados para la regulación de velocidad son:

1. *Modificando el flujo inductor.*
2. *Ajustando la resistencia del circuito inducido.*
3. *Variando la tensión en bornes del inducido.*

El primero de ellos, constituye una de las cualidades de los motores a excitación separada y a excitación compuesta o en derivación.

***"El ajuste de la corriente de excitación"**, y por consiguiente del flujo y de la velocidad, se consigue variando convenientemente la resistencia externa del circuito inductor o como se hace en estos tiempos, modificando el ángulo de encendido de tiristores de potencia lográndose con sencillez y sin aumento sensible de las perdidas en el motor.*

***La velocidad mínima conseguible es la que corresponde al campo máximo aceptable por el devanado en función de la corriente que circula por este sin poner en peligro la capacidad de aislamiento del mismo**, y la velocidad máxima está limitada por los efectos de la reacción del inducido, que cuando el campo es excesivamente débil, es motivo de conmutación deficiente y de inestabilidad pudiendo llevar al motor a velocidades peligrosas para las partes móviles del mismo.*

Los motores a excitación separada tienen la adición de un devanado estabilizador y otro de compensación los que aumentan considerablemente el campo de velocidades alcanzables.

***La corriente máxima Ia en el devanado inducido es la nominal para que el motor no se caliente excesivamente**, y la fuerza contra-electromotriz Ea se mantiene constante, ya*

*que el efecto del cambio de velocidad viene compensado por el cambio de flujo que lo motiva: El producto Ea*Ia, y por consiguiente la potencia disponible, se mantienen prácticamente uniforme en todo el campo de velocidades, por lo que la regulación mediante la variación de la corriente del inductor es una regulación con potencia constante.*

Por otra parte, el par varía directamente con el flujo, por lo que alcanzará su valor máximo a la menor velocidad, disponible cuando se regula por corriente del inductor; este procedimiento de regulación es idóneo para aquellos casos en que se requiera un par elevado a baja velocidad.

Cuando un motor regulado de esta forma se utiliza para vencer una carga que exija un par constante cualquiera que sea la velocidad, se deberá elegir su potencia de acuerdo con el producto del par por la velocidad máxima, quedando de esta forma sobre-dimensionado cuando trabaje a velocidades inferiores: éste es el principal factor económico que limita en la práctica el campo de velocidades de los motores grandes.

La regulación de velocidad variando la resistencia del circuito inducido *consiste en rebajar la velocidad insertando resistencias en dicho circuito, pudiéndose usar indistintamente en motores serie, derivación, compuesta o a excitación separada; sín embargo, para estos últimos, dicho sistema a quedado en desuso debido a las grandes cantidades de potencia eléctrica que se pierden y a los inconvenientes que reporta la no muy precisa regulación de velocidad.*

La regulación de velocidad por variación de tensión en el inducido *se basa en el hecho de que una variación en tal*

tensión en un motor derivación o en un motor a excitación separada va acompañada de una variación análoga de la fuerza contra-eléctromotriz y por consiguiente siendo el flujo constante, dé la correspondiente velocidad.

Normalmente, la fuente de energía disponible será una corriente alterna trifasica de tensión y frecuencia constante por lo que se precisará de un convertidor electrónico de estado sólido para poder variar el valor de la tensión aplicada a los bornes del inducido. El gran desarrollo alcanzado por los convertidores estáticos de gran potencia ha abierto un amplio campo en aquellas aplicaciones en las que es necesaria una regulación muy precisa de la velocidad del motor.

La tensión aplicada al inducido se regula ajustando el ángulo de encendido de tiristores de potencia, consiguiendo así una regulación precisa dentro de un amplio rango de velocidad.

Frecuentemente, para conseguir un campo de velocidades lo más amplio posible, la regulación de la tensión del inducido se combina con la regulación de la corriente del campo inductor del motor.

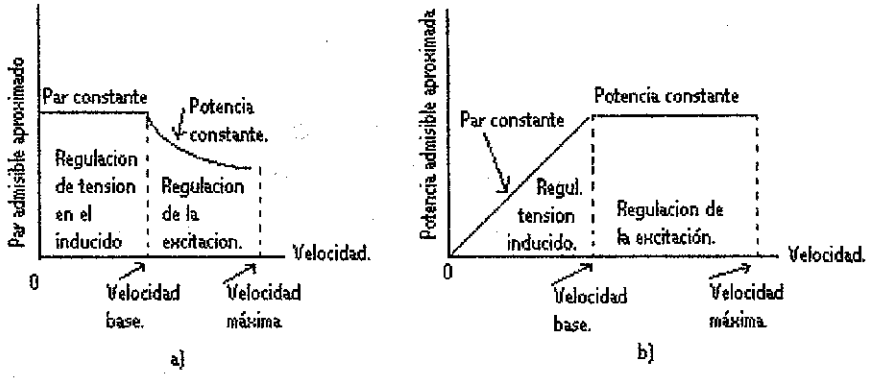
Con esta doble regulación, aplicada a motores de excitación separada, que actualmente se consigue en ambos casos con convertidores electrónicos de estado sólido, se puede definir como ***velocidad base*** *del motor, la que le correspondería con su tensión nominal en el inducido con pleno campo inductor aplicado.*

Por lo tanto, las velocidades mayores a la básica se consiguen regulando el campo inductor, y las inferiores

regulando la tensión en el inducido.

En la gama de velocidades por encima de la velocidad base solo se admite ***potencia constante*** *siendo el par magnético variable, mientras que por debajo de aquella velocidad es admisible el* ***par constante*** *y la potencia variable, ya que tanto la intensidad en el inducido como el flujo se mantienen aproximadamente constantes.*

Fig. 15 Limitaciones en el par (a) y en la potencia (b) al regular la velocidad combinando los métodos de variar la tensión en el inducido y de variar la excitación



La perdida de velocidad entre el funcionamiento en vacío y a plena carga ***(droop)*** *es debida íntegramente a la caída de tensión a plena carga en los devanados del inducido del motor.*

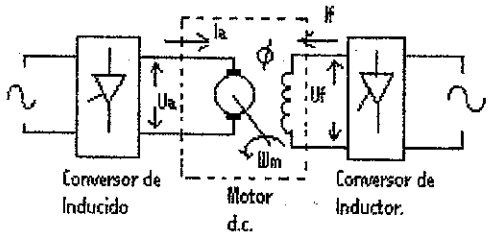
Esta caída es constante dentro de la zona regulada por variación de tensión del inducido, ya que en ella se consideran constantes el par y la intensidad a plena carga.

Los motores a excitación separada se pueden trabajar en un amplio margen de velocidades de operación tal el caso de motores para usos en fabricas siderúrgicas donde encuentran su mejor aplicación.

En estos motores, las características de regulación se aplican de la siguiente manera:

En el rango de velocidades abajo de la velocidad base, se actúa sobre la regulación de la tensión de inducido o de armadura manteniendo constante la corriente de excitación del devanado inductor, mientras que en el rango de velocidades arriba de la base, se actúa sobre la regulación de la corriente del devanado inductor, manteniendo constante la tensión aplicada al inducido, y puede incrementarse la velocidad del motor en un 40% de la velocidad base y para lograr esto, como se dijo antes, se han colocado devanados de estabilización y de compensación en serie al devanado inducido, por lo que además mantendrá ciertas características del motor serie.

Fig. 16 Esquema básico de conexión de motores a excitación separada



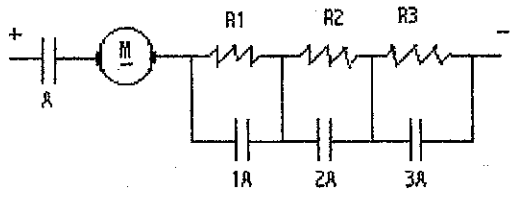
2.1.5 Arranque de motores de d.c.

Durante la operación de arranque de los motores de corriente continua, la corriente del inducido debe ser limitada a ciertos valores (muy abajo de la nominal) para permitir una conmutación adecuada y evitar sobre-

calentamiento excesivo que podría perjudicar el aislamiento del motor.

Una de las formas de limitar la corriente de arranque es la inserción de resistores adicionales en serie con el inducido siendo actualmente un sistema en desuso.

Fig. 17 Resistencias de arranque y contactores para aceleración de un motor de continua (actualmente en desuso)



El uso de convertidores electrónicos de estado sólido permite que el arranque del motor pueda hacerse suavemente a través de una rampa de aceleración fácilmente controlable a través de regular el ángulo de encendido de los tiristores de potencia.

Esto permite que suavemente se valla incrementando la f.e.m. inducida y por ende un mejor control de la corriente de arranque del motor.

Una rampa de aceleración de entre 10 y 20 segundos garantiza un arranque suave del motor, con corrientes que no alcanzan el 40% de la corriente nominal.

2.2 Alimentador o convertidor de estado sólido aplicado a motores de d.c.

Los alimentadores electrónicos descritos a continuación han sido diseñados para la alimentación y la regulación de la armadura y del campo de excitación de máquinas eléctricas de corriente directa.

Estos se adaptan por lo tanto a numerosas aplicaciones en los distintos campos industriales de plantas siderúrgicas, textiles, petroquímicas, de plásticos, etc. en tres versiones de aplicación:

1. Alimentación de armaduras de motores eléctricos.
2. Alimentación de campos de excitación de grandes máquinas de corriente continua.
3. Regulación combinada de la armadura y del campo de excitación de motores de corriente continua.

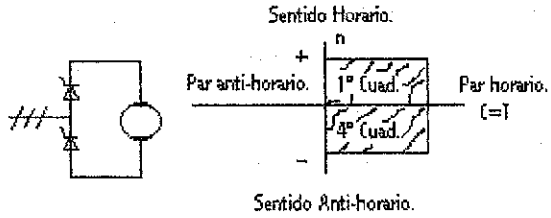
2.2.1 Tipos de convertidores

Los alimentadores a tiristores, vienen convencionalmente clasificados en dos categorías, con relación a la posibilidad de poder funcionar con corriente y tensión de salida de uno o de ambos signos de polaridades.

1. Convertidor unidireccional

Están en grado de abastecer corrientes y tensiones eléctricas solo de signo positivo.

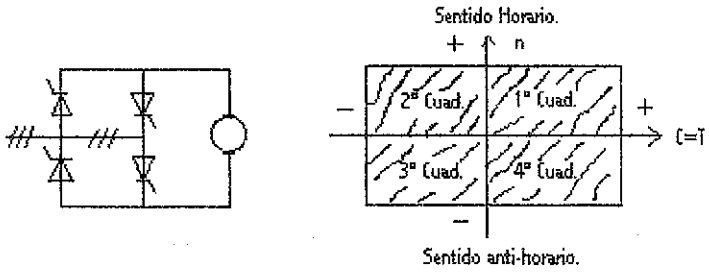
Fig. 18 Cuadrante de funcionamiento de un convertidor unidireccional



2. Convertidor bidireccional

Están en grado de abastecer corrientes y tensiones eléctricas de ambos signos o polaridades, cubriendo por lo tanto los cuatro cuadrantes de funcionamiento.

Fig. 19 Cuadrante de funcionamiento de un convertidor bidireccional



De acuerdo a lo dicho con anterioridad, se considera que el diagrama de funcionamiento del alimentador unidireccional se presta al siguiente comentario:

Ya que se nota la posibilidad de obtener "par mecánico" horario con ambos sentidos de rotación, resulta evidente que este alimentador está en grado de abastecer

par motriz para rotación horaria (primer cuadrante) y par frenante para rotación anti-horaria (cuarto cuadrante).

2.2.2 Generalidades constructivas

Las características peculiares de los reguladores electrónicos de estado sólido, que aumentan el grado de prestaciones y de confiabilidad, son:

a. *El empleo de amplificadores operacionales integrados en todas las secciones de regulación.*

b. *El empleo de relés estáticos usando transistores a efecto de campo (fet) para interrumpir los circuitos de regulación.*

c. *Sistemas de encendido estudiados adecuadamente para poder funcionar también con tensiones de alimentación perturbadas.*

d. *El empleo de tiristores a disco para mayores potencias con lo cual se obtiene aumento de las prestaciones de potencia de los convertidores electrónicos.*

e. *Lógica de inversión completamente estática en los convertidores bidireccionales a través de transistores a efecto de campo.*

2.2.3 Etapas de regulación electrónica

El sistema de regulación electrónico está constituido por tres anillos en cascada:

1. Anillo interno de tensión.

Este anillo tiene como objetivo:

1.1 De decidir en los accionamientos bidireccionales, cual de los dos convertidores debe funcionar (el directo o el inverso).

1.2 De responder inmediatamente a variaciones de tensión y de carga en modo de compensar los disturbios por estas generadas sobre la variable final regulada, por ejemplo la velocidad.

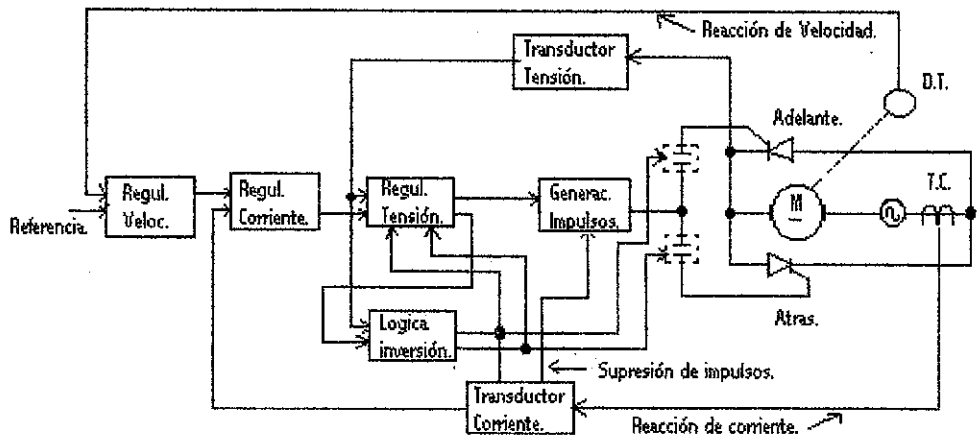
2. Anillo intermedio de corriente

Este es un anillo de apoyo al anillo interno de tensión y en los reguladores más modernos, tienden a unificarse llamándose únicamente como anillo de corriente.

3. Anillo externo de tensión o de velocidad

Cuyo objetivo primordial radica en comparar la señal de referencia impuesto con aquella señal de reacción proveniente ya sea de la armadura del motor ***(reacción por tensión)****, de una dinamo tacometrica o de un generador de impulsos "encoder"* ***(reacción por velocidad)****. Él modulo de conversión de potencia propiamente dicho, es realizado ya sea en la versión "unidireccional" o "bidireccional".*

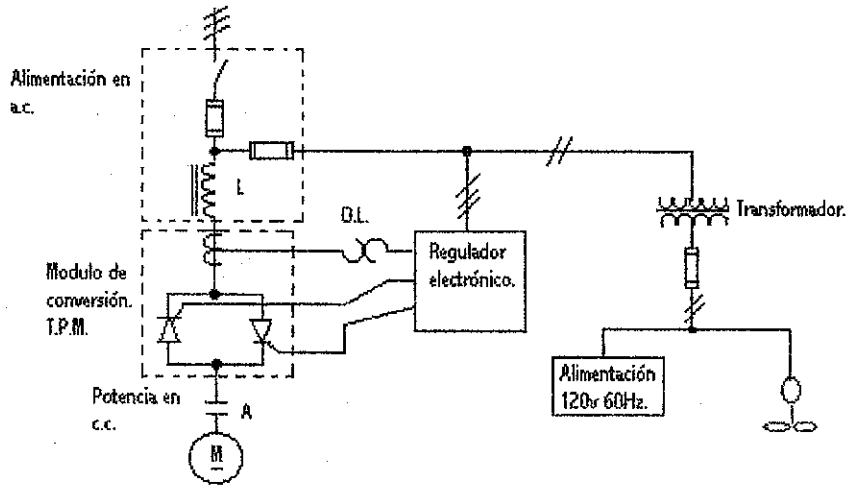
Fig. 20 Esquema a bloques de un alimentador con regulación de velocidad



2.2.4 Esquema de principio

En la siguiente figura se muestra el esquema unifilar para un alimentador de armadura que proporciona la alimentación a un único motor.

Fig. 21 Alimentador bididireccional



En dicho esquema se ponen en evidencia las siguientes partes:

1. Ingreso de alimentación. Comprende, en las versiones normalizadas los siguientes dispositivos:

a. Interruptor no automático.

b. Fusibles ultrarapidos para la protección de tiristores para alimentadores con Icc= 115 amperios, o fusibles lentos para alimentadores de tamaño superior.

c. Reactancia trifasica así como grupos R-C conectados en delta al ingreso de la línea de alimentación para la coordinación (discriminación) de las protecciones y ***absorción de las corrientes armónicas que se generan con el uso de dispositivos de conmutación de estado sólido.***

d. Fusibles de protección para los circuitos auxiliares.

Los alimentadores electrónicos han sido diseñados para ser conectados directamente a la red de alimentación sin interponer transformadores de adaptación, pero en el caso de que la tensión de red no corresponda con los valores normalizados, pueden conectarse a través de un transformador de adaptación, ***conectados en delta-delta y que además sirven de filtros de absorción de corrientes armónicas****, montado fuera de la cabina del convertidor.*

2. Módulo de conversión. Este comprende los siguientes dispositivos:

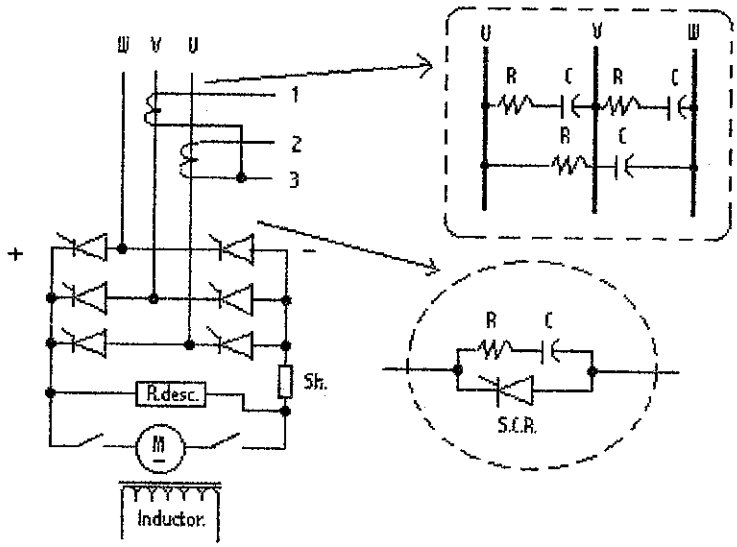
a. El complejo de tiristores con conexión en puente de "graetz" cuya función especifica es la conversión

controlada de la energía de corriente alterna en corriente continua.

b. Transformadores de corriente, que abastecen al sistema de regulación la señal de reacción de la corriente de carga.

c. El complejo de protección inherente a los tiristores.

Fig. 22 Diseño de modulo de potencia



Como se dijo antes, el modulo de conversión a tiristores es disponible en dos configuraciones: unidireccional y bidireccional.

La protección contra cortocircuitos está confiada, en coordinación con la reactancia, a fusibles ultra-rapidos.

Los circuitos R-C en paralelo a los ánodos y cátodos de los tiristores y reactores en ferrita localizados sobre

las barras de alimentación de las fases de ingreso, atenúan las derivadas de tensión que podrían llevar a conducciones no deseadas de los tiristores.

Contra las sobre-tensiones de origen externo en el lado de corriente alterna y del lado de corriente continua, se utilizan circuitos R-C los cuales también cumplen la función de absorción de las corrientes armónicas.

3. Modulo de regulación. El regulador electrónico normalmente comprende:

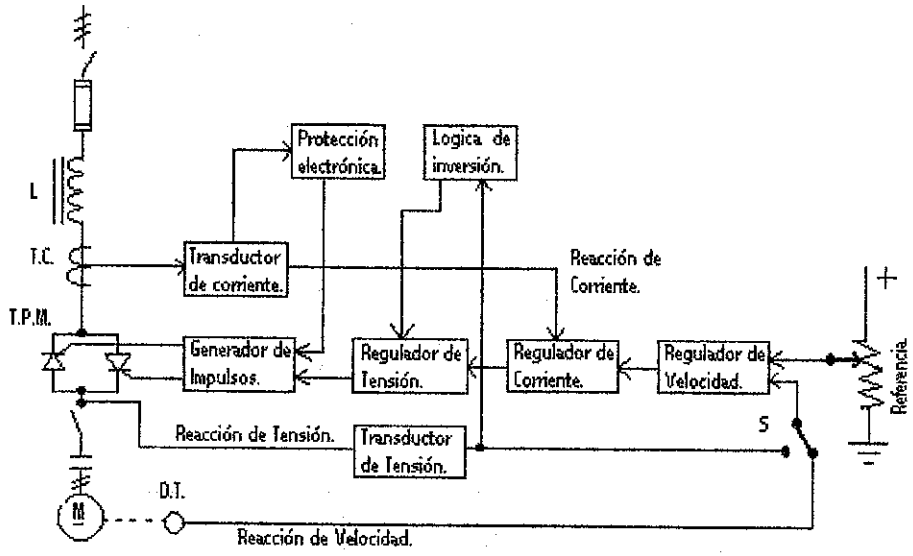
a. Un anillo interno de tensión constituido por un transductor de tensión, un regulador de tensión, un generador de impulsos, una lógica de inversión, un alimentador a 24 voltios de d.c. estabilizada para alimentar los circuitos de regulación.

b. Un anillo de corriente constituido por un regulador de corriente y un transductor de corriente.

c. Un anillo externo principal de regulación, constituido por un regulador de tensión o de velocidad con limite fijo.

d. Un combinador de señales para la ejecución de varias funciones como: Marcha lenta, marcha a impulsos, marcha adelante/atrás.

Fig. 23 Diagrama a bloques de regulación electrónica



La lógica de inversión sirve para determinar si en un cierto instante deben llegar los impulsos al convertidor "forward" (adelante) o al convertidor "reverse" (atrás) para el cambio de dirección de la corriente, y efectúa la decisión basándose en la señal del transductor de tensión y de la señal de salida del regulador de tensión interno. La lógica de inversión permite gran rapidez de respuesta en el cambio de un convertidor al otro.

4. Circuito de control.

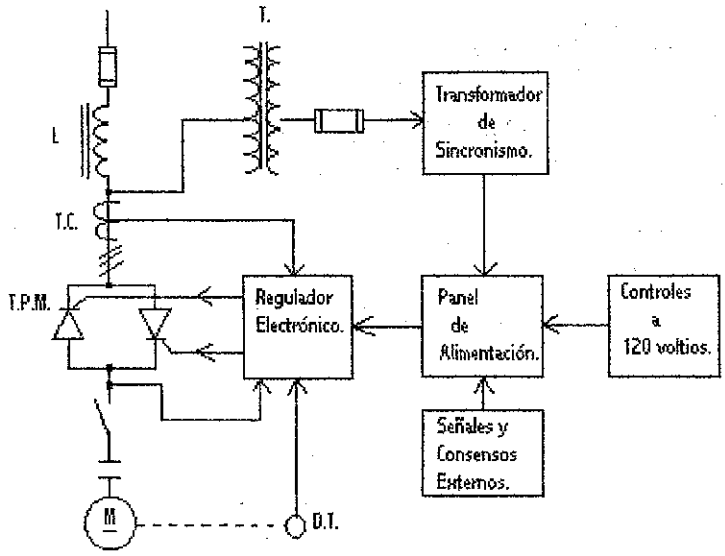
Se refiere a los circuitos eléctricos o electrónicos de apoyo a los sistemas de regulación, ya sea externos o internos al convertidor electrónico comprendiendo los siguientes dispositivos.

a. Transformador de tensión para alimentar los circuitos auxiliares.

b. *Fusibles de protección.*

c. *Relés auxiliares para la secuencia estándar de inserción del alimentador, o consensos adecuados de marcha.*

Fig. 24 Diagrama a bloques de circuito de control



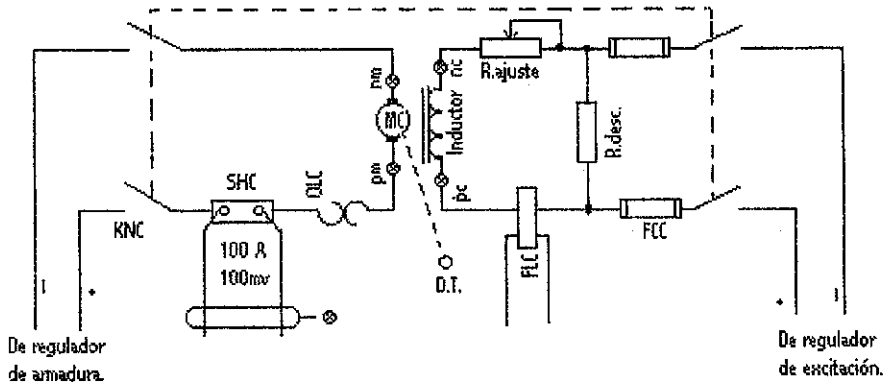
5. *Circuitos de potencia en el lado de corriente continua.*

Esta parte comprende:

a. *El contactor o telerruptor en continua cuya función es aquella de abastecer o cortar la potencia a la máquina en operación normal o de abrir el circuito en caso de error o por fallas detectadas por los sistemas de protección.*

b. *El relé térmico "OL" que sirve para proteger la máquina y el alimentador de sobrecargas de larga duración.*

Fig. 25 Esquema eléctrico de salida de potencia



2.2.5 Características y prestaciones

Los convertidores electrónicos de estado sólido presentan características y prestaciones que los hacen adecuarse a muchas situaciones de trabajo requeridas, las más importantes son:

1. *Tensión de alimentación lado de alterna: 440 v.a.c.*

2. *Frecuencia de red: 60 Hz.*

3. *Tensión en el lado de continua (salida): 460 v*

4. *Temperatura ambiente: de 0 a 40 grados centígrados.*

5. *Tolerancia de la tensión de alimentación: +- 10%*

6. *Tolerancia de la frecuencia de alimentación: +- 5%*

7. *Estabilización de la velocidad: +- 0.5% referida a la máxima velocidad. (En el caso de alimentación de armadura*

de un motor con reacción taquimetrica para variaciones de tensión de red del +- 10 % de frecuencia del +- 5 % y de la carga del 10 % al 100 %)

8. Sobrecargabilidad: No obstante la baja capacidad térmica característica de los semiconductores, el amplio dimensionamiento adoptado, hace posible la sobrecarga del alimentador de acuerdo a lo reportado en la siguiente tabla.

Tabla II. Prestaciones de los convertidores electrónicos

Tamaño del Convertidor.	Corriente Continua.	Potencia Continua. (Kw)								Corriente de sobrecarga por 60 seg
		Convertidor unidireccional				Convertidor Bidireccional.				
	(A)	Vcc=240v	Vcc=480v	Vcc=500v	Vcc=600v	Vcc=220v	Vcc=400v	Vcc=460v.	Vcc=560v	(A).
3A	25	6Kw	10.7Kw	12.5Kw	*******	5.5kW	10Kw	11.5Kw	*******	38=1.5In
4A	40	9.6Kw	17.2Kw	20Kw	*******	8.8kW	16Kw	18.4Kw	*******	60=1.5In
4B	55	13.2Kw	23.6Kw	27.5Kw	*******	12.1kW	22Kw	25.3Kw	*******	81=1.5In
5A	85	20.4Kw	36.5Kw	42.5Kw	*******	18.7kW	24Kw	39Kw	*******	127=1.5In
5B	115	27.6Kw	49.5Kw	57.5Kw	*******	25.3kW	46Kw	53Kw	*******	173=1.5In
7A	180	43.2Kw	77.5Kw	90Kw	*******	29.6kW	72Kw	82.7Kw	*******	270=1.5In
7B	280	67.2Kw	120Kw	140Kw	*******	61.5kW	112Kw	129Kw	*******	420=1.5In
9A	390	93.5Kw	167.5Kw	195Kw	*******	83kW	156Kw	180Kw	*******	585=1.5In
10A	600	144Kw	258Kw	300Kw	*******	132kW	240Kw	270Kw	*******	900=1.5In
11A	800	192Kw	344Kw	400Kw	480Kw	176kW	320Kw	368Kw	448Kw	1200=1.5In
		VAC=220v	VAC=380v	VAC=440v	VAC=540v	VAC=220v	VAC=380v	VAC=440v	VAC=540v	

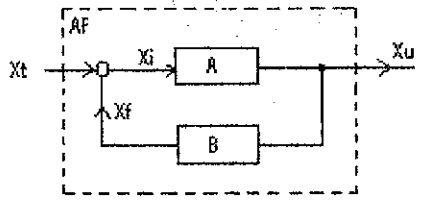
Fuente: Accionamiento de velocidad variable para la industria de laminación. Boletín ASEA.

3. REACCIONES ELÉCTRICAS DE CONTROL (FEEDBACK)

En el presente capitulo se habla acerca de las reacciones eléctricas que son necesarias incorporar en el sistema de control automático de los reguladores electrónicos provenientes ya sea del motor o del mismo regulador.

Producir una reacción significa llevar al ingreso de un sistema, una parte de la señal de salida.

Fig. 26 Cuadripolo con red de reacción



3.1 Fundamentos teóricos de reacción electrónica

De acuerdo al sentido o polaridad de la señal de reacción respecto a la señal de ingreso, puede ser:

POSITIVA: *cuando la señal de reacción está en concordancia de fase con la señal de ingreso.*

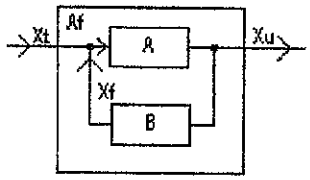
NEGATIVA: *cuando la señal de reacción está en oposición de fase con la señal de ingreso.*

La reacción positiva tiende a producir inestabilidad en los circuitos amplificadores, motivo por el cual es empleada casi exclusivamente para realizar circuitos generadores de oscilación.

La reacción negativa produce una mayor estabilidad de los circuitos amplificadores y mejora la calidad de la curva de respuesta.

En el siguiente esquema a bloques de dos cuadripolos se observan los siguientes parámetros:

Fig. 27 Cuadripolo con red de reacción



Xt = Señal de ingreso.
Xi = Señal de ingreso al cuadripolo amplificador.
Xu = Señal de salida.
Xf = Señal de reacción.

Una condición importante para la validez de las siguientes relaciones, radica en que el cuadripolo de reacción ***"B"****, no debe cargar eléctricamente al circuito principal* ***"A"****.*

Amplificación: $A = Xu/Xi$

Reacción: $B = Xf/Xu$

Amplificación compleja reaccionada: $Af = Xu/Xt$

En las ecuaciones anteriores, A, B y Af son en general expresadas en términos de números complejos. Considerando el esquema de conexiones a anillo cerrado, se puede hacer las siguientes afirmaciones:

a. La señal Xi al ingreso del cuadripolo A, se encuentra amplificada a la salida bajo la forma: $\mathbf{Xu = AXi}$

b. La misma señal Xu en la salida de A, controla el ingreso del cuadripolo de reacción B, y es atenuada a la salida de B: $\mathbf{Xf = BXu = ABXi}$

c.- En el nodo sumador las dos señales, Xt proveniente de la fuente externa de referencia y Xf proveniente de la salida del cuadripolo de reacción, se unifican formando la señal: $\mathbf{Xi = Xt+Xf}$

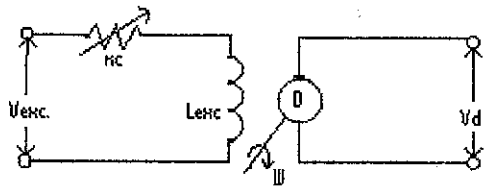
3.1.1 Sistemas de control

Al hablar de sistemas de control, debemos de entenderlo como aquel sistema con capacidad de manipular ciertas magnitudes físicas, como mecánicas o eléctricas, para efectuar determinada operación de control, pudiendo hablar por lo tanto de:

a. Sistema a cadena abierta

Para fijar los conceptos, tomaremos en examen el control de la tensión o voltaje a los bornes de un generador eléctrico, como se muestra en la siguiente figura.

Fig. 28 Generador eléctrico controlado a través de un reostato en el lado de la excitación



Como se sabe, el voltaje generado por la máquina depende de la velocidad de rotación (impuesta por un primotor u otro medio motor), y del flujo de su campo de excitación.

Suponiendo constante la velocidad, la magnitud que se desea controlar es en este caso el voltaje generado, el cual viene a depender solo de la excitación y el control puede ser efectuado operando por medio de un reostato en serie a dicha excitación.

El primer inconveniente de este tipo de control radica en que a través de dicha resistencia circula la completa corriente de excitación del generador y por consiguiente se tendrá una notable disipación de potencia en dicho reostato.

Si al generador se le impone una mayor carga, entonces se variará la corriente eléctrica que ella entrega, por lo que también varía la caída tensión interna y por lo tanto también la tensión ***Vd*** *que ella suministra a sus bornes. Es necesario, en forma manual ajustar el potenciometro del circuito de excitación.*

La misma cosa sucedería si cambia la resistencia eléctrica del circuito de excitación por efecto de una variación de temperatura o de velocidad del medio motor que

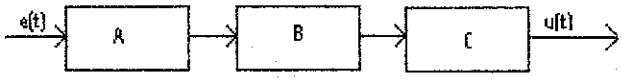
arrastra al generador.

En conclusión, tal tipo de control no logra mantener constante la magnitud controlada, sin continuas intervenciones de un operador, ya que se presentan perturbaciones que tienden a modificar la magnitud controlada.

Dichas perturbaciones son llamadas ***disturbios****, mientras las magnitudes que controlan los diferente elementos del sistema serán llamadas* ***señales****.*

El sistema anteriormente descrito, se puede representar esquemáticamente como en el siguiente diseño.

Fig. 29 Representación esquemática de un sistema de control a cadena abierta



En el sistema a cadena abierta como el descrito, es verdad que operando sobre la variable ***e(t)****, se puede establecer un determinado valor de la señal de salida, pero no se puede afirmar con certeza que el valor de* ***u(t)*** *así obtenido sea exactamente aquel deseado.*

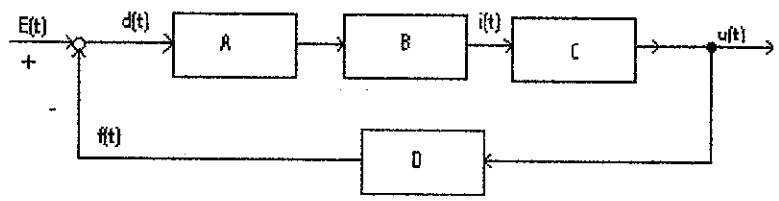
b. Sistema a cadena cerrada

Los inconvenientes descritos acerca del sistema a cadena abierta, vienen en la practica, anulados o extremadamente reducidos si el control es a cadena cerrada.

Usando el mismo ejemplo, se puede observar que si se hace depender la señal de control, de la magnitud por controlar, cuando sucede algún disturbio que provoca una variación de la tensión VD, se origina una variación de la señal Vd. de control (diferencia entre una señal de referencia y una de reacción, y esta ultima proporcional a VD), de modo que compense en gran parte el efecto del disturbio, y ya que esto sucede en forma automática, se habla entonces de un ***Control Automático.***

En general, los sistemas a cadena cerrada pueden ser representados con el esquema siguiente.

Fig. 30 Representación esquemática de un sistema de control a cadena cerrada



En dicho diseño, la magnitud de salida, oportunamente modificada por el elemento del bloque D, viene a ser comparada contra la señal de ingreso e(t) y se utiliza la diferencia d(t) entre las dos para operar a través de los elementos en cascada (A-B-C) sobre la misma u(t).

En el ejemplo citado, C representa el generador, A y B dos estadios amplificadores, D el divisor resistivo y él circulo representa el circuito que efectúa la diferencia entre la señal de referencia y aquella señal saliendo del divisor (señal de reacción).

Elementos de un sistema de control.

Un sistema de control automático a cadena cerrada puede representarse esquemáticamente como en la fig. 30, en la cual se distinguen.

a. *El sistema o complejo controlado*

Representado en dicha figura con la letra "C", y que es el elemento que abastece la magnitud controlada u(t).

Ya que en general, a la magnitud controlada se asocia una cierta potencia, el sistema controlado debe estar en grado de proveer la potencia requerida.

En nuestro caso, la magnitud controlada es la tensión eléctrica, el sistema controlado será por lo tanto un generador eléctrico, en cambio, si la magnitud controlada fuera una velocidad, ***el sistema controlado sería un motor,*** *o si fuera una temperatura, el sistema controlado sería un horno.*

La señal a la entrada del sistema controlado que permite modificar la magnitud controlada es indicada como ***i(t)*** *y toma el nombre de* ***señal de regulación.***

Dicha señal por si sola, no puede ser la señal de control ***e(t)*** *ya que casi siempre su nivel de potencia frecuentemente es muy bajo y no es compatible con aquel solicitado por* ***i(t)*** *por lo cual es necesario que sea modificado por un conjunto de elementos y en la figura 30, se indican como "A" y "B", este conjunto toma el nombre de* ***complejo de regulación.***

b. Complejo de regulación

*Está constituido por varios estadios de amplificación y que opera sobre la señal de diferencia **d(t)** obtenida de la comparación entre la señal de control o de referencia **e(t)** y aquella señal de reacción f(t) que es proporcional a la magnitud regulada.*

*La señal de diferencia **d(t)** viene manipulada por el complejo de regulación y transformada en la señal de regulación.*

c. Generador de señal de reacción

*Es el elemento que provee la señal de reacción **f(t)**, teniendo en su ingreso la magnitud regulada **u(t)**. Tal elemento, frecuentemente es un transductor ya que debe manipular la magnitud controlada para proveer una señal totalmente dependiente de la **u(t)** pero frecuentemente de diversa naturaleza, de tal forma de que sea homogénea a la señal de control **e(t)**.*

*Por ejemplo, en el caso de un control de velocidad, si la señal de referencia **e(t)** es una tensión eléctrica, el generador (transductor) de señal de reacción podrá ser una dinamo tacometrica, a excitación constante, conectada mecánicamente al eje del motor, de tal forma que pueda proveer a sus bornes una tensión proporcional a la velocidad de rotación del eje del motor.*

d. Generador de la señal de control

Es el elemento que provee la señal de referencia o de control y normalmente la potencia erogada por este

generador es modesta ya que debe de proveer una señal que tenga características bien determinadas y entre estrechos limites de tolerancia, tal elemento resulta más costoso mientras más potencia deba de erogar, siendo importante notar que el generador de señal de referencia es un elemento externo a la cadena de regulación.

5. *Elemento de comparación*

Es por lo general, un elemento en el cual se efectúa la diferencia entre la señal de referencia y aquella de reacción; está caracterizado por tener dos señales de ingreso ***e(t)*** *y* ***f(t)*** *y frecuentemente, tal elemento se reduce a un simple circuito eléctrico.*

El conjunto del complejo de regulación y del sistema regulado constituye la "línea de acción o de ida", mientras el generador de la señal de reacción hace parte de la línea de reacción o de retorno.

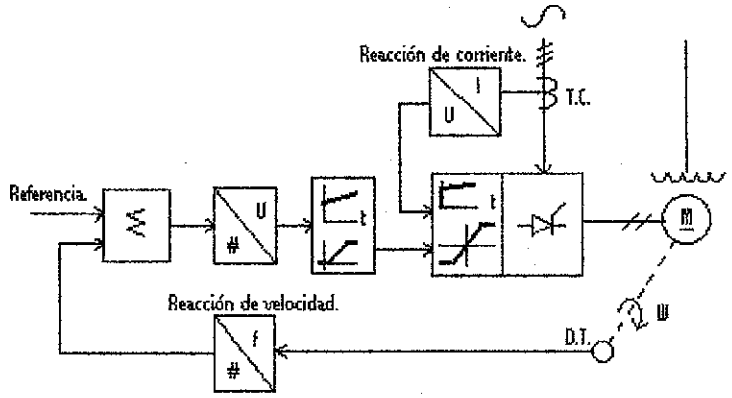
El conjunto de las dos líneas constituye el "anillo de regulación" y el conjunto de elementos agregados al sistema controlado considerado preexistente, para efectuar la regulación toma el nombre de "regulador", el cual está constituido por el generador de la señal de referencia, del generador de la señal de reacción, del elemento de comparación y del complejo de regulación.

Sistema de control automático a anillo cerrado de voltaje de armadura de un motor de corriente directa.

En el siguiente diagrama se observa el control de armadura de un motor en el cual se tienen los elementos de control, de acción, de reacción y otros, de los cuales se

dará a continuación una descripción detallada además de su forma de operar en conjunto.

Fig. 31 Diagrama a bloques de regulación de armadura de un motor de d.c.



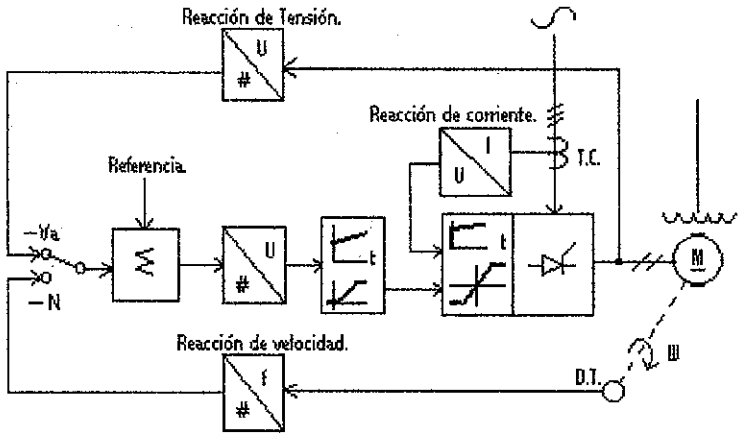
3.2 Reacción de F.E.M. (-Va)

Esta es una reacción negativa que permite obtener proporcionalmente el valor de voltaje con el cual está operando la armadura del motor, usada casi con exclusividad para la operación de puesta a punto del regulador de armadura del motor, ya que en los inicios de ajustes del regulador/motor, no se tiene plena certeza del sentido de giro que tomará el motor.

Por su naturaleza de reacción negativa controlada por un amplificador operacional, se presta para ser utilizada sin el inconveniente de que el motor al momento de energizar, por primera vez su armadura, aun con valores bajos de señal de referencia, tome velocidades peligrosas y sin control.

Su utilización como señal permanente de control de velocidad es muy limitada ya que presenta el inconveniente de ser bastante inestable cuando un motor se ve sometido a solicitaciones mecánicas considerables.

Fig. 32 Esquema eléctrico de la reacción de tensión de armadura o F.E.M.



3.3 Reacción de velocidad (-n)

Esta es una reacción negativa muy importante ya que físicamente una dinamo tacometrica está acoplada directamente al eje del motor y observa la velocidad de giro del mismo traduciéndola a una señal de voltaje proporcional a la misma.

Las relaciones de las dinamos tacometricas dan valores como 100 voltios de d.c. proporcionales a 1000 r.p.m. o 60 voltios de d.c. proporcionales a 1000 r.p.m. motivo por el cual es necesario interponer redes divisoras de tensión

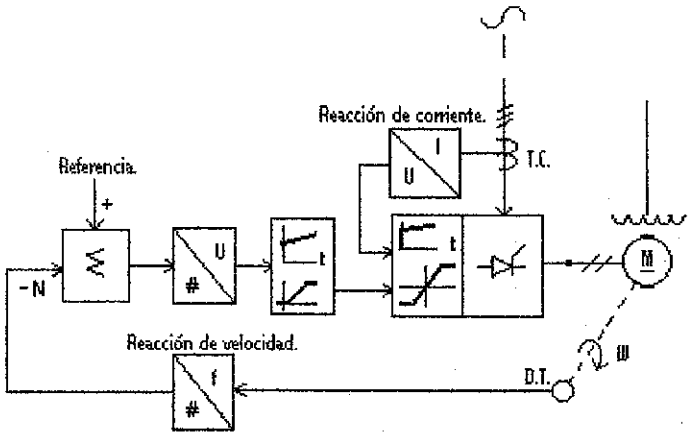
para atenuar dichas señales a una proporción de 0 a 10 voltios de d.c. ***(10 voltios corresponde a la máxima velocidad que el motor está en capacidad de alcanzar)*** *antes de arribar al ingreso del amplificador operacional que sirve como elemento de comparación contra la señal de referencia de velocidad.*

La señal de reacción de velocidad debe de ser siempre de polaridad negativa para hacer estable el lazo cerrado ya que si esta fuera positiva crearía inestabilidad debido a que el elemento de comparación, daría como resultado una señal positiva y en incremento, lo que mandaría al sistema de regulación electrónica de los tiristores a dar mayor ángulo de encendido lo que equivale a dar mayor tensión de armadura y por ende mayor velocidad la cual podría alcanzar valores peligrosos.

Los sistemas de apoyo de protección contra este error deberían de entrar a operar para desconectar rápidamente el puente de tiristores y poner a salvo el motor.

Este hecho obliga que en primera instancia, se deba de usar la reacción por tensión de armadura la que siempre será negativa antes de la reacción por velocidad ya que la polaridad de esta última puede ser observada y corregida de ser necesaria, *antes de que ingrese al elemento de comparación, y una vez se está seguro de la polaridad de la señal de la dinamo, entonces se puede utilizar con toda la seguridad del caso.*

Fig. 33 Esquema eléctrico de reacción de velocidad

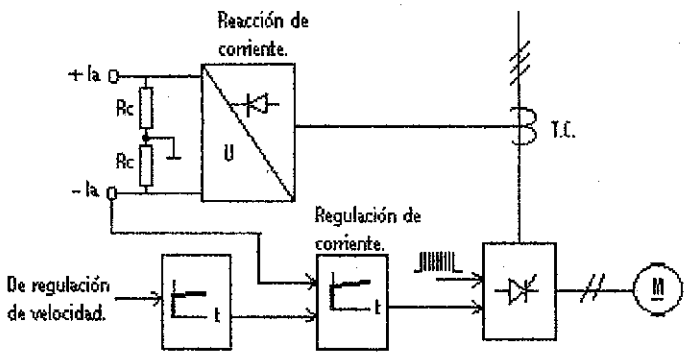


3.4 Reacción de la corriente de armadura (-Ia)

Esta reacción tiene por objeto observar el nivel de carga que adquiere el motor bajo condiciones de operación normal, ayudando al anillo de velocidad a estabilizar la operación del motor, compensando la caída de velocidad por el efecto de la carga impuesta.

Normalmente, los transductores son transformadores de corriente conectados a dos de las líneas de corriente alterna de alimentación del d.c. drive que dan una proporción de la corriente real bajo condiciones de operación del motor y posteriormente dicha señal de corriente es traducida a una señal de tensión de polaridad negativa para que pueda ser procesada por un amplificador operacional.

Fig. 34 Esquema eléctrico de reacción de corriente de armadura

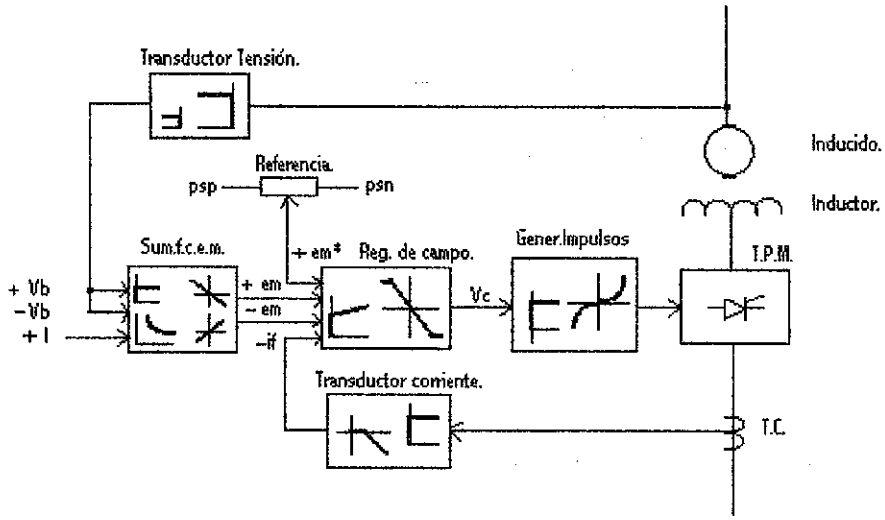


3.5 Reacción de la corriente de excitación (-if)

Esta reacción tiene por objeto enviar información acerca del nivel de corriente de excitación con que opera el motor para así poder llevar a cabo el deflujo de excitación en forma automática.

Esta señal proviene de un transformador de corriente localizado en una de las fases de corriente alterna que alimentan el puente de rectificación controlado en configuración "Graetz" usado para convertir la corriente alterna en directa y así alimentar el devanado de excitación del motor.

Fig. 35 Esquema a bloques de alimentador de excitación de motor



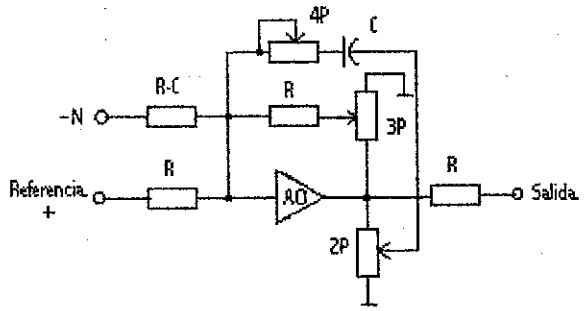
Como se observa de la figura anterior, la corriente de excitación se cambia de nivel en el transformador y en el transductor de corriente para poder ser manejada a nivel electrónico en la etapa de comparación respectiva a donde debe de llegar con polaridad negativa.

Todas las reacciones eléctricas anteriores, se integran al regulador electrónico a través de las siguientes etapas.

1. Control de velocidad del motor o "speed control"

Este elemento tiene por objeto recibir dos señales a nivel electrónico, compararlas y dar una señal de salida que sea la diferencia de las señales de ingreso (señal de error).

Fig. 36 Esquema eléctrico del control de velocidad



Las señales que se procesan de acuerdo al bloque anterior son las siguientes:

a. Señal de referencia ***(Rif.+)***

La que normalmente proviene de un potenciometro, siendo una señal de voltaje de d.c. variable entre 0 y 10 voltios.

b. Señal de reacción ***(-n)***

Esta señal debe de ser proporcional a la velocidad de giro del motor o bien proporcional al voltaje de armadura del motor.

c. Señal de salida o de error:

El circuito electrónico que procesa las dos señales de ingreso, normalmente es un amplificador operacional que constantemente está comparándolas, por lo que la señal de salida siempre será una señal negativa variable en el tiempo bastante parecida a un diente de sierra.

Cuando el motor arranca, en su período de aceleración, la señal de referencia es mayor que la señal de reacción por lo que la señal de error tiende a ser negativa, mandando al control de encendido de los tiristores a incrementar el ángulo de operación y por ende a dar mayor tensión de armadura para incrementar la velocidad del motor.

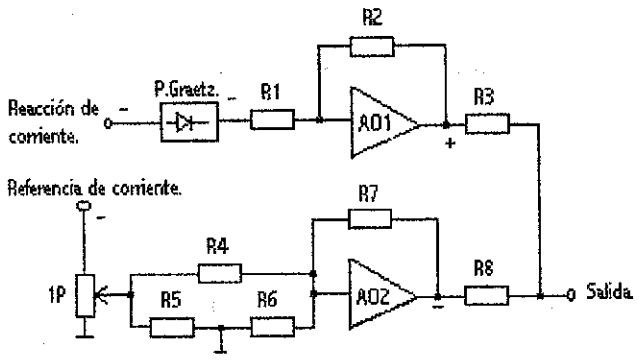
Normalmente, durante la aceleración la señal de referencia se modifica de valor en forma automática, siguiendo suavemente una rampa de aproximadamente 20 segundos hasta alcanzar el valor de velocidad deseada de trabajo del motor, motivo por el cual el encendido de los tiristores es suave y no se observan variaciones en escalón de la velocidad ya que esta constantemente alcanza a la señal de referencia y la sigue a través de toda su rampa de aceleración, y gracias a dicha rampa, el nivel de corriente también tiene un comportamiento relativamente suave.

Una vez alcanzada la velocidad de trabajo, el elemento de comparación, en forma continua sigue comparando las dos señales para mantener la estabilidad de la velocidad del motor.

2. Control de carga del motor o "current control"

Así como en el anterior elemento de comparación de control de velocidad del motor que resulta ser el elemento más externo, existe un elemento de comparación mas interno, el cual se encarga de compensar la velocidad del motor debido al efecto de carga mecánica aplicada en el eje del mismo.

Fig. 37 Esquema eléctrico de reacción de corriente de armadura



Las señales por comparar son las siguientes:

a. Señal de referencia:

También llamada referencia de corriente, ésta es la señal de salida del elemento de comparación por velocidad del motor. Dicha señal tiene polaridad negativa.

b. Señal de reacción:

Esta señal es proporcional a la corriente bajo condiciones de carga del motor y proviene de dos transformadores de corriente conectados a dos fases de alimentación trifasica del regulador electrónico y posteriormente reducida a una señal de voltaje de d.c. para poder ser utilizada por el elemento de comparación.

Esta señal de reacción, al ingresar a la regulación de corriente tiene polaridad negativa, sin embargo llega hasta un amplificador operacional en configuración invertente que le proporciona polaridad positiva para así no causar inestabilidad de la señal de salida del elemento de comparación.

c. Señal de salida:

Esta señal, es el resultado de comparar la señal de referencia de corriente, contra la señal de reacción, ***se obtiene un error el cual lleva implícito tanto las compensaciones por velocidad como por carga del motor,*** *ajustándose de tal manera que controlan en forma continua el ángulo de encendido de los tiristores con el único objetivo de mantener constante la velocidad.*

Cuando el motor está girando en vacío, el control de la estabilidad de la velocidad está a cargo casi en exclusiva por la regulación de velocidad, localizada en el elemento de comparación más externo (speed control), mientras que cuando el motor se ve sometido a condiciones de carga, el elemento de comparación por velocidad se ve reforzado por el elemento de comparación interno por carga (current control).

De lo anterior se deduce que no importará si el motor trabaja en vacío o bajo carga, su velocidad permanecerá constante controlada en forma automática.

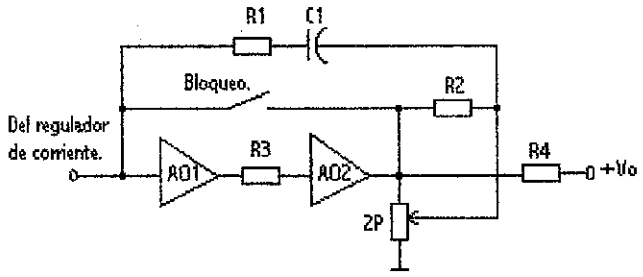
3. Complejo de control

Una vez la señal referencia de corriente es comparada contra la señal de reacción de corriente, en el regulador de corriente, el resultado o error se lleva al complejo de control el cual no es mas que un circuito con amplificadores operacionales cuyo objetivo radica en garantizar una señal de salida ***+V0,*** *siempre de polaridad positiva y variable de 0 a 10 voltios de d.c.*

Cuando una falla ocurre por ejemplo por una sobrecarga, la señal de salida del complejo de control (+Vo) instantáneamente se lleva a cero voltios, lo que equivale a cerrar el ángulo de encendido de tiristores llevando la tensión de armadura a cero voltios en forma instantánea.

Cuando esto sucede es aconsejable, antes de poner nuevamente en marcha el motor, revisar si no ocurrió daño alguno en su colector ya que debieron circular corrientes de sobrecarga de considerable valor.

Fig.38 Esquema eléctrico de salida de la regulación de corriente de armadura o "Current control"



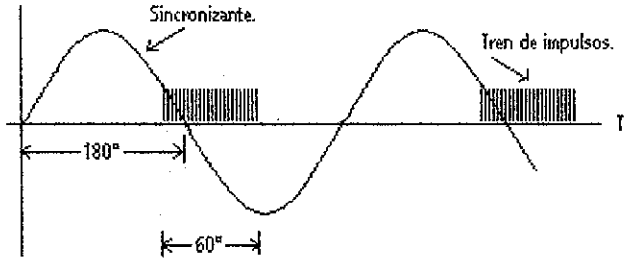
4. Generación y sincronización de impulsos

Su función consiste en generar un tren de impulsos de control de encendido de cada uno de los seis tiristores del puente de potencia así como de sincronizar el ángulo de encendido respectivo de cada uno de ellos y normalmente cada tren de impulsos tiene un periodo equivalente a 60 grados eléctricos.

Existe un circuito electrónico generador de tren de impulsos que siempre está operando, independientemente si

el motor está o no dispuesto a entrar en operación y ***normalmente dichos impulsos llegan hasta las compuertas de los tiristores exactamente cuando el voltaje instantáneo en el semi-periodo positivo de cada una de las fases de alimentación está cercano a 180 grados eléctricos,*** *lo que garantiza que a pesar de la existencia de impulsos en cada una de las compuertas de los tiristores, la tensión anodo-catodo es de un valor tal que no pueden los tiristores entrar en conducción.*

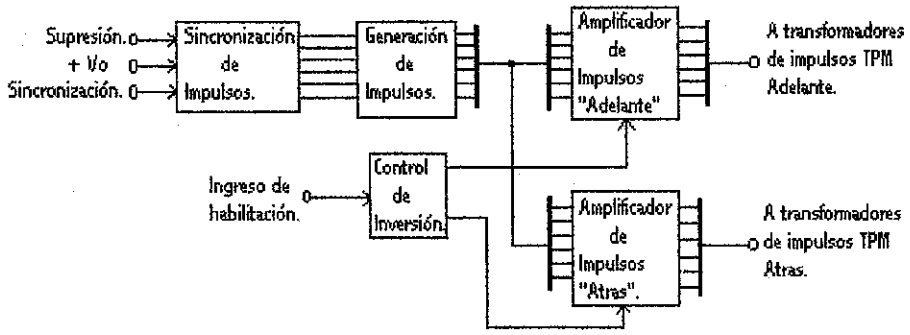
Fig. 39 Señal electrónica de sincronización de impulsos



El circuito de sincronización de impulsos tiene por objetivo desplazar en forma equidistante cada uno de los seis trenes de impulsos pudiendo así hacer un barrido electrónico de 180 grados eléctricos que coinciden con el tamaño del semi-periodo positivo de cada una de las fases de alimentación eléctrica.

Para efectuar la siguiente operación, el complejo de generación y sincronización de impulsos necesita una señal de control positiva variable de 0 a 10 voltios de d.c. la cual es proporcionada por el complejo de control a través de su señal de salida +Vo.

Fig. 40 Esquema eléctrico de generación de impulsos y lógica de inversión



5. Complejo de lógica de inversión

Su función radica en decidir que puente de tiristores (el directo o el inverso) debe de entrar a operar y en que momento, es usada exclusivamente en reguladores electrónicos de tipo "bidireccional".

Para operar, este circuito recibe la señal de ingreso de control del regulador de corriente (referencia de corriente) y observa la polaridad de dicha señal:

a. Si es de polaridad negativa hace operar al puente directo.

b. Si es de polaridad positiva hace operar al puente inverso.

Como se puede observar de la figura anterior, la lógica de inversión condiciona cual de las tarjetas amplificadoras de impulsos de compuerta debe de operar y por lo mismo que puente de tiristores debe de ser activado.

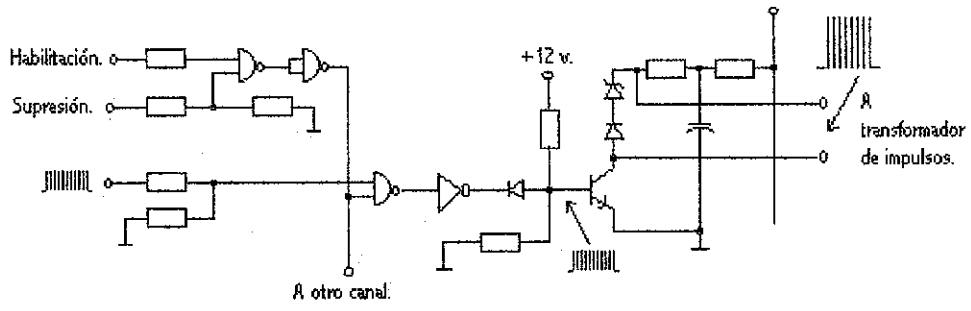
Su uso radica en poner a funcionar al motor temporalmente en sentido directo o en sentido inverso o bien para estabilizar rápidamente la velocidad del motor después de que este a dejado de operar con carga y ve incrementada su velocidad arriba de la predispuesta.

La estabilización de la velocidad de un motor después de que este a sido liberado de su carga es mucho más rápida y efectiva en un sistema bidireccional que en uno unidireccional gracias a la operación automática del complejo de su lógica de inversión.

6. Complejo amplificador de impulsos

Los trenes de impulsos provenientes del complejo de generación y sincronización de impulsos, no tienen la potencia adecuada para operar las compuertas (gate's) de los tiristores, motivo por el cual se coloca una oportuna interfase amplificadora a cada uno de los seis canales de salida.

Fig. 41 Esquema electrónico de amplificador de impulsos



Como se observa de la figura anterior, la internase involucra en su ingreso una alta impedancia lo que permite que el complejo de generación no se vea muy solicitado,

mientras que en su salida existen transistores de potencia que amplifican y ***manejan oportunamente los transformadores de impulsos respectivos, separando galvánicamente al circuito de control del de potencia.***

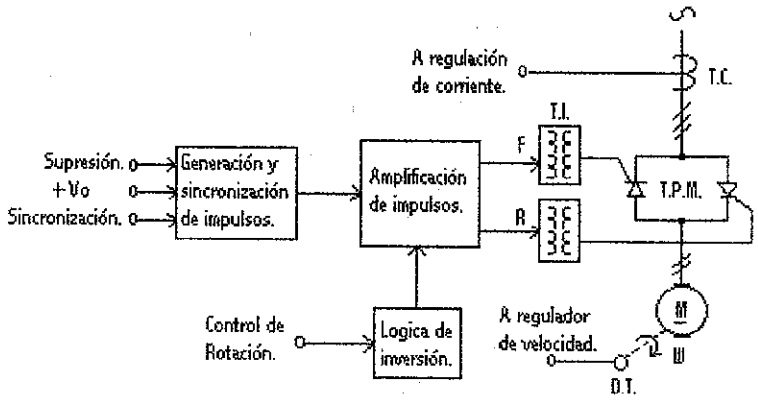
7. Complejo controlado

Ya que la magnitud por controlar en este caso es la velocidad, el complejo a controlar es un motor de corriente directa, por lo que el complejo controlado está compuesto por los siguientes elementos:

En el lado de control de voltaje de armadura.

a. Transformadores de impulsos.
b. Modulo de tiristores de potencia.
c. Fuente de alimentación principal.
d. Transformadores de corriente.
e. Dinamo tacometrica.
f. Motor de corriente directa.

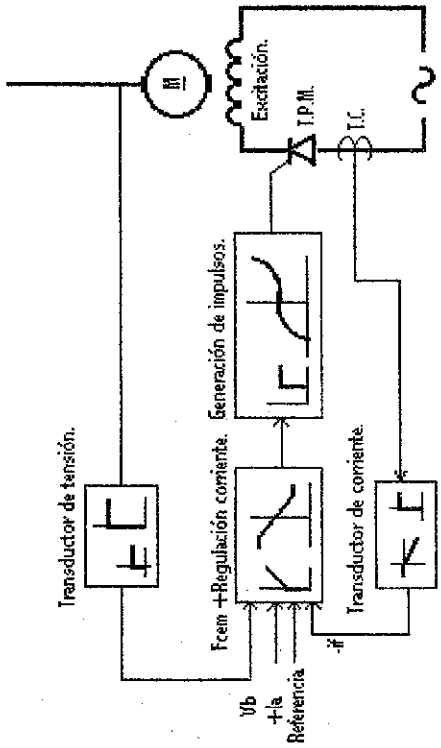
Fig. 42 Esquema general del control de voltaje de armadura de motor



En el lado de control de corriente de excitación del motor.

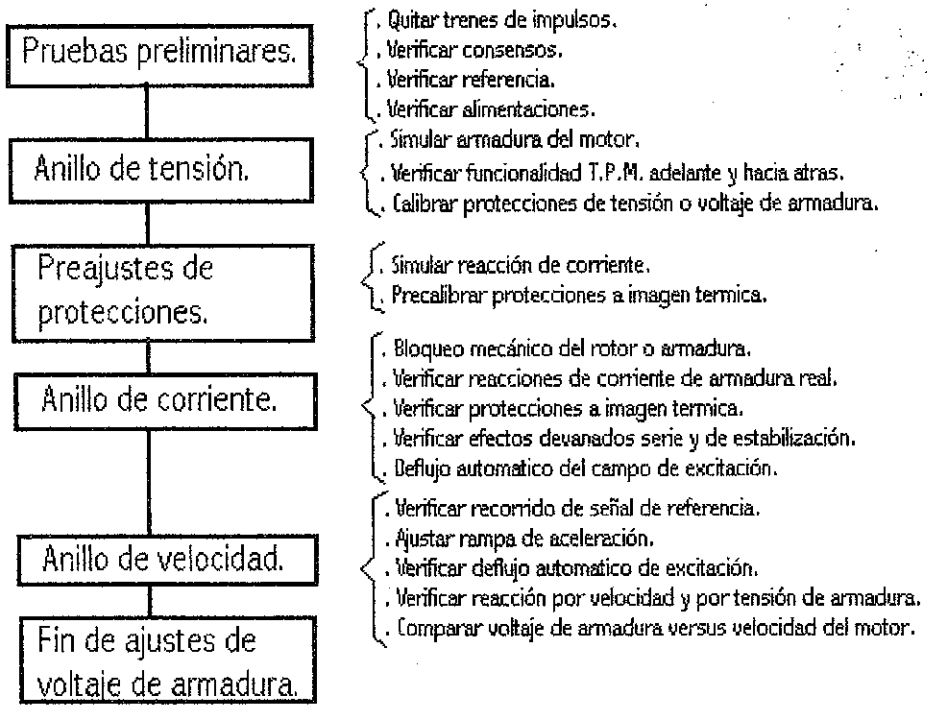
a. Transformadores de impulso.
b. Modulo de potencia a tiristores.
c. Fuente de alimentación.
d. Transformador de corriente.
e. Devanado de excitación.

Fig. 43 Esquema general de control de corriente de excitación del motor



Ajustes del regulador electrónico de voltaje de armadura

(Capitulo # 4)



Ajustes del regulador electrónico monofasico de excitación del motor

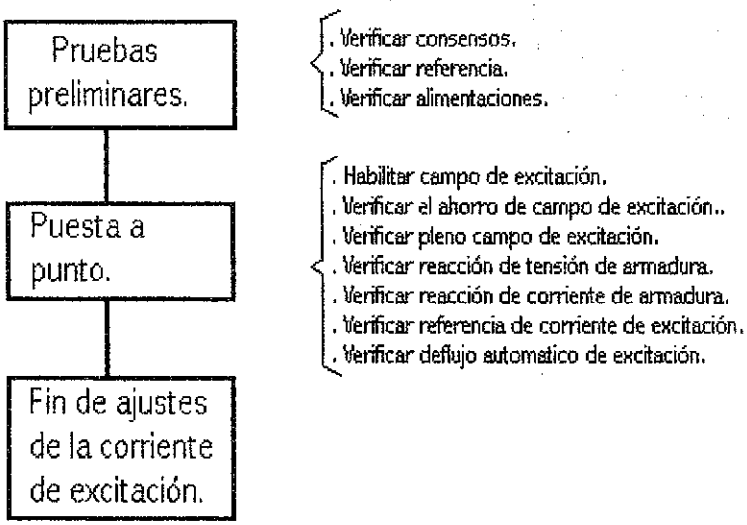


Diagrama de flujo a seguir para ajustes de reguladores de armadura y de excitación de motores de d.c. a excitación separada

4. PROCEDIMIENTO DE AJUSTES PARA PONER EN OPERACIÓN LOS REGULADORES ELECTRÓNICOS DE ESTADO SÓLIDO (D.C.-DRIVE)

El presente procedimiento está diseñado siguiendo las secuencias de prueba realizadas, en un regulador electrónico de estado sólido bidireccional de 450 KW de potencia teniendo a la mano los esquemas eléctricos y electrónicos del mismo.

Es necesario hacer la observación de que si bien es cierto, este procedimiento hace énfasis en reguladores electrónicos de tipo "BIDIRECCIONALES", también puede ser usado y de hecho se ha usado sin mayores inconvenientes en los reguladores "UNIDIRECCIONALES", no importando su potencia, la que puede variar desde 11 kw hasta 600 kw.

En el desarrollo del actual procedimiento, se toma como base el hecho de que los cuadros o paneles que alojan al regulador en sí y sus componentes internos, están totalmente acondicionados, incluyendo las pruebas de aislamiento y de las conexiones eléctricas externas.

En cuanto al elemento sometido a control, ***en este caso el motor de corriente directa a excitación independiente,*** *debió ser objeto de una revisión preliminar, para verificar el estado en que se encuentran sus partes mecánicas como eléctricas, a fin de garantizar una perfecta operación.*

Cabe resaltar que resulta de primordial importancia el criterio aplicado por la persona encargada de realizar las operaciones de puesta a punto, lo que condiciona cada una

de las etapas a seguir en el procedimiento.

4.1 Ajustes del regulador de voltaje de armadura

Debido a que tanto el motor como el regulador electrónico de estado sólido, llegan a las empresas en forma separada, se hace necesario hacer ajustes en el regulador electrónico para garantizar que las dos unidades ya integradas operen de una manera correcta, no importando desde luego que ambas unidades hallan estado en operación en otra parte.

El proceso de ajuste del regulador electrónico conlleva por lo tanto un proceso bastante meticuloso aun cuando la tecnología empleada sea la mas actualizada, ya que en general se espera que el conjunto motor/regulador estén en capacidad de responder a las siguientes premisas:

a. Soportar, sin problemas, solicitudes de cargas eléctricas dentro de sus valores nominales de operación.

b. Recuperación rápida de la velocidad de trabajo frente a operaciones bajo carga y de vacío.

c. Protecciones eléctricas eficaces y oportunas frente a solicitudes de carga superiores a las nominales.

d. Capacidad de seguir fielmente variaciones de velocidad impuestas por los procesos productivos.

4.1.1 Pruebas preliminares

Los pasos a seguir son los siguientes:

1.- Por seguridad del personal y del equipo (sí el procedimiento lo permite), asegurarse de desconectar los cables de señal de encendido de tiristores tanto en "forward" como en "reverse", así como de abrir los seccionadores bipolares de armadura y de excitación. ***Esto permite alimentar el regulador electrónico sin riesgo de que el motor se ponga en movimiento sin control alguno.***

2.- Si existe la posibilidad, extraer todas las tarjetas electrónicas de su contenedor.

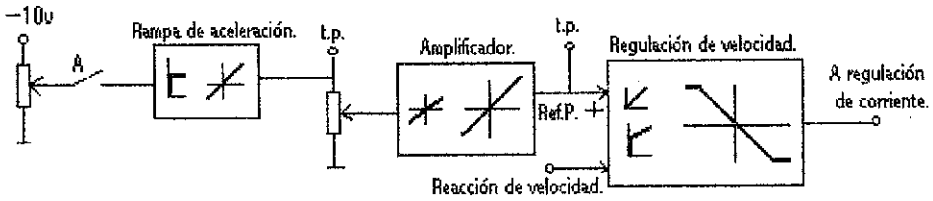
3.- Alimentar el regulador y verificar la existencia de todas las tensiones de alimentación en especial aquellas de corriente directa que sirven para alimentación de tarjetas electrónicas.

4.- Quitar alimentación al regulador y reinsertar todas las tarjetas electrónicas, a excepción de los cables de señal de encendido de tiristores y seccionadores de armadura y excitación.

5.- Alimentar nuevamente el regulador.

6.- Como la operación del regulador tiene por objetivo, seguir fielmente una señal de referencia, simular dicha señal y verificar tanto su existencia como su nivel de voltaje en los distintos puntos que la lógica de accionamiento tenga habilitados como puntos de prueba ***(test point).***

Fig. 44 Circuito electrónico para el paso de la señal de referencia



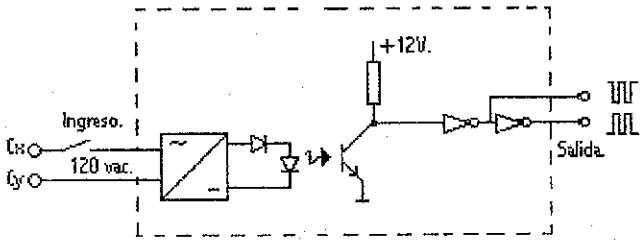
7.- Proceder a simular distintas situaciones que modifiquen o que alteren el comportamiento normal de dicha señal para verificar que efectivamente la lógica de accionamiento es operable y confiable. Por ejemplo simular situaciones como:

a. Falta de excitación del motor.
b. Falta de ventilación del motor.
c. Falta de ventilación del puente de tiristores.
d. Sobrecarga del alimentador o del motor.
e. Sobre-temperatura de los devanados del motor.
f. Sobre-voltajes del alimentador.
g. Sobre-velocidad del motor.
h. Falta de señal de reacción de dinamo tacometrica o de generador de impulsos (encoder).
i. Consenso de marcha y paro del regulador electrónico.
j. Consenso de marcha y paro del motor.

Cada uno de los consensos anteriores, actuando sobre la lógica de accionamiento del regulador electrónico, debe estar en capacidad de realizar la desconexión inmediata del puente de tiristores y de los telerruptores de salida de corriente directa, para poner fuera de operación tanto al motor como al regulador electrónico.

En la figura 45, se observa un diseño de interfase para recibir comandos externos como los expuestos con anterioridad.

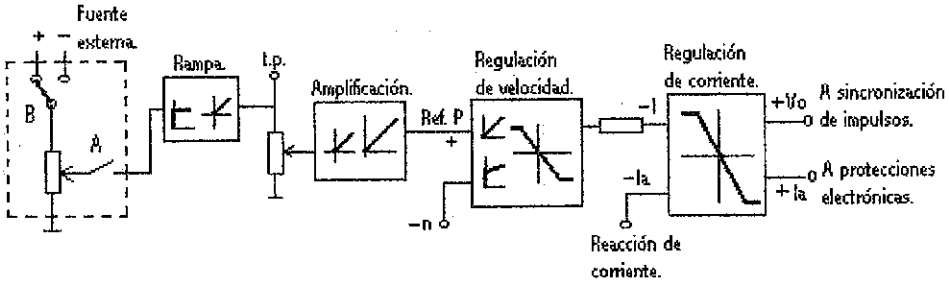
Fig. 45 Circuito electrónico de interfaces



Normalmente, la señal de referencia es una señal de corriente directa de polaridad positiva, de tipo analógico que oscila entre 0 y 10 voltios, hasta llegar a la parte electrónica de la regulación de velocidad, donde puede cambiar de valor.

8.- Verificar que cuando la señal de referencia se cambia de magnitud y polaridad, a la salida del amplificador operacional de la regulación de velocidad, la señal obtenida debe de ser proporcional a la de entrada y de la misma polaridad.

Fig. 46 Diagrama a bloques del recorrido de la señal de referencia



9.- Verificar que cuando la señal de ingreso de referencia alcanza el máximo valor de ± 10 voltios, exista una salida de la regulación de velocidad de ± 6.5 voltios que coincidirán con el valor de salida en saturación del amplificador operacional (este valor es así por los diversos divisores de tensión que se involucran en la salida real de dicho amplificador operacional), y modificable por medio de los potenciometros de la regulación de velocidad que se indican a continuación:

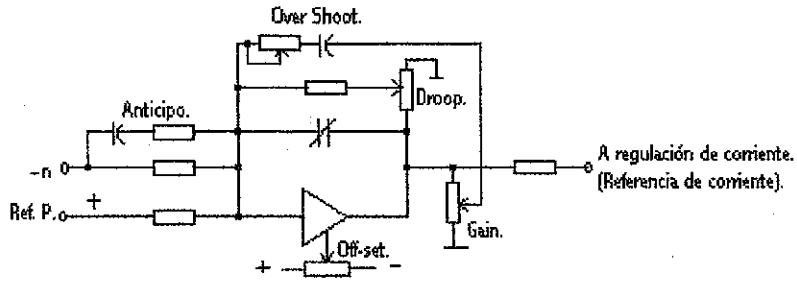
a. *Potenciometro de ajuste del* ***over-shoot*** *(oscilación de velocidad en el arranque y cuando libera carga el motor).*

b. *Potenciometro de ajuste del* ***droop*** *(caída de velocidad cuando el motor toma carga).*

c. *Potenciometro de ajuste del* ***offset*** *(salida de señal del operacional cuando se tiene ingreso cero o ganancia de modo común).*

d. *Potenciometro de ajuste del* ***gain*** *(nivel de ganancia dispuesto al operacional).*

Fig. 47 Diagrama electrónico de la regulación de velocidad



10.- Verificar que la señal de salida de la parte de regulación de velocidad llegue con la misma polaridad y magnitud hasta la parte de ingreso de la regulación de corriente, la cual se pondrá a actuar de manera "proporcional".

11.- Haciendo variar la señal de referencia tanto de magnitud como de polaridad, observar que se deberá de obtener a la salida de la regulación de corriente ***(Vo)****, una señal variable solo en magnitud manteniendo siempre polaridad positiva, y cuando la señal de referencia alcance ± 10 voltios, a la salida de Vo se deberá obtener como máximo +10 voltios, modificable a través del potenciometro de ingreso de la regulación de corriente.*

12.- Cuando en la señal de referencia se hacen cambios de polaridad y con mínima magnitud, observar que los indicadores luminosos muestran que puente a sido habilitado, ya sea "forward" o "reverse", confirmado esto en los indicadores luminosos (si existen) de los respectivos transformadores de impulsos, lo que a su vez confirma que el control electrónico de inversión de giro está operando.

Es importante recalcar que el valor máximo de Vo no deberá de exceder de +10 voltios, ya que es este parámetro, el que gobierna el ángulo de encendido de los tiristores del puente de potencia*, por lo cual también hay que observar que cuando la señal de referencia tenga 0 voltios, la señal de salida Vo deberá también mostrar +0 voltios, y de no ser así, proceder a ajustar con los potenciometros de ganancia y offset de la regulación de corriente.*

13.- Quitar la alimentación al regulador electrónico.

Las pruebas preliminares han terminado.

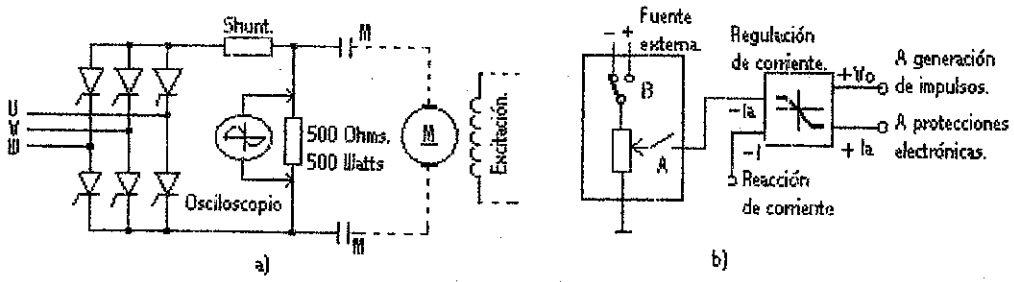
4.1.2 Anillo de Tensión

Esta prueba se realiza con el objetivo de verificar la funcionalidad del modulo de potencia bidireccional (Forward/Reverse), de manera preliminar de tal manera de asegurar su funcionamiento correcto sin arriesgar la integridad del regulador electrónico.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1.- Conectar una resistencia externa de 500 ohmios/500 wattios, al ingreso del seccionador bipolar de alimentación de armadura para simular a esta misma y asegurarse de que este seccionador permanezca abierto durante la prueba para mantener desconectada la armadura del motor.

Fig.48 Esquema eléctrico usado para prueba de anillo de tensión. a) Potencia b) Control



2.- Insertar únicamente el conector del puente "Forward", para habilitar la operación del puente "Adelante", conectando un voltímetro analógico a los bornes de la

resistencia de 500 ohmios como se observa en la fig.48

3.- Con una fuente externa conectar al ingreso de la regulación de corriente (-Ia), la señal de referencia.

4.- Manteniendo la señal de referencia a cero voltios, proceder a energizar el regulador electrónico y dar consenso de marcha, verificando que el voltímetro indique cero voltios.

5.- En el sistema de control de la tensión de armadura existen puntos para verificar la forma de onda que se debe de obtener a la salida del puente de tiristores; conecte la sonda de un osciloscopio en dichos puntos (que dan la tensión existente entre positivo y negativo de la salida del puente) observando que no existe señal alguna que indique que el puente está en conducción.

IMPORTANTE: la espiga de alimentación del osciloscopio, "NO" debe estar aterrizada tomando la precaución de aislar el chasis del osciloscopio y no tocarlo ya que este permanecerá al potencial eléctrico de la salida del puente.

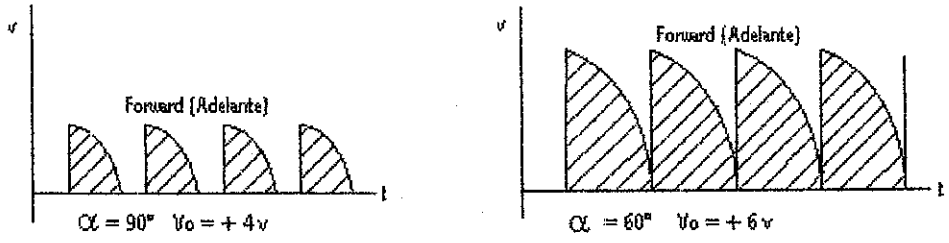
6.- Dar una pequeña referencia de polaridad negativa al ingreso de la regulación de corriente, y verifique la lectura de tensión dada por el voltímetro y la forma de onda del osciloscopio.

Ambas señales deben de ser muy estables, y además el regulador electrónico le debe de indicar que puente de tiristores está operando (por ser la señal de referencia de tipo negativa es el puente directo o forward el que debe estar operando).

Debe de tomar en consideración de que si el regulador electrónico fuera de una potencia mayor de 100 kw, ***los tiristores necesitaran un nivel de corriente anodica suficiente*** *para dar una señal estable, puede ser que necesite sustituir la resistencia de 500 ohmios por una de menor valor para poder mantenerlos en conducción.*

7.- Con la lectura dada por el voltímetro analógico, proceda a calibrar el instrumento medidor de tensión del regulador electrónico.

Fig. 49 Forma de onda de la tensión dada a la resistencia que sustituye al motor de d.c. en la salida de un regulador electrónico a diferente ángulo de encendido de los tiristores



8.- Incremente lentamente la señal de referencia, verificando que el puente de tiristores también incrementa la salida de voltaje, esto se verifica tanto en el voltímetro como en el osciloscopio donde la forma de onda debe de ser periódica aunque no necesariamente debe tener una forma senoidal.

La tensión máxima de salida no debe de ser mayor a 500 voltios si la señal trifasica de alimentación del regulador electrónico es de 440 voltios.

9.- Desenergice el regulador electrónico.

10.- Proceda a habilitar el conector del puente inverso "Reverse" sin desconectar el puente directo y con la referencia a cero voltios, energize el regulador electrónico, dando consenso de marcha, verificando que el voltímetro debe de señalar cero voltios a la salida (tanto forward y reverse).

IMPORTANTE: Si el voltímetro es analógico (de aguja) de preferencia que sea a doble polaridad con cero al centro de la escala debido al cambio de polaridad de la tensión de salida de ambos puentes.

11.- Con la fuente externa, dar una pequeña referencia positiva al ingreso del regulador de corriente y verificar que:

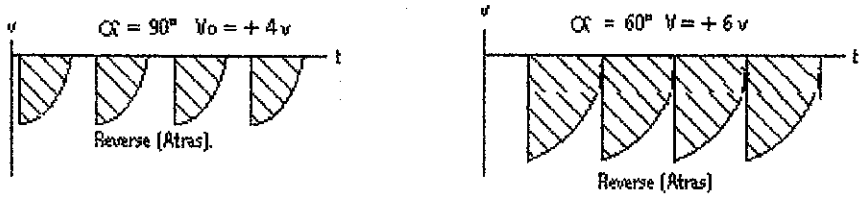
a. El puente de tiristores (T.P.M.) en operación, deberá de ser el "reverse" cuyo indicador luminoso deberá permanecer encendido durante todo el tiempo que tarde este en operación.

b. La tensión de salida del T.P.M. deberá ser de polaridad negativa y estable.

c. La forma de onda vista en el osciloscopio, deberá de estar invertida, estable y periódica.

d. Verificar el encendido de los seis LED's del grupo de transformadores de impulsos que confirma la existencia en operación de dicho puente.

Fig.50 Forma de onda de la tensión dada a la resistencia cuando T.P.M. opera en sentido inverso "Reverse" para diferente ángulo de encendido de los tiristores



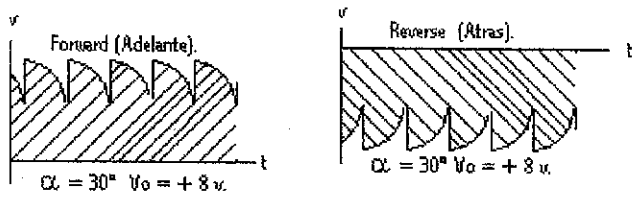
12.- Modificar el valor de referencia de la señal de entrada y verificar la variación de la magnitud de la tensión de salida así como la modificación de la señal vista en el osciloscopio.

13.- Modificar el valor de referencia de la señal de entrada a tal grado de obtener una tensión de salida de -50 voltios.

14.- Con el anterior valor de referencia, proceder a hacer el cambio de polaridad de la misma con el selector de la fuente externa.

15.- Verificar que con este cambio de polaridad, se cambia la polaridad de la tensión de salida del regulador (+50 voltios), vista en la resistencia de 500 ohmios, además verificar que los led's correspondientes a los transformadores de impulsos del otro puente se han encendido (Puente Forward).

Fig.51 Forma de onda de tensión en la resistencia con inversión de polaridad en T.P.M. y con el mismo ángulo de encendido de tiristores



16.- Con el selector de polaridad de la señal de referencia, hacer varios cambios de la polaridad, verificando que con dichos cambios también se produzcan los correspondientes cambios en la polaridad de la tensión de salida hacia la resistencia.

Polaridad de la tensión de la señal de referencia.	**Polaridad de la tensión de salida en la resistencia.**
+	- *(T.P.M. Reverse)*
-	+ *(T.P.M. Forward)*

17.- Observar en el osciloscopio que las formas de onda invierten su polaridad y que siguen siendo estables y periódicas.

18.- Incrementar lentamente la señal de referencia hasta obtener una tensión de salida de 500 voltios sobre la resistencia.

19.- Con el selector del cambio de polaridad de la señal de referencia, hacer cambios de polaridad y verificar que en el voltímetro y en el osciloscopio se producen cambios de polaridad.

La forma de onda vista en el osciloscopio a cambiado tanto de forma como de magnitud pero debe permanecer estable y periódica y responder a los cambios de polaridad impuestos.

20.- Verificado lo anterior, proceder a calibrar los relés de mínima y máxima tensión a los siguientes valores:

a. Relé de mínima tensión: 70 voltios.

b. Relé de máxima tensión: 630 voltios.

Los valores anteriores se calibran de esta manera por las siguientes razones:

a. Si el motor debe de ser parado por cualquier razón, el relé de mínima tensión garantiza que este no arrancará hasta que no halla bajado a una velocidad prudencial de aproximadamente 100 r.p.m.

b. Si existe una sobre-tensión en la red de alimentación o a la salida de un t.p.m. del regulador electrónico, por cualquier causa, el relé de máxima tensión desconectará la alimentación del motor.

21.- Verificar que la alarma luminosa de máxima tensión, responde correctamente.

22.- Lleve la tensión de salida a la resistencia a cero voltios y desenergice el regulador electrónico.

La prueba de anillo de tensión a terminado.

4.1.3 Pre-ajustes de protecciones electrónicas del regulador

Este paso se ejecuta con el fin de observar que el sistema de protecciones electrónicas del regulador está en operación, pudiéndose verificar sin necesidad de alimentar el motor.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Extraer los conectores de impulsos de ambos puentes (F y R)

2. Extraer el conector que lleva información de los transformadores de corriente CT's de la reacción de corriente de armadura.

Observar que dicha información no proviene directamente de los bornes de los transformadores de corriente sino que después de que el nivel de corriente dada por estos, ***a sido convertida a nivel de tensión,*** *por lo cual no existe peligro de daño en los transformadores de corriente.*

3. Con una fuente externa, debe de simular la "Reacción de corriente" que ingresa en la regulación de corriente, tomando en consideración, que debe de ser de polaridad negativa ya que es una reacción.

4. El valor de voltaje (teórico) de dicha señal de simulación, es calculado de la siguiente manera:

$$V_p = -I_e * (\#\ \text{vuelt. prim. T.A.} / \#\ \text{vuelt. sec.T.A.}) * R_c$$

El signo negativo es debido a que la señal de reacción (de los transformadores de corriente) recibida siempre será de polaridad negativa.

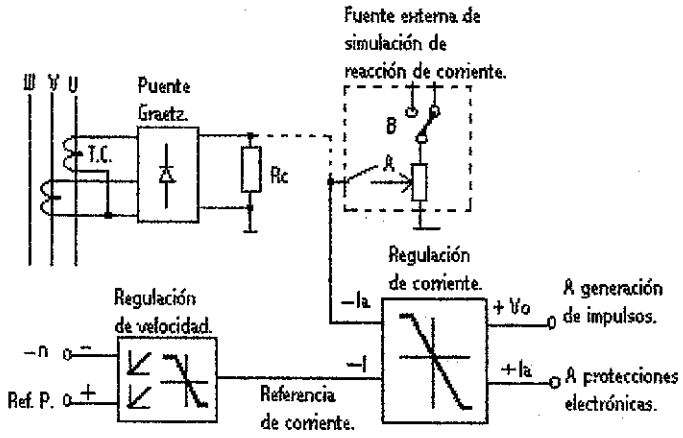
Donde:

Vp = Valor de voltaje para simular la reacción de corriente de armadura.

Ie = Valor de corriente continua real estimada en el lado primario del transformador de corriente (T.A.)

Rc = Resistencia de carga, convertidora de corriente a voltaje, o resistencia shunt.

Fig. 52 Esquema electrónico de interfaces de la reacción de corriente y la regulación de corriente



Ejemplo, se tienen que proceder a precalibrar las protecciones electrónicas de un motor de d.c. a excitación separada con los siguientes datos:

Placa de datos del motor.

- *Ercole Marelli E.M.G.*
- *Motor de corriente continua IP: 44*
- *Tipo: MLCA 400 M Clase Aislamiento: F*
- *Potencia: 300 Kw Velocidad: 1150/1600 r.p.m.*
- *Voltaje: 460 v. Corriente: 740 amperios.*
- *Excitación: Separada + Serie estabilizadora.*
- *Voltaje de excitación: 110/55 voltios.*
- *Corriente de excitación: 12.5/6.6 amperios.*

Placa de datos de los transformadores de corriente.

- *TAS 80 I.M.E.*
- *# de espiras del lado primario: 1*
- *# de espiras del lado secundario: ----*
- *Relación de transformación: 1250-2500/1 amperios.*
- *Linealidad: ----*
- *Voltaje de aislamiento: 3000 voltios a 60 segundos.*
- *Sobre-corriente de cortocircuito a 1 segundo: 60*In.*
- *Sobre-corriente de punta (dinámica): 2.7*(60*In).*
- *Frecuencia: 40 a 60 Hz +5%*
- *Consumo: 1.5 voltio-amperios.*

La resistencia de carga (shunt): 4.99 ohmios.

Por lo tanto, aplicando la formula anterior:

$$Vp = -740 * (1/2500) * 4.99 = -1.48 \text{ voltios.}$$

La reacción de corriente simulada calculada anteriormente, tomará los siguientes valores:

Nivel	***Corriente eléctrica.***	***Valor de voltaje de prueba.***	***Parámetro eléctrico.***
In	*740 amp.*	*-1.42 v*	*Corriente nominal (In)*
*1.2 * In*	*888 amp.*	*-1.71 v*	*Sobrecarga alimentador (Ith)*
*2.0 * In*	*1480 amp.*	*-2.84 v*	*Sobrecarga limite (Ilim)*
*1.2 * 2 * In*	*1776 amp.*	*-3.41 v*	*Supresión de impulsos (Isup)*

Los parámetros eléctricos dados, indican los niveles de corriente a los que el motor estará sometido antes de que actúen las protecciones electrónicas.

5. Energice el regulador electrónico.

6. Mantenga en "Stand-By" el regulador, es decir que este no habilite la salida de tensión de directa a la armadura del motor, ya que para esta prueba no se hace necesaria, (el regulador estará energizado pero en condición de "off").

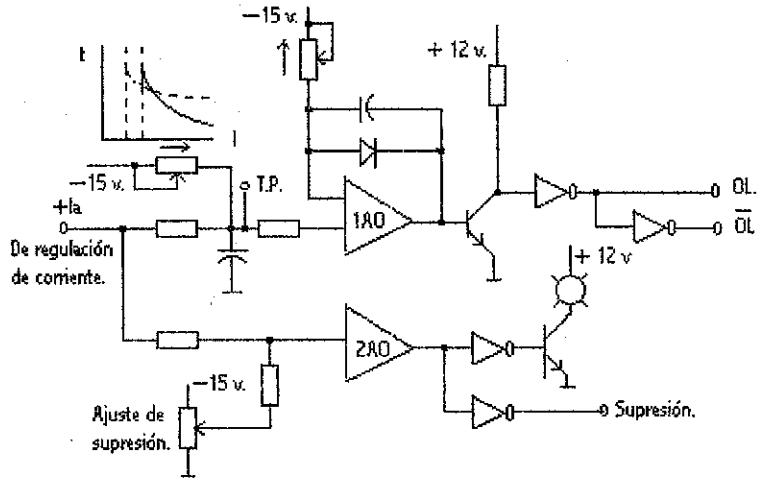
7. Con los valores antes calculados y usando el valor de voltaje de prueba que equivale a la "Supresión de impulsos", aplíquelo al ingreso de la reacción de corriente y verifique que cuando esta señal es aplicada por la fuente externa, entra a operar efectivamente la protección de supresión de impulsos que se observa en la alarma luminosa respectiva.

En caso de que la misma no opere, proceda a ajustar dicha protección en la tarjeta de protección electrónica, ya que esta tiene por objetivo sacar de operación inmediata al regulador electrónico para proteger al motor de este nivel de corriente.

8. Aplique con la fuente externa, el voltaje de prueba correspondiente a la corriente de referencia ***Ilim,*** *y observe con un osciloscopio en la tarjeta de protecciones y más precisamente en la salida del amplificador operacional correspondiente, que el valor de dicha salida sea de cero voltios.*

Dicho valor marca el inicio de tiempo para que entre a operar la protección electrónica a imagen térmica.

Fig. 53 Esquema de protecciones electrónicas a imagen térmica del regulador de estado sólido



9. Mueva el interruptor de la fuente externa a la posición "off" y verifique que la señal de salida del amplificador operacional adquiera valores de polaridad negativa.

10. Fijar la tensión de simulación dada por la fuente externa al valor correspondiente a la "Sobrecarga del alimentador" ***Ith,*** *active el interruptor de dicha fuente a la condición "ON", observando en el osciloscopio que la salida del operacional comienza a desplazarse a valores*

positivos (cuando dicha tensión alcanza el valor de cero voltios, se dice que el amplificador operacional a comenzado a integrar).

El retardo de tiempo de la acción integral del amplificador operacional comienza a contarse a partir de cero voltios y ***debe ser ajustado para un tiempo de 20 segundos,*** *a lo cual deberá de visualizarse la condición "Sobrecarga del alimentador" y la lógica de contactores debe indicar que se pone a resguardo al motor, si este estuviera conectado.*

Si el nivel de la tensión fuera mayor, el tiempo de habilitación de esta protección disminuirá ya que tiene el mismo comportamiento de una curva de tiempo inverso de protecciones térmicas.

11. Des-energice el regulador electrónico y habilite nuevamente los conectores de señales "forward, reverse y la de reacción de corriente".

La prueba de Pre-ajustes de protecciones electrónicas a terminado.

4.1.4 Anillo de corriente

Esta prueba se lleva a cabo, con el fin de comprobar la respuesta del regulador electrónico, cuando se le exigen valores nominales y de sobrecarga, verificando el grado de seguridad con que se puede operar un motor de d.c.

Esta prueba se hace con el rotor del motor físicamente bloqueado para evitar que gire y así poder simular una sobrecarga real del motor.

La respuesta del regulador debe ser la más confiable posible en los siguientes aspectos:

a. Máxima rapidez de respuesta sin Over-shoot.

b. Máxima rapidez de respuesta de las protecciones electrónicas frente a las sobrecargas a las que se vea sometido el motor.

Por norma de fabricación, todos los motores de D.C. suministrados por "Ercole Marelli" y otras empresas de motores, pueden operar bajo las siguientes condiciones de carga.

.- 100% Servicio continuo.

.- 125% En todo el rango de velocidades durante 2 horas.

.- 175% Repetido frecuentemente en la velocidad base durante 60 segundos.

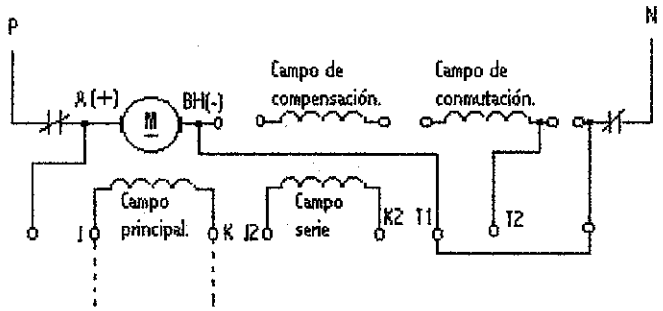
.- 200% Ocasionalmente en todo el rango de velocidades por menos de 60 segundos.

Esta prueba debe realizarse con las condiciones del motor y del regulador, siguientes:

a. Desconectar totalmente la alimentación del campo principal de excitación del motor, es decir remover los cables de los bornes "J y K" de la caja de conexiones.

b. Desconectar las conexiones de los campos "Serie, de compensación y de conmutación" del motor, los cuales están localizados en serie a la armadura del motor, como se observa en la figura 54.

Fig. 54 Esquema de conexiones de la bornera del motor para la realización del anillo de corriente



c. Bloquear mecánicamente el eje del motor con el fin de evitar de que este tienda a girar durante la prueba.

d. Conectar las salidas "P y N" del regulador a los bornes "A(+) y BH(-)" del motor.

e. Proceda a simular las funciones del regulador de la excitación del motor, aunque este no funcione.

PRECAUCION:

Es prudente, durante esta prueba, no hacer circular corrientes muy elevadas a través de la armadura del motor, por tanto la señal de tensión externa que activa el T.P.M. (Forward o Reverse), debe aplicarse de tal manera que permita una rápida desconexión.

Si el tiempo que permanece la circulación de alta corriente, a través de la armadura del motor, es prolongado, se puede ocasionar una dilatación de las delgas que conforman el colector, provocando por tanto una mala conmutación.

Durante las pruebas a rotor bloqueado, asegurarse de que no circulen corrientes eléctricas por tiempos superiores a los siguientes:

CORRIENTE	***TIEMPO (segundos)***
In	***40***
2In	***20***
3In	***10***

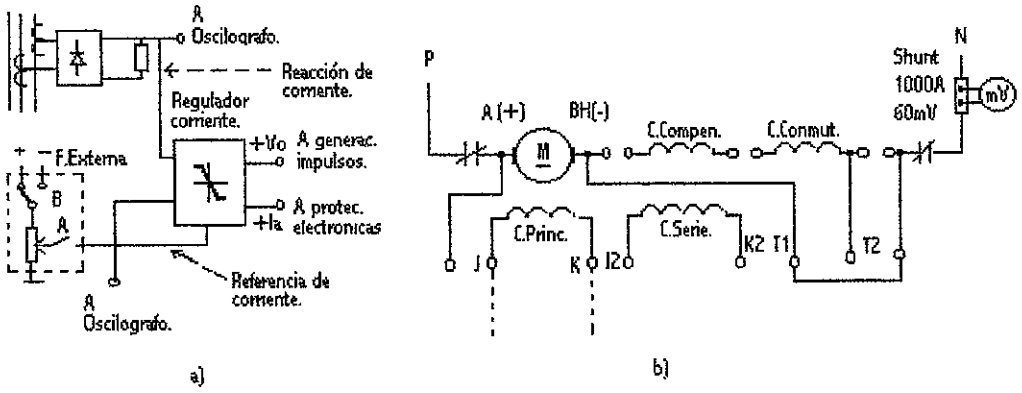
Si la prueba a de repetirse varias veces, esperar un poco de tiempo para que el motor se enfríe.

El procedimiento de ajustes del anillo de corriente lleva los siguientes pasos:

1.- En el sector de la regulación de corriente, conectar las sondas de un osciloscopio al ingreso de la reacción de corriente.

2.- Conectar un voltímetro a los bornes del resistor "shunt", para corroborar los niveles de corriente suministrados por ambos T.P.M.

Fig. 55 Esquema de conexiones para verificar los niveles de corriente alcanzados durante la prueba de anillo de corriente. a) Control b) Potencia



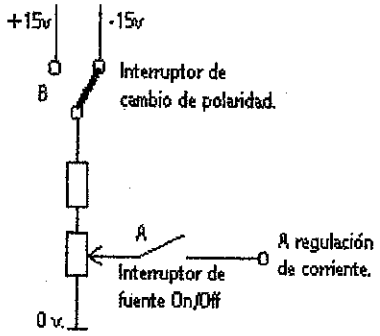
Nota: Se debe tomar en cuenta que el shunt responde a una relación lineal (puede usarse una simple regla de tres), por lo cual hay que verificar la relación indicada por el shunt, de la tensión dada en milivoltios a la corriente en amperios que circula por el mismo. (1000 amp. ---- 60 mV.)

3.- Localizar en la tarjeta de regulación de corriente, el ingreso de señal de referencia (la que toma el nombre de referencia de corriente), y conectar en ese punto la fuente externa para dar la referencia (asegúrese de desconectar los puentes que permiten la llegada de la señal de referencia interna del regulador).

4.- Energizar el regulador y dar consenso de marcha, con el interruptor de la fuente externa en condición de "off".

5.- Con el potenciometro de la fuente externa, podrá modificar la tensión de referencia de corriente, pero no active su interruptor.

Fig.56 Esquema eléctrico a usar en fuente externa para las pruebas de anillo de corriente



6.- Verificar con el voltímetro (en escala de milivoltios), conectado al shunt, que la corriente suministrada por el T.P.M. sea igual a cero.

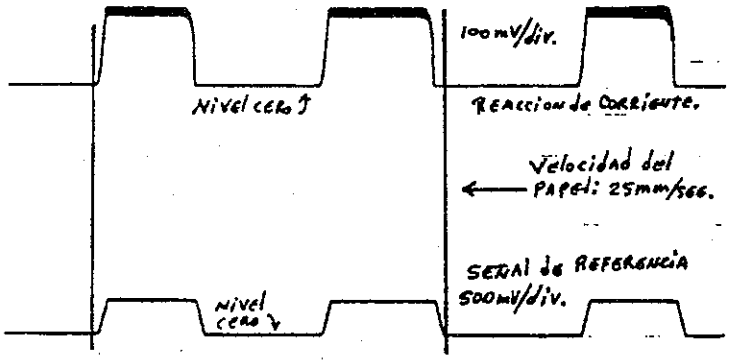
7.- Conectar las sondas de un ***oscilografo*** *al punto de ingreso de la reacción de corriente que proviene de los c.t.'s, y al ingreso de la señal de referencia, respectivamente.*

8.- Active a la condición de " ON " el interruptor de la fuente externa, haciéndolo durante un tiempo muy corto (entiéndase aquí solo el tiempo justo que le lleva activar y desactivar rápidamente el interruptor de la fuente externa), revisando el nivel de corriente que eroga el T.P.M. a través del voltímetro conectado al shunt, además puede verificar la presencia de corriente eléctrica observando la señal de reacción de corriente vista en el oscilografo.

Para un regulador electrónico que alimentará un motor de 300 Kw (en la siguiente parte de este procedimiento se hará uso de los parámetros de este motor para los ajustes así como los datos obtenidos en el ejemplo de la pagina

80), una reacción de corriente de aproximadamente -0.2 voltios equivale aproximadamente a 100 amperios de salida del T.P.M.

Fig. 57 Señal de reacción de corriente y de referencia obtenida por el oscilografo durante la prueba de anillo de corriente



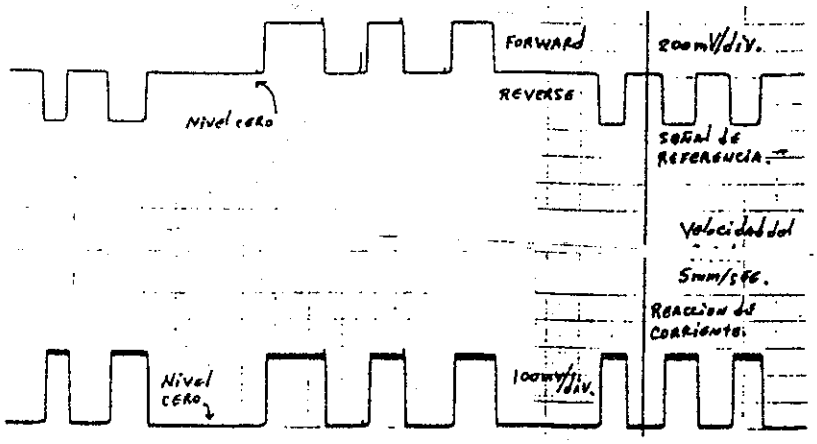
9.- Si no observa circulación de corriente cuando a hecho la prueba anterior, siempre con el interruptor de la fuente externa en condición " OFF ", incremente un poco la señal de referencia.

El hecho de mantener el interruptor de la fuente externa en condición " OFF ", cuando modifica el valor de la señal de referencia, le permite controlar plenamente el flujo de corriente que puede dar en determinado momento el T.P.M.

10.- Active a la condición de " ON " el interruptor de la fuente externa ***(siempre durante un tiempo muy breve)****, y observe en el trazo del oscilografo, si ya existe circulación de corriente eléctrica y si esta es estable.*

11.- Si ya existe corriente, entonces active nuevamente a la condición de "ON" al interruptor de la fuente externa y a este nivel de referencia proceda a cambiar alternativamente ***(unas cuatro veces seguidas y rápidas y entonces lleve nuevamente a la condición de "OFF" al interruptor de la fuente externa)*** *la polaridad de la señal de referencia y compruebe que también existe circulación de corriente dada por el T.P.M. " Reverse ", obteniendo señales en el oscilografo similares a las que se observan a continuación.*

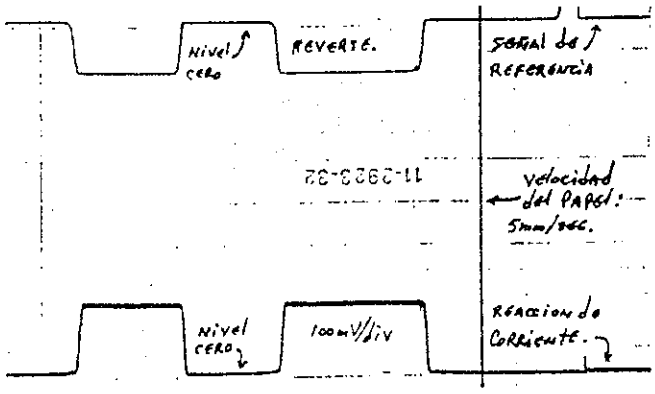
Fig. 58 Señal de reacción de corriente Forward y Reverse durante el anillo de corriente



12.- Gradualmente, incremente el valor de la señal de referencia ***(cada vez que lo haga asegúrese de que el interruptor de la fuente externa esté en condición OFF)****, hasta que la señal de reacción de corriente vista en el oscilografo alcance el valor de - 1.42 voltios que equivalen a la corriente nominal de armadura de un motor de 300 Kw y el nivel de voltaje visto en el voltímetro conectado al shunt debe de indicar aproximadamente 44 milivoltios.*

13.- En la sección de regulación de corriente debe existir un potenciometro de ajuste de la ganancia del anillo de corriente, ajústelo de tal forma de obtener la respuesta optima del regulador de corriente (máxima rapidez de respuesta sin over-shoot) y sin retardo considerable entre la señal de referencia y la señal de reacción de corriente, el cual debe de ser de aproximadamente 5 milisegundos, obteniendo una señal en el oscilografo parecida a la que se muestra a continuación.

Fig.59 Anillo de corriente al nivel de corriente nominal del motor



14.- Incremente lentamente el valor de la señal de referencia y cada vez verifique el nivel de corriente alcanzado a través de accionar brevemente el interruptor de la fuente externa, comparando el nivel obtenido en el oscilografo con aquel voltaje dado por el voltímetro conectado al shunt.

15.- Compruebe él limite de corriente, que se verifica cuando la señal de referencia aplicada, hace circular una corriente de 2*In = 1480 amperios, aproximadamente 86 milivoltios en el shunt y -2.84 voltios de reacción de corriente.

*Verificar la intervención de la protección " Sobrecarga del alimentador ", la cual comienza a funcionar (a integrar) cuando la corriente de armadura alcanza 1.2*In = 890 amperios, aproximadamente 53 milivoltios en el shunt y -1.71 voltios de reacción de corriente.*

Como se está usando una referencia equivalente al limite de corriente, la protección de sobrecarga del alimentador deberá actuar casi instantáneamente.

*16.- Disminuya el valor de la referencia externa al valor de 1.2*In = 890 amperios o -1.71 voltios de reacción de corriente.*

Con esta referencia, comience el conteo del tiempo desde el preciso momento de activar a " ON " el interruptor de la fuente externa y verifique que pasados aproximadamente 15 segundos, intervenga la protección " Sobrecarga del alimentador " y el T.P.M. "Forward ", sea desactivado.

Si pasados 20 segundos esta protección no a actuado, desactive el interruptor de la fuente externa (para no causar ningún daño al colector del motor) y revise por que no actuó dicha protección (esta protección había sido ajustada en el procedimiento " Precalibraciones de las protecciones ").

17.- Con los valores de referencia del ítem anterior, proceda a verificar que cambiando de polaridad a la señal de referencia (esta vez será positiva) intervenga nuevamente la protección de " Sobrecarga del alimentador ", solo que esta vez desactiva al T.P.M. "Reverse ".

18.- Incrementar lentamente la referencia de señal hasta alcanzar el valor de 1.2(2*In) = 1740 amperios, aproximadamente 104.5 milivoltios en la lectura dada por el voltímetro conectado al shunt y -3.41 voltios de reacción de corriente visto en el oscilografo.*

Verifique que al alcanzar este valor interviene de manera instantánea la protección " Supresión de impulsos ", desactivando instantáneamente al T.P.M. " forward ".

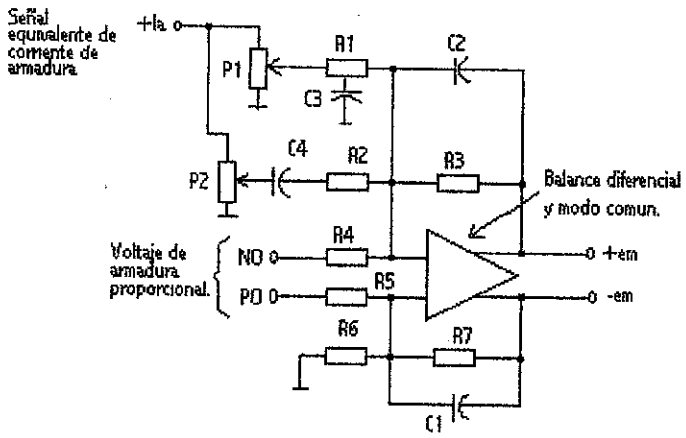
19.- Con el nivel de referencia del ítem anterior pero con polaridad positiva, verifique que cuando se active el interruptor de la fuente externa, la protección " Supresión de impulsos " desactiva esta vez al T.P.M. " Reverse ".

Las pruebas anteriores verifican que las " PRECALIBRACIONES DE LAS PROTECCIONES, están operando correctamente.

20.- Con el seccionador " KN " desconectado (alimentación de la excitación del motor), energize el regulador electrónico de la excitación del motor y proceda a verificar la " Acción diferencial " conectando las sondas del oscilografo a la salida del amplificador operacional de la sección electrónica de regulación del "CEMF " o regulación de la fuerza contra-electromotriz, que está localizada en el regulador electrónico de la excitación del motor.

Esta sección electrónica, recibe como señales de ingreso, valores proporcionales de la tensión de armadura del motor y de la corriente absorbida por el mismo, como se observa en el diseño siguiente.

Fig. 60 Diagrama electrónico de control de fuerza contra electromotriz



Fuente: Accionamiento de velocidad variable para la industria de laminación. Boletin ASEA.

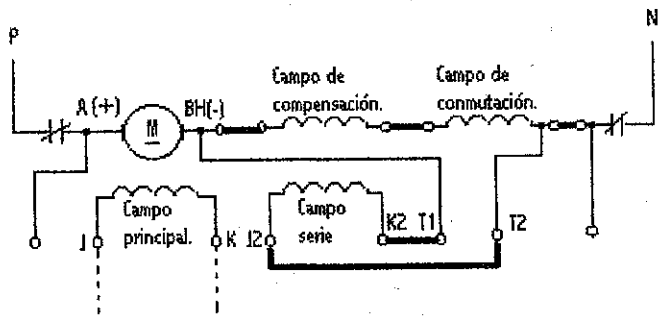
Con una señal de referencia externa de -1.42 voltios de reacción de armadura, dar pulsos con el interruptor de dicha fuente externa ***(considerando de no mantener mucho tiempo cada impulso)****, verificando en el oscilografo que la salida del amplificador operacional se acerque a cero ajustando esto con el potenciometro respectivo y con esto se comienza a calibrar el "Deflujo automático del campo de excitación del motor".*

Disminuya a cero voltios la señal de referencia de la fuente externa.

21.- Desenergice el regulador electrónico.

22.- Remover el freno mecánico puesto al eje del motor y conecte únicamente el campo serie del motor (aun no conecte el campo principal del motor).

Fig. 61 Conexiones eléctricas del campo serie o de compensación en la bornera de un motor de d.c. para verificar su influencia en el sentido de rotación del motor durante el anillo de corriente



23.- Energice solo el regulador de armadura (el regulador de la excitación principal del motor debe estar desactivado).

24.- De una pequeña referencia de corriente con la fuente externa y por medio de pulsos intermitentes al interruptor (cada dos segundos aproximadamente), verifique en que sentido, el " Campo serie ", tiende a hacer girar al motor.

El sentido de rotación del motor deberá de coincidir con el sentido de giro de trabajo dispuesto para el motor, y si el motor gira en sentido contrario, deberá de cambiar las conexiones del campo serie para su corrección.

25.- Desenergice el regulador electrónico.

26.- Habilite el campo principal del motor, así como la operabilidad del regulador electrónico del campo de excitación del motor.

La prueba de anillo de corriente a terminado.

4.1.5 Anillo de velocidad

Esta operación se realiza para verificar la funcionalidad del regulador electrónico, evaluando los siguientes aspectos:

a.- Verificar la capacidad del regulador de seguir las referencias de velocidad seleccionadas con la mayor precisión posible.

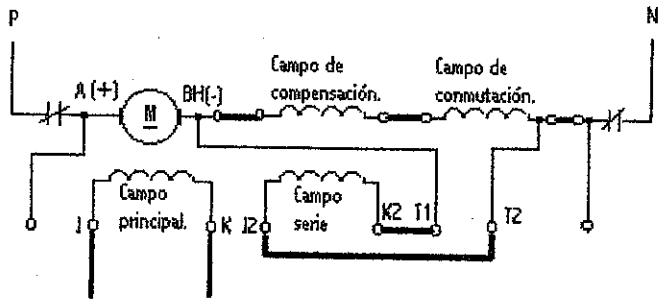
b.- Verificar el Deflujo correcto del campo de excitación del motor, si el regulador electrónico está capacitado para efectuar esta condición. En los reguladores electrónicos que poseen excitación de campo fija, no se podrá ejecutar este Deflujo.

El anillo de velocidad lleva los siguientes pasos:

1.- Proceda a remover todos los puentes o condiciones que permitían la simulación de operación del regulador de la excitación principal del motor.

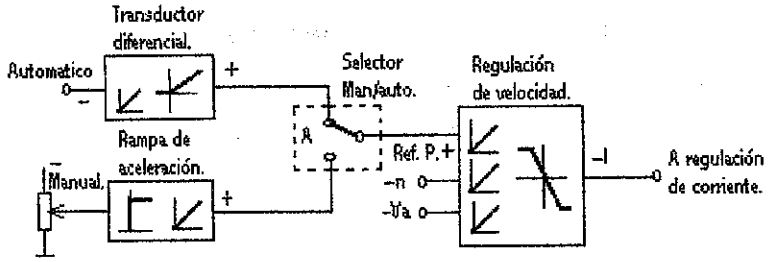
2.- Conecte físicamente el campo de excitación principal del motor.

Fig.62 Conexión de bornera del motor completa



3.- *Conecte la señal de la fuente externa al ingreso de señal de referencia automática más externa de toda la regulación electrónica (si el motor trabaja en cascada con otras unidades las cuales son gobernadas por un solo ordenador, desconectar la señal de ingreso del ordenador), o en el ingreso de señal del potenciometro de referencia manual si este trabaja en forma individual.*

Fig.63 Diagrama electrónico para procesar las señales de referencia en manual u en automático



Esta señal recibe el nombre de ***" Rif. P "***.

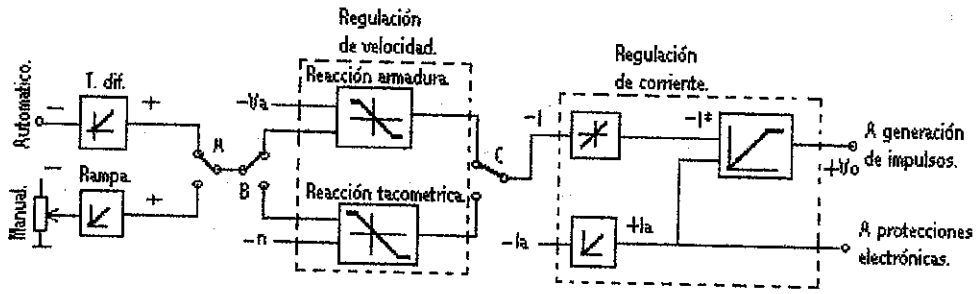
4.- *Habilitar al regulador electrónico para que funcione regulado por "Reacción de tensión" (dicha señal recibe el nombre de* ***" - Va "***)

Esto se hace por precaución ya que no se sabe en que sentido girará el motor, y para asegurar que la reacción de ingreso a la regulación de velocidad será negativa, como lo obliga un anillo de control cerrado. *La señal de la reacción de tensión es proporcional a la tensión de armadura del motor.*

5.- *Desconectar la señal de reacción de velocidad (la que tomará el nombre de* ***" -n "***), *proveniente de la dinamo tacometrica y conectar a dicha señal, un voltímetro para*

verificar la polaridad de la tensión generada cuando el motor gire.

Fig.64 Diagrama electrónico de by-pass para el uso de reacciones electrónicas



6.- Asegúrese de que las secciones electrónicas de regulación de velocidad y de regulación de corriente, sean interconectadas entre sí para recibir y poder procesar las señales de control de referencia rif. p y de reacción -Va.

7.- Con la referencia dada por la fuente externa al mínimo valor, energice el regulador electrónico, observando la existencia correcta del nivel de corriente de excitación del motor, dada por el correspondiente regulador de excitación.

Existen algunos reguladores de excitación que tienen la posibilidad de dar el valor de corriente nominal necesario o de dar un nivel de excitación mínimo (ahorro de campo) a través de botones pulsadores de selección. La condición de dichos pulsadores para motores de 300 kw, es la siguiente:

a.- Pulsador de ahorro de campo, Iexc. = 5 amperios.
b.- Pulsador de pleno campo, Iexc. = 12 amperios.

En la condición de ahorro de campo, el regulador de control de armadura se encuentra bloqueado y no puede habilitar la operabilidad de ninguno de los T.P.M. (Thyristor Power Module).

8.- Se puede observar que si el pulsador de ahorro de campo, está habilitado y la corriente de excitación es menor de 5 amperios, aparecerá una alarma luminosa que señaliza "Falta de excitación". Esta es una protección necesaria para evitar que el motor siga operando cuando exista una perdida de la corriente de excitación.

9.- Habilite el pulsador de pleno campo, y de consenso de marcha al regulador de armadura, observando que este suministre una tensión de cero voltios; el motor no deberá girar y esto se puede comprobar ya sea físicamente o viendo el voltaje suministrado por el voltímetro conectado a la señal proveniente de la dinamo tacometrica.

10.- Dé una pequeña referencia positiva con la fuente externa observando que el motor comience a girar lentamente en el sentido esperado y que la señal de reacción de velocidad (-n) sea de polaridad negativa. A este punto puede suceder lo siguiente:

a.- El motor gira en el sentido opuesto al esperado y la reacción de velocidad (-n) es de polaridad negativa:

Luego baje a cero la referencia externa para parar el motor y desactive el regulador electrónico, proceda a invertir ya sea las conexiones de la excitación del campo o

a invertir las conexiones de la armadura del motor. Por cuestiones de volumen de trabajo, se recomienda invertir únicamente las conexiones de la excitación del campo, ya que son cables más livianos.

Habilite nuevamente el regulador electrónico y repita el procedimiento a partir del ítem 9, el motor deberá de girar en el sentido correcto y casi con seguridad la reacción de velocidad (-n) será de polaridad positiva.

Pare nuevamente el motor e invierta las conexiones de salida de la dinamo tacometrica para que ***la señal que arribe al regulador electrónico sea de polaridad negativa.***

b.- El motor gira en sentido correcto y la señal dada por la dinamo tacometrica es de polaridad positiva:

Pare el motor e invierta las conexiones de salida de la dinamo tacometrica de tal forma de que al regulador electrónico arribe una señal de polaridad negativa, como debe ser.

Como puede observar, de este ítem, lo que se espera es de que el motor gire en el sentido esperado de trabajo y que la señal generada por la dinamo tacometrica, vista al ingreso del regulador electrónico, sea de polaridad negativa, asegurando con esto la correcta operabilidad del anillo de velocidad.

11.- De una referencia con la fuente externa de tal modo que el valor leído en el voltímetro de la dinamo tacometrica, indique -10 voltios aproximadamente igual a 100 r.p.m. del motor (dinamo con relación: 100 voltios equivalentes a 1000 r.p.m.).

Observe, físicamente, el comportamiento del motor el cual debe de ser estable así como la señal dada por la dinamo tacometrica debe de ser aproximadamente constante.

12.- Desenergice el regulador electrónico.

13.- Desconecte la señal de reacción de tensión (-Va) y conecte la señal proveniente de la dinamo tacometrica (-n) para que el motor quede ahora "regulado por velocidad", que es más estable comparada contra la " regulación por tensión de armadura ".

Asegúrese de que la señal de reacción de tensión esté deshabilitada, ya que podrían sumarse antes de arribar al sector de regulación electrónica de velocidad y podría darle un comportamiento irregular y peligroso. *El motor podría girar mucho más rápido de lo esperado.*

14.- Energice el regulador y dé consenso de marcha.

15.- Proceda a variar la señal de referencia con la fuente externa, variando la ganancia en el sector de regulación de velocidad con el potenciometro correspondiente.

Verifique que exista una variación de velocidad proporcional a la tensión de armadura de acuerdo a la siguiente tabla:

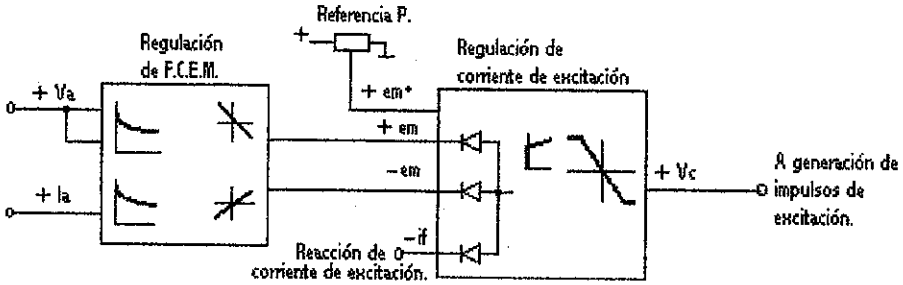
Tabla III Proporción que debe de existir en los parámetros eléctricos del motor.

VOLTAJE DE ARMADURA	**VOLTAJE DE DINAMO TACOMÉTRICA**	**VELOCIDAD DEL DEL MOTOR**
100 voltios.	- 25 voltios	250 r.p.m.
200 voltios.	- 50 voltios	500 r.p.m.
300 voltios.	- 75 voltios	750 r.p.m.
400 voltios.	-100 voltios	1000 r.p.m.
420 voltios.	-120 voltios	1200 r.p.m.

16.- A este punto, cuando la tensión de armadura alcanza 420 voltios, verificar que esta permanece constante aun cuando la velocidad del motor se incremente considerablemente (esto se debe a la modificación automática del flujo de excitación del campo del motor); calibrar el decremento del flujo magnético de la excitación **(Deflujo de campo)** en el regulador de excitación.

La reacción de corriente de excitación (- If) deja de operar y la reacción de tensión (+ em) en la regulación de excitación a tomado control de la excitación y de la velocidad del motor en forma automática. Esto se efectúa inmediatamente después de que la referencia dada por la fuente externa alcanza un valor tal que la tensión de armadura es de 420 voltios y la velocidad del motor a alcanzado la velocidad base de 1150 r.p.m.

Fig. 65 Control automático de la corriente de excitación



La corriente de excitación comenzará a disminuir a partir de 12.5 amperios y llegará aproximadamente a 8 amperios con una velocidad del motor de 1600 r.p.m. equivalente a 10 voltios de la señal de referencia de la fuente externa de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla IV Proporción de los parámetros eléctricos de la excitación del motor..

VELOCIDAD MOTOR	***VOLTAJE DINAMO TACOMÉTRICA***	***EXCITACIÓN DE CAMPO***
1200 r.p.m.	*-120 voltios.*	*12.5 amperios.*
1600 r.p.m.	*-160 voltios.*	*8.0 amperios.*

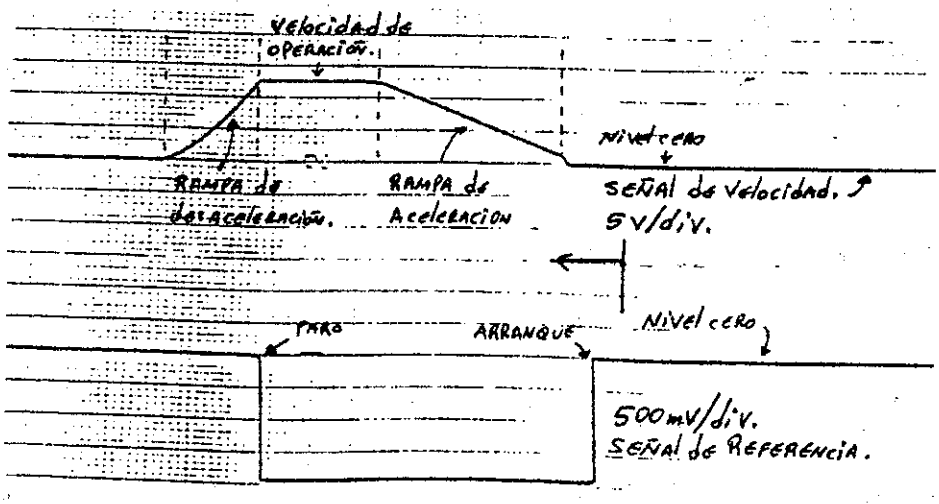
17.- Verifique la respuesta del regulador electrónico, conectando las sondas del oscilografo en las señales de ingreso de reacción de velocidad (dinamo tacometrica) y de señal de referencia (rif p) de la fuente externa.

De una referencia externa de tal forma que el motor gire a unas 300 r.p.m. y bloqueé el botón que desactiva la funcionalidad de la referencia externa. El motor disminuirá de velocidad lentamente hasta llegar a 0 r.p.m.

Active el botón que activa la funcionalidad de la referencia externa y observe en el oscilografo como se comporta la aceleración del motor hasta alcanzar las 300 r.p.m.

Repita esta operación hasta lograr mejorar el over-shoot a través de los potenciometros de ajuste en la sección de regulación de velocidad del motor.

Fig. 66 Rampa de aceleración del motor



18.- Si desea incrementar la tensión de armadura arriba de 420 voltios equivalente a la velocidad base del motor, calibre el potenciometro externo del regulador electrónico de la excitación de campo del motor, que corrige el decremento del Deflujo del motor. Aquí se observa que la velocidad permanece constante al valor de la velocidad base mientras la tensión de armadura incrementa de valor.

19.- Desenergizar el regulador electrónico.

La prueba del anillo de velocidad a terminado.

4.2 Ajustes del regulador monofasico de excitación del inductor

Este procedimiento se lleva a cabo con el fin de asegurar los correctos niveles de corriente de excitación del campo del motor, así como la realización del deflujo automático de campo para garantizar su buen funcionamiento.

Recuerde que el motor debe de llegar a la velocidad base controlado por la tensión o voltaje de armadura y superar dicha velocidad controlando el debilitamiento automático del campo de excitación.

4.2.1 Pruebas preliminares

Los pasos a seguir son los siguientes:

1.- Verifique que todos los cables, conectores y tarjetas electrónicas, se encuentren instalados correctamente.

2.- Con el seccionador de salida (KNC) del regulador de excitación abierto, y simulando los consensos dados por el regulador de armadura (hacer puentes donde sea necesario, desconectando los cables en dichas posiciones), energice el regulador electrónico de excitación.

3.- Verifique la existencia de alimentaciones en corriente alterna, así como las de directa, las cuales deberán encontrarse en los niveles dados por los esquemas.

4.- Verifique la funcionalidad del ventilador de

enfriamiento de diodos o tiristores, la lógica de control en alterna (contactores, relés, etc.) de acuerdo a los esquemas de diseño para el efecto.

5.- Verifique la existencia de impulsos electrónicos de habilitación de compuertas (gate's) de tiristores, dados por los transistores de control y generación de impulsos por medio de un osciloscopio conectado a los bornes de salida y referido al punto común P.S.C. "Power source common".

6.- Si las pruebas anteriores son satisfactorias, desenergice el regulador, si existe algún problema, identifíquelo, localícelo y corríjalo antes de continuar.

4.2.2 Puesta a punto

Los pasos a seguir son los siguientes:

1.- Conecte el campo de excitación del motor al seccionador de salida (KNC), el cual deberá de cerrarse, desactivando con ello la resistencia ***RSC*** *de drenaje de campo.* ***Por ningún motivo esta resistencia debe de permanecer conectada cuando el campo de excitación esté alimentado ya que puede sufrir daños severos, ya que esta resistencia debe funcionar únicamente para descargar el devanado de campo durante un proceso de mantenimiento.***

2.- De acuerdo a su esquema, coloque todos los potenciometros de control del nivel de excitación, en rotación totalmente antihorario para asegurar que el regulador inicialmente dé niveles mínimos de corriente de

excitación.

3.- Conecte una sonda del osciloscopio en el borne que provee la reacción de corriente de excitación ***(-if).***

4.- Energice el regulador electrónico de excitación con el botón de campo reducido (Ahorro de campo) en condición "off", con el fin de que no circule una corriente alta sin control durante este inicio de ajuste.

5.- Mida la tensión de salida del T.P.M. a los bornes del seccionador KNC, la que debe de ser de aproximadamente de 27 vdc y el amperímetro del gabinete debe indicar aproximadamente 3 amperios.

6.- Proceda a incrementar el nivel de referencia de corriente por medio del potenciometro de referencia, observando lo siguiente:

a.- *La señal observada en el osciloscopio deberá de ser estable y bien conformada.*

b.- *La tensión de salida de control de encendido de tiristores (Vc), deberá de tener valores negativos que van en aumento.*

c.- *La corriente de excitación se incrementará a partir de 3 amperios y por seguridad no deberá de exceder de 12.5 amperios, que es el valor base de la corriente de excitación del motor.*

7.- Si lo anterior no se logra (existe un incremento mayor de corriente), puede ser debido a que la ganancia del amplificador operacional de control de encendido de

*tiristores **(Vc)** sea muy grande, entonces revise la sección de reacción de dicho operacional y disminuya la ganancia haciéndolo funcionar de manera proporcional conectando una resistencia en dicha reacción, además desconecte el cable que lleva la señal de salida Vc para evitar que los tiristores se activen.*

*8.- Verifique el comportamiento del operacional con la función del botón PSR en off, variando la salida Vc con los potenciometros internos de ajuste, y cuya salida debe de ser proporcional a las variaciones del potenciometro externo de control de fuerza contraelectromotriz **(em)**. La salida de Vc no deberá de exceder de -1.5 voltios.*

9.- Desenergice el regulador y desconecte la resistencia que ponía a trabajar al operacional en forma proporcional del ítem 7, (esto hace regresar al operacional a la modalidad proporcional-integral) además conecte nuevamente el cable que transporta la señal Vc.

10.- La resistencia shunt localizado en la línea positiva de salida de corriente de campo tiene la siguiente relación:

25 amperios ----- 60 milivoltios.

Por lo tanto, para que el amperímetro indique 12.5 amperios deberá de haber una tensión a los bornes del shunt de 30 mV.

11.- Energice el regulador y verifique:

a. Con el botón P.S.R. en "off", el amperímetro deberá indicar 5 amperios de corriente de excitación, si no da

este valor ajustar con el potenciometro de ganancia de la tarjeta M.F.C.

b. Con el botón P.S.R. en "on", el amperímetro deberá indicar 12.5 amperios de corriente de excitación, si no ajuste con:

b.1 Potenciómetro externo de referencia de corriente de excitación.

b.2 Potenciómetro externo de regulación de reacción de corriente.

La tensión en el voltímetro del shunt deberá indicar 30 mV, cuando existen 12.5 amperios de corriente de excitación.

12.- Verifique la funcionalidad del botón P.S.R.

P.S.R. en off ---- Iexc. = 5 amperios (ahorro de campo).
P.S.R. en on ---- Iexc. = 12.5 amperios (excitación base).

*13.- Calibre el relevador de falta de campo **(FL)** por medio del potenciometro localizado en la regulación electrónica de impulsos de compuerta de tiristores. Su función consiste en operar el transistor en un punto diferente de su curva de operación, activándolo como un simple interruptor electrónico que a su vez activa el relé de falta de campo. Se calibra con el botón P.S.R. en off de tal manera, que deberá actuar cuando exista una corriente de excitación menor de 3 amperios.*

14.- La calibración de la tarjeta electrónica de reacción de tensión de armadura (CEMF), se llevó a cabo cuando se

realizó la prueba de "anillo de corriente" del regulador de armadura.

Para calibrar el decremento de flujo del motor se deberá de realizar a través del potenciometro externo de control de señal de reacción de armadura (em), cuando se realiza el "anillo de velocidad" del regulador de armadura.

Este deberá de operar de la siguiente manera:

a. ***Cuando se debe de trabajar al motor a velocidades inferiores a la velocidad base, la señal de reacción de corriente de campo (-if) debe tener el control de la excitación del motor, manteniendo constante la excitación a 12.5 amperios y tensión de armadura regulable entre 0 y 420 voltios.***

b. ***Cuando se debe de trabajar al motor a velocidades mayores a la velocidad base, el control de la excitación del motor lo toma la reacción de tensión de armadura (em), manteniendo constante la tensión de armadura a 420 voltios y regulando la corriente de excitación (Deflujo), a un mínimo de 8 amperios, equivalentes a 1600 r.p.m.***

15.- Desenergice el regulador electrónico.

La prueba a terminado y a este punto puede hacer operar al motor bajo las condiciones de carga dadas por el proceso productivo, teniendo la certeza de que el motor responderá sin mayores problemas a todas las solicitudes mecánicas impuestas.

5. CONDICIONES DE OPERACIÓN REAL (FALLAS)

Este capitulo presenta algunos aspectos relacionados con las fallas que en determinado momento se podrían presentar durante la operación de motores de d.c. controlados por reguladores electrónicos de estado sólido.

5.1 Respuesta del regulador electrónico frente a una falla

Cuando un motor de corriente directa a excitación independiente, trabaja en un proceso industrial como lo es la laminación en caliente, se ve sometido a diversas solicitudes de tipo mecánico que debe de absorber o mejor dicho que debe de ser capaz de trasladar al regulador electrónico que lo gobierna.

El regulador electrónico a su vez, debe estar en capacidad de absorber dichos esfuerzos mecánicos por medio de poder maniobrar los parámetros de velocidad, potencia y para electromecánico, y cuando dichos esfuerzos exceden los valores limites dispuestos, este debe de tener la facultad de poder llevar a cero la alimentación de potencia dada al motor.

Para llevar a esta condición la alimentación de potencia, el regulador electrónico puede hacerlo a través de las siguientes formas:

1.- Apertura inmediata del telerruptor de potencia en el lado de alimentación de corriente directa.

2.- Apertura inmediata del contactor de alimentación trifasica principal.

3.- Modificar el ángulo de encendido de cada uno de los tiristores que forman el puente controlado de potencia a un valor cercano a $\alpha = 180°$ eléctricos.

4.- Se funden las laminas de los fusibles que alimentan al regulador electrónico.

Como se observa, estas características de respuesta frente a una falla, no son diferentes a las de cualquier otro equipo eléctrico sin embargo lo que sí marca la diferencia es la forma en que estas características entran a funcionar.

No esta demás hacer la observación de que todas estas funciones tienen el objetivo de proteger al equipo así como al personal humano que trabaja cerca de estas máquinas.

5.2 Falla de corriente de excitación del motor

Descripción de la falla

El motor de corriente directa incrementa en forma abrupta su velocidad sin que halla recibido la orden de efectuar dicha modificación y entran en operación las protecciones de sobrevoltaje y de sobrevelocidad que hacen que el motor se pare.

Análisis y solución

El hecho de que un motor de d.c. incremente sin control su velocidad se debe a que se produjo un corte de la corriente de excitación del motor como se observa de la siguiente formula:

$$Wm = \frac{Ea}{Ka * \phi d}$$

Ya que el ϕd es directamente proporcional a la corriente de excitación (if) del motor, cuando esta disminuye rápidamente o se pierde, disminuye en forma abrupta el flujo de excitación (ϕd) del motor, lo que obliga a un incremento rápido de la velocidad (Wm).

Los motivos por los cuales la corriente de excitación se vea interrumpida pueden ser los siguientes:

a.- Sobrecorriente de excitación que obliga a que las protecciones térmicas operen.

b.- Falla de uno o más tiristores del puente monofasico controlado de potencia en el lado de excitación del motor.

c.- Falla en la generación de impulsos de encendido de los tiristores de potencia, siempre en la excitación del motor.

Cuando esto sucede, el regulador electrónico de voltaje de armadura del motor modifica el ángulo de encendido de su puente de potencia haciendo que dicho puente incremente el nivel de voltaje y por lo mismo incremente la velocidad.

Incrementar abruptamente el voltaje hace que este parámetro alcance valores altos lo que permite que los relés de sobrevoltaje de armadura entren en operación ordenando al regulador de parar el abastecimiento de potencia hacia el motor a través de alguna de las funciones indicadas en el inciso 6.1

Incrementar la velocidad a valores arriba de los permitidos hace que la protección por sobrevelocidad actúe y también desactive la alimentación del regulador electrónico.

5.3 Falla por falta de fase

Descripción de la falla

La velocidad, el voltaje y la corriente de armadura del motor presentan una fuerte inestabilidad y no se pueden evitar fuertes caídas de la velocidad cuando el motor toma carga.

Análisis y solución

Cuando un motor presenta inestabilidad en su velocidad y esta no se puede controlar y además en los parámetros eléctricos de la corriente y el voltaje de armadura vistos en los instrumentos del regulador electrónico se observan fuertes variaciones de valores que tampoco se pueden controlar, es de esperar que se deba a los siguientes motivos:

a.- No se logra la conducción de un tiristor en el puente de potencia de voltaje de armadura ya sea por no recibir el impulso de encendido respectivo o porque el tiristor esta dañado.

b.- Falla un fusible de alimentación de potencia en el lado de corriente alterna lo que impide la correcta alimentación del puente de tiristores del voltaje de armadura.

Debido a lo anterior, el comportamiento del motor se presenta como en las siguientes gráficas.

Fig. 67 Comportamiento de a) la velocidad b) la corriente del motor operando correctamente visto en un oscilografo

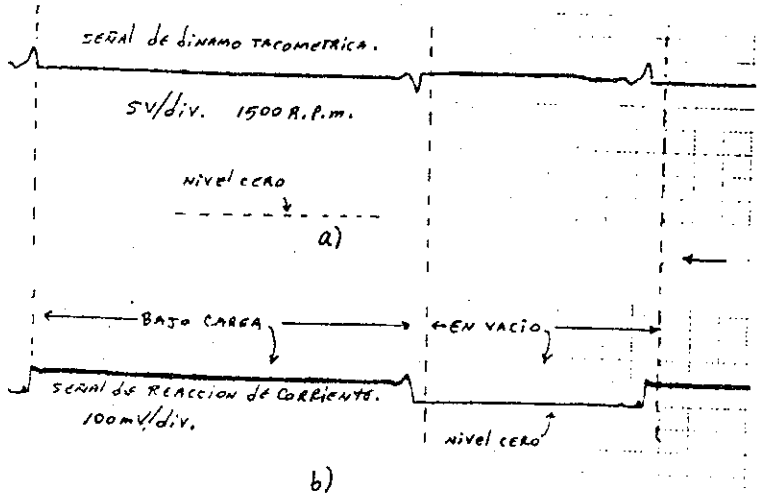
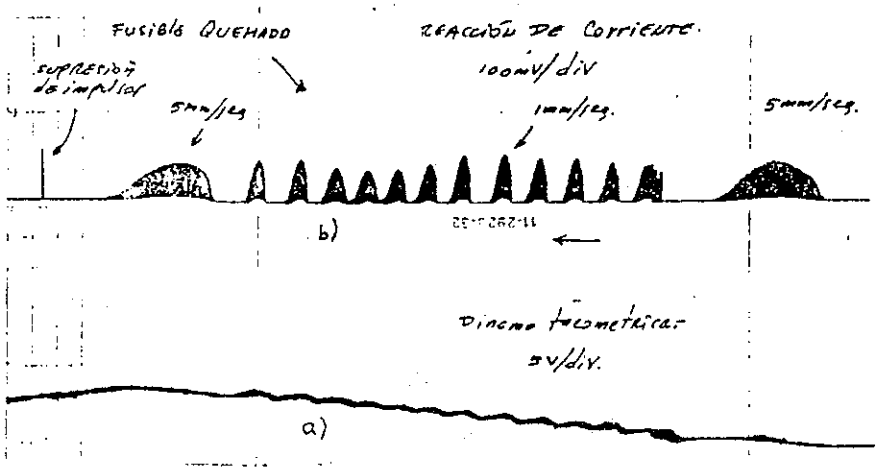


Fig. 68 Comportamiento de a) la velocidad y b) la corriente del motor operando bajo falla de fase del regulador electrónico



Se puede observar en la figura 68 que la velocidad no logra estabilizarse en un valor definido y la señal de corriente que absorbe el motor esta totalmente distorsionada lo que también puede verse en el colector del motor donde el chisporroteo presente en las escobillas es demasiado violento, lo que obliga a parar el motor y revisar la operabilidad del regulador electrónico.

Puede darse el caso de que la protección a imagen térmica del regulador entre a operar ya que los niveles altos de corriente pueden permanecer mas allá de los 20 segundos a que esta protección está ajustada, lo que hace que el motor se pare por sobrecarga del alimentador y en el caso del dispositivo detector de falla de fase debe entrar a operar sacando de operación la alimentación al motor de d.c.

Es obvio de que un motor trabajando en estas condiciones no tiene la capacidad de mantener un ritmo adecuado y además el calentamiento excesivo del colector

podría dañarlo de manera permanente, por lo que amerita una revisión especifica de la alimentación trifasica del regulador electrónica.

5.4 Falla por sobrevoltaje de armadura

Descripción de la falla

El motor sale de operación después de que se libera de la carga mecánica aplicada a su eje o después de terminar su periodo de aceleración al momento del arranque.

Análisis y solución

Cuando un motor de c.d. está en su periodo de aceleración puede presentar al final de la misma una oscilación de la velocidad en torno de la velocidad de trabajo predispuesta por la señal de referencia.

Un efecto parecido se puede dar cuando el motor pasa de su estado "bajo carga" hacia el estado "libre de carga", aplicada a su eje siendo este efecto llamado "Over-shoot".

El over-shoot es un efecto natural presente en todas las máquinas que se ven sometidas a esfuerzos mecánicos de consideración pero en especial en las máquinas de d.c. este valor puede ser muy amplio de tal modo de que su magnitud está en capacidad de activar las protecciones de sobre-voltaje de armadura o de hacer muy inestable un proceso productivo en la línea.

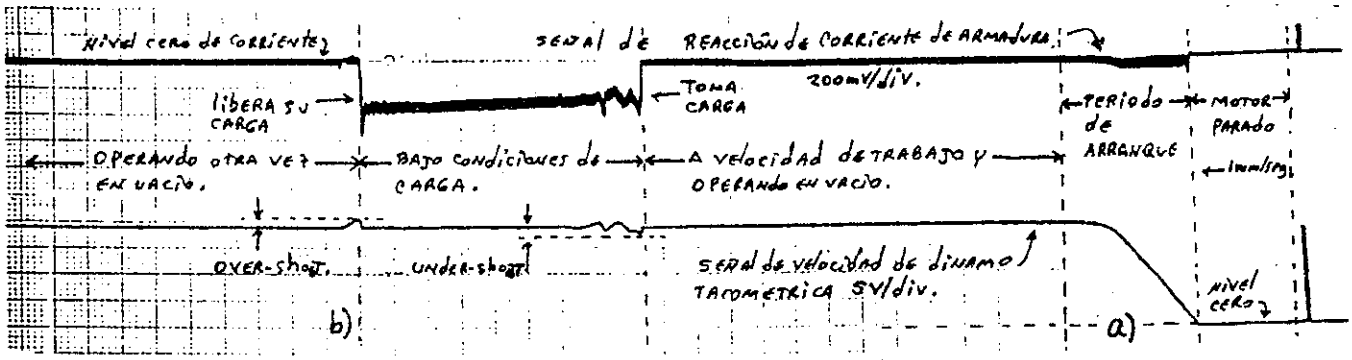
En especial en motores de d.c. el over-shoot es un efecto que se produce cuando el motor se ve libre de carga en su eje y tiende a incrementar momentáneamente su velocidad hasta el momento en que la reacción de velocidad dada por una dinamo tacométrica informa al regulador electrónico de un incremento de la velocidad no contemplada por la señal de referencia de la misma.

Como resultado, la velocidad del motor disminuye debajo de la predispuesta por la señal de referencia lo que es "observado" por la dinamo tacometrica quien informa al regulador electrónico quien a su vez actúa incrementando el ángulo de encendido de los tiristores lo que incrementa el voltaje de armadura dado al motor, incrementando por lo tanto la velocidad.

Este efecto es repetitivo por lo que presenta un movimiento oscilatorio de tipo amortiguado hasta estabilizarse en la velocidad predispuesta por la señal de referencia como se observa en la figura 69

En los motores de d.c. este movimiento amortiguado de la velocidad se puede controlar hasta hacerlo mínimo, en el sector de la regulación de velocidad a través del potenciometro de control de "Over-shoot" que normalmente está localizado en el lazo de reacción del amplificador operacional de comparación y está conectado en serie a un condensador desde la salida de señal del amplificador operacional hasta el ingreso de señal del mismo.

Fig.69 Comportamiento durante a) el arranque y b) en el momento de liberar carga de un motor de d.c.



Este efecto es mucho mas sensible en los reguladores electrónicos de estado sólido "Unidireccionales" que en los "Bidireccionales" ya que estos últimos tienen la ventaja de producir frenado dinámico en el momento de la liberación de carga, es decir el puente "Reverse" entra a operar momentáneamente estabilizándolo mucho mas rápido.

En la figura 69 se a logrado disminuir el over-shoot que se produce al final del periodo de aceleración haciendo que este periodo tenga una rampa de aproximadamente 20 segundos siendo el nivel de corriente de armadura de aproximadamente el 20% de la nominal, mientras que de la misma figura se observa que cuando el motor libera carga, el over-shoot presente es de aproximadamente de 50 r.p.m. durante tres segundos que tarda en recuperar su velocidad de trabajo.

En la misma figura se observa que cuando el motor toma carga, se presenta un efecto algo parecido a un over-shoot/under-shoot; sin embargo, esto es normal ya que este motor está siendo controlado a través de una rotosonda, la

que obliga que en los inicios de toma de carga del motor, la velocidad fluctúe hasta alcanzar el valor adecuado para la formación del ansa correcta impuesta por dicha rotosonda, por lo tanto ese periodo es normal habiendo variaciones de la velocidad de aproximadamente de ±50 r.p.m. con relación a la de referencia.

*La falla de sobrevoltaje se produce entonces como resultado de las fuertes oscilaciones de voltaje de armadura que se suceden por un mal ajuste del over-shoot permitido al motor y se da precisamente cuando el voltaje de armadura alcanza valores instantáneos cercanos al valor máximo que se puede obtener de una señal de alterna, Vmax. = 1.41 * Vfases, que cuando se trabaja con una alimentación trifasica de 460 voltios, llega a tomar valores de 1.41*460 = 648 voltios.*

Normalmente las protecciones por sobrevoltaje de armadura se calibran a un 80% del voltaje máximo de una señal alterna, lo que corresponde aproximadamente a 520 voltios de voltaje de armadura y actúan sacando de operación al motor.

Afortunadamente, esta falla no es muy frecuente y cuando se dé, se hará necesario revisar el colector del motor ya que se producen descargas eléctricas desde el colector hacia el chasis del motor como resultado del sobrevoltaje presente, provocando desprendimientos de material de las delgas en especial en sus extremos, además hay que revisar los contactos principales de los telerruptores en el lado de directa ya que se producen los mismos efectos, que algunas veces los "rompe-arcos"

localizados sobre los contactos no son capaces de absorber en su totalidad.

5.5 Falla por sobrecarga del motor

Descripción de la falla

El motor de d.c. se frena rápidamente y el regulador electrónico de estado sólido deja de alimentar al motor.

Análisis y solución

Un motor de d.c. puede trabajar perfectamente bien en condiciones de carga nominal o debajo de esta, donde todos sus parámetros eléctricos y mecánicos como el voltaje de armadura, la corriente de excitación, la potencia mecánica dada a su eje y su velocidad, no se ven alterados significativamente frente a una carga mecánica moderada ya que este está diseñado para operar en condiciones sumamente adversas tal y como se observa en el inciso 4.1.4 y hoja # 85, donde la carga puede alcanzar valores superiores a la nominal siempre y cuando no sea por un tiempo mayor al especificado.

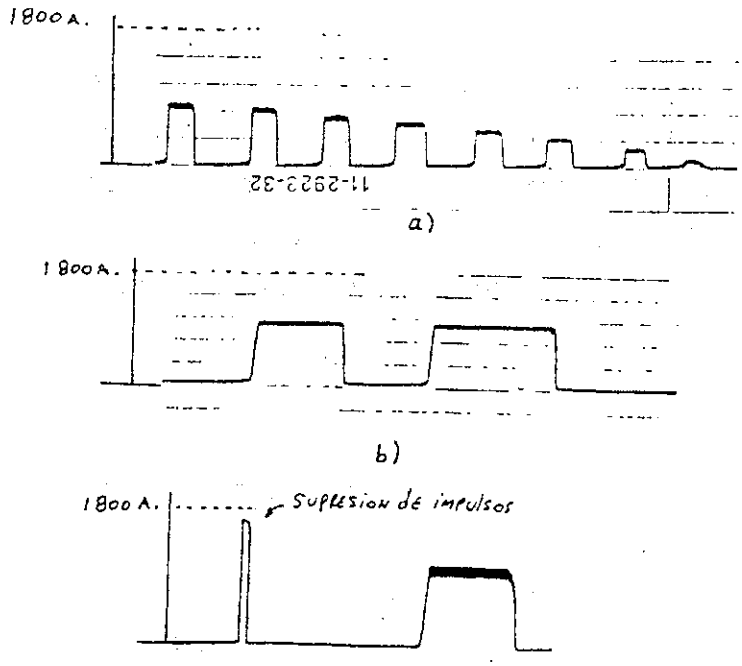
De acuerdo con los ajustes de las protecciones electrónicas, que en consideración de lo anterior, el motor soportará sobrecargas de acuerdo a los siguientes valores donde se sigue tomando de ejemplo a un motor de d.c. a excitación independiente de 300 Kw de potencia.

Tabla V Ajustes de protecciones electrónicas

Valor de corriente	**Ajuste de protecciones**
In *= 740 amperios.*	*El regulador no detecta anomalía alguna ya que el motor se encuentra dentro de sus parámetros de operación nominales.*
1.2*In *= 890 amp.* ***(Ith)***	*El regulador electrónico detecta una sobrecarga liviana y comienza el conteo de tiempo hasta 20 segundos. Si la carga se libera antes de que finalice este conteo, no existirá bloqueo de la alimentación del motor y automáticamente se resetea dicho conteo.*
2*In *= 1480 amp.* ***(Ilim)***	*El regulador electrónico detecta una sobrecarga máxima y el tiempo de conteo para la habilitación de la protección térmica se reduce al mínimo ya que su comportamiento obedece a una curva de tiempo-corriente de tipo inversa. Cuando se alcanza este nivel, generalmente el regulador bloquea la alimentación de voltaje de armadura.*
1.2*2*In *= 1776 amp.* ***(Isupresión)***	*Si se alcanza este valor, el regulador electrónico detecta una fuerte sobrecarga que puede poner en peligro la integridad del motor por lo que en forma instantánea (sin conteo de tiempo) manda el bloqueo de la alimentación de armadura del motor.*

Esta es una condición sumamente adversa que obliga a una inspección física tanto del colector del motor así como de los contactos principales del telerruptor de armadura.

Fig. 70 Consumo del motor visto desde la reacción de corriente de armadura a) a valores nominales o debajo de ella b) a valores de sobrecarga liviana y c) bajo condiciones de sobrecarga máxima



Como puede observarse, el comportamiento tanto del motor como del regulador electrónico bajo estas circunstancias están dentro de las operaciones normales o esperadas de los mismos por lo que realmente no deberían de catalogarse como una falla.

5.6 Falla de aislamiento

Descripción de la falla

El motor no arranca y además hace actuar las protecciones eléctricas y electrónicas, el regulador electrónico responde bien hasta el momento de intentar poner en movimiento al motor.

Análisis y solución

Los motores de d.c. para uso en laminadoras de acero al carbono, generalmente se arrancan en vacío, siendo la carga representada únicamente por el accionamiento que ponen en movimiento, el que no representa una carga arriba del 30% de la nominal, por tal motivo los motores deben de acelerar hasta su velocidad de trabajo sin mayores inconvenientes.

Cuando el regulador electrónico tiene todos sus consensos correctos pero activa sus protecciones al momento en que se energiza el motor, es de esperar que exista algún problema localizado en el motor, por tal motivo se debe revisar el estado del aislamiento de los devanados del motor, haciéndolo de la siguiente manera.

a.- Desconectar completamente las conexiones de la bornera del motor y proceder a la medición del aislamiento real que presenta cada devanado y cuyos valores deben estar en los mínimos siguientes.

Tabla VI Aislamiento de devanados mínimos de motores eléctricos

Armadura versus Masa	=	***2 Mega-ohmios a 500 voltios durante 1 minuto de prueba.***
Excitación versus Masa	=	***2 Mega-ohmios a 500 voltios durante 1 minuto de prueba.***
Armadura versus Excitación	=	***2 Mega-ohmios a 500 voltios durante 1 minuto de prueba.***

En la prueba de aislamiento de la armadura versus mas se toman en consideración tanto el devanado de armadura así como el colector y los devanados de estabilización y compensación, sin embargo no se toman aquí en consideración las fallas de aislamiento que se presenta en el aislante existente entre las delgas del colector.

Si la medición del aislamiento fuera inferior a los datos anteriores se debe de lavar todos los devanados del motor con algún liquido limpiador de impurezas y que a su vez sea desplazante de humedad.

b.- Con la prueba de aislamiento se puede identificar y aislar el sector que presenta bajo aislamiento aun después de haber realizado la limpieza respectiva y si esta continua proceder a desconectar los cables que de los devanados llegan a las borneras porque puede ser de que la bornera sea la que presenta el problema ya que esta puede verse impregnada con residuos de polvo que pueden volver su superficie conductora.

Si el bajo aislamiento persiste entonces se deberá extraer la parte afectada (que puede ser la armadura o un polo de excitación) y enviarla a su reparación.

Puede darse el caso de que el motor pueda trabajar sin problemas ya que la tierra física del motor no está al mismo potencial del negativo de la alimentación de armadura o de excitación pero con seguridad cualquier persona que tenga contacto casual con el chasis del motor podrá sufrir un fuerte descarga eléctrica por lo que inmediatamente debe ser sustituida dicha unidad.

5.7 Falla de acoplamiento mecánico entre el motor y la dinamo tacométrica

Descripción de falla

El motor alcanza valores de velocidad muy altos o todos los valores de voltaje, corriente y velocidad presentan oscilaciones moderadas.

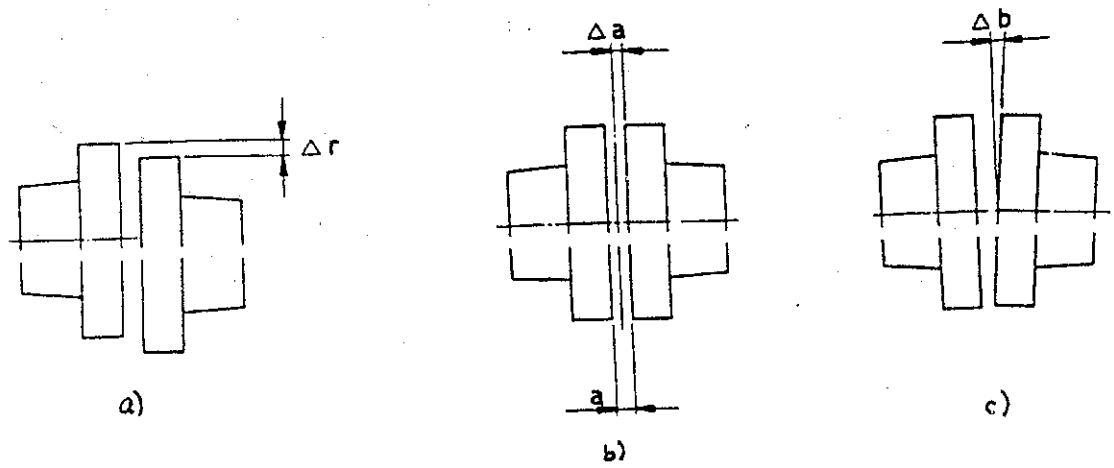
Análisis y solución

Los motores de d.c. a excitación separada pueden proporcionar como señal de reacción de velocidad ,la señal proveniente de una dinamo tacometrica o de un generador de impulsos (encoder), los que siempre están localizados directamente en el eje del motor a través de un acoplamiento mecánico.

Su función principal es la de informar al regulador electrónico, la velocidad con la que viaja el motor, ya sea por medio de un voltaje de d.c. de tipo analógico o por medio de impulsos de tipo digital que, resultan ser proporcionales a la velocidad del eje del motor.

El acoplamiento mecánico entre el motor y estas unidades de generación, debe de ser capaz de absorber desalineamientos mecánicos tanto radiales, axiales y de tipo angular.

Fig.71 Acoplamiento mecánico entre motor y generador tacometrico mostrando las tolerancias a) radial b) axial c) axial angular



Valores aceptables de tolerancias para poder absorber estos tipos de desalineamientos son los siguientes:

Tolerancia radial:	***± 0.1 mm. (Δr)***
Tolerancia axial:	***3 ± 1 mm. (Δa)***
Tolerancia angular:	***± 0.1 mm. (Δb)***

La señal proveniente de una dinamo tacométrica, la cual tiene problemas en su acoplamiento, puede presentar oscilaciones de la velocidad ya que la señal enviada no permite al regulador electrónico estabilizar la misma ya que este constantemente estará tratando de corregir dichas variaciones.

Cuando este problema se presente se debe de observar el comportamiento del voltaje y de la corriente de armadura, donde también se observará el mismo patrón de oscilaciones lo que inmediatamente se tiene que corregir ya que puede hacerse mayor el problema.

El caso extremo se dará cuando el acople entre la dinamo y el motor falle completamente; es decir, el movimiento mecánico del motor se deje de transmitir a la dinamo tacométrica y, por lo mismo, la señal de reacción de velocidad será nula y bajo esta circunstancia, el regulador electrónico observa que hace falta velocidad y procederá a incrementar el ángulo de encendido de los tiristores haciendo con ello que el motor incremente vertiginosamente su velocidad.

La única que queda es la protección por sobrevoltaje del regulador y posiblemente la de sobrecorriente, las que deberán de bloquear al regulador electrónico ya que ese incremento brusco de velocidad va acompañado también de un incremento brusco de voltaje y de corriente de armadura.

La protección por sobrevelocidad no actuará ya que esta, está confiada a un dispositivo de tipo centrifugo que generalmente está acoplada al eje opuesto de salida de la

dinamo tacométrica y por lo tanto también quedará fuera de servicio al fallar el acople entre ésta y el motor.

En los reguladores electrónicos de tecnología digital, esta protección está mejorada ya que si el regulador electrónico detecta una variación brusca de la señal de reacción de corriente, en forma automática impone un valor determinado de reacción proveniente del mismo regulador, lo que a su vez bloquea suavemente la alimentación del motor.

CONCLUSIONES

1. *A pesar de existir, en el mercado nacional, motores trifásicos de corriente alterna a velocidad variable, al menos en la industria metalúrgica, éstos no han logrado desplazar el uso de motores de d.c. a excitación separada por la confianza adquirida en estos motores debido a su robustez y garantía de trabajo.*

2. *Aun cuando el procedimiento de ajustes mencionados en el capitulo # 4 se dirija a un motor de d.c. a excitación separada de 300 kw, el mismo procedimiento puede ser usado para cualquier capacidad de motor de d.c. ya sea para funcionamiento unidireccional o bidireccional, ajustando los datos de acuerdo a los parámetros eléctricos del nuevo motor, con la única condición de que el motor sea a excitación separada.*

3. *El sistema de control a cadena abierta solo permite ajustes manuales de los parámetros eléctricos, pudiéndose utilizar para fines de verificación del estado de funcionamiento del motor en vacío.*

4. *El control automático a cadena cerrada en cambio, permite que un motor de d.c. pueda mantener su velocidad ya sea en condiciones de vacío o de carga.*

5. *El control automático siempre necesitará de dos señales de ingreso:* ***de referencia y de reacción,*** *con la condición de que la falta de una de ellas restrinja el funcionamiento del motor.*

6. *Debido a la sobrecargabilidad que es capaz de aceptar el regulador electrónico (tabla 2.1 y hoja # 21), las protecciones electrónicas pueden ser ajustadas de tal forma que se puedan soportar niveles considerables de carga (ejemplo 4.1 hoja # 80) arriba de su nominal sin poner en peligro el motor y/o regulador electrónico.*

7. *Ya que el sistema motor/regulador, se presta para trabajar como un sistema de control automático a anillo cerrado, la reacción de control por velocidad resulta ser más estable comparada con la reacción por tensión de armadura, cuando el motor observa fuertes solicitaciones de carga.*

8. *De acuerdo con el capítulo # 4, la puesta a punto del motor/regulador implica seguir los ajustes comenzando por el anillo de voltaje para observar la correcta operabilidad del regulador electrónico, continuar con el anillo de corriente para garantizar de que el motor será puesto a buen resguardo cuando sea sometido a sobrecargas de trabajo arriba del 200% de su nominal y finalizar con el anillo de velocidad para verificar la correcta respuesta a las variaciones de velocidad solicitadas por determinado proceso productivo.*

9.- *Aun cuando este procedimiento está realizado para sistemas motor/regulador de la tecnología de los años ochenta, dicho procedimiento se ajusta perfectamente bien para sistemas digitales de tecnología reciente, ya que aun en estos sistemas se sigue utilizando la secuencia de pruebas indicadas en el capitulo # 4.*

10.- El presente trabajo da respuesta a interrogantes que se presentan durante la puesta a punto de sistemas motor/regulador y en su posterior operación.

RECOMENDACIONES

1. *Antes de utilizar el presente documento para ajustar motores de d.c. a excitación separada, familiarizarse con las características técnicas y de diseño del equipo a ajustar para poder encontrar similitudes técnicas con las dadas en el presente trabajo.*

2. *Los criterios expuestos en el presente trabajo están dirigidos a sistemas motor/regulador de aplicación especifica para la industria metalúrgica por lo que la persona encargada de proceder a los ajustes de estos sistemas, si no tendrán esta aplicación, entonces deberá aplicar su criterio personal auxiliado de las características del equipo con que cuente.*

3. *A las personas sin experiencia previa que pretendan hacer uso de este trabajo, se les recomienda estudiar a profundidad los primeros tres capítulos antes de intentar proceder a los ajustes de sistemas como los aquí descritos.*

4. *A las personas con la debida experiencia y conocimiento técnico y de ingeniería y/o que se dedican a trabajar con estas máquinas, se les recomienda estudiar y comparar las similitudes técnicas de su equipo con el procedimiento indicado en el capitulo # 4 para que consoliden de mejor forma su experiencia técnico/práctica.*

5. *Como se indica en el capítulo # 4, se recomienda seguir la secuencia de ajustes, comenzando con el anillo de voltaje, continuar con el anillo de corriente y finalizar con el anillo de velocidad.*

6. *Todas las señales electrónicas de reacción provenientes de una dinamo tacométrica, de transformadores de corriente ya sea del lado de armadura o del lado de la excitación, deberán de ser de polaridad negativa para hacer estable el sistema de control.*

7. *Cuando se comienza la secuencia de ajustes del anillo de velocidad, es recomendable e imprescindible comenzar con la reacción de voltaje de armadura para garantizar que el motor no alcanzará velocidades peligrosas, y usarlo solamente, después de haber corroborado que la polaridad de la reacción de velocidad sea negativa.*

8. *Cuando se presente cualquier tipo de falla, se recomienda analizar los efectos de la misma para poder localizar su origen y así poder proceder a las reparaciones o correcciones necesarias ya sea en el motor o en el regulador electrónico antes de volver a energizar nuevamente el equipo.*

9. *Estudiar el capítulo # 5 ya que en el se presentan las fallas más comunes que suceden durante la operación de motores de d.c. a excitación separada usados en la industria metalúrgica.*

10. *A la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de la Escuela Mecánica-Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, se le recomienda implementar su apoyo científico y tecnológico con relación a la operación de reguladores de velocidad de estado sólido para motores de d.c.*

BIBLIOGRAFÍA

1. *AGUILAR Rivas, Roberto Alejandro. Fabricación del acero e interpretación de las normas de control de calidad aplicables en el medio guatemalteco para barras de refuerzo de hormigón armado. V Consejo Nacional de la Industria de la Construcción. Septiembre de 1993, p.p.4-8*

3. *BOLETIN Asea,* ***Tren de laminación combinado para desbaste, pequeñas secciones y alambre*** *(Suecia),(8511):3-6, 1961*

4. *BOLETIN Asea,* ***Accionamiento de velocidad variable para la industria de laminación*** *(España),(Av 82.101): 4-9 s.a.*

5. *BOLETIN Asea,* ***Motores standard de corriente continua*** *(España),(OK 42-2 Parte A):1-5, 1978*

6. *DONALD, G.Fink y Beaty H. Wayne.* ***Manual de Ingeniería eléctrica.*** *13a Edición, I y II, México, Mc Graw-Hill, 1996*

7. *FITZGERALD, y otros.* ***Teoría y análisis de las máquinas eléctricas.*** *3ra edición, México. Mc Graw-Hill 1990.*

8. *LOBOSCO, Rolando Silvio y José Luis Pereira.* ***Selección y aplicación de motores eléctricos,*** *s.e. Tomo I. España, Siemens-Marcombo, 1989.*

APÉNDICE A

GRADO DE PROTECCIÓN DE LAS CUBIERTAS DE LOS MOTORES Y EQUIPO ELECTRICO

Algunas veces el grado de protección mecánica de un motor se indica por medio de expresiones como: Motor Abierto, a prueba de gotas, a prueba de salpicadura, totalmente cerrado, no obstante, tales nomenclaturas pueden dar lugar a diversas interpretaciones y, para evitarlo se creó una norma para los grados de protección mecánica de las cubiertas o envolventes de motores por medio de símbolos perfectamente definidos.

Los grados de protección mecánica de las cubiertas de máquinas eléctricas obedecen a la International Standard IEC, publicación 3-5 en la que se designan los grados de protección por las letras IP seguida de dos cifras o guarismos, donde la primer cifra indica el grado de protección contra contactos accidentales en las partes activas y la penetración de cuerpos raros y la segunda cifra indica el grado de protección contra la entrada de líquidos.

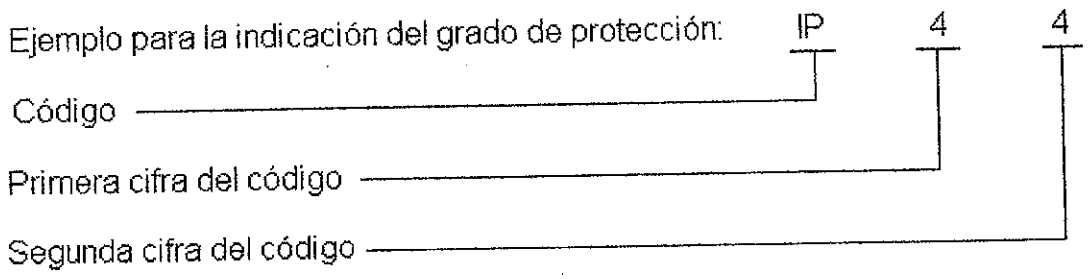


Tabla VII. Protección contra contactos fortuitos y cuerpos extraños

Primera cifra del código	Descripción.	Aclaración.
0	Sin protección	No existe ninguna protección especial para personas contra contacto fortuito en partes bajo tensión o en movimiento. Ninguna protección del elemento contra la entrada de cuerpos extraños sólidos.
1	Protección contra cuerpos extraños ma yores a 50 mm	Protección contra contactos fortuitos con grandes superficies de elementos bajo tensión y en movimiento en su interior por ejemplo con la mano y no da segu ridad contra contacto voluntario a estos elementos. Protección contra la entrada de cuerpos sólidos con un diámetro superior a los 50 mm.
2	Protección contra cuerpos extraños ma yores a 12 mm	Protección contra contacto con los dedos de elemen tos bajo tensión o elementos en movimiento en su interior. Protección contra la entrada de cuerpos sólidos con un diámetro mayor de 12 mm.
3	Protección contra cuerpos extraños ma yores de 2.5mm	Protección contra contactos fortuitos, de elementos bajo tensión o que se encuentren en movimiento en su interior, con herramientas, alambres o similares, de un espesor superior a 2.5 mm y protección contra la entrada de cuerpos sólidos con un diámetro superior a 2.5 mm.
4	Protección contra cuerpos extraños ma yores de 1 mm.	Protección contra contactos de elementos bajo tensión o piezas que se encuentren en movimiento en su inte rior con herramientas, alambres y similares con un espesor superior a 1 mm. Y protección contra la entrada de cuerpos sólidos con un diámetro superior a 1 mm.
5	Protección contra depósi tos de polvo.	Protección completa contra el contacto por elementos bajo tensión o que se encuentren en movimiento en su interior. Protección contra depósitos nocivos de polvo. No se evita totalmente la entrada de polvo pero este no debe de entrar en tales cantidades que tenga influencia negativa sobre la forma de trabajo.
6	Protección contra la entra da de polvo.	Protección completa contra el contacto de piezas bajo tensión o que se encuentren en movimiento en su interior. Protección contra la entrada de polvo.

Tabla VIII. Protección contra agua

Segunda cifra del código	Descripción.	Aclaración.
0	Sin protección.	Sin protección especial.
1	Protección con tra goteo vertical	No deben de tener ninguna influencia nociva.
2	Protección con tra goteo de agua de caída inclinada.	Gotas de agua que caen en cualquier ángulo hasta 15° con relación a la vertical, no deben de tener efectos nocivos.
3	Protección con tra goteo en to dos los sentidos	Agua que cae en cualquier ángulo hasta 60° a la verti cal, no debe provocar ningún efecto nocivo.
4	Protección con tra salpicaduras de agua.	Agua que salpica al elemento en todas las direcciones no pueden tener efectos nocivos.
5	Protección con tra chorros de agua.	Un chorro de agua de una boquilla que es dirijida en todas las direcciones contra el elemento, no deben de provocar efectos nocivos.
6	Protección con tra inundación.	El agua en caso de inundación transitoria, por ejemplo por mar gruesa no deben de entrar en cantidades noci vas en los elementos de accionamiento.
7	Protección con tra inmersión.	No podrá penetrar el agua en cantidades nocivas en él elemento de accionamiento bajo condiciones de pre sión y tiempos fijadas.
8	Protección con tra inmersión profunda.	No podrá penetrar el agua en cantidades nocivas cuan do el elemento de mando se introduzca en el agua bajo unas condiciones fijadas de presión y un tiempo indeterminado.

APÉNDICE B

CLASES DE AISLAMIENTO Y CLASIFICACIÓN TÉRMICA

Las pérdidas eléctricas y mecánicas en motores eléctricos ocurren con la subsiguiente transformación de tales pérdidas en energía térmica originando el calentamiento de diversas partes de la máquina.

Para asegurar la operación adecuada de la máquina, el calentamiento de cada una de sus partes necesita el mantenimiento dentro de valores compatibles.

La mayor dificultad es garantizar un comportamiento adecuado del sistema aislante de los arrollamientos, pues todos los materiales aislantes conocidos empiezan a deteriorarse a una temperatura relativamente baja. Además, la máxima potencia disponible en un motor dado se limita por la temperatura máxima permitida para los materiales aislantes empleados.

Se pueden clasificar térmicamente los materiales aislantes que se utilizaban históricamente en máquinas eléctricas y los que se utilizan hoy en día, según la IEC-85 en las siguientes clases.

CLASE Y: *comprende materiales fibrosos, a base de celulosa o seda, no saturados, no inmersos en líquidos aislantes, y materiales semejantes. La "Temperatura características"* de esta clase es de 90°C.*

CLASE A: *comprende materiales fibrosos, a base de celulosa o seda, (típicamente) saturados con líquidos aislantes, y otros materiales semejantes. La temperatura característica es de 105°C.*

CLASE E: *comprende algunas fibras orgánicas sintéticas y otros materiales, su temperatura característica es de 120°C.*

Los materiales de las clases Y, A y E no son de uso común, y actualmente en el mercado nacional e internacional de motores eléctricos, se utilizan materiales de las siguientes clases

CLASE B: *comprende materiales a base de poliester y polimidicos aglutinados con materiales orgánicos o saturados con estos. La temperatura característica de esta clase es de 130°C.*

CLASE F: *comprende materiales a base de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con materiales sintéticos, como siliconas, poliesteres o epóxicos y su temperatura característica es de 155°C.*

CLASE H: *comprende materiales a base de mica, asbestos o fibra de vidrio aglutinados típicamente con siliconas con alta estabilidad térmica, su temperatura característica es de 180°C.*

CLASE C: *incluye mica, cerámica, vidrio y cuarzo sin aglutinante; siendo su temperatura característica superior a los 180°C.*

Hoy, los materiales de las clases B y F son usuales en los mercados nacionales e internacionales de motores eléctricos, por razones económicas se restringe la utilización de materiales clase H principalmente a máquinas de corriente continua, donde la reducción de masa de los motores obtenida a través de la utilización de materiales de esa clase presenta ventajas en el costo. Aunque los materiales aislantes de la clase C se utilicen individualmente en los sistemas aislantes de los motores, los sistemas de clase C no son comunes.

* *La "Temperatura característica" define el limite superior de temperatura en el cual el aislamiento puede desempeñar su función principal por un período suficientemente largo.*

APÉNDICE C

FORMAS CONSTRUCTIVAS Y MONTAJES

En la instalación de motores eléctricos, un aspecto primordial a considerar es el análisis de los requisitos de la máquina accionada en cuanto al acoplamiento y al tipo de transmisión de movimiento. Por otro lado, la posición en que se deberá instalar el motor es función no solo de las características mecánicas del equipo accionado, sino también de la disponibilidad de espacio en el interior o en los alrededores de la misma.

La norma internacional IEC 34-7, ABNT NBR 5031 y la 42950 prescriben recomendaciones en cuanto a la identificación y clasificación de las formas constructivas y de los montajes.

Las recomendaciones internacionales IEC y la ABNT adoptan como parámetros para la clasificación de la forma constructiva, los siguientes:

a) La forma de fijación del motor (a una base con rieles o a la propia máquina).

b) La existencia o no de cojinetes y de tapas laterales y la propia disposición de estas.

c) La existencia o no de una segunda punta del eje, además de la existencia o no del eje como parte del motor y no de la máquina accionada.

La tabla # 3 presenta la designación de los tipos de formas constructivas, asociadas a un guarismo que

constituye el primer numeral del denominado "Sistema de Codificación II" de formas constructivas y de montajes.

Este sistema también denominado "Completo", está constituido por las letras IM (International Mounting Arragement) seguida de cuatro guarismos.

.- El primer guarismo indica el tipo de forma constructiva (Tabla 3).

.- El segundo guarismo está asociado a la forma de fijación: por pies o bridas.

.- El tercer guarismo está asociado a la dirección de la línea del eje y montaje, la existencia de una base común a la máquina y los cojinetes de pedestal.

.- El cuarto guarismo está asociado al tipo de punta del eje según la tabla # 4.

El sistema descrito así constituye el comúnmente denominado "Sistema completo", para la gran mayoría de las situaciones, sin embargo el "Sistema simplificado" o sistema de codificación es suficiente para la perfecta caracterización de la forma constructiva y de montaje, donde detrás de las letras IM habrá la letra B para motores de eje horizontal y la letra V para motores de eje vertical y luego un número con uno o dos guarismos, que definen la existencia o no de pues y/o bridas, tipo de punta del eje y dirección, la accesibilidad de la brida, la existencia o no de tapas laterales y la fijación.

Las tablas 3 y 4 presentan algunas formas constructivas comunes, así como su codificación por el sistema simplificado, respectivamente para motores de eje vertical y eje horizontal.

Tabla IX. Designación de los tipos de formas constructivas. Sistema de codificación II

Primer guarismo.	*Descripción.*
1	*Máquinas con pies y tapas con cojinetes.*
2	*Máquinas con pies y bridas con cojinetes.*
3	*Máquinas sin pies, con brida en una tapa y tapas con cojinetes.*
4	*Máquinas sin pies, con brida en la carcaza y tapas con cojinetes.*
5	*Máquinas sin cojinetes.*
6	*Máquinas con tapas, con cojinetes y cojinetes de pedestal.*
7	*Máquinas sin cojinetes en las tapas y con cojinetes de pedestal.*
8	*Máquinas verticales no designadas por los primeros guarismos del 1 al 4.*
9	*Máquinas con montaje especial.*

Tabla X. Designación de los tipos de puntas de eje. Sistema de codificación II

Cuarto guarismo.	Descripción.
0	Sin punta del eje.
1	Con punta del eje cilíndrica.
2	Con punta del eje cónica.
3	Con dos puntas de eje cónico.
4	Con una punta del eje con brida de acoplamiento.
5	Con dos puntas del eje con brida de acoplamiento.
6	Con la punta del eje lado acople con brida y punta del eje lado opuesto cilíndrica.
7	Todos los demás tipos de puntas de eje.