

UNIVERSIDAD LA SALLE
ESCUELA DE INGENIERIA
INCORPORADA A LA U.N.A.M.

300617

7
2ej

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONTROL DE VELOCIDAD PARA
UNA MAQUINA DESEMBOBINADORA DE PAPEL EN BASE A UN
EMBRAGUE DE CORRIENTES DE EDDY"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA ELECTRONICA

PRESENTA

ENEAS BALTAZAR LOPEZ

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ASESOR DE TESIS

INGENIERO GUILLERMO ARANDA PEREZ



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

| | | |
|--------------|---|----|
| Introducción | | 01 |
| Capítulo I | Antecedentes | 06 |
| | 1.1 Planteamiento del problema | 06 |
| | 1.2 Justificación | 15 |
| | 1.3 Objetivos | 18 |
| Capítulo II | Conceptos básicos | 21 |
| | 2.1 El motor de inducción | 21 |
| | 2.1.1 Principio de operación | |
| | 2.1.2 Velocidad síncrona | |
| | 2.1.3 Deslizamiento | |
| | 2.2 El embrague | |
| | 2.2.1 Corrientes de Eddy | |
| | 2.2.2 El embrague de corrientes de Eddy | |
| | 2.2.2.1 Principios básicos | |
| | 2.2.2.2 Funcionamiento | |

| | | |
|--------------|--|----|
| 2.2.2.3 | Desarrollo de par | |
| 2.3 | El montaje mecánico | 41 |
| Capítulo III | Planteamiento de la solución propuesta | 46 |
| 3.1 | El circuito | 47 |
| 3.2 | Las fuentes | 50 |
| 3.3 | Los sensores | 51 |
| 3.4 | El circuito diferenciador | 55 |
| 3.5 | El VCO | 64 |
| 3.5.1 | Funcionamiento | |
| 3.6 | El Mosfet | 70 |
| Capítulo IV | Desarrollo de la solución propuesta | 81 |
| 4.1 | Esquema general | 81 |
| 4.2 | Ventajas | 82 |
| 4.3 | Futuro | 83 |
| 4.4 | Costo | 84 |
| CONCLUSIONES | | 86 |
| GLOSARIO | | 88 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Apéndice A | Demostración Formula de carrera libre VCO | 89 |
| Apéndice B | Diagrama de flujo. Detección de errores, puesta en marcha | 91 |
| Apéndice C | Densidad de materiales | 94 |
| Apéndice D | Freno con embrague de corrientes de Eddy | 95 |
| Apéndice E | Hojas de pruebas del amplificador diferencial | 96 |
| Bibliografía | | 97 |

INTRODUCCION

La retroalimentación es un proceso fundamental de la naturaleza, está presente en casi todo lo que nos rodea.

La ingeniería de control es una ciencia que basa su estudio fundamentalmente en la retroalimentación.

La ingeniería de control no se limita a ninguna disciplina de la ingeniería, sino que se aplica por igual a muchas áreas como, la biología, la química, la aeronáutica, mecánica, eléctrica, la política, la economía, etc.. sin embargo los conceptos de retroalimentación han sido utilizados casi exclusivamente por ingenieros, es por esto que el control ha sido desarrollado como una disciplina de la ingeniería, para analizar sistemas de control prácticos.

La ingeniería de control comenzó a desarrollarse cuando se reconoció que existía una estructura común para resolver problemas físicos de naturaleza muy diferente. Esta estructura se caracteriza por la retroalimentación y obedece a principios comunes independientemente de la naturaleza física del sistema en particular.

La ingeniería de control es simultáneamente el primer nivel y la base de la automatización para la que existen hoy en día cada vez más aplicaciones.

El control automático ha sido un verdadero pilar del avance tecnológico de nuestra era.

Con la poderosa herramienta de las matemáticas la necesidad y el ingenio humano, el control automático ha alcanzado niveles cada vez más altos y nos ha ayudado a lograr metas inimaginables.

El control automático resulta esencial en operaciones industriales, por ejemplo, el control de humedad, temperatura, velocidad, presión etc..

En la industria Mexicana, como en la de todo el mundo, la variación de la velocidad es esencial para diversas áreas, y por ende el control de ésta variación.

La necesidad de dicha variación puede observarse en numerosas aplicaciones y por lo consiguiente varias necesidades en cuanto potencia se refiere.

Esta variación es especialmente crítica en la industria del papel.

La presente tesis diseña y construye un control de velocidad para una máquina de la industria del papel a apartir de un motor de corriente alterna (CA) y un ebrague de corrientes de Eddy.

Control de motores de CA.

El control más común en motor de CA es un arrancador.

Este dispositivo conecta el motor a una línea comercial de energía CA. Está diseñado para operar con una corriente típica de arranque (que suele ser muy alta, hasta 6 veces la corriente nominal a plena carga), cuando se energiza directamente a 60 Hz de la línea de alimentación (comúnmente 440 o 220 volts).

Un arrancador además, generalmente posee algunos dispositivos de protección como:

Protección contra sobrecargas, producidas posiblemente por excesiva carga mecánica durante el arranque, o algún atoramiento durante la operación.

La carga a ser manejada determina el tiempo de aceleración. Sin embargo cuando se necesita una variación de la velocidad de la flecha cargada, no es suficiente tener un arrancador.

Variación de la velocidad con motores de CA.

La variación de la velocidad con motores de CA, puede ser obtenida de dos maneras diferentes.

- Una es acoplar el motor girando a una velocidad continua, a un dispositivo que cambie ésta velocidad.

-Otra es cambiar la velocidad del propio motor de CA, al modificar la fuente de alimentación.

De la primera opción se hablará más adelante, el tema del presente trabajo abarca una parte de la segunda opción.

Los dispositivos que suelen cambiar la velocidad (constante) del motor son comunmente:

A) Reductores

De engranes

De poleas con cadenas

De poleas con bandas

B) Acoplamientos hidráulicos

C) Poleas con ajustes de diámetro

D) Embragues de corrientes de Eddy

En todos éstos tipos de sistemas, el motor opera a una velocidad constante.

El único sistema eléctrico de éste tipo es el embrague de corrientes de Eddy.

El embrague opera como un transmisor de par (torque), que acopla al motor con la carga.

Esta tesis pretende ser innovadora al poder ofrecer a los usuarios de embragues de corrientes de Eddy que tengan sus controles averiados una posibilidad de volverlos a poner a funcionar con un bajo costo sin tener que comprar el control que es cada vez más difícil y costoso importarlo.

CAPITULO I Antecedentes

1.1 Planteamiento del problema

Se pretende analizar y desarrollar un control de tensión para el siguiente proceso.

Considere un proceso de impresión y plecado* de papel de la siguiente forma:

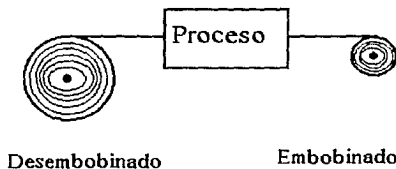


FIGURA 1.1 Modelo del proceso

Conforme avanza el proceso ambos rollos varían en peso y diámetro proporcionalmente, afectando esto continuamente la tensión debido a que cada rollo es controlado por un motor independiente, además los motores de tracción del proceso pueden variar la velocidad. Los controles de los motores se comunican a través del propio papel.

* ver el glosario

El papel demasiado flojo causaría problemas en los tambores de impresión y ésta no sería continua, es decir se defasaría hoja a hoja, o en un caso extremo el papel se arrugaría.

En un papel demasiado tenso la impresión se deformaría o simplemente se rompería, (el papel también se estira).

Para que la impresión y el plecado se conserven uniformes es necesario aplicar al papel una tensión adecuada y constante durante todo el proceso. Esta tensión se determina dependiendo del gramaje* del papel a procesar y algunos otros factores como la calidad o complejidad de impresión.

El proceso completo operaría de la siguiente forma:

Considere que el rollo de desembobinado descansa sobre un eje de metal, el cual es parcialmente móvil, para efectos de poder cargar un rollo nuevo fácilmente. Dicho eje posee cuñas neumáticas las cuales permiten, mediante presión de aire, sostener el eje del rollo durante toda la operación.

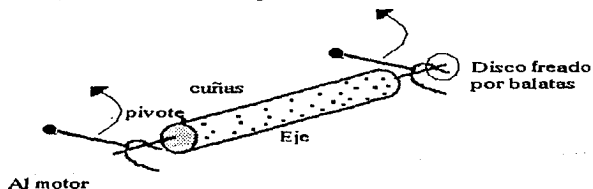


FIGURA 1.2 Eje móvil

* ver el glosario

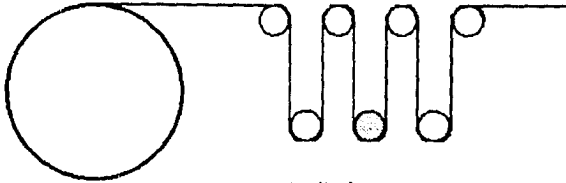
En la figura 1.2 puede observarse el eje metálico, (sin papel) las cuñas, el pivote, y el disco de frenado. El montaje del rollo nuevo, se ejecuta al colocar dicho rollo sobre el eje metálico y una vez puesto se "inflan" las cuñas a través del pivote, de ésta manera se fija el rollo de papel al eje de metal, que posteriormente transmitirá torque al rollo.

La balata frena continuamente el eje para evitar que éste siga girando por su propia inercia cuando no hay requerimiento de papel.

El grado de frenado en la balata se determina en base a la experiencia del operador y continuamente, mientras avanza el proceso, el operador agrega o disminuye mecánicamente la cantidad de frenado.

Una vez montado el rollo en su lugar el papel es conducido por un operador a través de la imprenta, en este momento el rollo se encuentra totalmente libre, es decir no existe frenado ni torque transmitido al rollo.

El primer proceso por el que tiene que pasar el papel es de alto grado de importancia para nuestro fin. El papel tiene que pasar por una serie de tubos dispuestos de la siguiente manera: observe la figura 1.3.



Bailarina

FIGURA 1.3 Tejido de papel

Obteniendo un "Tejido" de papel.

Esto es con el fin de tensionarlo correctamente, logrando el sensado y a la vez tensión a través de la bailarina.

Además del proceso anterior, el papel pasa antes de entrar a impresión a otro control llamado alineamiento, que es un control de movimiento horizontal de uno de los tambores dispuesto exactamente antes de entrar a la primera imprenta, con objeto de no dejar que el papel se alimente chueco al proceso.

Sin embargo nos concentraremos sólo en el control de tensión cuya base es un tubo móvil llamado bailarina.

Dicha bailarina se ilustra en la siguiente figura 1.4

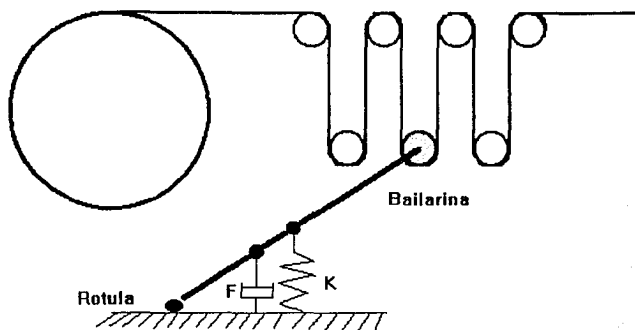


FIGURA 1.4 Detalle de la bailarina

Se puede observar, que la bailarina está sujeta a un sistema de resorte-amortiguador con el fin de producir una respuesta adecuada para el correcto tiempo de sentido.

Cabe destacar algunos puntos críticos con respecto a la bailarina.

Si el papel se tensa, la bailarina sube, si el papel se afloja la bailarina baja (razón por la cual se le denomina así).

Siempre se trabajará con un parámetro que es la carrera de la bailarina, el cual nos proporcionará los límites mínimo y máximo de carrera.

Ahora, analizando la figura 1.5 podemos apreciar como es que se comunican ambos controles de los motores (el de embobinado y el de desembobinado), a través de la propia tensión del papel.

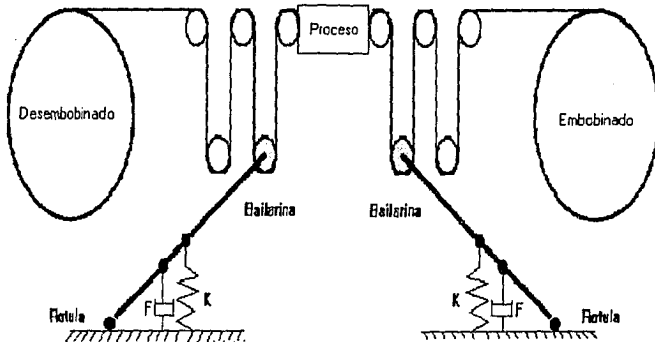


FIGURA 1.5 Conjunto embobinado y desembobinado

Llamaremos tensionador al conjunto de: bailarina, amortiguador, resorte y retroalimentación al motor.

Supongamos ahora que el proceso se está llevando a cabo normalmente.

Si la bailarina del tensionador A (fig. 1.5) baja, equivale a que el papel se afloja por lo que la velocidad del motor A se reduce para provocar que el papel se tense y por lo tanto la bailarina suba al nivel prefijado. Por su parte si la bailarina B también baja se provoca un aumento de la velocidad del motor B y así lograr el equilibrio entre ambos motores y tensionar adecuadamente al papel.

Todo el proceso se invierte si la bailarina sube.

De ésta manera se logra mantener constante la tensión del papel durante todo el proceso. Pero ¿qué ocasiona las variaciones en la bailarina?.

El diámetro y peso del rollo de desembobinado así como el de embobinado varía generalmente de forma constante en el tiempo. Es decir, si el proceso se mantuviera siempre a velocidad constante, el cambio de las variables , sería lineal, y no se necesitaría control de tensión, pues ésta sería función del tiempo.

Sin embargo, la velocidad del proceso se puede cambiar o reajustar según sea necesario.

Por ejemplo, en un principio se trabaja la imprenta a baja velocidad (1 o 2 pies por minuto, fpm) para comprobar la calidad de impresión y plecado así como posibles desviaciones o defasamiento se utiliza luz estroboscópica.

Una vez comprobados dichos parámetros, se reinicia la operación a baja velocidad y después se incrementa hasta

alcanzar la máxima velocidad de operación (de 7 a 14 pies por minuto, fpm) dependiendo del gramaje del papel y de la complejidad de la impresión. Así que durante todo momento se deberá mantener una tensión constante.

De manera que los cambios producidos en la tensión del papel no sólo son debidos al cambio de tamaño en el diámetro del rollo, sino que se pueden deber a agentes externos como bajar la velocidad del proceso para comprobar su calidad y después volver a incrementar la velocidad de impresión.

Al ver el proceso desde el rollo de desembobinado resulta que la velocidad tangencial del mismo no varía una vez puesto en marcha a su velocidad de operación a pesar de los cambios que ocurren en su diámetro. De manera que la velocidad de giro tiene que incrementarse para así lograr una velocidad tangencial constante. De manera análoga sucede con el tensionador del rollo de embobinado, cerrando el lazo así a través del propio papel.

Cabe hacer una analogía con la que quizá estemos muy familiarizados, pensemos en una cinta de un cassette normal, que se está reproduciendo en una grabadora.

En un principio el lado de desembobinado gira muy lentamente mientras que el lado de embobinado gira a una velocidad mayor.

Conforme avanza el proceso, las velocidades de ambos lados se igualarán exactamente cuando posean la misma cantidad de cinta.

Y el proceso será invertido cuando el lado de desembobinado sea menor al opuesto, ahora gira mucho más lento el lado embobinador.

Sin embargo al escuchar la grabación no se altera la velocidad de reproducción, esto es debido al capstan* que jala la cinta de manera constante, mantiene la velocidad fija y toda la cinta pasa a la misma velocidad delante de la cabeza reproductora.

En la analogía anterior pudimos captar como la velocidad tangencial no varía, de manera similar en la imprenta es necesario mantener esa misma característica, aunque debemos considerar la posibilidad de variación de velocidad lenta a rápida, o viceversa y todo el rango de velocidades.

De lo anterior se puede deducir que:

1.- La variable a controlar es la tensión del papel durante todo el proceso.

2.- El sensado de dicha variable lo hace un tubo móvil llamado bailarína.

3.- El objetivo de la presente tesis es desarrollar un control de la tensión del papel, como resultado del control de transmisión del torque y velocidad de un motor CA hacia el eje del rollo.

* ver el glosario

1.2 Justificación

Parte de la solución al presente problema se considera una aplicación típica para motores de corriente directa, sin embargo se propone utilizar motores de corriente alterna.

La principal característica que hace al motor de corriente directa aplicable para la solución, es la capacidad de mantener un torque o par prácticamente constante durante todo el rango de variación de la velocidad.

Más adelante se podrá observar como influye esto de manera significativa en la solución.

Sin embargo el motor de corriente directa presenta severos problemas en comparación al motor de corriente alterna.

Algunos de ellos son:

MOTOR DE DC

- A) Mantenimiento periódico
- B) Alto costo (motor y control)
- C) Reparación especializada

MOTOR DE AC

- A) Prácticamente nulo
- B) Un Costo mucho menor al de DC
- C) Reparación sencilla

De manera que con fines de reducción de costos y para el rango de carga (de 70 a 150 Kg) que se pretende manejar con esta imprenta resulta más conveniente el uso de motores

trifásicos de corriente alterna del tipo más común en el mercado "Jaula de ardilla".

Aunado al motor se encuentra nuestro elemento actuador, el embrague o clutch, que finalmente será el elemento que tendrá influencia directa sobre la velocidad y tensión del papel.

El uso de este embrague beneficia al motor en algunas cosas como por ejemplo, le permite arrancar en vacío para después aplicar carga gradualmente. No posee partes con contacto físico entre ellas, es decir no existe contacto mecánico entre la entrada y la salida. Posee sin embargo algunas deficiencias como no poder transmitir el 100% del torque al eje de carga en velocidades cercanas a 1800 rpmns y poseer un alto porcentaje de deslizamiento.

El control expuesto en la presente tesis será aplicado a un sistema estandar de transmisión de movimiento o impulsión. En la misma armadura del motor se encuentra acoplado el embrague de corrientes de Eddy. Junto al clutch está el eje de salida. Aunque este eje corre a lo largo del motor, es solamente visible en embrague al final de la máquina.

El motor opera con corriente alterna de tres fases y el embrague opera con corriente directa, el grado de acoplamiento es directamente proporcional al voltaje y corriente de DC aplicado al embrague.

Como este voltaje es controlado por el circuito expuesto en la presente tesis, es posible controlar la velocidad del eje de salida por medio del grado de acople.

Los motores usados en los sistemas de impulsión estandar son todos convencionalmente trifásicos de inducción (asíncronos) o tipo Jaula de ardilla, y en este caso la transmisión se efectúa por medio del embrague de corrientes de Eddy.

Por lo que el circuito puede ser usado para la mayoría de sistemas de impulsión estandares como el descrito anteriormente.

La litográfica que usa en especial este control se verá beneficiada al no tener que comprar controles nuevos pagando regalías e importaciones costosas.

Además de analizar la posibilidad de reemplazar el freno de balatas por un sistema de frenado que actúa automáticamente, de manera análoga al control de tensión. Evitando con ello irregularidades que se efectuan durante el frenado mecánico.

1.3 Objetivos

El control expuesto en la presente tesis se ha diseñado para que se adapte a las necesidades reales de la compañía, usando el mínimo de componentes, para abaratar costos, así como disminuir la posibilidad de falla, y aumentar las posibilidades de una reparación rápida, así como poseer tarjetas de refacción también a un bajo costo, logrando además disminuir el tiempo muerto de la imprenta por falla del sistema de control de tensión y velocidad.

Las características del circuito de control a realizar son:

Respuesta continua e inmediata al menor cambio producido en la bailarina.

Esta respuesta se traduce en aplicar mayor o menor voltaje y corriente al embrague y así, poder transmitir más o menos velocidad al rollo.

El control del voltaje y corriente transmitido se hace mediante ancho de pulsos.

Existe también la posibilidad de cambiar la duración del ancho de los pulsos.

El circuito será realizado en base solo a el rollo de desembobinado, de aquí en adelante sólo se hace referencia a dicho rollo.

El control de embobinado es una parte del circuito del de desembobinado y se hará hincapié en cuales serán las diferencias principales a lo largo de la explicación así como en el diagrama.

Ahora para tener una visión general del sistema completo es conveniente analizar detalladamente la figura 1.6.

El motor está continuamente girando a 1750 RPM. (nominal).

La carga se encuentra estática al no existir transmisión.

El embrague acopla la carga proporcionalmete al voltaje y corriente que se le aplica.

La bailarina sensa la tensión del papel y la información de ella será una de las entradas al circuito de control.

El disco está frenando constantemente a la carga por medio de las balatas.

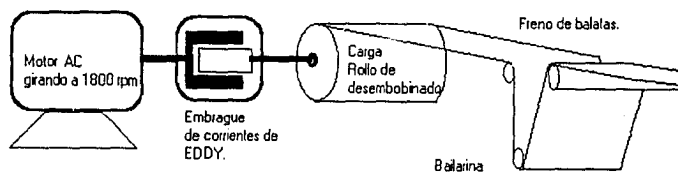


FIGURA 1.6 Esquema general del proceso

En el siguiente capítulo se realizará un estudio de cómo trabajan, el motor y el embrague.

CAPITULO II Conceptos básicos

Para la comprensión adecuada del presente trabajo primero se realiza un análisis de los elementos individuales que a continuación se exponen.

2.1 El motor de inducción

Se llama motor de inducción o asíncrono a una máquina de corriente alterna en la cual la velocidad del rotor es menor que la velocidad del campo magnético giratorio del estator.

En la parte interior del estator existen ranuras en donde se coloca el devanado que se alimenta con corriente alterna. Este devanado es idéntico al de un alternador.

En el rotor existe también un devanado que no está conectado a ninguna fuente externa y que actúa como el secundario de un transformador.

Un motor de inducción posee sólo una fuente de poder, la cual actúa en las bobinas del estator.

La excitación del rotor se logra por inducción.

Los motores de inducción se dividen en dos tipos:

- * Jaula de ardilla (devanado del rotor en corto)
- * Rotor devanado con anillos rozantes.

El primero es ampliamente usado en la industria debido a su simplicidad de construcción, a la ausencia de un conmutador o anillos rozantes en el rotor.

2.1.1 Principio de operación

El motor de inducción tipo jaula de ardilla opera bajo el principio de un campo magnético giratorio que se produce por corrientes alternas polifásicas. En las siguientes figuras 2.1 se muestra cómo se produce un campo magnético giratorio en un motor eléctrico de inducción trifásico de cuatro polos.

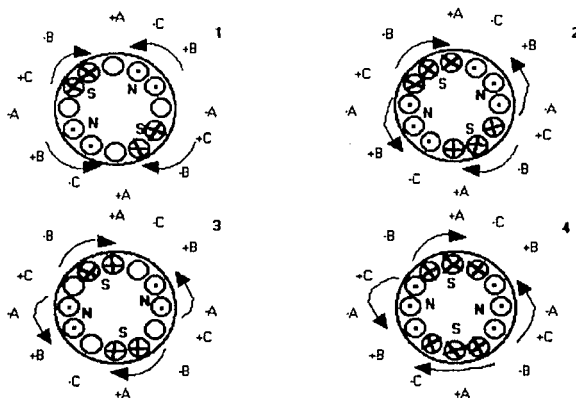


FIGURA 2.1 Corte transversal de un motor de 4 polos

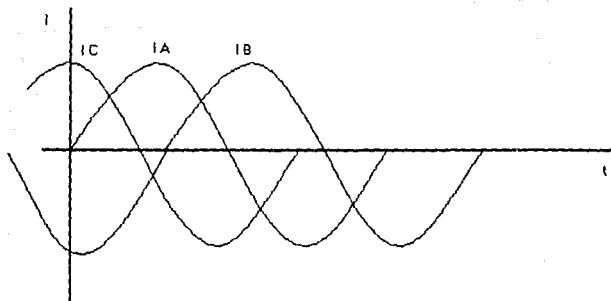


FIGURA 2.2 Formas de onda de la fuente

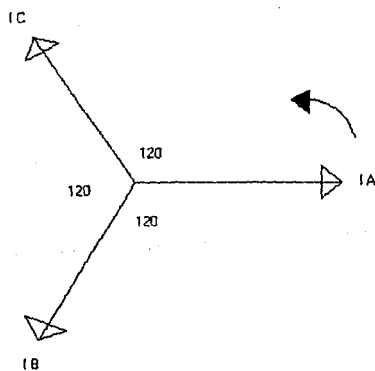


FIGURA 2.3 Fasores

Los signos positivo y negativo de la figura 2.1 indican los estados opuestos de las bobinas en el estator o armadura. Cuando la corriente es positiva circula hacia adentro en un lado positivo de bobina y hacia afuera en un lado negativo de bobina.

Cuando la corriente es negativa su dirección será hacia afuera en un lado positivo de bobina y hacia adentro en lado negativo de bobina. La comprensión del ejemplo se puede mejorar al observar la figura 2.4 que representa el devanado del estator seccionado y fluyendo corriente en dos sentidos en lados opuestos del embobinado.

En la figura 2.2 se pueden observar las ondas senoidales en el tiempo. Y en la figura 2.3 se presentan sus fasores separados 120° grados eléctricos.

Los polos norte y sur producidos por las corrientes en los devanados del estator, en forma rotatoria cortan los conductores del rotor induciendo corrientes en ellos.

Estas corrientes inducidas reaccionan con los polos del estator según la regla de Fleming de la mano izquierda, desarrollando un torque que produce giro en el rotor, véase la figura 2.5, si se pone el pulgar de la mano izquierda en el sentido de la corriente y el índice en el sentido del campo magnético, el dedo medio indicará el sentido de la fuerza que deberá de ser ortogonal a los otros dos ejes.

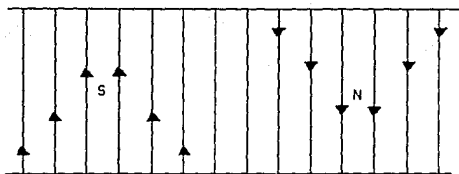


FIGURA 2.4 Distribución de la corriente en el motor tipo jaula de ardilla

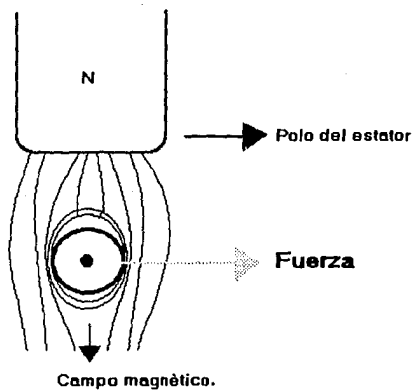


FIGURA 2.5 Regla de Fleming de la mano izquierda

2.1.2 Velocidad síncrona

La velocidad del campo magnético giratorio se llama velocidad síncrona y se determina de la siguiente forma.

$$\text{RPM} = (120 \cdot f) / P \qquad \text{Fórmula 2.1}$$

donde:

f es la frecuencia en Hertz

P es el número de polos

Velocidad del campo magnético giratorio en el estator.

2.1.3 Deslizamiento

El rotor en un motor de inducción nunca puede obtener la velocidad del campo magnético giratorio, por que si eso sucediera no habría flujo magnético cortando a los conductores del rotor, y no se induciría corriente y por consiguiente no existiría torque.

La diferencia entre la velocidad del campo magnético giratorio y la velocidad del rotor se llama velocidad de deslizamiento del rotor.

Es conveniente expresar el deslizamiento en porcentaje de la velocidad síncrona.

$$S = ((N - N_2) + N) \cdot 100\% \quad \text{Fórmula 2.2}$$

Donde:

S es el porcentaje de deslizamiento,

N es la velocidad síncrona,

N_2 es la velocidad del rotor.

El deslizamiento varía proporcionalmente con la carga mecánica, por ejemplo si un motor con 2.6% de deslizamiento a plena carga se le aplica la mitad de carga entonces.

$$S = 2.6\% \cdot 0.5 = 1.3\%$$

Sin embargo en vacío hay que considerar por lo menos un 5% de la carga en pérdidas por fricción y ventilación.

El 90 % de los motores poseen un ventilador acoplado a la flecha, este ventilador se compone de aspas, las cuales cuando giran a la velocidad base (60 Hz, para un motor de 4 polos), producen un flujo de aire para enfriar el estator del motor, en el rotor existe algo muy parecido, las aspas del rotor hacen circular un flujo de aire para enfriar internamente al estator y al rotor. La posición de las aspas así como el número de ellas depende, en parte de la velocidad base del motor y del tamaño del mismo.

$$S = 2.6\% \cdot 0.05 = 0.13\%$$

El deslizamiento a plena carga en motores comerciales varía de 1% a 10% dependiendo del tamaño y tipo de motor.

Las siguientes gráficas muestran las curvas características de un motor de inducción tipo jaula de ardilla:

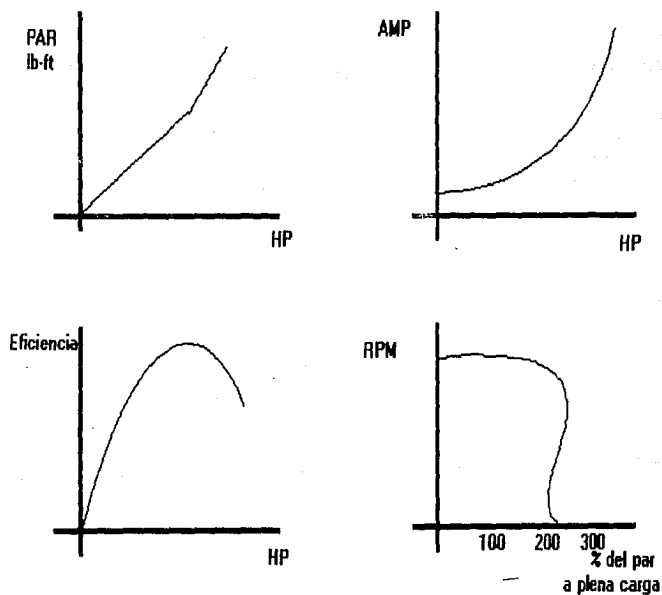


FIGURA 2.6 Características del motor jaula de ardilla

2.2 El embrague

En la misma armadura del motor CA está acoplado el embrague de corrientes de Eddy, junto al embrague está el eje de salida.

El motor utiliza CA mientras que el embrague utiliza CD. Si sólo se aplicara CA el motor trabaja mientras que el sistema permanece desembragado, en este caso el eje de salida permanece quieto. Energizando el embrague por medio de aplicar CD se acopla el eje de salida a el motor. El grado de acople es proporcional al voltaje y corriente.

Si este voltaje y corriente son variados con ayuda de un control electrónico externo, es posible controlar la velocidad o el torque del eje de salida.

2.2.1 Corrientes de Eddy

También conocidas como corrientes parásitas.

Alguna vez posiblemente nos habremos preguntado ¿porqué los núcleos de los transformadores estan laminados, porqué no son sólidos?.

La respuesta está en las corrientes de Eddy o parásitas.

Un transformador está siempre sujeto a corrientes alternas las cuales producen pérdidas por histerésis y pérdidas por corrientes parásitas.

Estas corrientes se producen en el hierro en forma ciclar y son debidas a la inducción electromagnética. La dirección de éstas corrientes son opuestas a la dirección de las corrientes que las producen (ley de Lenz). Para reducir al mínimo éstas pérdidas se lamina el núcleo y se aíslan con barniz unas de otras como se muestra en la figura 2.7.

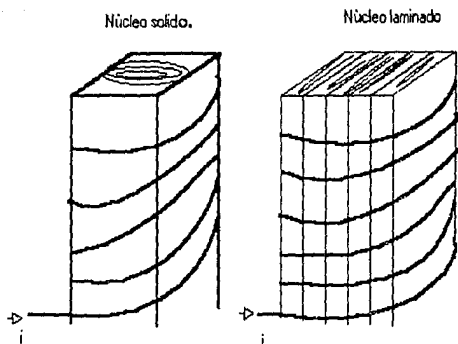


FIGURA 2.7 Núcleo sólido y laminado
Corrientes parásitas en el interior

Nótese que la cantidad de pérdidas por corrientes parásitas es menor en el núcleo laminado.

Para un volumen de material, las pérdidas por corrientes parásitas varían con el cuadrado del espesor de la laminación, la frecuencia y la densidad de flujo, las pérdidas están dadas por la siguiente expresión:

$$P_{cp} = ((\pi \cdot t \cdot f \cdot B_m)^2) \div (6 \cdot \rho \cdot 10^{16})$$

Fórmula 2.3

Donde:

| | |
|----------|--|
| P_{cp} | esta dimensionada en watts/cm ³ |
| t | es el espesor de la lámina en cm |
| f | es la frecuencia en Hz |
| B_m | es la densidad de flujo magnético en Gauss |
| ρ | es la resistividad de la lámina en Ohms-cm |

Sin embargo éstas corrientes parásitas pueden utilizarse de forma provechosa en el embrague.

2.2.2 El embrague de corrientes de Eddy

El sistema de transmisión de par o torque utiliza el principio de corrientes de Eddy para transmitir potencia desde el motor a la carga.

Los miembros de entrada y de salida del embrague no tienen un contacto físico entre ellos, excepto en el centro del tambor y el cojinete de soporte.

El sistema embraga y desembraga al motor de la carga sin interrumpir la fuente de alimentación del motor.

Esta característica prolonga la vida útil del motor y la del arrancador, además permite que el motor sea arrancado sin estar bajo condiciones de carga.

Las únicas partes sujetas a uso durante una operación normal son; el anillo rozante, las escobillas, y los cojinetes o rodamientos.

2.2.2.1 Principios básicos

La generación de par o torque a través de dispositivos que operan con corrientes de Eddy se basan en los siguientes principios básicos.

A) La figura 2.8 ilustra un simple electromagneto consistente en una barra de hierro en forma de "U" y una bobina de alambre aislado alrededor de la base de la "U" justo entre ambos lados.

Cuando una corriente de directa fluye a través de ésta bobina, la barra se convierte en un magneto.

La fuerza del campo magnético (que se definirá como el campo primario), es determinada por la corriente que fluye, el número de vueltas de la bobina y la permeabilidad del hierro.

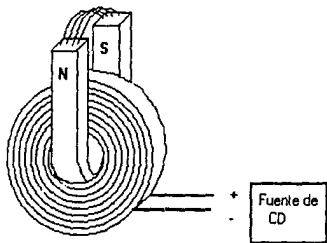


FIGURA 2.8 Conjunto bobina y núcleo de hierro
Electroimán

B) Si algunas barras de hierro en forma de "U" son insertadas en una sola bobina y montadas en una eje, como se muestra en la figura 2.9, se simulará la parte del campo de ensamble del embrague de corrientes de Eddy.

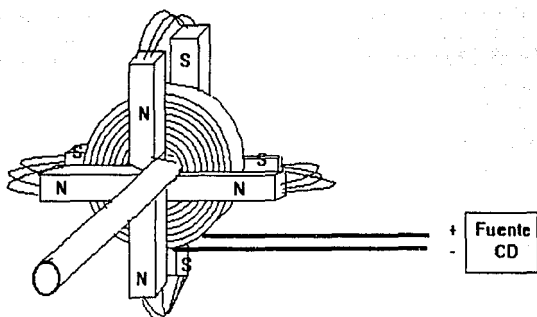


FIGURA 2.9 Conjunto de barras de hierro montadas en un eje

C) Añadiendo un anillo sólido de acero, hierro, aluminio (o algún otro material), y logrando que el campo de los

electroimanes sea cortado por dicho anillo, se obtendrá, la estructura básica del embrague de corrientes de Eddy.

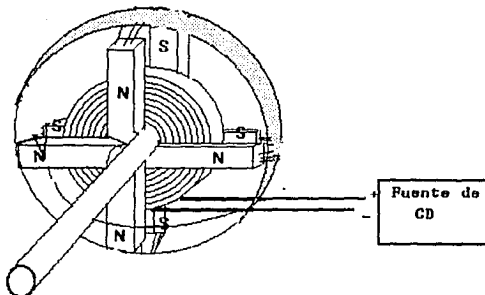


FIGURA 2.10 El anillo rompe el campo magnético inducido

2.2.2.2 Funcionamiento

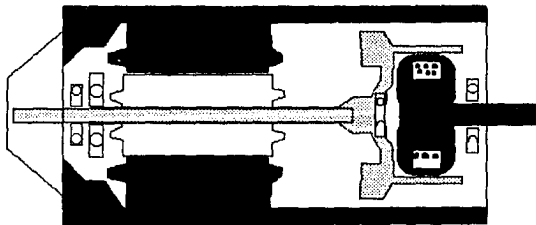
El principio de acople con un embrague de corrientes de Eddy, hace posible obtener un amplio rango de velocidades ajustables a partir de la frecuencia estandar de una línea industrial de CA.

La unidad de variación consiste en un motor de inducción y un acople o transmisión creado por un embrague de corrientes de Eddy.

La velocidad variable que se obtiene en el eje de salida, es proporcionada por el acople que hace el embrague al motor que está girando a su velocidad constante.

El embrague de corrientes de Eddy consiste básicamente en tres ensambles principales.

El tambor, el rotor y el campo magnético o campo de ensamble. Estos componentes básicos están ilustrados en la figura 2.11.



- Rotor del embrague.
Rotor del motor
- Estator del motor
- ◆ Eje y tambor

FIGURA 2.11 Corte del conjunto motor-embrague

El motor de corriente alterna dentro del sistema de transmisión de torque mueve al tambor a una velocidad constante.

El tambor es el miembro activo del sistema, y en un principio, sirve como portador de flujo magnético.

Por la posición del tambor podemos observar que la parte interna del mismo rodea y envuelve parcialmente al campo magnético o de ensamble, y al rotor.

El campo de ensamble permanece estacionario al no ser aplicado ningún voltaje y corriente a la bobina.

El tambor está hecho en aluminio, y está alojado sobre el eje hueco del rotor del motor, tiene un inductor forjado en acero en forma toroidal y además posee aletas que actúan como ventilador para enfriar.

El rotor del embrague o campo de ensamble, consiste en un anillo de araña (material no magnético) presionando sobre una bobina, todo montado en una combinación de un anillo interior de araña (material no magnético) y un eje o un núcleo centrador. El núcleo centrador está soldado al eje de salida. Así de ésta manera el tambor esta siempre unido y gira con el rotor del motor, mientras que el rotor del embrague es acoplado y esto causa rotación sobre el eje de salida.

El eje de salida es parte del rotor del embrague, y gira a una velocidad determinada por el control.

Del lado del rotor del embrague se encuentra unido un ensamble de anillos deslizantes.

Este ensamble consiste en dos anillos de acero inoxidable montados sobre un material no conductor o aislante.

Cada lado de la bobina del embrague es conectada a cada anillo rozante.

La energía con que se alimenta la bobina del embrague pasa a través de éstos anillos rozantes y de escobillas que finalmente están conectadas a una salida que se localiza al final del motor.

Estas escobillas son dos por cada anillo rozante y están localizadas en lados opuestos de los anillos rozantes para asegurar un buen contacto aún en periodos de vibración.

Al energizar la bobina ésta produce una serie de polos y flujo magnético, éstos polos son proyectados alternadamente en la cara exterior del rotor, por su parte, el flujo magnético cruza la barrera de aire que está entre el campo de ensamble y el tambor, pasa a través del inductor del tambor toroidal y regresa a través de la barrera de aire al campo de ensamble. Esta trayectoria del flujo megnético es rota cuando el tambor se está moviendo respecto al campo de ensamble. Como resultado de ésto son creadas corrientes de Eddy en la cara inferior del tambor. Estas corrientes de Eddy producen series de polos magnéticos en el tambor los

cuales interactúan con los polos del campo de ensamble produciéndose torque. Este torque causa que el campo de ensamble y el eje de salida siga la rotación del tambor.

Para que pueda existir par a partir de corrientes de Eddy debe existir una diferencia de velocidad entre el tambor del embrague y el campo de ensamble. Esta diferencia de velocidad es llamada al igual que en el motor, también deslizamiento. Esto sumado con el deslizamiento propio del campo del motor, es la razón de la diferencia entre la máxima velocidad de salida y la máxima velocidad del motor. Ver figura 2.12.

La construcción del motor permite separar el eje de salida hacia la carga del eje del rotor, gracias a que están montados en rodamientos diferentes, esto permite girar libremente al motor independientemente de la carga.

Existe además una solución para eliminar el frenado constante de las balatas, y consiste en un embrague de corrientes de Eddy doble, usado para frenar al conectar magnéticamente la flecha, no a un toroide en movimiento (tambor) sino al chasis del propio embrague que permanece estático. Véase el apéndice D.

2.2.2.3 Desarrollo de par

La cantidad de par transmitida desde el motor hasta el eje de salida es proporcional a:

- 1.- La cantidad de voltaje y corriente aplicada al campo de ensamble o bobina.
- 2.- La velocidad relativa entre el tambor y el campo de ensamble.
- 3.- La baja inercia del propio rotor del embrague.

El límite del par transmitido es típicamente el máximo par disponible en el motor.

En la siguiente figura 2.12 se representan diferentes curvas de par contra velocidad para un embrague de corrientes de Eddy.

Conforme se incrementa la excitación de la bobina la capacidad de transmisión de par se incrementa tal como lo muestran las curvas.

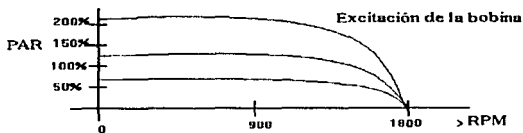


FIGURA 2.12 Curvas de par

2.3 El montaje mecánico

El eje final de salida no está conectado directamente a la carga, se tiene una transmisión de engranes, que además de reducir la velocidad aumentan el par de transmisión optimizando así el uso tanto del embrague como del motor.

Generalmente el uso de reductores es conveniente para los siguientes aspectos.

- 1.- Cambio de velocidad. (relación constante)
- 2.- Cambio de dirección.
- 3.- Cambio de sentido.
- 4.- Cambio de par.

Los puntos anteriores dependen del arreglo que se tenga de engranes.

El reductor de engranes sirve como un amplificador de par, incrementando éste en la misma relación que disminuye la velocidad.

Claro que ésta transmisión cuesta y la eficiencia debe considerarse en la salida de dicho reductor.

Analice el siguiente ejemplo:

Si un motor de 1 HP que gira a 1750 rpm, tiene un par de 3 lbft, y se conecta a un reductor con una relación de 30:1, con un 85% de eficiencia, a la salida del dicho reductor se obtendrá $(3)(30)(0.85)=76.5$ lbft.

Observe la figura 2.13

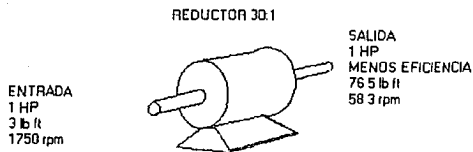


FIGURA 2.13 Ejemplo de reducción

He aquí un esquema del ensamble mecánico.

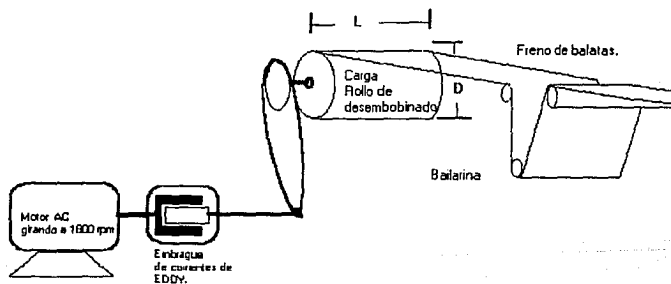


FIGURA 2.14 Ensamble general

Finalmente se realiza un análisis de la cantidad de par necesario para mover un cilindro de papel.

Para fines prácticos consideré un rollo de papel sólido.

La fórmula general para el cálculo de la inercia en un cilindro es:

$$WK^2 = 0.000681 \cdot \rho \cdot L \cdot (D)^4 \quad \text{Fórmula 2.4}$$

Donde:

WK^2 es la inercia en el cilindro en (lb·ft²)

ρ es la densidad del material del cilindro en (lb·in³), ver apéndice C

D es el diámetro del cilindro en (in)

L es el tamaño del largo del cilindro en (in)

En el peor de los casos las variables son:

$$\rho = 0.0420 \quad D = 60 \text{ in.} \quad L = 40 \text{ in}$$

Obteniendo $WK^2 = 14,827.27 \text{ lb}\cdot\text{ft}^2$

Para calcular el par partiendo de una inercia conocida WK^2 y una velocidad en un periodo de tiempo, se puede usar la siguiente ecuación para obtener un promedio del par necesario.

$$T = (WK^2 \cdot dN) \div (308 \cdot t) \quad \text{Fórmula 2.5}$$

Donde:

T es el torque o par en lb . ft

WK^2 es la inercia total del sistema en lb.ft²

dN es el cambio de velocidad requerido en rpm.

t es el tiempo para acelerar la carga en segundos.

Si la relación del reductor es de 18:1, con una eficiencia de 83% (peor de los casos), y se calcula unitariamente 1 RPM en 1 s. el par necesario en la entrada del reductor es:

$$T' = 48 \text{ lb} \cdot \text{ft. Par en la salida.}$$

$$T = 3.7 \text{ lb} \cdot \text{ft. Par en la entrada.}$$

Una vez conocido el par necesario se procede al cálculo de los HP's. La siguiente fórmula puede ser aplicada para el cálculo indicado.

$$\text{hp} = (T \cdot N) \div 5250. \qquad \text{Fórmula 2.6}$$

Donde:

hp son los caballos de potencia.

T es el par en lb.ft

N es la velocidad del motor cargado en rpm.

Las variables son:

N 1750 rpm de datos de placa del motor.

T 3.7 lb.ft de la página anterior.

Por lo tanto: 1.2 hp son requeridos por cada rpm por segundo.

CAPITULO III Planteamiento de la solución propuesta

Para comenzar a proponer la solución al problema analicemos el siguiente diagrama a bloques; que es un esquema general en la figura 3.1.

Se encuentra el motor, que se conecta directamente a la entrada del embrague. El eje de salida del embrague se conecta a la carga, vía un reductor.

Se realimenta una muestra de salida del proceso por medio del sensor 1.

Por medio del sensor 2 se alimenta una señal de referencia.

Los sensores 1 y 2 a su vez actúan directamente en el control, el cual regula el grado de acople entre el motor y la carga.

Cabe aclarar que el sensor 2 es la referencia del operador.

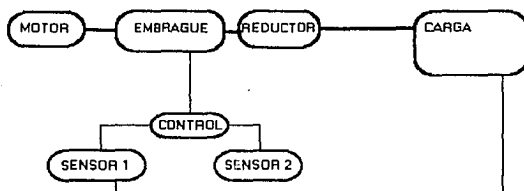


FIGURA 3.1 Diagrama general a bloques

La figura 3.1 nos puede ayudar a comprender y a tener una visión general, de como se propone solucionar el problema.

3.1 El circuito

Se procede a presentar la solución propuesta en esta tesis partiendo de los siguientes puntos:

- A) El sensor 1 provee un voltaje analógico (variable en un rango) que representa la altura de la bailarina (entrada 1).

- B) Un potenciómetro 2 provee un voltaje analógico (variable en un rango) que representa la tensión a la que se desea que se desarrolle el proceso (constante una vez seleccionada ésta) (entrada 2).

- C) La salida que deberá tener el control es una señal analógica proporcional al error resultante de la diferencia entre la lectura de ambos potenciómetros (entradas 1 y 2); dicha señal será transformada y alimentada al embrague de corrientes de Eddy, para que el par (torque) y velocidad puedan ser transmitidos al eje del rollo sensado.

Ahora podemos plantear la solución según el siguiente diagrama a bloques:

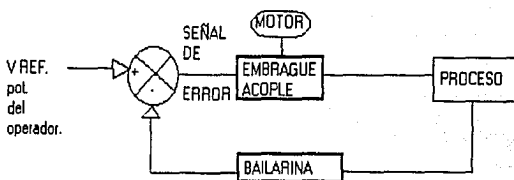


FIGURA 3.2 Diagrama abloques "Punto de suma"

En la figura 3.2 se observa un par de entradas al punto de suma o detector de error, del cual se obtiene una señal de diferencia o error.

Esta señal (diferencia), se alimenta a la bobina del campo de ensamble indirectamente por medio de pulsos y de variación en la resistencia que limita el paso de la corriente a dicha bobina la cual actúa directamente sobre la carga.

Cualquier cambio de velocidad en el proceso se detecta a través de la bailarina.

Un poco más esquemático, se puede observar en la figura 3.3 como se relacionan los componentes para lograr su fin.

El conjunto de motor y embrague se encuentran sin cambios.

Los sensores toman forma y el control se divide en un detector de error entre las señales, y un generador de pulsos, que además permite controlar un MOSFET.

Además se puede observar la bailarina conectada al sensor 1, y las fuentes de donde toman su energía.

Ahora se pretende analizar de manera particular cada elemento sin perder hilación entre ellos.

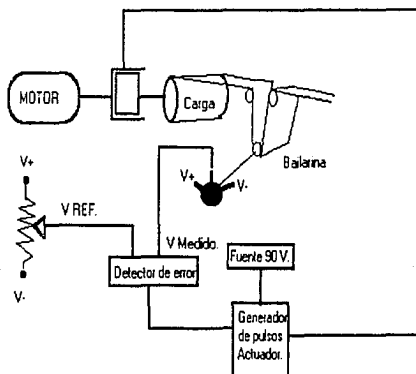


FIGURA 3.3 Esquema general a bloques

3.2 Las fuentes

La fuente de 90 VDC no será analizada. Se usará la misma fuente que funciona hasta el momento.

La máxima corriente que puede tomar es 10 amp. Puesto que la bobina del campo de ensamble posee una impedancia de 9 Ohms. El transformador tiene una capacidad de 1 KVA.

La fuente de +15 VDC y -15 VCD es expuesta a continuación.

La entrada es de 110 VCA, pasa por el primer elemento que es un transformador que baja la amplitud a 32 VCA. La capacidad del transformador es de 100 VA.

Después ésta señal se pasa a través de un rectificador de onda completa tipo puente de diodos con capacidad de 3 amperios.

El rizado es disminuido con un capacitor electrlítico de 0.1 micro faradio a 50 VDC.

La regulación es realizada con dos cicuitos LM317 y su espejo LM337, calibrados para proporcionar un voltaje regulado de +15 VDC y -15 VDC.

A continuación se muestra un diagrama de la misma para su mejor comprensión.

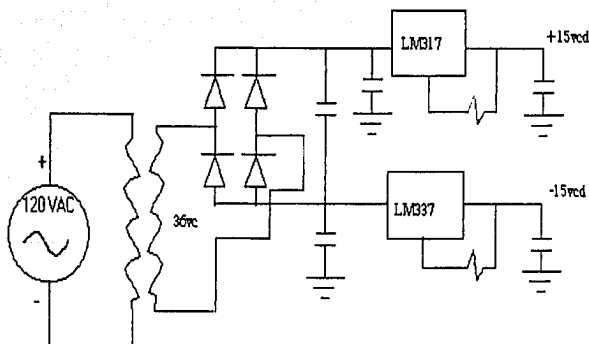


FIGURA 3.4 Fuente regulada +15VDC y -15VDC

3.3 Los sensores

Los sensores son básicamente potenciómetros, y comenzaremos por definir las características de los potenciómetros 1 y 2.

El voltaje de alimentación seleccionado es +15VCD y -15VCD. La razón es que es el mismo voltaje que se usa para la alimentación de los demás circuitos y sale de la fuente propuesta ya regulado, así que no se deberá temer a posibles variaciones de voltaje en la alimentación de dichos potenciómetros, ya que cualquier variación en la lectura nos dará una posición equivocada o no real de la bailarina proporcionando un control erróneo de la situación propuesta por los potenciómetros.

Es conveniente ahora realizar un análisis de los potenciómetros.

La figura 3.3 puede ayudar a comprender el siguiente estudio:

Los circuitos son logrados con potenciómetros de 3.3 K Ohms, $\pm 5\%$. Ambos de uso industrial.

La potencia disipada es de:

$$P = V \cdot I$$

Fórmula 3.1

$$P = 300 \text{ mW.}$$

Por lo que $\frac{1}{2}$ Watt en las resistencias es suficiente.

Así que tampoco se deberá temer por variaciones en las resistencias debidas a la temperatura.

El brazo de referencia será alimentado a un circuito de muy alta impedancia de entrada, como se verá en el punto 3.4, así que la corriente tomada por el mismo se considera despreciable.

Ahora considere los siguientes puntos.

A) Se necesita poseer un potenciómetro de referencia para poder tener una medida a comparar (potenciómetro del operador).

B) La comparación o medida de la tensión se propone realizar de la siguiente manera. (potenciómetro de la bailarina).

La articulación inferior del brazo de la bailarina (rótula) se conecta directamente con un potenciómetro que se muestra en la siguiente figura 3.5

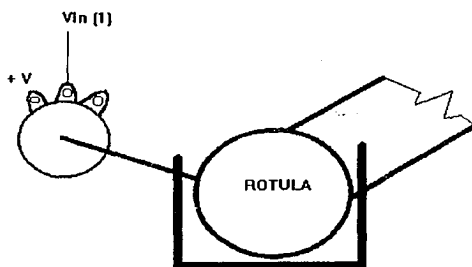


FIGURA 3.5 Acoplamiento del potenciómetro de la bailarina

De ésta manera podemos sensar un voltaje proporcional a la posición de la bailarina y poder compararlo contra el valor a alcanzar o voltaje del potenciómetro del operador.

Hasta éste punto ya poseemos información analógica valiosa de la máquina para ser alimentada al control.

En la siguiente sección se realiza un análisis del circuito donde se alimentará los voltajes de los sensores.

3.4 El circuito diferenciador

EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL DE INSTRUMENTACION

El amplificador de instrumentación es uno de los amplificadores más útiles, preciso y versátil disponible en la actualidad. Está constituido de tres amplificadores operacionales y siete resistores tal y como se muestra en la siguiente figura.

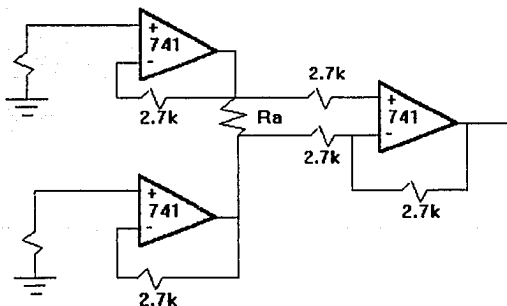


FIGURA 3.6 Amplificador diferencial de instrumentación

Este diseño hace al circuito muy estable y útil cuando es importante la exactitud.

Dicho diseño se basa en amplificadores diferenciales básicos. Para comprender como opera un amplificador diferencial de instrumentación, se realiza primero un análisis de un amplificador diferencial básico.

Un amplificador diferencial básico puede medir y también amplificar señales débiles que quedan enterradas en señales mucho más intensas. Por ejemplo, un amplificador diferencial es usado para escuchar los latidos del corazón de un feto sin que se mezclen o se confundan con los de la madre. Sin embargo aquí será utilizado con voltajes parecidos entre si o por lo menos dentro de un rango común.

Con cuatro resistencias y un amplificador operacional se puede hacer un amplificador diferencial básico como se muestra en la siguiente figura.

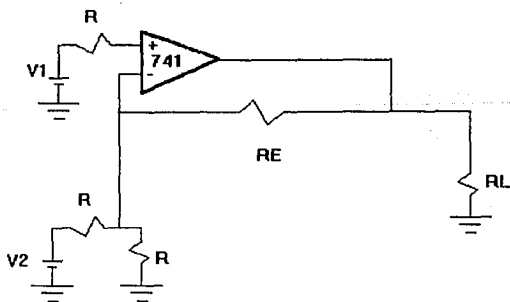


FIGURA 3.7 Amplificador diferencial básico

Hay dos terminales de entrada una positiva (+) y una negativa (-), correspondientes a las entradas del amplificador operacional.

Si el voltaje marcado como V1 se reemplaza como corto a tierra, el voltaje marcado como V2 ve al amplificador como un amplificador inversor de ganancia -A. Por tanto el voltaje de salida debido a V2 es -AV2. Ahora se pone en corto a tierra en lugar de V2 y se deja V1. V1 se divide entre A y A·R para aplicar un voltaje de $V1 \cdot A / (A + 1)$ a la entrada positiva (+) del amplificador operacional. Este voltaje dividido ve un amplificador no inversor con ganancia (A + 1). El voltaje de salida debido a V1 es el voltaje dividido $V1 \cdot A / (A + 1)$, veces la ganancia del amplificador no inversor, (A + 1), lo cual es A·V1. Por lo tanto V1 está amplificado A a A·V1. Cuando están presentes ambos voltajes V1 y V2 en las entradas (+) y (-) respectivamente la salida Vsal es A·V1-A·V2.

$$V_{sal} = A \cdot (V1 - V2).$$

Fórmula 3.2

En la ecuación 3.1 se muestra que el voltaje de salida es del amplificador diferencial básico Vsal es proporcional a la diferencia en el voltaje aplicado a las entradas (+) y (-). El multiplicador A se le denomina ganancia diferencial y se establece por razones de resistores.

Sin embargo existen dos desventajas del amplificador diferencial básico: Tiene baja resistencia de entrada y el cambio de ganancia se hace difícil debido a que las razones de resistencias deben igualarse estrechamente.

Este primer problema se puede resolver reforzando o aislando las entradas con seguidores de voltaje, esto se lleva a cabo con dos amplificadores operacionales conectados como seguidores de voltaje.

La salida del amplificador operacional A1 con respecto a tierra es V_1 y la salida del amplificador operacional A2 con respecto a tierra es V_2 .

El voltaje diferencial de salida V_{sal} se desarrolla en las terminales de salida de cada uno de los amplificadores operacionales A1 y A2, y es igual a la diferencia entre V_1 y V_2 . $V_{sal}=V_1-V_2$. Debe observarse que la salida del amplificador diferencial básico es única y que el voltaje de salida V_{sal} se toma de la salida del amplificador operacional a tierra.

El amplificador diferencial reforzado posee una salida diferencial es decir ésta es medida entre la salida de A1 y A2.

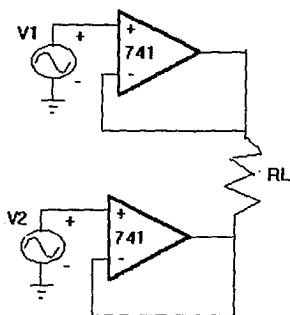


FIGURA 3.8 Amplificador diferencial reforzado

La segunda desventaja del amplificador diferencial básico es la falta de ganancia ajustable. Este problema es eliminado agregando tres resistencias al amplificador reforzado.

La entrada diferencial reforzada resultante al amplificador diferencial de salida con ganancia ajustable se muestra en la siguiente figura 3.9.

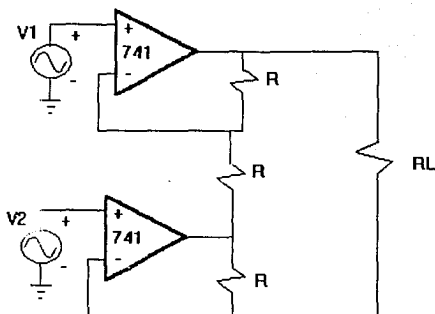


FIGURA 3.9 Amplificador diferencial reforzado con ganancia ajustable

La alta resistencia de entrada se conserva por los seguidores de voltaje. Ya que el voltaje diferencial de entrada de cada amplificador es cero volts, los voltajes en los puntos a la salidas de los amplificadores operacionales con respecto a tierra son respectivamente iguales a V_1 y V_2 , por lo tanto el voltaje a través del resistor aR en $V_1 - V_2$. El resistor aR es un potenciómetro que se usa para ajustar la ganancia. La corriente a través de aR es:

$$I = (V_1 - V_2) / aR$$

Fórmula 3.3

Cuando V_1 es mayor que V_2 la dirección es como se muestra en la figura.

La corriente fluye a través de los dos resistores designados por R y el voltaje a través de los tres resistores establecen el valor de V_{sal} , formando la ecuación.

$$V_{sal} = (V_1 - V_2) \cdot (1 + 2 + a)$$

Fórmula 3.4

Así que ahora podemos tener control sobre la ganancia al mover el potenciómetro aR . Sin embargo, la desventaja de éste amplificador diferencial es, que sólo, se puede cargar con cargas flotadas. Estas cargas flotadas no tienen ninguna terminal conectada a tierra. Para impulsar cargas a tierra debe agregarse un circuito que convierta un voltaje diferencial de entrada en un voltaje de salida de extremo único. Dicho circuito es el amplificador diferencial básico. Y la configuración resultante es el amplificador de instrumentación.

Para simplificar su análisis debe observarse que el amplificador de instrumentación en realidad se hace conectando un amplificador reforzado y un amplificador diferencial básico. El amplificador 3 o el amplificador diferencial básico de salida, tiene ganancia 1, puesto que los resistores son de valor idéntico.

El resistor marcado como R_0 es un potenciómetro usado para eliminar cualquier voltaje en modo común. Y sólo un resistor aR se usa para variar y establecer la ganancia de acuerdo con la ecuación.

$$V_{sal.} = (V_1 - V_2) \cdot (1 + 2a)$$

Fórmula 3.5

donde: $a = aR/R$

V_1 se aplica a la entrada positiva (+) y V_2 a la entrada negativa (-), $V_{sal.}$ es proporcional a la diferencia entre los voltajes de entrada. Las características del amplificador de instrumentación se resumen como sigue:

- * La ganancia de voltaje, desde la entrada diferencial $(V_1 - V_2)$ a la salida de extremo único, se establece por un resistor.

- * La resistencia de entrada de ambas entradas es muy alta y no cambia conforme se varía la ganancia.

- * $V_{sal.}$ no depende del voltaje común a ambos V_1 y V_2 (voltaje en modo común), sólo a su diferencia. Cabe hacer notar que si el valor del resistor aR es muy alto el valor de $V_{sal.}$ tenderá a ser sólo la diferencia entre V_1 y V_2 sin amplificación.

Los valores de los componentes se muestran a continuación.

| | | | |
|------------------------------|----------|-------|----------|
| A) Resistencias | | | |
| R | 270 | KOhms | 1/4Watt. |
| aR | 100 | KOhms | 1/4Watt. |
| B) Amplificador Operacional. | | | |
| Opam | MC4741CP | | |

Una vez obtenido el voltaje diferencial de los potenciómetros de entrada la siguiente fase del circuito es alimentar ésta diferencia a un oscilador controlado por voltaje (VCO) y a un MOSFET.

Obsérvese las hojas de pruebas en el apéndice E para poder apreciar la exactitud de éste diferenciador.

Cabe hacer notar que el costo de éstos amplificadores es variable, de 5 hasta más de 100 dólares, sin embargo con ayuda de la retroalimentación se puede lograr obtener un comportamiento adecuado o de cierta calidad, con componentes relativamente de bajo costo en relación a los precios anteriores.

3.5 EL VCO

EL OSCILADOR CONTROLADO POR VOLTAJE

En la siguiente figura 3.10 se muestra un circuito temporizador 555 conectado como un oscilador controlado por voltaje. El circuito se denomina convertidor de voltaje a frecuencia, porque la frecuencia de salida depende del voltaje de entrada.

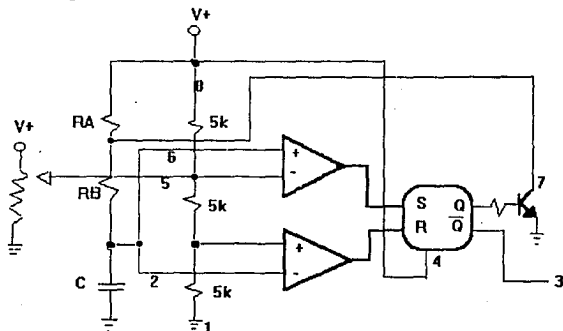


FIGURA 3.10 Circuito 555 como OCV

Para comprender su funcionamiento se analiza el temporizador 555 por dentro y se efectúan las conexiones de la figura anterior.

A.- El voltaje en 5 (control) es ajustable, por el potenciómetro externo.

B.- El voltaje en el capacitor varía así.

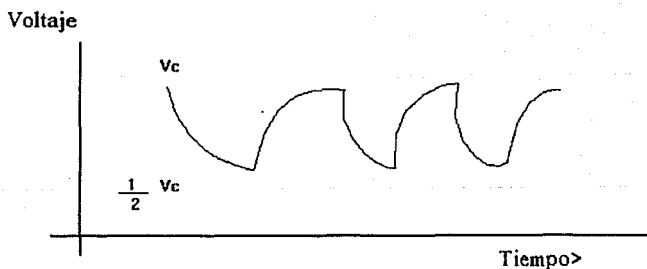


FIGURA 3.11 Forma de onda de carga y descarga del capacitor

Desde $+V_{control} \cdot (1+2)$ hasta $V_{control}$.

Al aumentar $V_{control}$, el capacitor tardará más en cargarse y descargarse por lo tanto la frecuencia disminuye.

C.- La conexión se hace similar a la de un astable.

D.- Si no se conecta nada a la terminal 5 (control).

El circuito se encontrará en modo de operación libre, teniendo la siguiente fórmula para obtener la frecuencia de operación.

$$f = 1.44 / (Ra + 2 \cdot Rb) \cdot C$$

Fórmula 3.6

Los valores de las resistencias y del capacitor se muestran a continuación.

$$Ra = 120\Omega$$

$$Rb = 0 \text{ a } 5K\Omega \text{ (potenciómetro)}$$

$$C = 4.7\mu F$$

Resultando las siguientes frecuencias.

$$f_{max} = 2,550\text{Hz.}$$

$$f_{min} = 60\text{Hz.}$$

Estos valores fueron obtenidos como resultado de prueba y error.

3.5.1 Funcionamiento

Si Q (del flip-flop) está en estado bajo, el transistor está en corte así que C se cargará a través de Ra y Rb, por lo tanto la constante de carga es $C \cdot (R_a + R_b)$, eventualmente el voltaje en el capacitor rebasará los $2+3 V_{cc}$. conmutando la salida del amplificador operacional de menos (-) a más (+) y el amplificador operacional inferior ya estará en menos (-), conmutando así la salida del flip-flop y poniendo Q en estado alto, descargando el capacitor sólo a través de Rb por medio de 7 que está a tierra, la constante de carga ahora será de $C \cdot (R_b)$.

Cuando el voltaje en el capacitor baja a menos de $V_{cc}+3$ el amplificador operacional inferior conmuta, y restablece (reset) a la memoria básica (flip-flop). Cambiando el circuito al estado inicial.

El voltaje de control afecta directamente al amplificador operacional superior al variar el voltaje en la pata inversora. Si el voltaje en 5 (control) es bajo, el capacitor alcanzará rápidamente un valor bajo de voltaje y se iniciará el proceso descrito arriba, y de manera inversa, si el voltaje en 5 (control) es alto, el capacitor, tomará más tiempo en cargarse.

Así pues a menor voltaje menor tiempo y por lo tanto mayor frecuencia, y viceversa.

E.- Cabe aclarar que la salida será rectangular y el ciclo de trabajo se puede calcular con:

$$D = \{(Ra + Rb) + (Ra + 2Rb)\} (100\%) = (W + T) \cdot (100\%) \quad \text{Fórmula 3.7}$$

Para el caso asumiendo los valores anteriores de Ra y Rb.

$$D_{max} = 100\%$$

$$D_{min} = 50\%$$

Cuanto menor sea Ra con respecto a Rb la constante del ciclo de trabajo tiende a 50%.

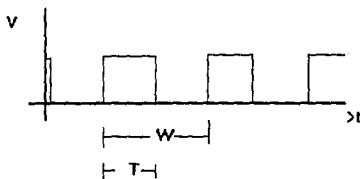


FIGURA 3.12 Ciclo de trabajo

Hasta aquí obtenemos una mayor frecuencia en el V.C.O. partiendo de un bajo valor de voltaje de error. Y una menor frecuencia en el V.C.O. a partir de un valor alto de voltaje de error.

Sin embargo aún no hemos definido concretamente la interfaz con la parte de la potencia.

3.6 El MOSFET

METAL OXIDE SEMICONDUCTOR FIELD EFFECT TRANSISTOR

En realidad solo se trata de dejar pasar una cierta cantidad de corriente de la fuente de DC hacia la bobina del campo del embrague de corrientes de EDDY, durante periodos de tiempo variable provenientes del VCO.

Así que para poder controlar la corriente obedeciendo siempre al voltaje de error (diferencia) se propone usar un MOSFET de canal N en modo de enriquecimiento.

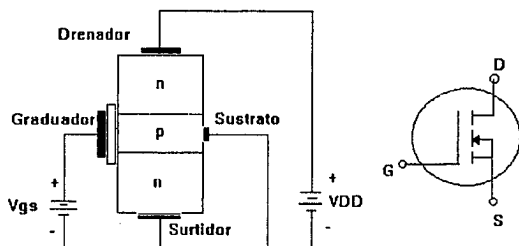


FIGURA 3.13 Símbolo y diagrama de un Mosfet

El símbolo esquemático del Mosfet de enriquecimiento tipo n se puede observar en la figura 3.13 y tiene la línea punteada del canal para indicar la condición de normalmente

no conducción o normalmente apagado. Además la flecha apunta hacia una capa de inversión.

La estructura interna del Mosfet de enriquecimiento tipo n también se muestra en la figura 3.13.

Físicamente no se tiene un canal tipo n entre la fuente (pata S) y el drenaje (pata D).

En la figura se muestran las polaridades de polarización normal. Cuando $V_{GS}=0$, la alimentación V_{DD} trata de forzar el paso de los electrones libres del surtidor al drenador, pero el sustrato tipo p solo tiene unos pocos electrones libres producidos térmicamente en la banda de conducción. Exceptuando por éstos portadores minoritarios y por alguna fuga superficial, la corriente entre el surtidor y drenador es cero. Y para fines prácticos una corriente tan ínfima no puede producir un campo apreciable en el embrague de corrientes de EDDY.

La pata de graduador (G) termina dentro del Mosfet de enriquecimiento tipo n en una placa que a su vez, la separa del sustrato p un dieléctrico, compuesto por óxido de silicio (SiO_2). De manera que actúa como un capacitor.

Cuando el voltaje en el graduador es positivo induce cargas negativas en el sustrato p creando un canal n.

En otras palabras, el graduador o compuerta positivo atrae electrones libres del surtidor o fuente al extremo izquierdo inferior de la región p.

Cuando el graduador es suficientemente positivo, puede atraer suficientes electrones libres para formar una capa delgada de electrones entre el surtidor y el drenador.

Así de ésta manera los huecos cercanos al óxido de silicio se llenan por los que los electrones libres comienzan a obedecer al voltaje V_{dd} que trata de enviarlos del surtidor o fuente hacia el drenador.

Todo tiende siempre a comportarse como lo marca la cantidad de voltaje existente en el graduador. Este voltaje proviene precisamente del amplificador diferencial de instrumentación, así se logrará un canal más estrecho o más ancho dependiendo de la diferencia percibida por el amplificador diferencial de instrumentación.

Este canal permitirá a su vez dejar pasar más o menos corriente siempre obedeciendo o siguiendo al voltaje de diferencia o error.

Finalmente se puede comprender, que ésta cantidad controlada de corriente se alimentará a la bobina para que ella forme un campo equivalente y éste a su vez se traduzca en parnecesario para mover lo suficiente al rollo.

La siguiente figura muestra una familia de curvas para el Mosfet de enriquecimiento tipo n, la curva más baja se denomina curva de umbral, cuando V_{gs} es menor que V_{gs} de umbral, la corriente del drenador es prácticamente cero. Cuando V_{gs} es mayor que V_{gs} de umbral fluye una corriente controlada y cuyo valor depende de V_{gs} .

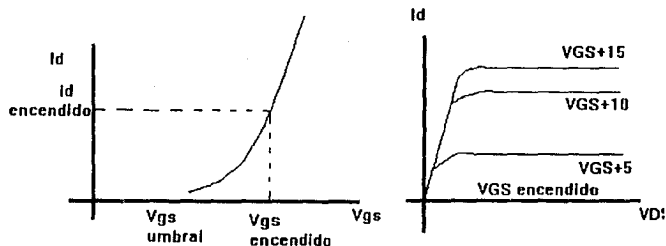


FIGURA 3.14 Curva de transconductancia

Como puede observarse la curva de transconductancia se trata de una relación cuadrática.

El vértice de la parábola está en V_{gs} de umbral (comienzo de conducción).

$$I_d = K(V_{gs} - V_{gs}(\text{umbral}))^2$$

Fórmula 3.8

La constante K depende del Mosfet de enriquecimiento tipo n en particular.

Para el caso:

$$I_d = 8\text{mA}$$

$$V_{gs}(\text{umbral}) = 3\text{V}$$

$$V_{gs}(\text{encendido}) = 5\text{V}$$

Los Mosfet de enriquecimiento tipo n poseen una corriente extremadamente pequeña para alimentar al graduador debido a que éste funciona como un capacitor gracias a la capa de óxido de silicio. Esta capa aislante se hace tan delgada como sea posible, para que el graduador tenga mayor control sobre el canal que comunica al drenador con la fuente. Puesto que la capa de aislante es tan delgada, es fácil destruirla si se aplica un voltaje excesivo entre el graduador y el surtidor.

La capa delgada de aislante puede destruirse también de otras formas que no sea aplicarle un excesivo voltaje de graduador-fuente.

Si se retira o se inserta un Mosfet de enriquecimiento tipo n en un circuito cuando la alimentación está conectada, los voltajes transitorios causados por inversiones inductivas y

otros efectos pueden exceder el voltaje nominal de V_{gs} y dejar inservible el Mosfet de enriquecimiento tipo n.

Incluso tomar el Mosfet de enriquecimiento tipo n con la mano sin estar debidamente aterrizado puede inducirse una carga estática que exceda el voltaje de V_{gs} nominal.

En particular el Mosfet de enriquecimiento tipo n del circuito expuesto posee un diodo zener interno que está conectado entre el graduador y el surtidor para protección.

Algunos autores catalogan al MOSFET como "lo más cercano al interruptor perfecto", a continuación se listan algunas de las características que distinguen al MOSFET de un transistor utilizado como interruptor en cuanto a su desempeño se refiere.

- * Utiliza voltaje como medio de control (en lugar de corriente).

- * Alta impedancia de entrada, de aquí que el circuito de control resulta de muy baja potencia.

- * En las uniones o junturas hay portadores mayoritarios (en lugar de minoritarios) ésto provee una rápida respuesta de interrupción sin demoras por almacenamiento.

* El tiempo de interrupción no depende de la temperatura.

* Coeficiente de temperatura positivo.

No obstante cuando se controla corriente en cargas inductivas, como es el caso, resulta no tan fácil su manejo. Debido a la "inercia" eléctrica de una corriente al circular por una bobina, al realizar una interrupción ésta puede producir un voltaje excesivo a través del MOSFET.

Normalmente cuando por medio de un interruptor se desenergiza un inductor, éste produce alto voltaje y a su vez se induce un arco eléctrico a través de los platinos o contactos del interruptor (que puede ser un arrancador). Esto mismo puede llegar a suceder en las terminales del MOSFET.

Este voltaje puede ser "sujetado" por medio de un circuito tipo "clamp" realizado por dispositivos auxiliares mostrados en la figura 3.16, un circuito tipo "snubber" o amortiguador o de absorción de impactos es normalmente utilizado para resolver dicho problema.

En la siguiente figura 3.15 puede observarse las curvas de comportamiento.

La caída del voltaje en un principio solo llega al voltaje de conducción en el MOSFET, la corriente que circula a través de él y la carga, es constante.

Al cambiar de estado puede observarse la súbita caída de corriente y simultáneamente se forma un transitorio de

voltaje que fácilmente puede llegar a altos niveles y destruir al MOSFET.

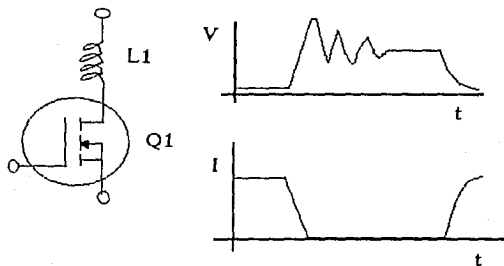


FIGURA 3.15 Curvas de V e I al corte de la conducción

En la figura 3.16 puede observarse la disminución de éste efecto gracias a la red del circuito amortiguador.

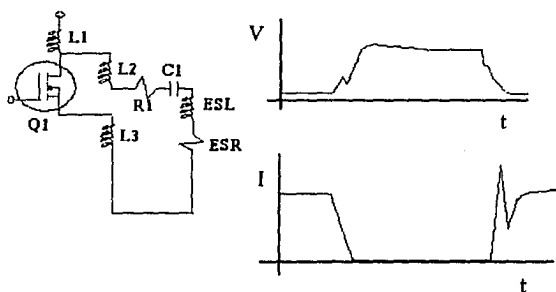


FIGURA 3.16 Red atenuadora y sus efectos

El cálculo del atenuador se resume a continuación.

L1 y L2 son elementos parásitos que no llegan a influir de manera notoria en bajas frecuencias, como el circuito trabaja en un máximo de 2.5 KHz, éstos dos elementos son minimizados.

De manera que C1, ESL y ESR son calculados para cortar a una frecuencia de 3 KHz. Así como R1 para limitar la corriente que fluya a través de la red.

Resultando:

$$C1 = 6.8\mu F$$

$$ESR = 180\Omega$$

$$ESL = 0.8mH.$$

$$R1 = 10\Omega$$

Observe la siguientes figuras 3.17 y 3.18 donde se muestra un diagrama a bloques de la parte electrónica del circuito de control.

El amplificador diferencial de instrumentación, el oscilador controlado por voltaje (VCO) y el MOSFET con su red de amortiguación, obsérvese además el transistor que comunica el voltaje de error al graduador con periodos definidos por el VCO.

El arreglo anterior permite alimentar pulsantemente corriente a la bobina del campo de ensamble del embrague de corrientes de EDDY por medio del MOSFET.

A mayor error tomado en la bailarina con respecto al potenciómetro del operador el amplificador de

instrumentación podrá alimentar mayor voltaje al VCO y al colector del transistor de paso que finalmente está conectado en la compuerta del MOSFET de potencia.

El transistor entrará en saturación y permitirá el paso del voltaje de error hacia el graduador del MOSFET de potencia.

Como resultado se obtendrá en la bobina del embrague, un mayor periodo de aplicación de corriente al campo de ensamble, transmitiéndose en mayor cantidad de par hacia el rollo.

Por otro lado si la diferencia o error de la bailarina con respecto al potenciómetro del operador es menor, un voltaje menor será aplicado al VCO obtenido una frecuencia mayor, ésta frecuencia saturará o cortará al transistor de paso el cual dejará pasar el poco voltaje resultante hacia el graduador.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

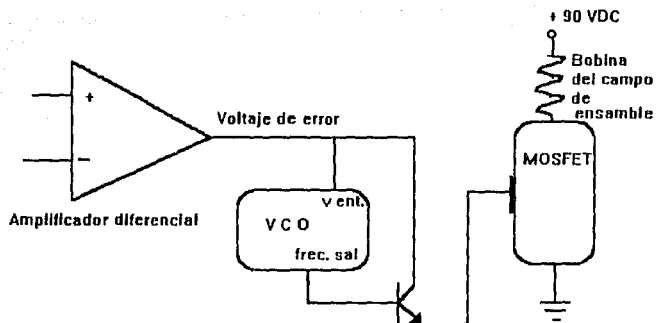


FIGURA 3.17 Diagrama a bloques de la solución propuesta

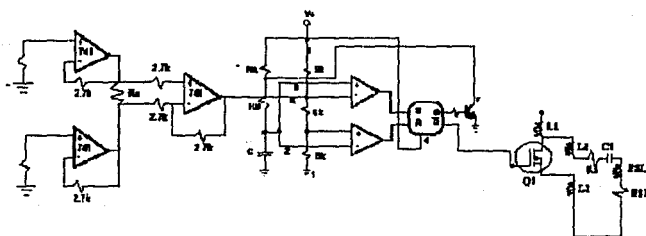


FIGURA 3.16 Solucion integrada

CAPITULO IV Desarrollo de la solución propuesta.

4.1 Esquema general.

El circuito no se desarrolló hasta sus últimas consecuencias por diversas causas ajenas, sin embargo, realicé adelantos que yo catalogué como pertinentes para fin de hacer más tangible la posibilidad del reemplazo de los controles de éste como de futuros usuarios del embrague de corrientes de Eddy.

El circuito trabajó de manera adecuada en el prototipo que se desarrolló en el laboratorio, parte de las pruebas pueden encontrarse en el apéndice E.

Se realizó un diagrama de flujo explicativo con cada una de las partes que constituyen al circuito, tanto para ponerlo a funcionar adecuadamente como para encontrar errores, o saber si efectivamente se encuentra dañado, (detección de errores de hardware), si éste fuera el caso ese mismo diagrama ayuda a identificar la parte del circuito que se encuentra dañada.

4.2 Ventajas

Algunas ventajas y beneficios del uso de dispositivos eléctricos para variar la velocidad de motores de CA se listan a continuación.

- 1.- Control del arranque -Limitan la corriente de arranque.
-Reducen los disturbios en la línea, al energizar.

- 2.- Control de la aceleración
-Arranque suave.
-Aceleración ajustable basada en tiempo o carga.
-Reducción de Hp requeridos para la aceleración.

- 3.- Velocidad de operación ajustable
-Habilita la posibilidad de optimizar el proceso.
-Cambios durante el proceso.
-Ahorro de energía.
-Permite arrancar procesos con velocidad reducida.

- 4.- Control de paro.
-Frenado suave.
-Paro de emergencia.

4.3 Futuro.

En México se venden alrededor de 50 controles nuevos al año, a razón de 1500 a 5000 dólares dependiendo del tipo y capacidad del control. Así que el futuro del circuito en la industria Mexicana depende de un estudio en los sistemas de embrague de cada aplicación en particular.

Existen aplicaciones con embragues de corrientes de Eddy para los siguientes campos:

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| Ventiladores | Centrífugos |
| Compresores | Bombas de desplazamiento positivo |
| Extrusores | Alimentadores |
| Mezcladores | Máquinas de enrollado |
| Generadores | Estampados |
| Cortadores | Formado de vidrio |

Y muchas otras aplicaciones donde se necesite variar la velocidad con torque constante o variable.

En todas ellas se utilizó algún método de variación.

4.4 Costo.

Lista de partes:

| Partida | Cantidad | Descripción | Costo aprox.total. |
|---------|----------|--|--------------------|
| 1 | 1 | Transformador de 110 VCA a 36 VCA 100 VAs | 32,000.00 |
| 2 | 1 | Puente rectificador de onda completa. 3 Amps. | 2,300.00 |
| 3 | 1 | LM317T Positivo Regulador de voltaje de 1.2 a 37 V 1.5 Apms. | 1,700.00 |
| 4 | 1 | LM337 Negativo Regulador de voltaje de 1.2 a 37 V 1.5 Apms. | 1,700.00 |
| 5 | 2 | Capacitores cerámicos 0.1 μ F | 500.00 |
| 6 | 4 | Capacitores electrolíticos 1000 μ F 16 Volts | 2,000.00 |
| 7 | 3 | Presets de 5K Ω . | 2,800.00 |
| 8 | 2 | Presets de 100 K Ω . | 1,000.00 |
| 9 | 4 | LEDs Diodos emisores de luz. | 2,000.00 |

| Partida | Cantidad | Descripción | Costo aprox. total. |
|---------|----------|--|---------------------|
| 10 | 1 | MC4741CP 4 Amplificadores Operacionales. | 2,700.00 |
| 11 | 1 | μ A555TC Circuito de tiempo configurado para VCO. | 1,600.00 |
| 12 | 15 | Resistencias de $\frac{1}{2}$ Watt Varios valores | 7,500.00 |
| 13 | 1 | MOSFET DE CANAL N de potencia hasta 12 Amps. EGC 66 | 25,000.00 |
| 14 | 1 | Tabla fenolica | 5,000.00 |
| 15 | 2 | Resitencias 2 Watts | 1,000.00 |

Totalizando

88,800.00 MN.

(Precios en el mes de mayo de 1989)

CONCLUSIONES

El sistema de impulsión explicado con anterioridad tuvo mucho éxito debido a que es un sistema muy versátil para el control de variación de velocidad, además de su casi nulo mantenimiento, hoy en día existen equipos aún en operación. Sin embargo estos equipos ya no se fabrican, las compañías constructoras de dispositivos de variación de velocidad han encontrado nuevos caminos que la tecnología ha ido abriendo. Hoy en día se pueden encontrar sistemas de variación de la velocidad conocidos como inversores o "drives".

Es cierto que la tendencia para los controles de velocidad de motores de CA, está en manos de poderosos microprocesadores dentro de los novedosos inversores. Sin embargo existen equipos de impulsión con embragues de corrientes de Eddy, que continúan trabajando.

El circuito de control es cada vez más difícil de conseguir y por lo tanto es también más costoso conforme pasa el tiempo, debido a que las compañías que se dedicaban a manufacturar estos mecanismos están proponiendo desechar estos controles y poner los inversores.

Es por esta razón que la aportación del presente trabajo se valora como una solución alternativa para la inversión, o reposición de nuevos mecanismos de variación de velocidad.

Los embragues de corrientes de Eddy presentan ventajas con respecto a los otros sistemas y bien vale la pena realizar un análisis de su implementación para una aplicación de control de velocidad.

GLOSARIO:

Gramaje: Es la cantidad de gramos que puede pesar diferentes tipos de papeles dependiendo de la calidad y del uso que se les de. Generalmente se mide en gramos/metro cuadrado.

Capstan: Es el conjunto de tracción de una grabadora-reproductora que se compone de un cilindro de plástico suave y un vástago metálico, al poner a funcionar la reproductora entra en contacto el cilindro y oprime contra el vástago a la cinta. El cilindro es movido a velocidad constante.

Plecado: Es la perforación, que nos permite desprender o cortar a la medida las hojas.

Es un corte parcial de diferentes tamaños las hojas.

APENDICE A

Demostración de la fórmula de carrera libre
del V.C.O.

$$\text{Partiendo de : } v=V_i+(V_f-V_i)(1-e^{-t/RC})$$

$$2+3(V_{cc})=V_{cc}+3 + (V_{cc}-V_{cc}+3)(1-e^{-t/RC})$$

$$2+3(V_{cc})-V_{cc}+3=(V_{cc}-V_{cc}+3)(1-e^{-t/RC})$$

$$1+3=2+3(1-e^{-t/RC})$$

$$e^{-t/RC}=1/2$$

$$\ln(e^{-t/RC})=\ln(0.5)$$

$$t=(0.6931)RC$$

Como $R_B \gg R_A$ pero se debe tomar en cuenta RC =constante de tiempo para:

$$\text{La carga} \quad (R_A+R_B)C$$

$$\text{La descarga} \quad (R_B)C$$

Un ciclo es:

$$T_{tot}=T_{carga}+T_{descarga}$$

$$T_{tot}=0.6931(R_A+R_B)C+0.6931(R_B)C$$

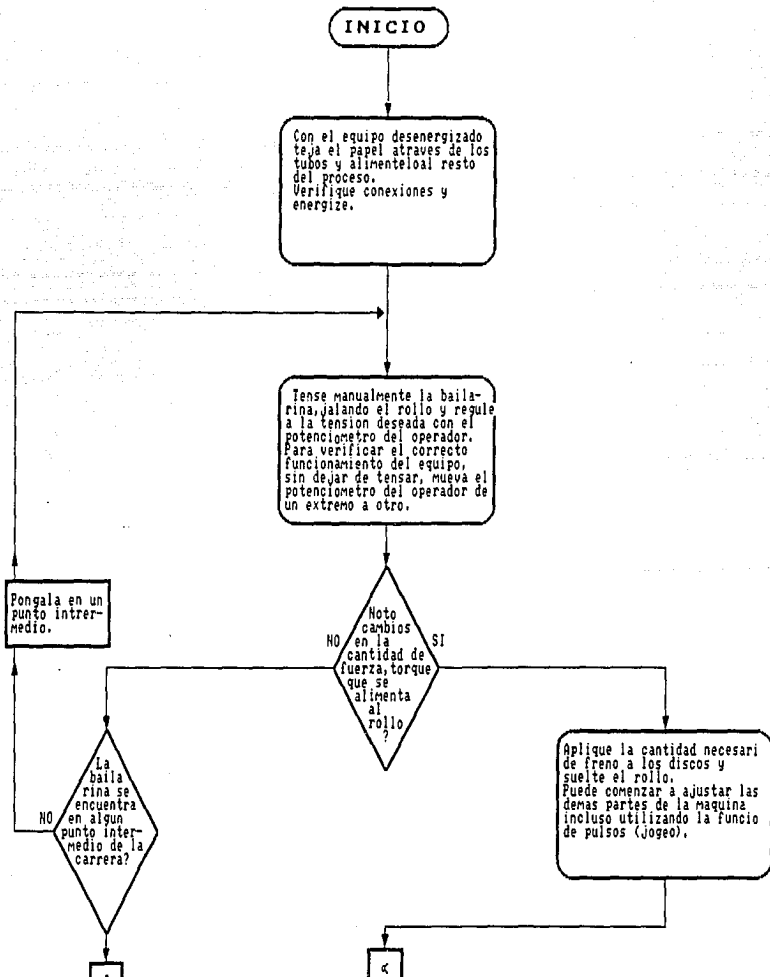
$$T_{\text{tot}} = (0.6931)C(RA + 2*RB)$$

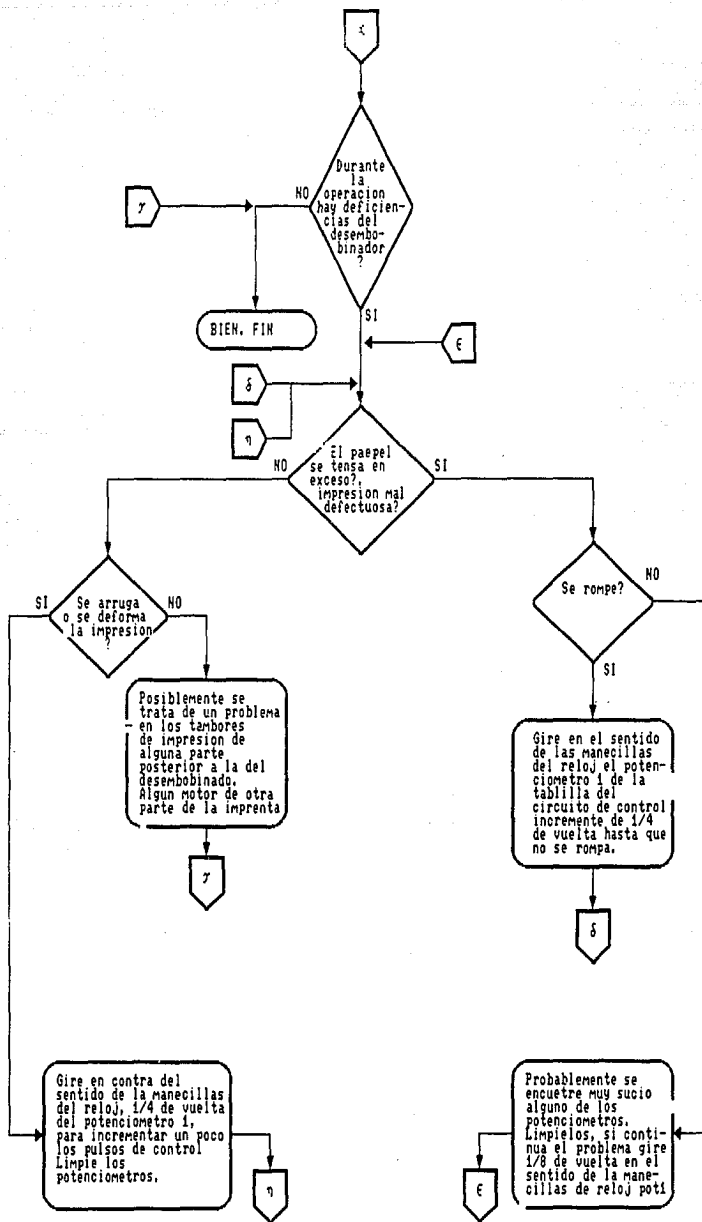
$$f = 1 + T$$

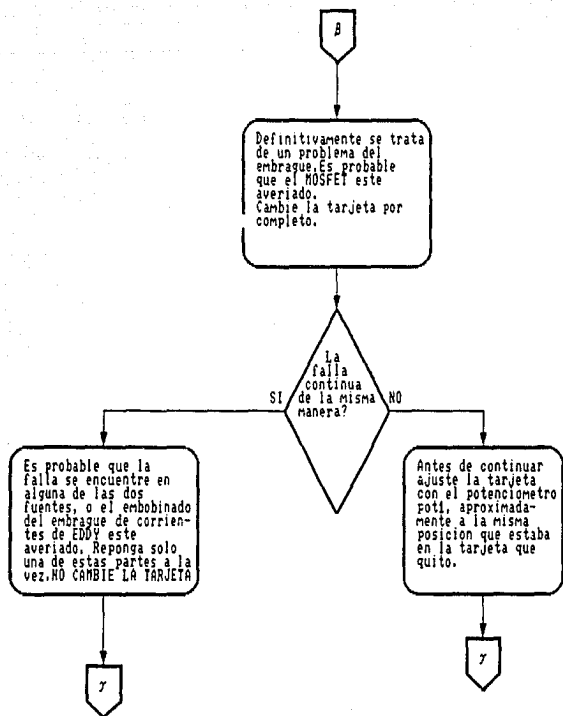
$$f = (1.4427) \div (RA + 2RB)C$$

APENDICE B

Diagrama de flujo detección de errores, puesta en marcha.







APENDICE C

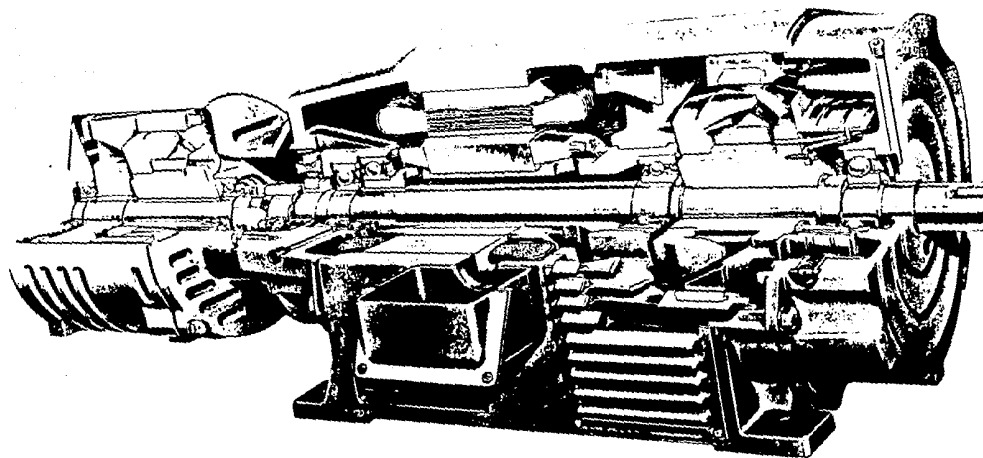
Densidad de algunos materiales

| SUSTANCIA | DENSIDAD (kg+dm ³) |
|-----------|--------------------------------|
| ACERO | 7.85 |
| ALUMINIO | 2.6 |
| BRONCE | 8.0 |
| COBRE | 8.93 |
| HIELO | 0.9 |
| LATON | 8.7 |
| MARMOL | 2.8 |
| PAPEL | 1.1 |
| PLOMO | 11.34 |
| ZINC | 6.86 |

APENDICE D

Embrague OPCION frenado.

En la siguiente lámina se puede observar un corte de un motor con dos embragues de corrientes de Eddy. El exterior es una opción para frenar.



APENDICE E

Resultados pruebas.

En la siguiente lámina se puede observar gráficamente las pruebas realizadas al circuito experimental.

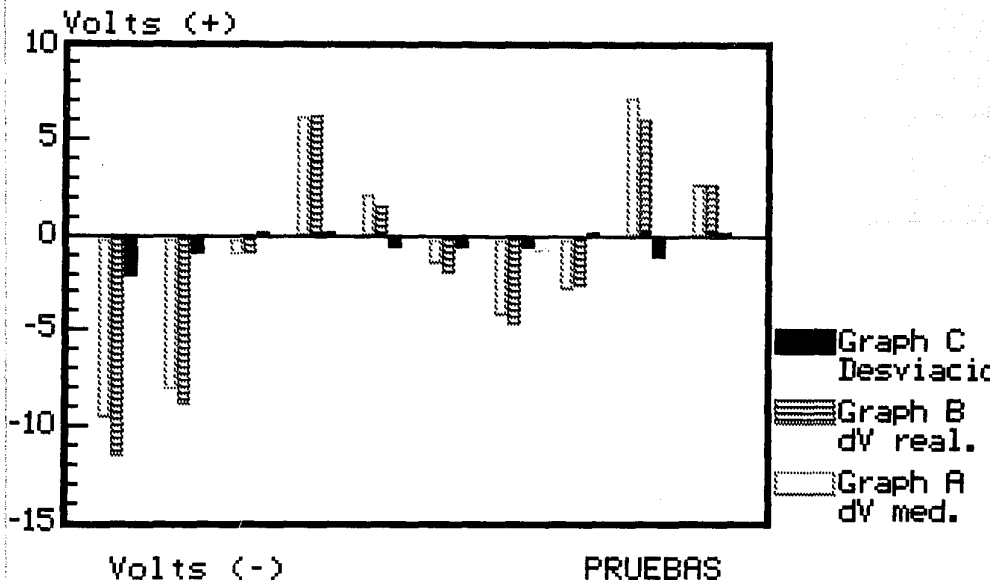
Al variar el voltaje en los extremos del amplificador diferencial de instrumentación.

La grafica A es la diferencia medida en el circuito.

La grafica B es la diferencia real medida con un vólmetro.

La grafica C es la desviación.

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION



Bibliografía.

- 1-Ogata Katsuhiko Ingeniería de control moderna
Ed. Prentice Hall 1980 902 p.
- 2-Boylestad Robert Electrónica teoría de circuitos.
Ed. Prentice Hall 1986 784p.
- 3-Ross Forman Fundamentos de ingeniería de control
- 4-Gordon Lewis Feedback control modes.
Chemical engineering Agosto 1983
- 5-Siemens Einführung in die elektronische
regelungstechnik Aktiengesellschaft.
Ed. Marcombo S.A. Barcelona 1986
- 6-Krieger Robert Guía de electrónica práctica.
Ed. McGraw-Hill 1986 222 p.
- 7-Radio Shack Understanding Electronic control of
energy systems.
Dallas Texasinstruments learning center.
- 8-Dorf Richard Sistemas automáticos de control.
Ed. Addison-Wesley iberoamericana 1986
- 9-D'Azzo John Linear control system analysis and
design conventional and modern.
Ed. McGraw-Hill 1988 906p.
- 10-Signéticos analog Aplications Manual
Phase locked loops.
- 11-Coughlin Robert Circuitos integrados lineales y
amplificadores operacionales.
Ed. Prentice Hall 1987. 394p.
- 12-Malvino Paul. Principios de electrónica.
Ed. McGraw-Hill 1986.
- 13-Distefano III Retroalimentación y sistemas de control
Ed. McGraw-Hill 1982 372p.
- 14-Taub Herbert Digital integrated electronics.
Ed: McGraw-Hill, 1985 650p.
- 15-Benjamin C. Kuo Sistemas Automáticos de control.
Ed. C.E.C.S.A. 1983, 663p.
- 16-Tarter Principles solid state Power Conversion.
Sam's Books.