

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CONTROL DE VELOCIDAD Y TENSION EN UN  
INTERPRETADOR DE RADIOGRAFIAS**

**POR**

**ING. FRANCISCO AGUSTIN VAZQUEZ ESQUIVEL**

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL**

**Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.  
Junio 2002.**

TM  
TJ225  
.V39  
2002  
c.1

70117

COMITRÓL DE VELOCIDAD Y TRANSMISIÓN EN UN  
CARRERA

F.A.V.E



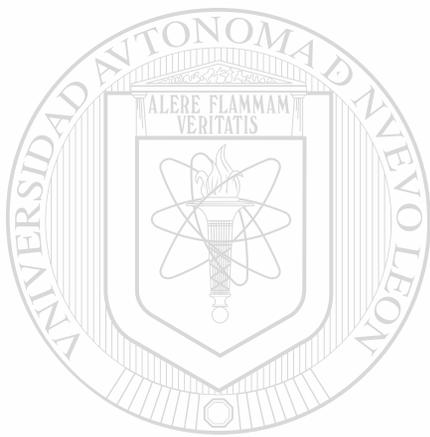
# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

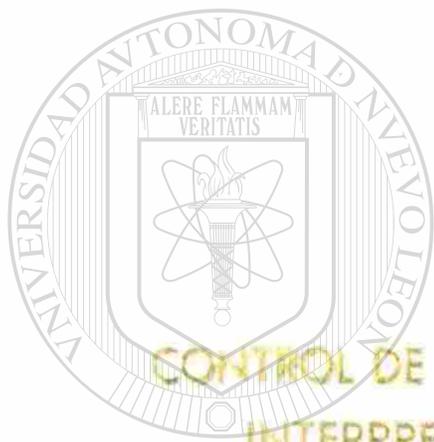


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CONTROL DE VELOCIDAD Y TENSION EN UN  
INTERPRETADOR DE RADIOGRAFIAS

UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

POR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ING. FRANCISCO AGUSTIN VAZQUEZ ESQUIVEL

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

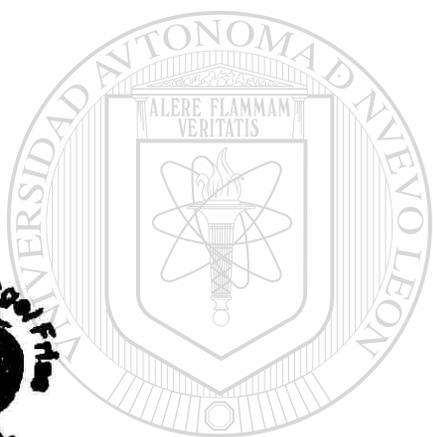
Junio 2002

7M

TJ225

.V39

2002



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

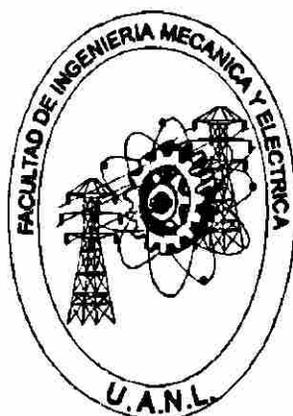
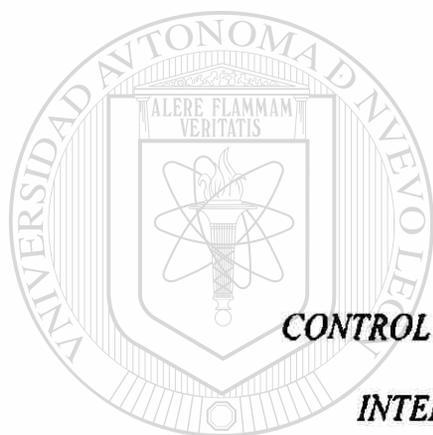


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



*CONTROL DE VELOCIDAD Y TENSION EN UN  
INTERPRETADOR DE RADIOGRAFIAS*

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
POR  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ING. FRANCISCO AGUSTIN VAZQUEZ ESQUIVEL

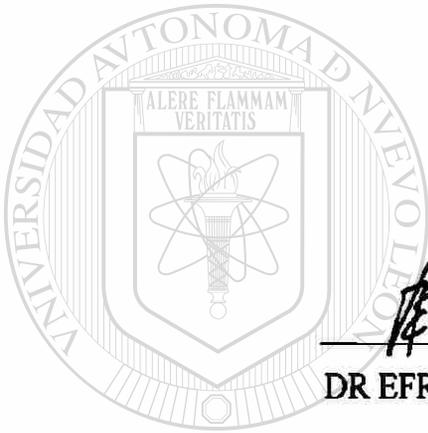
TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA  
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza Nuevo León.  
Junio 2002.

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**División de Estudios de Post-Grado**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Control de velocidad y tensión en un interpretador de radiografías”, realizada por el alumno Ing. Fco. Agustín Vázquez Esquivel matrícula 1069311 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.



El comité de Tesis

**DR EFRAÍN ALCORTA GARCÍA**  
Asesor

**DR. CÉSAR ELIZONDO GONZÁLEZ**  
Coasesor

**M.C. CORNELIO POSADAS CASTILLO**  
Coasesor

**DR. GUADALUPE ALAN CASTILLO RODRIGUEZ**  
Subdirector de la División de Estudios de Post-Grado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León; a 7 de Junio de 2002.

# AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero darle las gracias a Dios por haberme permitido dar término satisfactorio a uno de mis muchos objetivos trazados en la vida.

Quiero dedicarle este trabajo hecho con el mayor esfuerzo, a mis padres, que con su amor y ayuda han estado presentes en toda mi carrera. Les dedico este logro más en mi vida esperando que sea motivo de orgullo para ellos.

Muy especialmente dedico a mi esposa este trabajo y le agradezco porque con su paciencia y apoyo incondicional me ha ayudado a concluirlo y a continuar siempre adelante.

A toda mi familia: mis hijos Gaby, Marcel y Antonio, porque con su alegría me dieron la fuerza para seguir adelante; mis hermanas, quienes me brindaron su apoyo a lo largo de mis estudios.

Gracias a todas aquellas personas que con su ayuda y sus consejos también me han apoyado especialmente a mi asesor: Dr. Efraín Alcorta García y a mi amigo y maestro: M.C. Carlos Herrera Pérez.

# PROLOGO

La innovación está asociada fuertemente con la habilidad para mejorar el funcionamiento de un todo. Dentro de la ingeniería, frecuentemente se requieren y se proponen procesos innovadores, en una búsqueda constante de operatividad y funcionalidad.

La ingeniería de control es una más de las áreas, en las que si se logra conjuntar la teoría y la práctica, los conocimientos pueden resultar más provechosos. Así pues, la teoría de control como parte de la ingeniería busca optimizar el desempeño de los sistemas para obtener de ellos el máximo rendimiento posible.

El presente trabajo se ha desarrollado como un caso práctico en el que se ha implementado un sistema de control electrónico analógico a un equipo conocido como interpretador ó visualizador de radiografías. El equipo originalmente contaba con un sistema de accionamiento semiautomático, caracterizado como un lazo abierto de control. Esta estructura presenta ciertas desventajas, tales como: un mayor consumo de energía y la no- regulación tanto en la velocidad de movimiento como en la tensión de una tira ó banda transportadora.

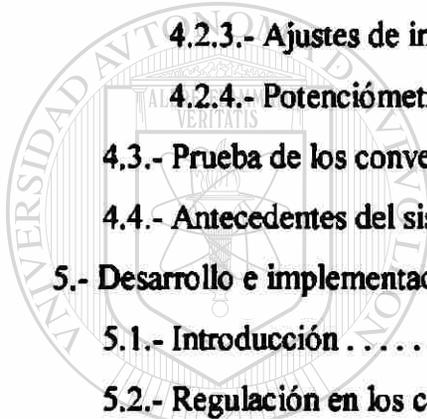
Parte importante en la implementación del modo de control aquí desarrollado se basa en un equipo, que aunque sea por demás conocido en algunas otras aplicaciones, se le da un uso muy particular.

Este trabajo también va dirigido a estudiantes cuya licenciatura es cursada en el área de ingeniería eléctrica y de control, ya que se abordan conceptos interesantes dentro del tema de control de máquinas eléctricas. Por lo tanto se espera que el presente estudio y desarrollo físico del mismo contribuyan hacia todos aquellos interesados en estos temas.

# INDICE

Capítulo	Página
Síntesis .....	1
1.- Introducción .....	3
1.1.- Descripción del problema .....	3
1.2.- Objetivos de la tesis .....	4
1.3.- Hipótesis .....	4
1.4.- Límites del estudio .....	4
1.5.- Justificación del trabajo de tesis .....	5
1.6.- Metodología .....	5
1.7.- Revisión bibliográfica .....	5
2.- Fundamentos y terminología .....	7
2.1.- Introducción .....	7
2.2.- Conceptos básicos .....	8
2.2.1.- Modelado de sistemas .....	8
2.2.2.- Características de un sistema lineal de control de tiempo continuo .....	9
2.2.3.- Respuesta en el tiempo de sistemas continuos .....	12
2.2.4.- Sistemas de segundo orden .....	13
2.2.5.- Representación de sistemas en el dominio de la frecuencia ...	15
2.3.- Control de velocidad en motores de corriente directa .....	17
2.3.1.- Principios de funcionamiento y operación .....	18
2.3.2.- Convertidores de modo conmutado de corriente directa .....	21
3.- Modelado del sistema .....	28
3.1.- Introducción .....	28

3.2.- Datos de los componentes eléctricos y mecánicos . . . . .	29
3.2.1.- Especificaciones de los motores eléctricos . . . . .	29
3.2.2.- Especificaciones de los reductores de velocidad y rodillos . . . . .	30
3.2.3.- Especificaciones de los convertidores . . . . .	30
3.3.- Modelado del sistema a controlar . . . . .	31
3.4.- Modelado del sistema completo. . . . .	37
4.- Características y antecedentes del sistema de control . . . . .	40
4.1.- Generalidades del sistema de control. . . . .	40
4.2.- Descripción y características de los convertidores modelo PRD-2. . . . .	41
4.2.1.- Descripción general . . . . .	42
4.2.2.- Conexiones y encendido inicial . . . . .	43
4.2.3.- Ajustes de instalación. . . . .	45
4.2.4.- Potenciómetros de ajuste . . . . .	46
4.3.- Prueba de los convertidores. . . . .	48
4.4.- Antecedentes del sistema de control . . . . .	49
5.- Desarrollo e implementación del sistema de control . . . . .	52
5.1.- Introducción . . . . .	52
5.2.- Regulación en los convertidores . . . . .	53
5.2.1.- Funcionamiento del límite de corriente . . . . .	55
5.2.2.- Conexiones . . . . .	60
5.3.- Circuito de accionamiento. . . . .	63
5.3.1.- Conexiones. . . . .	67
5.4.- Operación del sistema . . . . .	70
6.- Conclusiones y Recomendaciones . . . . .	72
6.1.- Conclusiones . . . . .	72
6.2.- Recomendaciones . . . . .	73
Bibliografía. . . . .	75
Listado de figuras. . . . .	76
Glosario . . . . .	78
Anexos . . . . .	81
Resumen Autobiográfico . . . . .	105



UANI

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## SINTESIS

Un interpretador o visualizador de radiografías es un equipo utilizado para observar una serie de radiografías clínicas en hospitales o centros médicos. En particular el equipo descrito en este trabajo es un aparato cuya marca es "Radx Corporation" y está disponible en el laboratorio de control de ésta Facultad .

El funcionamiento del interpretador de radiografías está basado en un sistema electromecánico de movimiento. Este sistema desplaza una banda larga enrollada en uno de dos carretes y sujeta al otro. Una vez seleccionada la velocidad y sentido de movimiento se hacen girar los carretes mediante la acción de un motor controlado por una tarjeta electrónica. En total el interpretador de radiografías cuenta con dos motores de corriente directa (cada uno responsable de un sentido de giro) y sus respectivos circuitos de control. Las radiografías son montadas sobre la banda y pasadas a contra luz para su interpretación.

Después de contar con un accionamiento semi-automático, en el que no se controlaba la velocidad, se implementa y diseña un control automático para dar ventajas a dicho aparato; entre las cuales están la compensación a cambios de carga como el sobrecarreo, el ahorro de energía, y propiamente la regulación de velocidad y de tensión en la banda.

# 1 INTRODUCCION

## 1.1.- Descripción del Problema.

La facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, adquirió un dispositivo llamado interpretador de radiografías, conformado por una mesa, un panel de iluminación y un mecanismo electromecánico, por medio de los cuales se permite revisar radiografías clínicas de manera semi-automática.

Este dispositivo de marca “Radx Corporation”, y modelo “200-A”, que se encuentra en el departamento de Ingeniería de Control de ésta Facultad, no cuenta con un sistema de control automático que pueda optimizar su funcionamiento.

El mecanismo con que trabaja, consiste en dos rodillos que giran a velocidad fija movidos por dos motores eléctricos, de tal forma que uno de los rodillos enrrolla la banda en la cual se colocan las radiografías mientras que el otro va desenvolviendo dicha tira. La banda va desplazando las radiografías a través del panel de iluminación en el cual pueden ser observadas.

Uno de los motores actúa como freno dinámico fijo, mientras que el otro gira a velocidad constante, lo que hace que la tensión de la banda permanezca constante.

Dentro de su funcionamiento no existe la posibilidad de adelantar o regresar con mayor rapidez por parte del usuario, la banda que sostiene las radiografías en caso que

así lo requiera al existir una urgencia. Además la velocidad de avance o retroceso de la banda, no es regulada automáticamente. En base a esta última desventaja, el sistema se considera como un sistema de control de lazo abierto ya que no incluye retroalimentación de la variable controlada.

Por lo tanto al ocurrir un cambio de carga, como el sobreacarreo; o una perturbación, como el cambio en algún factor externo o interno del sistema; su desempeño se ve definitivamente afectado.

También como consecuencia de estos problemas se presenta un mayor consumo de energía eléctrica y un considerable tiempo de espera en el paso de las radiografías.

## 1.2.- Objetivos de la tesis.

- Diseñar e implementar un controlador para un sistema multivariable y con acoplamiento.
- Verificar experimentalmente la teoría del control robusto de sistemas multivariables.

## 1.3.- Hipótesis.

Es posible satisfacer especificaciones propias de diseño en el manejo de un equipo interpretador de radiografías mediante un control electrónico analógico, logrado mediante convertidores conmutados de corriente directa; así como favorecer su desempeño.

## 1.4.- Límites del estudio.

El estudio se realiza de manera integral, tal como se haría en un caso práctico. No se pretende encontrar el controlador óptimo entre todos, sino que mediante el uso de técnicas clásicas de control, encontrar un diseño que mejore el funcionamiento de éste equipo interpretador de radiografías, considerando las características de los elementos con que cuenta actualmente.

### 1.5.- Justificación del trabajo de tesis.

El paso rápido de las radiografías con gasto de energía óptimo requiere el doble control de velocidad y tensión en la banda, lográndose así hacer más eficiente el uso y manejo del equipo.

Al realizar éste trabajo, se consigue aplicar los conocimientos adquiridos, desarrollar habilidades de análisis y mejorar la capacidad en el manejo de problemas prácticos.

Además de que con el sistema de control implementado, es posible utilizar el equipo para fines didácticos hacia aquellos alumnos que cursen su Ingeniería en la especialidad de Control ó para futuros diseños e investigaciones.

### 1.6.- Metodología.

- Recolección de datos de los motores del equipo.
- Adaptación y prueba de los convertidores, para ambos motores.
- Desarrollo del modelo matemático del sistema.
- Análisis de las características del equipo y de las posibilidades de control.
- Prueba del equipo.
- Implementación del control desarrollado.
- Ajustes del diseño.
- Propuesta definitiva.

### 1.7.- Revisión bibliográfica.

- Gomáriz Castro, Spartacus; Biel Solé, Domingo; Matas Alcalá, José; Reyes Moreno, Miguel.

*Teoría de control. Diseño electrónico.*

Grupo Alfaomega S.A. de C.V./ Ediciones UPC. 1999.

De aquí se han seleccionado los conceptos básicos descritos en el capítulo dos, particularmente lo que es el concepto de lazo cerrado y lazo abierto, ganancia de lazo, sistema de primer y segundo orden, y parte de respuesta temporal de sistemas continuos.

En esta obra también pueden encontrarse temas relacionados a los amplificadores operacionales utilizados como reguladores. Estos temas son incluidos en el capítulo cinco que corresponde al desarrollo del sistema de control.

- Ogata, Katsuhiko.

*Ingeniería de control moderna. 3ª. Edición.*

Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. 1998.

De esta obra también se seleccionan conceptos básicos, especialmente sobre respuesta en el tiempo de sistemas lineales, modelado de un mecanismo reductor de velocidad y de un motor de corriente directa controlado por armadura.

- Richardson, Donald V.; Caisse, Arthur J. Jr.

*Máquinas eléctricas rotativas y transformadores. Cuarta Edición.*

Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. 1997.

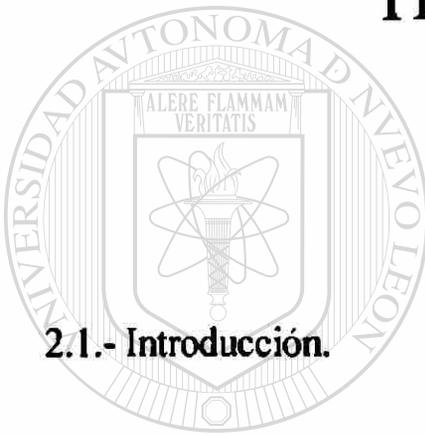
De esta obra se han considerado los conceptos básicos en lo que respecta a motores de corriente directa y sus métodos de control, en particular el análisis de un motor de corriente directa en derivación y su control de velocidad por voltaje de armadura. También se han extraído los fundamentos respecto a los convertidores conmutados de corriente directa empleados en el control de velocidad de estos motores.

- PolySpede Electronics.

*PRD – 2. Single phase half-wave regenerative DC motor control. Basic Manual.*

Este es un manual en el que se describe la instalación y puesta en marcha de convertidores electrónicos conmutados marca “poly-spede”, para el control de motores de corriente directa. Prácticamente esta información se ha tomado en forma completa ya que en ella se detalla todo acerca de un convertidor de este tipo, desde su instalación hasta ajustes especiales y posibles modificaciones. Se han considerado de manera particular los puntos relacionados al conexionado y operación en circunstancias y aplicaciones normales de servicio. El resto de la información es agregada en los anexos quedando disponible al lector.

## 2 FUNDAMENTOS Y TERMINOLOGIA.



### 2.1.- Introducción.

En el presente capítulo se abordan temas necesarios para el estudio de este trabajo.

Primeramente se mencionan algunos conceptos básicos de la teoría de control en lo que se refiere a lazo abierto y lazo cerrado, sistemas de segundo orden, respuesta en el tiempo y la representación en el dominio de la frecuencia. También se habla de las características más importantes en el funcionamiento de los motores de corriente directa. Estos temas están dados de manera quizás simplificada ya que en esta área de estudio pueden ser por demás conocidos, sin embargo necesarios como un fundamento sólido en aplicaciones prácticas.

Así mismo se contempla también una descripción del funcionamiento y modo de operación de los llamados “convertidores conmutados”, utilizados en el control de velocidad de maquinas eléctricas, particularmente para motores de corriente directa.

## 2.2.- Conceptos básicos.

El estudio de la teoría de control representa una base para la comprensión de los sistemas dinámicos. Dicha comprensión es primordial cuando ha de estudiarse un sistema que deba controlarse eficazmente.

Además como los sistemas de control frecuentemente emplean componentes de muchos tipos ( mecánicos, eléctricos, electrónicos, etc.; y las combinaciones entre ellos); se debe estar familiarizado con los principios y características de una amplia gama de dispositivos.

### 2.2.1.- Modelado de sistemas.

El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su modelo, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación “entrada / salida” permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla. De ésta manera, el diseñador, conociendo cual es la dinámica deseada, ajustará la acción de control para conseguir el objetivo final.

Por lo tanto, un sistema físico puede caracterizarse dinámicamente a través de las ecuaciones diferenciales que describen las leyes físicas que rigen el comportamiento de dicho sistema.

Se debe de tener en cuenta que una descripción completa y precisa del sistema físico puede resultar demasiado compleja y laboriosa; por ello debemos modelar el sistema llegando a un compromiso entre la exactitud y la sencillez requeridas. En cualquier caso se debe garantizar que el modelo obtenido responda a las exigencias iniciales del estudio, pues ello determina el rango de validez de un modelo (por ejemplo: alta frecuencia en un estudio circuital) . De hecho, un modelo será válido mientras se cumplan las hipótesis que han permitido simplificarlo.

### 2.2.2.- Características de un sistema lineal de control de tiempo continuo.

Recordemos que la función de transferencia de un sistema, es la relación que existe entre la transformada de Laplace de la señal de salida con respecto de la señal de entrada, figura 2.1. En el dominio de Laplace y con las condiciones iniciales nulas, tenemos:

$$G_{LA}(s) = \frac{C(s)}{R(s)}, \quad (\text{relación entrada / salida}). \quad (2.1)$$

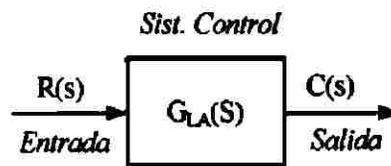


Figura 2.1.- Relación “salida - entrada” en un sistema de control

**Topología en lazo abierto.** Un sistema de control estará formado por diversos sistemas (planta ó proceso, control, elemento de medida, etc.). La topología en sistemas de lazo abierto se observa en la figura 2.2.

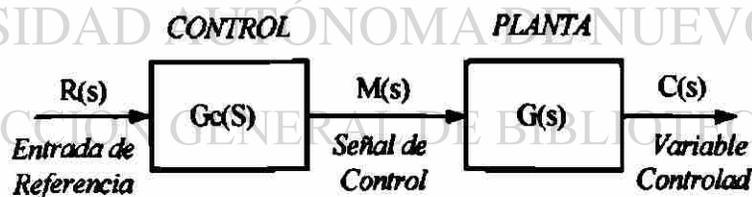


Figura 2.2.- Topología en sistemas de lazo abierto

$$\text{De aquí se obtiene que: } \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{M(s)}{R(s)} \cdot \frac{C(s)}{M(s)} = Gc(s) \cdot G(s), \quad (2.2)$$

es la función de transferencia del sistema.

**Topología en lazo cerrado:** La figura 2.3 muestra el esquema a bloques que representa un sistema de lazo cerrado. El detector de error produce una señal resultante de la diferencia existente entre la referencia de entrada y la señal de salida de realimentación del sistema (realimentación negativa). La señal originada en el detector se denomina señal de error.

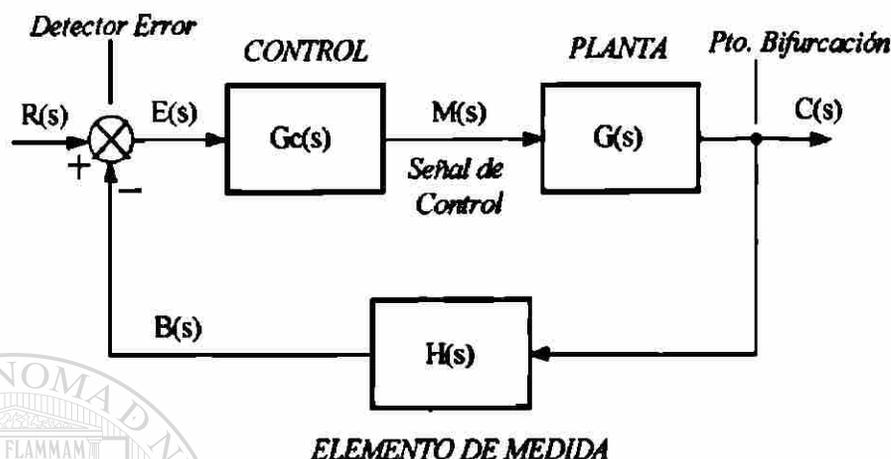


Figura 2.3.- Topología en sistemas de lazo cerrado

El punto de bifurcación permite trasladar la señal de salida al punto de entrada, efectuando así la realimentación deseada.

El elemento de medida es un transductor ó sensor que mide el valor de la señal y adapta la naturaleza de sus características a las necesarias para poder realizar la comparación con la señal de referencia (Ejemplo: No podemos comparar la velocidad de un motor si la señal de referencia es eléctrica, debemos realizar una conversión velocidad-tensión). Generalmente, sus características dinámicas son más rápidas que las propias del sistema que se debe controlar (adquisición de señal mucho más rápida que la dinámica propia del sistema); en este caso se puede considerar  $H(s) = k$ ; en el caso  $k = 1$  se dice que existe realimentación unitaria; si no fuese así, deberíamos considerar las características dinámicas del elemento de medida a través de su función de transferencia  $H(s)$ .

Se definen las siguientes funciones de transferencia:

1.- Función de transferencia en lazo abierto (ganancia de lazo):

$$G_{LA}(s) = \frac{B(s)}{E(s)} = G_c(s) \cdot G(s) \cdot H(s). \quad (2.3)$$

2.- Función de transferencia directa:

$$G_D(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = G_c(s) \cdot G(s). \quad (2.4)$$

3.- Función de transferencia de lazo cerrado:

$$G_{LC}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G(s)}{1 + G_c(s) \cdot G(s) \cdot H(s)} = \frac{G_D(s)}{1 + G_{LA}(s)}. \quad (2.5)$$

Por último, cabe destacar que en el caso para el cual se cumpla que la ganancia de la función de transferencia directa es alta ( $G_c(s) \cdot G(s) \gg 1$ ) y que se posea realimentación unitaria ( $H(s)=1$ ), la señal de salida y la señal de entrada son iguales, lo cual proporciona una robustez muy importante frente a perturbaciones externas y variaciones de parámetros internos.

**Sistema en lazo cerrado sometido a una perturbación:** Considérese el esquema a bloques de la figura 2.4, que representa un sistema de lazo cerrado sometido a una perturbación  $N(s)$ .

Aplicando superposición, se obtiene la señal de salida:

$$C(s) = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \cdot N(s) + \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \cdot R(s). \quad (2.6)$$

Comparando con la salida que se obtendría en lazo abierto:

$$C(s) = G_2(s) \cdot N(s) + G_1(s)G_2(s) \cdot R(s). \quad (2.7)$$

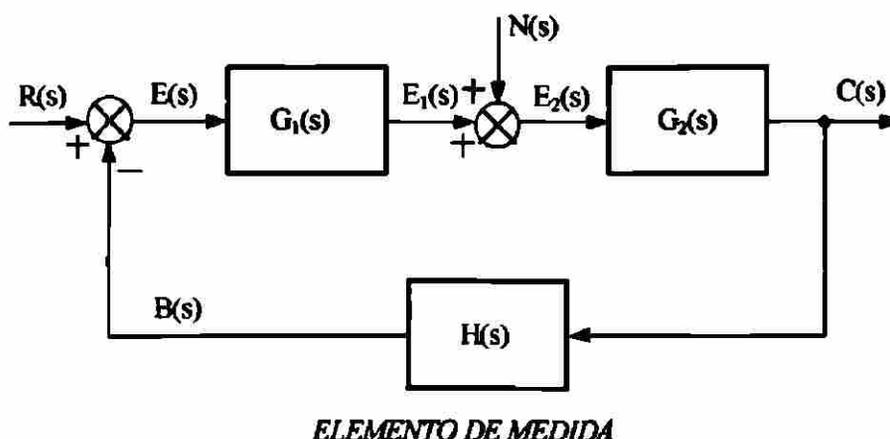


Figura 2.4.- Sistema de lazo cerrado sometido a una perturbación

Se observa como se ha reducido la sensibilidad del sistema frente a perturbaciones externas; en concreto, si la ganancia de lazo es elevada, la señal de salida depende exclusivamente de la función de transferencia de la realimentación.

### 2.2.3.- Respuesta en el tiempo de sistemas continuos.

El primer paso para analizar un sistema de control es obtener un modelo matemático del mismo. Una vez obtenido tal modelo, existen varios métodos para el análisis del desempeño del sistema.

Una manera de caracterizar un sistema, es mediante el uso de señales de prueba. Una señal de prueba es utilizada como entrada y la respuesta del sistema es analizada. Mediante este procedimiento es posible determinar algunas de las características relevantes de los sistemas, sobre todo si se trata de sistemas lineales.

La respuesta temporal de un sistema lineal invariante en el tiempo puede descomponerse en dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta estacionaria. De este modo, si denominamos  $c(t)$  a la expresión de la respuesta temporal:

$$c(t) = c_t(t) + c_{ss}(t), \quad (2.8)$$

en donde:

$C_t(t)$  = Respuesta transitoria.

$C_{ss}(t)$  = Respuesta estacionaria.

La respuesta transitoria es originada por la propia característica dinámica del sistema y determina el comportamiento del sistema durante la transición de algún estado inicial hasta el estado final.

La respuesta estacionaria depende fundamentalmente de la señal de excitación al sistema y si el sistema es estable, dicha respuesta perdura cuando el tiempo pasa infinitamente.

Se define el error en estado estacionario, como la diferencia entre la señal de referencia y la señal retroalimentada en estado estacionario en sistemas estables. Este error coincide con el valor estacionario de la señal originada por el detector de error.

Por otra parte, en sistemas de control, interesa minimizar la desviación de la señal de salida respecto a la señal de entrada en estado transitorio. Por esta razón se caracteriza

la respuesta transitoria respecto a entradas típicas ó estándares, conociendo que, como el sistema es lineal ó linealizable (dentro de un rango de operación), la respuesta del sistema a señales más complejas es perfectamente predecible a partir del conocimiento de la respuesta a estas entradas de prueba generales. Generalmente las entradas típicas son: función impulsional, función escalón, función en rampa y función parabólica en el tiempo.

#### 2.2.4.- Sistemas de segundo orden.

Un sistema de segundo orden se caracteriza por poder almacenar energía en dos formas distintas y por poseer dos polos en su función de transferencia. Su función de transferencia está dada por la siguiente expresión normalizada:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (2.9)$$

en donde:

$\zeta$  = Relación de amortiguamiento.

$\omega_n$  = Frecuencia natural no amortiguada.

Los polos de un sistema de segundo orden vienen determinados por la expresión:

$$s_{1,2} = \zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}. \quad (2.10)$$

En la gráfica de la figura 2.5, se visualiza la ubicación de polos de la función de transferencia en función del valor de  $\zeta$ , en la cual:

Para  $\zeta = 0 \Rightarrow$  Sistema oscilatorio:

$$s_{1,2} = \pm j\omega_n. \quad (2.11)$$

Para  $0 < \zeta < 1 \Rightarrow$  Sistema subamortiguado:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = -\sigma \pm j\omega_n. \quad (2.12)$$

Para  $\zeta = 1 \Rightarrow$  Sistema con amortiguamiento Crítico:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n. \quad (2.13)$$

Para  $\zeta > 1 \Rightarrow$  Sistema sobreamortiguado:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}. \quad (2.14)$$

La respuesta al escalón en un sistema subamortiguado ( $0 < \zeta < 1$ ) es:

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s} \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} c(t),$$

$$C(s) = 1 - e^{-\zeta\omega_n s} \left[ \cos(\omega_d \cdot t) + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \text{sen}(\omega_d \cdot t) \right]; \quad t \geq 0, \quad (2.15)$$

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \text{sen} \left[ \omega_d \cdot t + \text{tg}^{-1} \left( \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right],$$

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \text{sen}[\omega_d \cdot t + \theta]; \quad t \geq 0, \quad (2.16)$$

donde:  $\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right)$ , con lo cual  $\theta$  es el ángulo que forma el polo respecto al origen; de hecho puede expresarse:  $\zeta = \cos \theta$ . En conclusión, a medida que  $\theta$  aumenta la relación de amortiguamiento disminuye. En la gráfica de la figura 2.6, se representa la respuesta al escalón en un sistema de segundo orden.

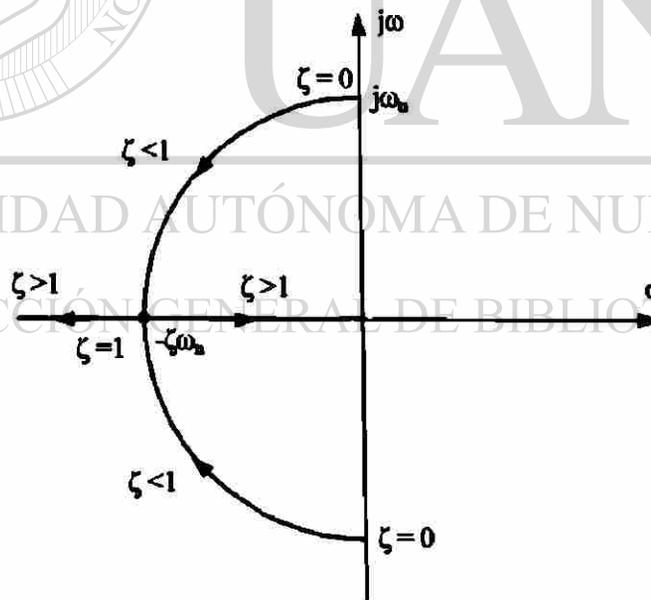


Figura 2.5.- Ubicación de polos en función del valor de  $\zeta$ .

La respuesta del sistema para  $\zeta = 0$  es oscilatoria, como puede comprobarse en esta gráfica (figura 2.6). Por otra parte, se observa que el valor máximo de amplitud logrado en el estado transitorio decrece a medida que aumenta  $\zeta$  ( $0 < \zeta < 1$ ). En concreto, para

valores de  $\zeta \geq 1$  desaparece totalmente este máximo, lográndose el valor máximo de la señal cuando se alcanza el estado estacionario. Esta característica es tanto más acentuada cuando mayor es el valor de  $\zeta$ .

Por lo tanto, si  $\zeta \gg 1$  la respuesta del sistema de segundo orden puede aproximarse por la respuesta de un primer orden, realizándose lo que se conoce como aproximación de polo dominante. La respuesta, en este caso, queda caracterizada por la raíz real de constante de tiempo mayor ( la más cercana al eje imaginario en el plano S ).

Debe observarse que ésta aproximación no puede realizarse cuando se analiza el inicio de respuesta, donde todavía perdura el efecto de la señal originada por la raíz no dominante.

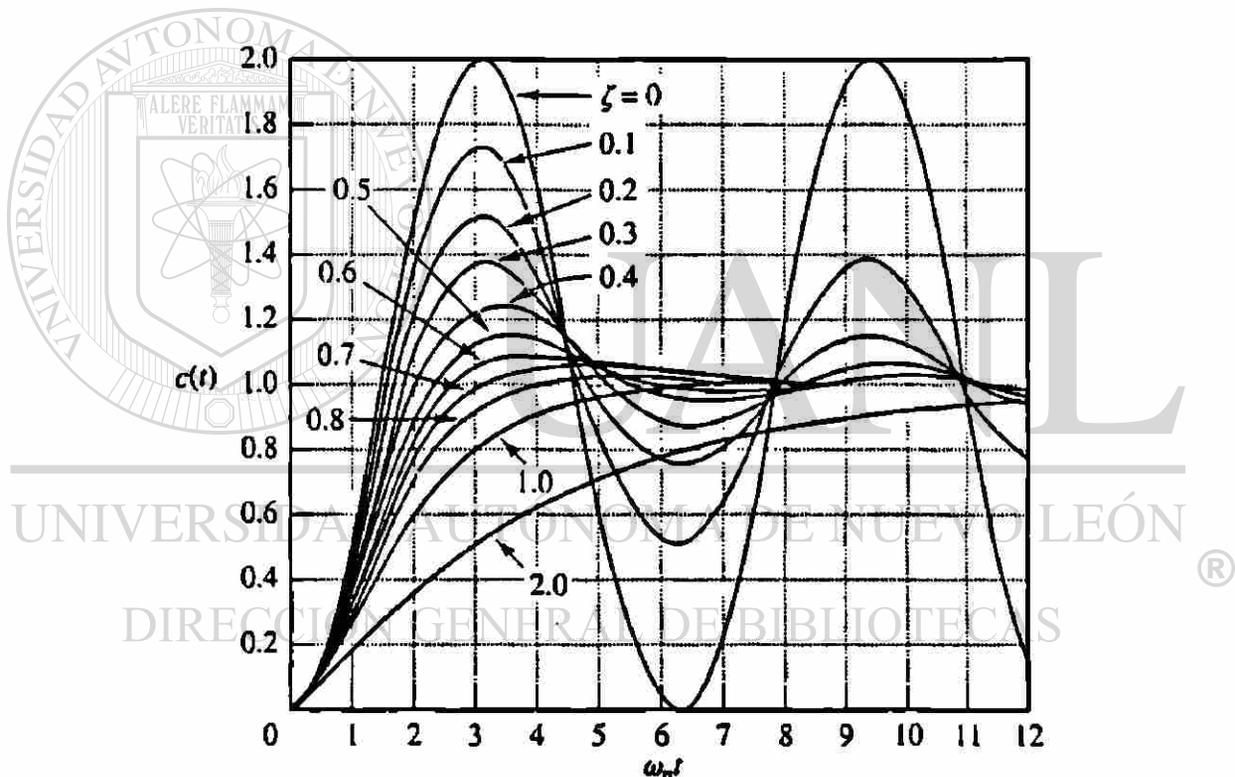


Figura 2.6.- Respuesta al escalón de un sistema de segundo orden.

### 2.2.5- Representación de sistemas en el dominio de la frecuencia.

Cuando un componente ó sistema lineal estable es excitado con una señal de entrada del tipo senoidal, la señal de salida, una vez extinguido el transitorio inicial, tendrá siempre la forma de una onda también senoidal y de la misma frecuencia.

En general, la amplitud de la senoide de salida será diferente respecto a la de entrada y presentará un desfase angular con relación a la misma, obteniéndose por lo tanto, una relación de ganancia entre las amplitudes y un ángulo de fase entre ellas.

Por lo tanto existirá una función de transferencia en el dominio de la frecuencia que proporcione el valor de la ganancia “G” y del ángulo de fase “ $\phi$ ” en función de la frecuencia “ $\omega$ ” y de los parámetros del sistema. Esta función de transferencia se obtiene sustituyendo la variable S por el producto  $j\omega$ . Se simboliza por “G(j $\omega$ )”, la cual representa al sistema mismo en tiempo continuo pero en esta ocasión es función compleja de los parámetros del sistema y de la frecuencia.

Dado el sistema lineal de tiempo continuo de la figura 2.1 sometido a una entrada senoidal, cuya función de transferencia es:

$$C(s) = G(s)E(s), \quad \frac{C(s)}{E(s)} = G(s) \text{ se representa en el dominio de la frecuencia como:}$$

$$G(j\omega) = \frac{C(j\omega)}{E(j\omega)} \quad \text{donde:}$$

$$G(j\omega) = \frac{C(j\omega)}{E(j\omega)} = \text{Cociente de amplitud entre la senoide de salida y la de entrada.}$$

$$\angle G(j\omega) = \angle \frac{C(j\omega)}{E(j\omega)} = \text{Corrimiento de fase de la senoide de salida con respecto a la senoide de entrada;}$$

obteniéndose a partir de esta representación la respuesta a la frecuencia de dicho sistema.

Una de las formas más habituales de representar la función compleja y su respuesta a la frecuencia, es mediante los diagramas ó trazas de Bode, que están formadas por dos gráficas: una es el logaritmo de la magnitud de la función vs. la frecuencia, y la otra es el ángulo de fase vs. la frecuencia. En ambas, se grafica la frecuencia en una escala logarítmica.

La representación común de la magnitud logarítmica de G(j $\omega$ ) es  $20 \log |G(j\omega)|$ , en donde la base del logaritmo es 10, siendo la unidad el decibel. De igual forma el ángulo

de fase se traza sobre una misma escala logarítmica pero independiente, donde las unidades son grados.

El método se basa en aproximaciones asintóticas. Tiene como principal ventaja el hecho de que la multiplicación de magnitudes se convierte en adición.

Los factores básicos que suelen ocurrir en una función de transferencia arbitraria son:

- 1.- La ganancia K.
- 2.- Los factores integral y la derivada  $(j\omega)^{\pm 1}$ .
- 3.- Los factores de primer orden  $(1 + j\omega T)^{\pm 1}$ .

- 4.- Los factores cuadráticos  $\left[ 1 + 2\zeta \left( \frac{j\omega}{\omega_n} \right) + \left( \frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]$

Una vez que se identifican éstos factores y familiarizados con sus trazas logarítmicas, es posible utilizarlas con el fin de construir una traza logarítmica compuesta para cualquier forma de la función de transferencia, trazando las curvas para cada factor y agregando curvas individuales en forma gráfica, ya que agregar los logaritmos de las ganancias, corresponde a multiplicarlos entre sí.

De esta manera, mediante la representación en el dominio de la frecuencia se permite evaluar la gama de frecuencias que afecta al funcionamiento de un sistema así como también analizar su respuesta cuando la descripción de sus partes resulta difícil por medio de ecuaciones diferenciales.

### 2.3.- Control de velocidad en motores de Corriente Directa.

En muchas de las aplicaciones de control, los motores se operan directamente de las líneas de suministro de corriente alterna ó de corriente directa. Es decir, las terminales de los devanados del motor se conectan directamente a las líneas que suministran la corriente eléctrica. En estas situaciones, el comportamiento operativo del motor es determinado por la naturaleza de la carga mecánica conectada al eje del motor. En términos sencillos, si la carga es fácil de manejar, el motor tenderá a entregar un par relativamente pequeño y girará a una velocidad alta. Si la carga es difícil de manejar, el motor tenderá a entregar mucho par y girará a una velocidad menor. El punto es que el

comportamiento operativo del motor es establecido por su carga (para una línea de suministro de voltaje fijo), y el operador no tiene control sobre el comportamiento del motor.

Actualmente, hay muchas aplicaciones que requieren que el operador sea capaz de intervenir en el control de la velocidad del motor. Existen cuatro medios básicos de controlar la velocidad de un motor de corriente directa y cada uno tiene un rango aplicable distinto de efectividad:

- 1.- Control de campo ó más específicamente control de flujo magnético de campo.
- 2.- Control de resistencia de armadura o control de voltaje de armadura disponible por resistencia en serie.
- 3.- Control de resistencia de armadura en serie y en derivación; que utiliza resistencia tanto en serie como en derivación con la armadura.
- 4.- Control de voltaje de armadura, que como su nombre implica, utiliza una fuente de voltaje controlada para la armadura. Esto puede ser en un motor de derivación excitado por separado o en un motor en serie.

### 2.3.1.- Principios de funcionamiento y operación.

Se muestra que las distintas formas de control afectan a cada tipo de motor de manera diferente. Primero es necesario analizar su principio de funcionamiento y las limitaciones de la velocidad de rotación. Un motor de corriente directa de cualquier tipo alcanza una velocidad de equilibrio donde la corriente que se toma de las líneas suministra justo el par suficiente para las condiciones de carga. La corriente se regula por la diferencia entre el voltaje de línea y la fuerza contraelectromotriz, o contravoltaje, que se genera dentro de la armadura en rotación. La fuerza o voltaje contraelectromotriz, a su vez, obedece exactamente la misma fórmula de generación de voltaje que controla un generador. Es decir:

$$E_c = \frac{\Phi \cdot Z \cdot S \cdot P}{60 \cdot a} \times 10^{-8} \text{ Volts,} \quad (2.17)$$

y para unidades del sistema internacional se tiene que:

$$E_c = \frac{\phi \cdot Z \cdot \omega \cdot P}{a} \text{ Volts.} \quad (2.18)$$

En ambos casos, “Z” es el número de conductores por armadura, “P” el número de polos y “a” el número de trayectos paralelos en el devanado. Todos son fijados por la construcción de la máquina y no son ajustables en servicio. De manera similar, en la ecuación de unidades en el sistema inglés, las cantidades  $10^{-8}$  y 60, son constantes de proporcionalidad necesarias para que sean válidas las unidades de la ecuación y no se pueden modificar.

Como consecuencia, las dos fórmulas de generación se transforman en:

$$E_c = K \cdot \Phi \cdot S, \quad (2.19)$$

$$E_c = K \cdot \phi \cdot \omega. \quad (2.20)$$

En donde “S” es la velocidad de la máquina en revoluciones por minuto, y “ $\omega$ ” la velocidad dada en radianes por segundo. Cualquier máquina específica, cuya disposición de devanados y construcción física, sean fijos genera un voltaje que es directamente proporcional a su flujo magnético total y a su velocidad de rotación. En este caso, este voltaje E se considera que es la fuerza contraelectromotriz o contravoltaje, y se identificará como “ $E_c$ ” de modo que:  $E = E_c$ .

También el voltaje del circuito de armadura “ $V_a$ ” menos la fuerza contraelectromotriz. “ $E_c$ ”, iguala exactamente la caída de voltaje  $I_a R_a$  entre las terminales de la armadura, según la ley de Ohm:

$$V_a - E_c = I_a \cdot R_a. \quad (2.21)$$

En donde “ $E_c$ ” es igual a:

$$E_c = V_a - I_a \cdot R_a. \quad (2.22)$$

Recuérdese además, que el voltaje en terminales “ $V_t$ ” es probablemente igual a “ $V_a$ ” si no existe alguna resistencia de arranque que provoque caída de voltaje. Siendo así, entonces:

$$E_c = V_t - I_a \cdot R_a. \quad (2.23)$$

Por lo tanto, durante la acción del motor, “ $E_c$ ” debe ser menor que el voltaje en terminales, ajustándose en forma automática. Esto se puede ver si se combinan las ecuaciones: 2.3, 2.4 y 2.7.

$$E_c = V_t - I_a \cdot R_a = K \cdot \Phi \cdot S, \quad y \quad (2.24)$$

$$E_c = V_t - I_a \cdot R_a = k \cdot \phi \cdot \omega. \quad (2.25)$$

Trasponiendo éstas ecuaciones y despejando la velocidad, tenemos que:

$$S = \frac{E_c}{K \cdot \Phi} = \frac{V_t - I_a \cdot R_a}{K \cdot \Phi}, \quad (2.26)$$

$$\omega = \frac{E_c}{k \cdot \phi} = \frac{V_t - I_a \cdot R_a}{k \cdot \phi}. \quad (2.27)$$

Con base a éstas relaciones, podemos concluir, que la velocidad de rotación de estado estable se puede cambiar modificando ya sea el contravoltaje “ $E_c$ ” ó el flujo “ $\phi$ ”. El flujo se puede cambiar dentro de los límites de la máquina particular como límite alto. El límite bajo de flujo es en realidad el magnetismo residual que la estructura retiene. Sin embargo, si el campo se debilita demasiado, la conmutación se ve afectada y el motor se vuelve inestable. El término de contravoltaje se controla tanto por el voltaje de línea “ $V_t$ ” como por la corriente que toma el motor. Pero la corriente que se requiere está casi directamente relacionada con el par de carga necesario.

Dentro de los diferentes tipos de motores de corriente directa, el que presenta mejores características de regulación de velocidad, es el motor tipo derivación ó con excitación externa; ya que como se recordará, su curva característica, “momento de torsión-velocidad” es la más constante.

Los métodos de control de velocidad por resistencia variable, tienen la desventaja de provocar pérdidas de energía considerables; además de aumentar drásticamente la pendiente de la curva característica “momento de torsión-velocidad”, del motor, cuando ésta se conecta en serie con la armadura.

En cuanto al método de control del flujo magnético del campo, a velocidades muy lentas del motor, un aumento de la resistencia de campo, en realidad disminuirá su velocidad. Este efecto ocurre porque a muy bajas velocidades, el aumento de la corriente de inducido, causado por la disminución del voltaje contraelectromotriz, ya no es suficiente para compensar la disminución de flujo en la ecuación del par inducido ( $\tau_{ind} = k\phi I_a$ ). Con la disminución de flujo realmente mayor que el aumento de la corriente de armadura, el par inducido disminuye y el motor disminuye su velocidad.

Por lo tanto, en motores que operen a bajas velocidades, un incremento en la resistencia de campo, podría no tener efecto ó incluso podría disminuir la velocidad del motor.

Para motores en derivación ó con excitación externa, el control por resistencia de campo se aplica para velocidades superiores a la velocidad base, pero no para velocidades inferiores a ella.

Para el control de velocidad por voltaje en la armadura, cuánto menor sea éste, en caso de un motor en derivación o con excitación externa, más lentamente gira el motor; y cuanto mayor sea el voltaje en el inducido o armadura, más rápido girará. Puesto que un aumento de voltaje al inducido causa un aumento de la velocidad, siempre hay una velocidad máxima alcanzable mediante el control de voltaje en la armadura. Esta velocidad máxima se presenta cuando el voltaje en el inducido o armadura del motor alcanza su máximo nivel permitido.

Si el motor está funcionando a su voltaje, corriente de campo y potencia nominales, estará rodando a la velocidad base. El control de voltaje en el inducido puede controlar la velocidad del motor para velocidades inferiores a la velocidad base, pero no para velocidades superiores a ella. Alcanzar una velocidad mayor que la velocidad base mediante control de voltaje en la armadura requeriría aplicar un excesivo voltaje, posiblemente dañando el circuito de inducido.

Por supuesto, como se mencionó anteriormente, los motores de corriente continua en derivación y también los de excitación externa, son excelentes opciones para las aplicaciones que necesitan grandes variaciones de velocidad, especialmente si éstas deben controlarse con exactitud.

### 2.3.2.- Convertidores de modo conmutado de corriente directa.

Como podrá recordarse, un motor en derivación tiene por lo general su devanado de campo conectado en paralelo con la armadura , pero puede alimentarse desde una fuente totalmente independiente, en cuyo caso la disposición completa se conoce como un motor de corriente directa en derivación excitado por separado. El control de velocidad de estado sólido del motor en derivación se aplica por lo general con el campo excitado por separado.

Considérese el circuito de la figura 2.7, el cual representa un motor de corriente directa en derivación con excitación independiente, tal como el empleado en este

trabajo. El circuito de armadura se muestra con la resistencia “ $R_a$ ” y la inductancia de armadura “ $L_a$ ” en serie con un inductor filtrado, “ $L_x$ ”.

Se muestra un voltaje generado “ $E_c$ ”, en serie con “ $R_a$ ”, “ $L_a$ ” y “ $L_x$ ”; para representar el contravoltaje que se genera dentro de la armadura del motor conforme él mismo gira. El devanado de campo también está compuesto de la resistencia de campo, “ $R_f$ ” y la inductancia del campo, “ $L_f$ ”.

Recordando las ecuaciones 2.26 y 2.27, y además considerando que el par del motor está dado por:

$$T = C \cdot \Phi \cdot I_a \quad 2.28$$

$$\text{ó } t = c \cdot \phi \cdot I_a, \quad 2.29$$

se pueden hacer ciertas observaciones en cuanto a la forma en que se puede controlar la velocidad o el par en una máquina de corriente directa de este tipo.

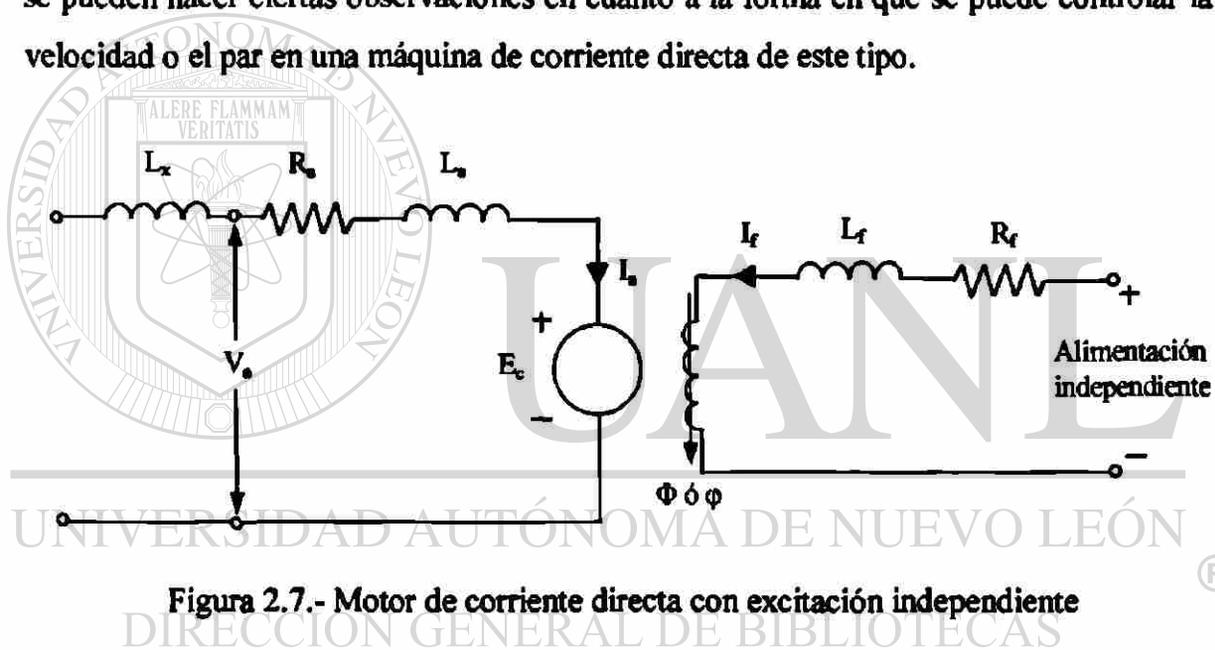


Figura 2.7.- Motor de corriente directa con excitación independiente

Es obvio que el par de un motor de corriente directa en derivación es directamente proporcional a dos variables que son el flujo de campo y la corriente de armadura. “ $C$ ” (ó  $c$ ) en la ecuación 28 ó 29 es una constante. Si el flujo de campo se conserva constante (manteniendo una corriente de campo constante, “ $I_f$ ”) entonces el par que se produce dependerá del valor promedio de la corriente de armadura “ $I_a$ ”. Si tanto el flujo de campo como la corriente de armadura se controlan cada uno a un valor constante, el par será constante.

Considérese que el flujo de campo y la corriente de armadura son ambos fijos, de esta manera supongamos que la corriente de campo fluye a los amperes nominales y la

corriente de armadura a cierto valor abajo del nominal. Con ésta condición , la velocidad de la máquina se puede evaluar con la ecuación 2.26 ó 2.27.

Con " $I_a$ " , " $R_a$ ", " $K$ "(ó " $k$ ") y " $\Phi$ " (ó " $\phi$ " ), todos constantes, la velocidad de la máquina se hace dependiente del valor del voltaje " $V_a$ " ( anteriormente " $V_i$ " ) que se aplica a la armadura. Conforme se incrementa el valor de este voltaje, el valor del numerador de la ecuación (2-26 ó 2.27), aumenta y lo mismo hace, por tanto, la velocidad de la máquina, mientras que se mantiene un par de salida constante. La reducción del voltaje aplicado, " $V_a$ ", mientras se conservan constantes el flujo de campo y la corriente de armadura, da por resultado una velocidad inferior mientras que se mantiene el mismo par constante. Por lo tanto, se puede hacer referencia a éste método de control como una aplicación de control de velocidad variable y par constante. Un posible uso de esto es donde se enrolla una tira alrededor de un objeto. Se requiere un par constante para mantener una tensión constante en la tira que está arrollando, pero la velocidad se modifica conforme varía el radio del enrollado. Tal aplicación es la que se desarrollará en este estudio.

Mediante el control electrónico (con semiconductores) de velocidad en motores de corriente directa, se consiguen los mismos objetivos en comparación con los elementos resistivos variables; y como resultado agregado se evita la disipación y consecuentemente el gasto indebido de energía. Las pérdidas de energía externas al motor mismo, se restringen a las pérdidas en los circuitos de estado sólido y periféricos de soporte, es decir, los circuitos de activación y de conmutación.

El diagrama a bloques de la figura 2.8 muestra los componentes básicos de un sistema de control para un motor de corriente directa, que comprende una etapa de potencia mediante tiristores, una etapa ó fuente de disparo y el transductor ó transductores requeridos para la medición de velocidad.

En el centro de la operación está la fuente de disparo ajustada con los valores deseados de velocidad, par u otras variables (llamados puntos de referencia), a un rango seguro de operación del motor. También se establecen valores de límite máximo de corriente, par, velocidad etc., para protección del sistema.

El transductor ó transductores miden al instante la velocidad real, corriente, par etc., realimentando éstas señales que son comparadas con los puntos de referencia por los sistemas electrónicos en la etapa de disparo.

Si por ejemplo, hay una diferencia entre la velocidad real y la del punto de referencia, el sistema modifica automáticamente el ángulo de retardo de disparo de los tiristores, con lo que la velocidad real cambia e iguala a la velocidad establecida como referencia. Si la velocidad aumenta más allá del ajuste del límite máximo, por error ó mal funcionamiento del circuito, el motor se apaga automáticamente.

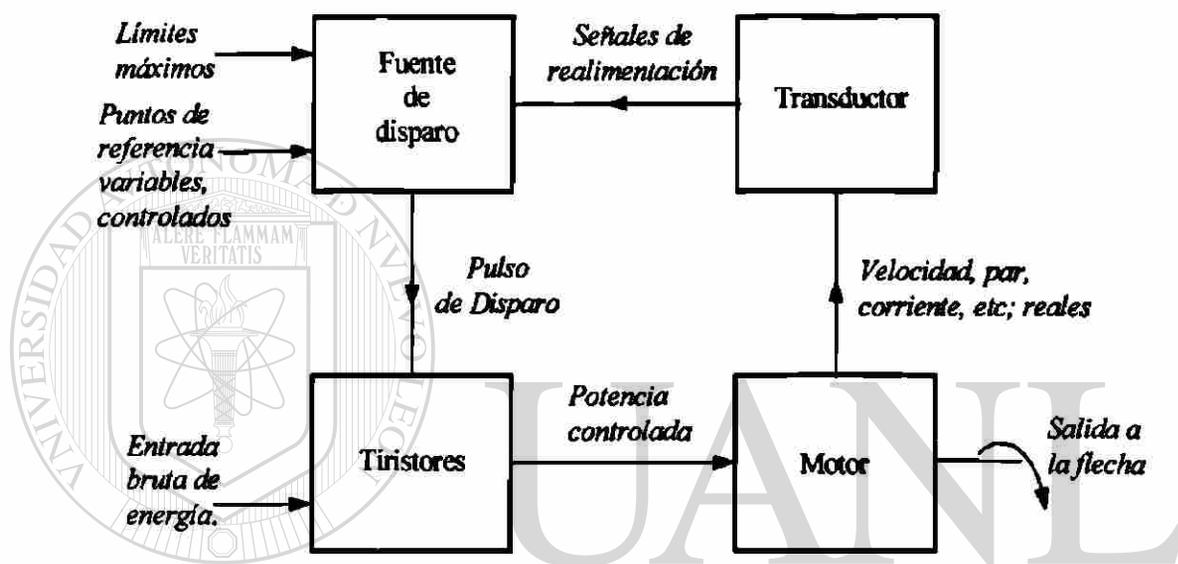


Figura 2.8.- Componentes básicos de un sistema de control para un motor de corriente directa.

Los convertidores de modo conmutado, del tipo de corriente directa a corriente directa, son una excelente opción para el manejo de un motor de corriente directa. Estos dispositivos son capaces de regular la velocidad del motor de una manera suave y controlada, mediante un voltaje variable de salida de corriente directa, aplicado a la armadura del motor. Además permiten la inversión del voltaje y corriente de salida cuando se requiera con fines de frenado. Debido a ésta última característica pueden estar concebidos como convertidores de 2 y/ó 4 cuadrantes, ya que trabajan como rectificador e inversor para polaridad positiva y/ó negativa.

La operación de éstos convertidores se puede describir al referirnos a la figura 2.9, dónde se muestra una representación sencilla, en cuatro cuadrantes del voltaje y de la corriente de salida de un convertidor de éste tipo.

Obsérvese que la abscisa, representa la corriente promedio de corriente directa  $I_{cd}$  y la ordenada representa el voltaje promedio de salida de corriente directa  $E_{cd}$ , del convertidor.

Cuando el voltaje y la corriente de salida son ambos positivos ó negativos, se dice que el convertidor está en el modo de rectificación positiva ó negativa y la energía pasa del lado de corriente alterna de alimentación hacia el lado de corriente directa en la carga. (Cuadrantes I ó III).

Si el convertidor al trabajar con un voltaje positivo de salida cambia a un valor negativo y la corriente permanece positiva, entonces la energía fluye desde la carga a través del convertidor hacia el lado de alimentación de corriente alterna (cuadrante IV).

De manera similar pero con un voltaje inicial negativo que cambia a un valor positivo y la corriente igual (negativa), la energía fluye desde la carga hacia el lado de corriente alterna.

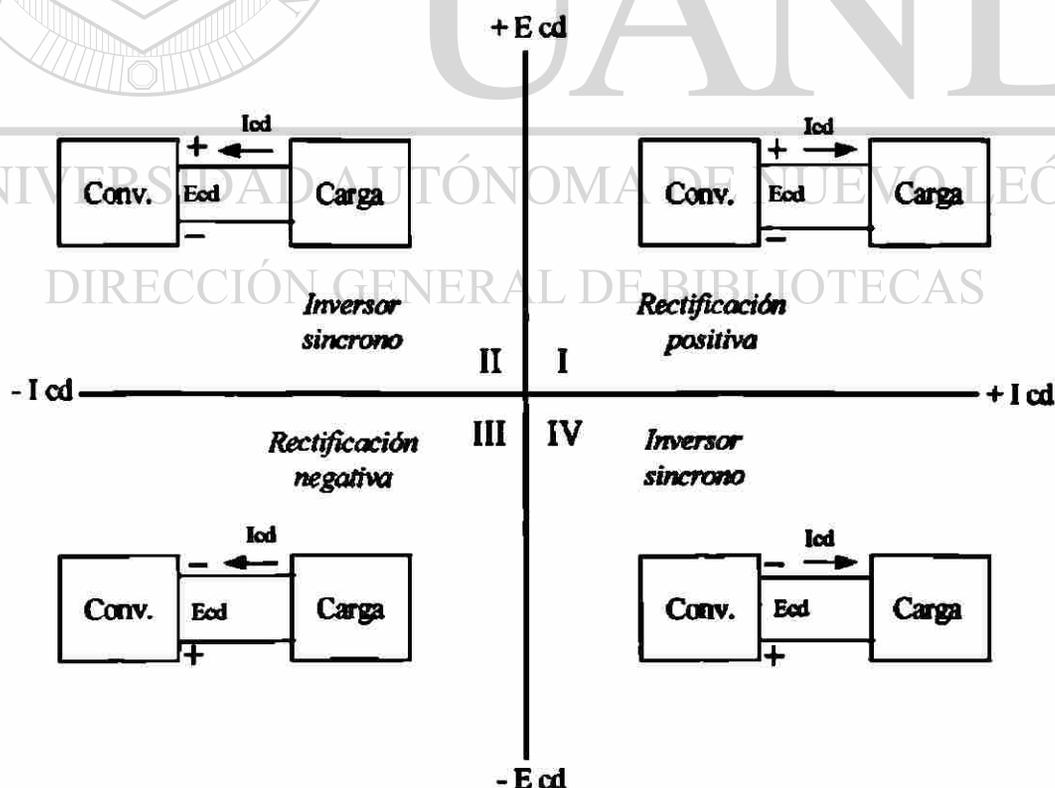


Figura 2.9.- Convertidor conmutado de cuatro cuadrantes.

Esta operación completa del convertidor, cubre los cuadrantes I y IV ó II y III, para éstos últimos dos casos respectivamente. Este tipo de convertidor es llamado convertidor de dos cuadrantes.

Un convertidor de modo conmutado de corriente directa a corriente directa puede configurarse para funcionar en dos ó cuatro cuadrantes, siempre y cuando su diseño lo permita. Mediante el modo de cuatro cuadrantes, se logra además del frenado regenerativo del motor, el control de la velocidad con giro en sentido contrario.

El diagrama a bloques de la figura 2.10 representa un sistema completo de convertidor de modo conmutado de corriente directa a corriente directa, éste diagrama describe en realidad un sistema independiente. Como se puede ver el sistema es alimentado por una fuente de corriente alterna senoidal a través de un transformador (opcional); la alimentación senoidal se rectifica con el dispositivo rectificador apropiado y se filtra con un capacitor, resultando una corriente directa filtrada con bajo rizo. Conforme " $E_N$ " (voltaje de entrada), se presenta ante el convertidor, es transferido hacia la salida en ráfagas de energía, que dan por resultado un voltaje promedio de corriente directa en la salida del convertidor,  $E_{cd}$ . Este proceso se llama "modulación por ancho de pulsos" ("PWM").

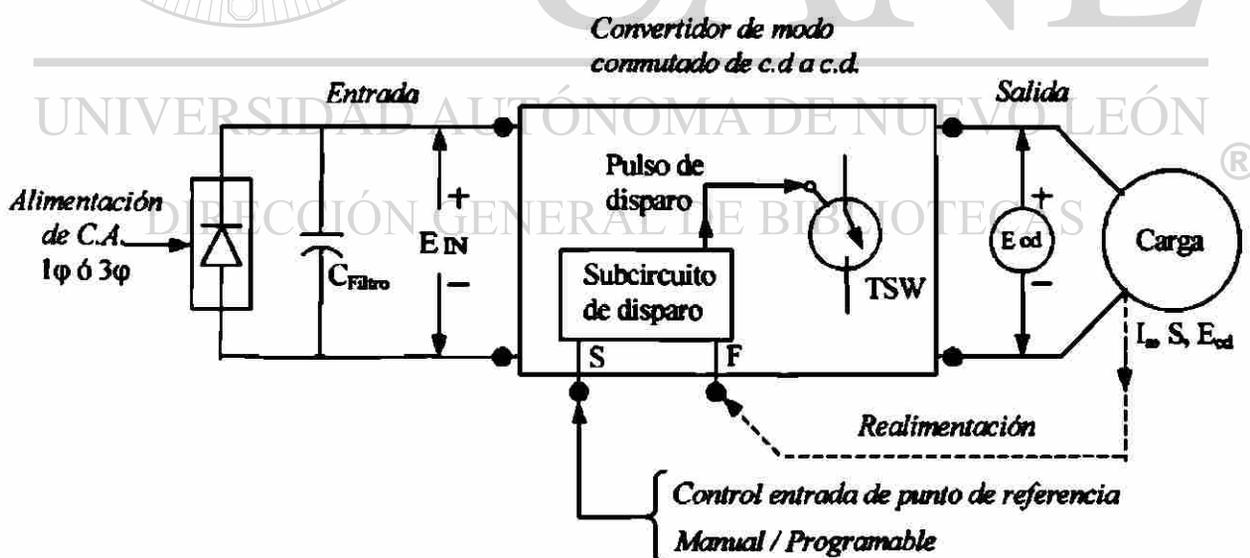


Figura 2.10.- Convertidor de modo conmutado de corriente directa.

La salida, " $E_{cd}$ ", se vuelve un voltaje regulado de corriente directa y es independiente de las fluctuaciones del voltaje de alimentación de corriente alterna original (dentro del rango especificado). El voltaje de salida, " $E_{cd}$ ", se puede hacer variar modificando un control de punto de referencia deseado, que en último término, decide a qué ciclo de trabajo de los interruptores electrónicos disparables del convertidor, van a funcionar en un momento dado. Si se modifica el punto de referencia, el ciclo de trabajo de los interruptores disparables ("TSW") también cambia, y como resultado, el valor de la salida del convertidor, " $E_{cd}$ ", responderá en consecuencia.

En ciertas aplicaciones, se requerirá de convertidores de uno ó dos cuadrantes. En otros casos se puede necesitar el convertidor de cuatro cuadrantes.

Un convertidor de dos cuadrantes se emplea cuando el motor que va a manejar devuelve energía al convertidor (por ejemplo, debido a un exceso de velocidad por sobreacarre) lo cual se aprovecha como frenado regenerativo, pero para un solo sentido de giro de la máquina, es decir, considerando una sola polaridad del voltaje de salida del convertidor. Se usa un convertidor de cuatro cuadrantes cuando se desea también el control de velocidad del motor con frenado regenerativo pero con la opción de que el motor gire en ambos sentidos, es decir, la polaridad del voltaje de salida del convertidor puede ser negativa ó positiva.

## 3 MODELADO DEL SISTEMA.

### 3.1.- Introducción.

El modelado del sistema consiste en la obtención de una función de transferencia la cual representa el comportamiento dinámico del sistema completo.

Los motores cuya velocidad será regulada no manejan directamente los rodillos en los cuales se envuelve la banda, sino que lo hacen a través de un engranaje reductor de velocidad; por lo tanto también es necesario considerar ésta etapa en el modelado. En ella existe una relación de “velocidad de entrada - velocidad de salida”, de acuerdo al radio ó al número de dientes de los engranes.

Por lo tanto la representación de la planta comprende los dos motores eléctricos y los dos reductores de velocidad, ambos subsistemas poseen las mismas características; es decir, los motores son idénticos al igual que ambos reductores de velocidad. De esta manera se consideran en conjunto como un solo subsistema “motor-reductor”.

Para la representación del sistema de control más planta, se consideran los convertidores (ambos de idénticas características) como una etapa de amplificación que proporciona el voltaje de armadura del motor, regulando así su velocidad.

### 3.2.- Datos de los componentes eléctricos y mecánicos.

Dentro de los componentes eléctricos se consideran a los dispositivos electrónicos convertidores y sus respectivos elementos de accionamiento, así como también a los motores eléctricos; los cuales mueven indirectamente los rodillos de la banda.

Estos motores son de corriente directa con terminales externas de armadura y campo, razón por la cual pueden manejarse como motores de corriente directa con excitación independiente.

Los componentes mecánicos son los engranajes reductores de velocidad así como los dos rodillos en los que se envuelve ó desenvuelve la banda portadora de radiografías.

#### 3.2.1.- Especificaciones de los motores eléctricos.

Como se mencionó anteriormente los motores eléctricos son idénticos en construcción y características, y poseen los siguientes valores nominales obtenidos de sus datos de placa.

- Marca: Bodine Electric Company.
- Tipo o modelo: NSH-54RL.
- Voltaje: 115 volts C.D.
- Corriente: 1.2 amperes C.D.
- Velocidad: 1725 r.p.m.
- Potencia: 1/8 h.p.
- Uso: Continuo.
- Par ó Torque: 32 Lb-pulg.

Debido a que en el voltaje de placa no se especifica si es para uno o ambos devanados del motor, se realizó la medición en condiciones normales de funcionamiento de los voltajes de armadura y de campo para ambos motores. Dicha medición arrojó los siguientes datos como era de esperarse:

- Voltaje de armadura (variable): de 8 a 115 volts C.D.
- Voltaje de campo (fijo): 115 volts C.D.

Posteriormente se identificaron y marcaron las polaridades de ambos devanados (armadura y campo), dejando especificada, con una marca, ambas terminales positivas. Estas pruebas se realizaron para cada motor en condiciones normales de funcionamiento, manejando el equipo con el sistema de accionamiento original.

### 3.2.2.- Especificaciones de los reductores de velocidad y rodillos.

En cuanto a los datos de los componentes mecánicos, éstos se obtuvieron en forma experimental mediante la medición física de velocidades y dimensiones. Los datos obtenidos bajo condiciones normales de funcionamiento y sin carga, son los siguientes:

- Velocidad nominal en el eje de cada rodillo: 80 RPM
- Diámetro de cada rodillo: 35 cm.

Por lo tanto considerando la velocidad nominal de cada motor, como la velocidad  $N_1$  de entrada al reductor, y de acuerdo a la velocidad medida en el eje de cada rodillo que corresponde a la velocidad  $N_2$  de salida del reductor; se obtiene la relación de velocidad:  $N_1 / N_2$ .

### 3.2.3.- Especificaciones de los convertidores.

De acuerdo a los datos proporcionados por el fabricante los convertidores tienen las siguientes especificaciones:

- Marca: Polyspede.
- Modelo: PRD-2.
- Voltaje de alimentación: 115 volts C.A. +/- 10 v; ó 230 volts C.A. +/- 20 v.
- Frecuencia de entrada: 60 Hertz.
- Rango de potencia: a 115 volts C.A. de 1/6 a 2/3 H.P. Para 230 volts C.A. de 1/3 a 1 ¼ H.P. y 1.9 H.P. con motores especificados.
- Voltaje de salida para armadura: 0 a 75 volts C.D. (Controles de 115 volts). 0 a 150 volts C.D. (Controles de 230 volts).
- Voltaje de salida para el campo: 100 volts C.D. (Controles de 115 volts). Convertible a 50 volts C.D. Máximo 2 ampers a cualquier voltaje. 200 volts C.D.

(controles de 230 volts). Convertibles a 100 volts C.D. Máximo 2 ampers a cualquier voltaje.

- Regulación de carga para un 100% de cambio de carga.
  - a) Con retroalimentación de armadura: Ajustable a +/- 1% de la velocidad base.
  - b) Con retroalimentación de tacómetro: +/- 0.1 % de la velocidad base típica.
- Rango de velocidad: 0 al 100%.
- Rango de velocidad para regulación específica: 20 a 1.
- Límites de Par (independientemente de los límites ajustables "mas" y "menos" +Lim. y -Lim.): 0 al 200% de la relación de corriente del motor.
- Voltaje de programa de velocidad (voltaje en la terminal 1TB-C ) para producir +/- 100 % de velocidad: - / + 6 volts C.D.
- Voltaje de programa del Par ( terminal 6 de 1TB ) para producir cero al preestablecer velocidad: 0 a +6 volts C.D.
- Voltaje de salida (1TB-8) del medidor de Par ( % T ) para un rango de -100 % hasta +100 % de Par (470 ohms de resistencia de salida ): -1 volt a +1 volt C.D.
- Temperatura ambiente máxima: 40 °C.

### 3.3.- Modelado del sistema a controlar.

Como sistema a controlar, es decir la planta, se considera el conjunto de componentes formado por los motores, los reductores de velocidad, los rodillos y la banda misma.

Primeramente, en este orden; considérese el diagrama de la figura 3.1, que representa un motor de corriente directa con excitación independiente cuya velocidad (variable de salida) es controlada por la variación del voltaje de armadura (variable de entrada).

En el circuito de excitación se aplica una corriente constante de tal manera que se produzca un campo magnético " $\phi$ ", constante también. En el circuito de armadura, cuando se tiene una cierta velocidad angular, el campo magnético que atraviesa dicho circuito, genera un voltaje proporcional a la velocidad y opuesto al voltaje aplicado " $V_a$ "; éste es el voltaje contraelectromotriz " $E_m$ ".

Por lo tanto, el campo magnético y la velocidad, son las causas de la fuerza contraelectromotriz, la cual está dada por:

$$\begin{aligned} E_m(t) &= K' \phi \cdot \omega(t) \\ E_m(t) &= K_1 \cdot \omega(t), \end{aligned} \quad (3.1)$$

en la cual:

$$K_1 = K' \phi, \text{ y}$$

$K'$  = constante de construcción de la máquina, como se vio en la ecuación 2.2, depende de “Z” (número de conductores por armadura), “P” (el número de polos) y “a” (el número de trayectos paralelos en el devanado).

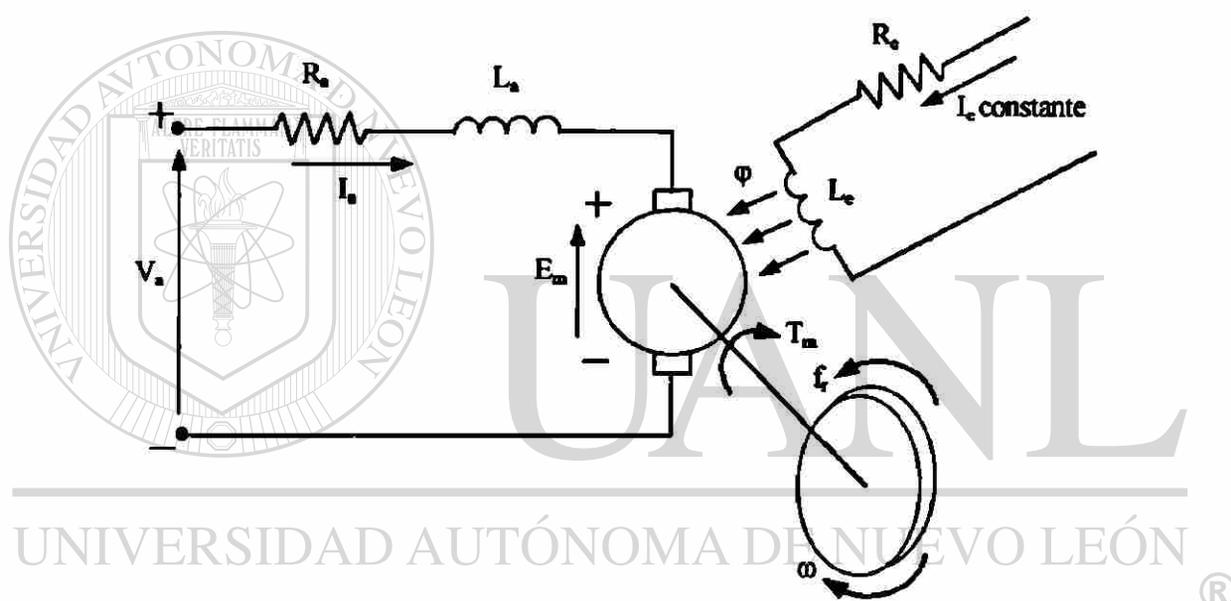


Figura 3.1.- Motor de corriente directa con excitación independiente con su eje acoplado a una carga

Por otra parte, el par producido por el motor, depende de la corriente de armadura y de la intensidad del campo magnético; así tenemos:

$$\begin{aligned} T_m(t) &= K'' \phi \cdot i_a(t), \\ T_m &= K_2 \cdot i_a(t), \end{aligned} \quad (3.2)$$

en la cual:

$$K_2 = K'' \phi, \text{ y}$$

$K''$  = constante de construcción de la máquina, que al igual que en la ecuación 2.13 (en donde es representada como constante "C"); depende de "Z", "P", "a" y de  $2\pi$ , (Factor de corrección).

Para el circuito de armadura de la figura 3.1, podemos escribir la siguiente ecuación:

$$V_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_m(t). \quad (3.3)$$

En cuanto a la carga que consiste en el sistema reductor de velocidad que mueve a los rodillos; se representa por los engranes  $N_1$  y  $N_2$ , y las flechas 1 y 2. La carga esta representada en la figura 3.2, y es movida por el par del motor  $T_m(t)$  aplicado en la flecha 1. Para este sistema se obtienen las ecuaciones siguientes:

- Para la flecha 1:

$$J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + b_1 \frac{d\theta_1}{dt} + T_1 = T_m(t), \quad (3.4)$$

en donde:

$T_m(t)$  = Par desarrollado por el motor .

$T_1(t)$  = Par en el engrane 1 debido al reposo de la carga.

$\theta_1$  = Posición angular del eje 1 de rotación.

$J_1$  = Momento de inercia de la carga, referido al eje 1 de rotación.

$b_1$  = Coeficiente de fricción que tiene el eje 1 de rotación.

Debido a que la variable controlada ( ó señal de salida) es la velocidad angular  $\omega$ , entonces se deben hacer las siguientes sustituciones en la ecuación 3.4:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \text{ y } \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} .$$

Con ello, la ecuación 3.4 se transforma en:

$$J_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} + b_1 \omega_1(t) + T_1(t) = T_m(t), \quad (3.5)$$

en donde:

$\omega_1(t)$  = Velocidad angular del eje 1 de rotación.

- Para la flecha 2:

$$J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + b_2 \frac{d\theta_2}{dt} + T_L(t) = T_2(t), \quad (3.6)$$

en donde:

$T_2(t)$  = Par transmitido al engrane 2.

$T_L(t)$  = Par de carga.

$\theta_2(t)$  = Posición angular del eje 2 de rotación.

$J_2$  = Momento de inercia de la carga a mover.

$b_2$  = Coeficiente de fricción que tiene el eje de carga (eje 2 de rotación).

De la misma forma en que se consideró que la velocidad angular es la variable a controlar, en la ecuación 3.4; se tiene que hacer la sustitución respectiva para la ecuación 3.6, esto es:

$$J_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} + b_2 \omega_2(t) + T_L(t) = T_2(t), \quad (3.7)$$

en donde:

$\omega_2(t)$  = Velocidad angular en el eje de carga (eje 2 de rotación).

— Considerando que la rigidez de las flechas es infinita (no existe juego ni deformación elástica), el trabajo realizado por el engrane 1, es igual al del engrane 2, entonces:

$$T_1 \theta_1 = T_2 \theta_2$$

Y de acuerdo al número de dientes (o a los radios respectivos) en los engranes 1 y 2; representados por  $N_1$  y  $N_2$  respectivamente, la relación respecto a las posiciones angulares está dada por:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{N_2}{N_1} \text{ donde } \theta_2 = \theta_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \text{ ó } T_2 = T_1 \frac{\theta_1}{\theta_2} = T_1 \frac{N_2}{N_1}.$$

Si  $N_1 / N_2 < 1$ , la relación de engranes reduce la velocidad y aumenta el par.

Sustituyendo estas relaciones en la ecuación 3.6:

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + b_2 \dot{\theta}_2 + T_L(t) = T_1(t)$$

$$\frac{N_1}{N_2} J_2 \ddot{\theta}_1 + \frac{N_1}{N_2} b_2 \dot{\theta}_1 + T_L(t) = T_1 \frac{N_2}{N_1}$$

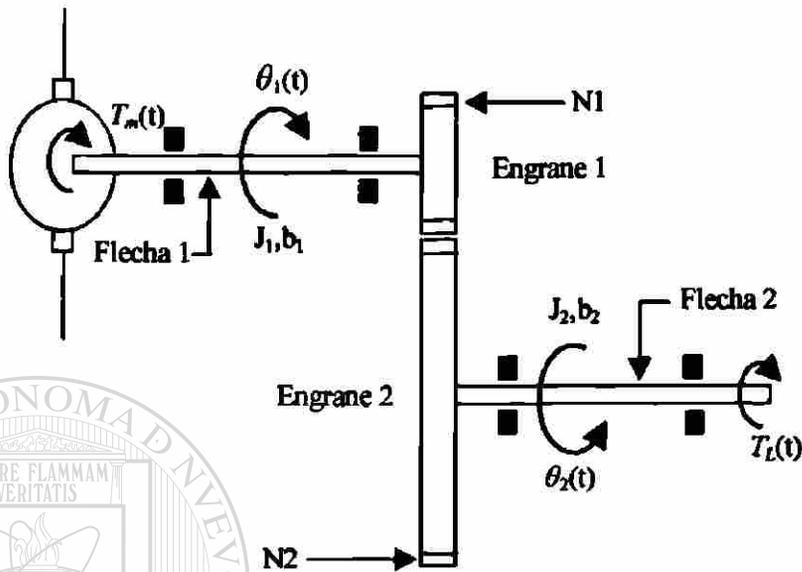


Figura 3.2.- Sistema mecánico reductor de velocidad.

Despejando  $T_1$ , se obtiene:

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2 \ddot{\theta}_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 b_2 \dot{\theta}_1 + T_L(t) = T_1$$

Ahora sustituyendo  $T_1$  en la ecuación 3.4 resulta que:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + b_1 \dot{\theta}_1 + T_1 = T_m$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + b_1 \dot{\theta}_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2 \ddot{\theta}_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 b_2 \dot{\theta}_1 + T_L(t) = T_m(t)$$

$$T_m(t) = \left[ J_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2 \right] \cdot \ddot{\theta}_1 + \left[ b_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 b_2 \right] \cdot \dot{\theta}_1 + T_L(t)$$

Por lo tanto, el momento de inercia equivalente y el coeficiente de fricción de engranaje, referidos a la flecha 1, se obtienen respectivamente mediante:

$$J_{1,eq} = J_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2$$

$$b_{1,eq} = b_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 b_2$$

En términos del momento de inercia equivalente “ $J_{1,eq}$ ” y del coeficiente de fricción viscosa equivalente “ $b_{1,eq}$ ”, la ecuación 3.8 se simplifica para dar:

$$J_{1,eq} \cdot \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + b_{1,eq} \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + n \cdot T_L(t) = T_m(t)$$

Lo que es igual a:

$$J_{1,eq} \cdot \frac{d\omega_1(t)}{dt} + b_{1,eq} \cdot \omega_1(t) + n \cdot T_L(t) = T_m(t). \quad (3.9)$$

El efecto de “ $J_2$ ” en el momento de inercia equivalente, se determina mediante la relación de engranes “ $N_1 / N_2$ ”. En caso de un reductor de velocidad por lo general “ $N_1 / N_2$ ” es una cantidad menor a la unidad. Si “ $N_1 / N_2 \ll 1$ ”, el efecto de “ $J_2$ ”, en el momento de inercia equivalente “ $J_{1,eq}$ ”, es insignificante. De igual forma sucede para el coeficiente de fricción viscosa equivalente “ $b_{1,eq}$ ” del engranaje. Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.9 tenemos:

$$E_m(s) = K_1 \cdot \omega(s); \quad (3.1a)$$

$$T_m(s) = K_2 \cdot I_a(s); \quad (3.2a)$$

$$V_a(s) = R_a \cdot I_a(s) + L_a[S \cdot I_a(s) - i_a(0)] + E_m(s);$$

$$T_m(s) = J_{1,eq} \cdot [S \cdot \omega_1(s) - \omega_1(0)] + b_{1,eq} \cdot \omega_1(s) + n \cdot T_L(s).$$

Considerando condiciones iniciales nulas para “ $V_a(s)$ ” y “ $T_m(s)$ ”.

$$V_a(s) = I_a(s) \cdot [S \cdot L_a + R_a] + E_m(s); \quad (3.3a)$$

$$T_m(s) = \omega_1(s) \cdot [S \cdot J_{1,eq} + b_{1,eq}] + n \cdot T_L(s). \quad (3.9a)$$

Ahora sustituyendo la ecuación 3.1 a en la ecuación 3.3 a, se tiene:

$$V_a(s) = I_a(s) \cdot [S \cdot L_a + R_a] + K_1 \cdot \omega_1(s). \quad (3.10)$$

De manera similar sustituyendo la ecuación 3.2a en la ecuación 3.9a, se tiene:

$$K_2 \cdot I_a(s) = \omega_1(s) \cdot [S \cdot J_{1,eq} + b_{1,eq}]. \quad (3.11)$$

Despejando la corriente " $I_a$ " en la ecuación 3.11 y sustituyéndola en la ecuación 3.10 tenemos:

$$V_a(s) = \frac{\omega_1(s) \cdot [S \cdot J_{1eq} + b_{1eq}]}{K_2} \cdot [S \cdot L_a + R_a] + K_1 \omega_1(s).$$

Ahora se obtiene la función de transferencia:

$$V_a(s) = \frac{\omega_1(s) [S \cdot J_{1eq} + b_{1eq}] \cdot [S \cdot L_a + R_a] + K_1 \omega_1(s)}{K_2},$$

$$V_a(s) = \frac{\omega_1(s) \cdot [S^2 \cdot J_{1eq} \cdot L_a + S \cdot (b_{1eq} \cdot L_a + J_{1eq} \cdot R_a) + b_{1eq} \cdot R_a] + K_1 \cdot K_2 \cdot \omega_1(s)}{K_2},$$

$$\frac{\omega_1(s)}{V_a(s)} = \frac{K_2}{S^2 \cdot J_{1eq} \cdot L_a + S \cdot (J_{1eq} \cdot R_a + b_{1eq} \cdot L_a) + b_{1eq} \cdot R_a + K_1 \cdot K_2}. \quad (3.12)$$

Como puede observarse, la entrada corresponde a el voltaje aplicado al motor, y la salida a la velocidad de movimiento en su flecha, considerando que se encuentra conectada a un reductor mecánico de velocidad.

### 3.4.- Modelado del sistema completo.

Hasta aquí, hemos obtenido solamente el modelo de la carga a manejar. La otra etapa en el modelado del sistema, corresponde a los dispositivos manejadores de la carga, éstos son los llamados convertidores. Su función es proporcionar un voltaje variable a la armadura del motor mediante el cual se controla su velocidad, a partir de un voltaje ajustado como entrada de referencia. Este valor de referencia lo compara con un valor medido que representa la velocidad de la máquina en todo momento, y de acuerdo a la diferencia, genera una salida cuya magnitud es "K" veces la entrada. En otras palabras, el convertidor actúa como un amplificador diferencial de voltaje con cierta ganancia y cuya relación de transferencia es:

$$V_a = K_a \cdot V_e, \quad (3.13)$$

donde:

$V_a$  = Voltaje de salida del convertidor.

$K_a$  = Ganancia de voltaje.

$V_e$  = Voltaje de entrada diferencial.

Considerando un tacogenerador como elemento de medida de la velocidad del motor, el voltaje generado, proporcional a la velocidad es:

$$V_f = K_g \frac{d\theta}{dt}, \quad (3.14)$$

donde:

$V_f$  = Voltaje de salida del tacogenerador.

$K_g$  = Constante de proporcionalidad ó ganancia.

$d\theta / dt$  = Velocidad del motor.

Si el amplificador maneja una entrada diferencial, los voltajes de referencia y de retroalimentación se combinan de tal forma que la entrada neta, al amplificador, es un voltaje diferencial " $V_e$ ". Esto puede expresarse como:

$$V_e = V_i - V_f$$

$$V_e = V_i - K_g \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$V_e = V_i - K_g \cdot \omega(t), \quad (3.15)$$

donde:

$V_e$  = Voltaje de entrada diferencial.

Como el voltaje de salida del convertidor es aplicado a la armadura del motor, podemos asegurar que se trata del mismo voltaje, el cual hemos llamado " $V_a$ ", dado en la ecuación 3.13.

Sustituyendo el voltaje de entrada diferencial de la ecuación 3.15 en la ecuación 3.13, finalmente resulta:

$$V_a = K_a [V_i - K_g \cdot \omega(t)]. \quad (3.16)$$

Por lo tanto, como anteriormente se mencionó, este voltaje " $V_a$ " de salida del amplificador, es el mismo que el de entrada al motor, por lo tanto, se sustituye en la función de transferencia de la ecuación 3.12; y una vez aplicada la transformada de Laplace:

$$\frac{\omega(s)}{K_a [V_i(s) - K_g \cdot \omega(s)]} = \frac{K_2}{S^2 \cdot [J_1 \text{eq} \cdot L_s] + S \cdot [J_1 \text{eq} \cdot R_s + b_1 \text{eq} \cdot L_s] + b_1 \text{eq} \cdot R_s + K_1 \cdot K_2}$$

Ahora se despeja para obtener la relación salida / entrada ó función de transferencia del sistema completo, esto es:

$$\frac{K_1 \cdot V_f(s) - K_1 K_2 \cdot \omega(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{\frac{K_2}{S^2 \cdot [J_{1,eq} \cdot L_1] + S \cdot [J_{1,eq} \cdot R_1 + b_{1,eq} \cdot L_1] + b_{1,eq} \cdot R_1 + K_1 K_2}},$$

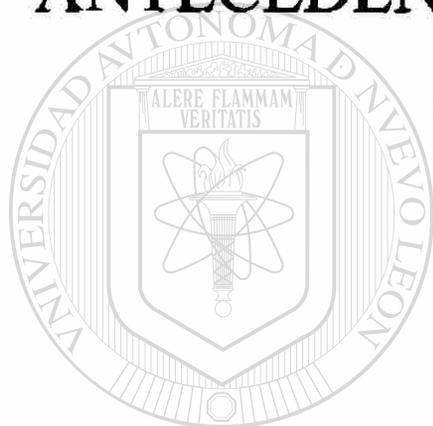
$$\frac{K_1 \cdot V_f(s)}{\omega(s)} - K_1 \cdot K_2 = \frac{1}{\frac{K_2}{S^2 \cdot [J_{1,eq} \cdot L_1] + S \cdot [J_{1,eq} \cdot R_1 + b_{1,eq} \cdot L_1] + b_{1,eq} \cdot R_1 + K_1 \cdot K_2}},$$

$$\frac{V_f(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{K_1 \cdot K_2} + K_2. \quad (3.17)$$

Si la realimentación es a través de un dispositivo tacogenerador tal como se ha considerado en este último análisis, que por las condiciones físicas de la planta estaría ubicado en contacto directo con el carrete o rodillo; entonces es conveniente retomar la sección anterior y obtener la función de transferencia tomando en cuenta la velocidad en la flecha 2. De esta manera en la relación salida / entrada del sistema completo (ecuación 3.17), la velocidad que aparece en ella deberá ser  $\omega_2(s)$ .

Pero si la realimentación de velocidad se efectúa directamente a través del voltaje producido por el giro del motor, entonces el cambio a considerar será en la ecuación 3.14 en la que se deberá sustituir el voltaje del tacogenerador " $V_f$ ", por el voltaje generado en la armadura del motor.

## 4 CARACTERISTICAS Y ANTECEDENTES DEL SISTEMA DE CONTROL.



UANL

### 4.1.- Generalidades del sistema de control.

La idea básica en este trabajo es la de modificar la estrategia de control. En lugar del control original con el cual la tensión de la banda era “controlada” de forma indirecta mediante un freno dinámico; ahora se pretende fijar la tensión de la banda ayudándose del límite de corriente de uno de los convertidores, mientras que el otro controla la velocidad en el segundo motor. Nótese que ambos motores interactúan por medio de la banda en la que se colocan las radiografías. De esta manera el sistema de control se realiza de forma integral mediante el uso de un convertidor en cada motor lográndose así regular la velocidad y la tensión de la banda.

Primeramente se instalan estos dos dispositivos convertidores de tal forma que proporcionan el voltaje de armadura variable para cada motor así como también la alimentación de campo. Su funcionamiento es tal que trabajan de forma alternada, es

decir, para un determinado desplazamiento de la banda, por ejemplo a la derecha; uno de ellos se encuentra operando normalmente a su respectivo motor y controlando su velocidad; mientras que el otro regula un par inverso de frenado con el cual se logra tensar la banda. Al cambiar el sentido de movimiento de la banda se invierten las condiciones de funcionamiento. Es decir, el motor cuya velocidad es ahora controlada por su convertidor gira a la velocidad establecida, mientras que el otro motor que es acarreado en sentido contrario a su movimiento, se encuentra generando un voltaje inverso que sirve para proporcionar un par inducido contrario pero limitado hasta cierto valor máximo. Como el par inducido es contrario y opuesto al movimiento al que esta siendo sometido, intenta cancelarlo pero sin conseguirlo ya que es acarreado con mayor fuerza por el otro motor a través de la banda. En estas condiciones el efecto finalmente es mantener un tensión constante en la banda de radiografías y por supuesto controlar su velocidad de desplazamiento con la posibilidad de reajustarla a un nuevo valor cuando así se desee.

También se utiliza un sistema de accionamiento que incluye relevadores electromagnéticos, botones pulsadores y potenciómetros de ajuste, para accionar y conmutar el sistema; logrando con ello la secuencia y condiciones correctas de funcionamiento.

#### 4.2.- Descripción y características de los convertidores modelo PRD-2.

Para regular la velocidad de los motores y por lo tanto la tensión en la banda, se implementan dos convertidores conmutados de corriente directa a corriente directa como los descritos en el capítulo 2, los cuales pueden configurarse como convertidores de dos ó cuatro cuadrantes. Estos convertidores son adaptados en la modalidad de dos cuadrantes para controlar la velocidad de ambos motores. Ambos dispositivos son idénticos y poseen las características propias para el manejo de los motores. A continuación se hace una descripción de dichos convertidores así como también las conexiones y ajustes respectivos de acuerdo a los requerimientos de operación según la aplicación.

#### 4.2.1.- Descripción general.

El convertidor "PRD-2" es un control regenerativo de 4 cuadrantes de media onda, monofásico de rápida respuesta. Se usan dos SCR's para proporcionar corriente ya sea positiva o negativa a un motor de CD. El control esta disponible para usarse en ambos servicios de entrada, 115 ó 230 Volts de CA, a 50 ó 60 Hz.

El convertidor "PRD-2" automáticamente dictará si el control actúa como motor o como generador con objeto de satisfacer un comando de velocidad dado. Por ejemplo, si el motor esta corriendo a una velocidad determinada y la velocidad del potenciómetro es rápidamente cambiada a un punto de velocidad cero, el motor actuará como generador y la corriente regresara dentro de las líneas de CA , para lograr una velocidad cero. El regresar la energía a la línea de CA, produce el par requerido para reducir la velocidad del motor a cero. Ambas cosas, la velocidad y la rotación están determinadas por el ajuste de velocidad del potenciómetro. La polaridad del voltaje en las escobillas del potenciómetro determina la dirección de rotación; la magnitud del voltaje aplicado en la armadura determina la velocidad.

El control básico es proporcionado con características estándar. Una de estas características incluye ajustes independientes (más / menos ) en la corriente límite de los potenciómetros. Cada potenciómetro puede ser ajustado a un límite máximo en las corrientes del motor desde una relación de cero hasta 200 % en la corriente de la armadura. A menos que se especifique otra cosa, la corriente límite de los potenciómetros están ambas preestablecidas de fabrica a un límite máximo de corriente de motor, de 150 %. La compensación "IR" es también proporcionada para permitir una buena regulación de velocidad ( +/- 1 % de la velocidad base ) ya que el motor está cargado desde una relación de carga ligera hasta una máxima corriente de armadura para carga nominal.

El "PRD-2" viene equipado con una doble capacidad de campo para cubrir su uso con la mayoría de los motores ( Véase la sección de cambios de voltaje de campo en el anexo 1). Se proporciona una tarjeta circuito puente para permitir una reducción en el error de velocidad en cuanto a la ganancia del amplificador se refiere, desde la posición alto denominada "Hi" establecida a 100,000, hasta la posición bajo denominada "Lo", con una ganancia de 10. Esta tarjeta puente hace cambios al ajustar completamente los

potenciómetros denominados “+Bal” y “-Bal” ( Diagrama A2001-000-ES, anexo 2) en el sentido de las manecillas del reloj, e introduce una banda muerta, ( aproximadamente 2 % del rango de la señal de entrada ). Esta capacidad es muy importante en aquellas aplicaciones que requieren operación de “no error” a velocidad cero.

Una terminal de salida denominada “ % de Par ” también está disponible para monitorear convenientemente la velocidad de armadura en un medidor remoto ó dispositivo de lectura. La magnitud y la dirección de la corriente de salida puede ser leída conectando un medidor en la tarjeta marcada como “1TB” ( Diagrama A2001-000-ES, anexo 2), terminal 8 respecto al común ( La resistencia de salida en esta terminal es de 470 ohms.).

El “PRD-2” esta protegido contra corrientes excesivas de sobrecarga por el circuito de corriente límite “PRD-2” de respuesta rápida . En adición, la unidad “PRD-2” esta protegida contra daños causados por cortos circuitos accidentales o tierras, mediante un fusible insertado en la(s) línea(s) de entrada de C.A. En controles para 115 volts únicamente se proporciona un fusible, por lo tanto, las líneas de C.A. sin fusible, deberán estar aterrizadas.

#### 4.2.2.- Conexiones y encendido inicial.

Para la puesta en marcha de este convertidor se realizan las conexiones de acuerdo al diagrama A2001-000-EW.a, proporcionado por el fabricante y que se encuentra en el anexo 2. Se conecta el motor y la unidad de control, sin activar el interruptor de energía y se aplica el potenciómetro (o la señal externa del voltaje de entrada), conforme al diagrama sintético de la figura 4.1, el cual muestra el alambrado externo básico. Se recomienda ver este diagrama completo en el anexo 2 para otras opciones de funcionamiento.

Antes de aplicar la fuerza se verifica el voltaje de entrada para asegurarse que esté de acuerdo con la relación de voltaje de la unidad de control ( mostrado en la tarjeta de precauciones y en la placa de control). Algo muy importante es verificar las relaciones de placa del PRD-2 contra los voltajes de la armadura y del campo mostrados en la placa del motor. Estos deberán de coincidir. En ningún caso los voltajes de campo y de armadura deben ser menores que aquellos que se muestran en la placa de la unidad de

control. El fabricante especifica que en caso que el motor cuente con doble voltaje de embobinado de campo, se debe conectar el campo del motor con el voltaje apropiado conforme se indica en la placa de la unidad.

Después se conecta el potenciómetro conforme al diagrama de la figura 4.1. Se aplica la alimentación de corriente alterna, y el motor comienza a funcionar. Lentamente se gira el potenciómetro desde un extremo hasta el otro.

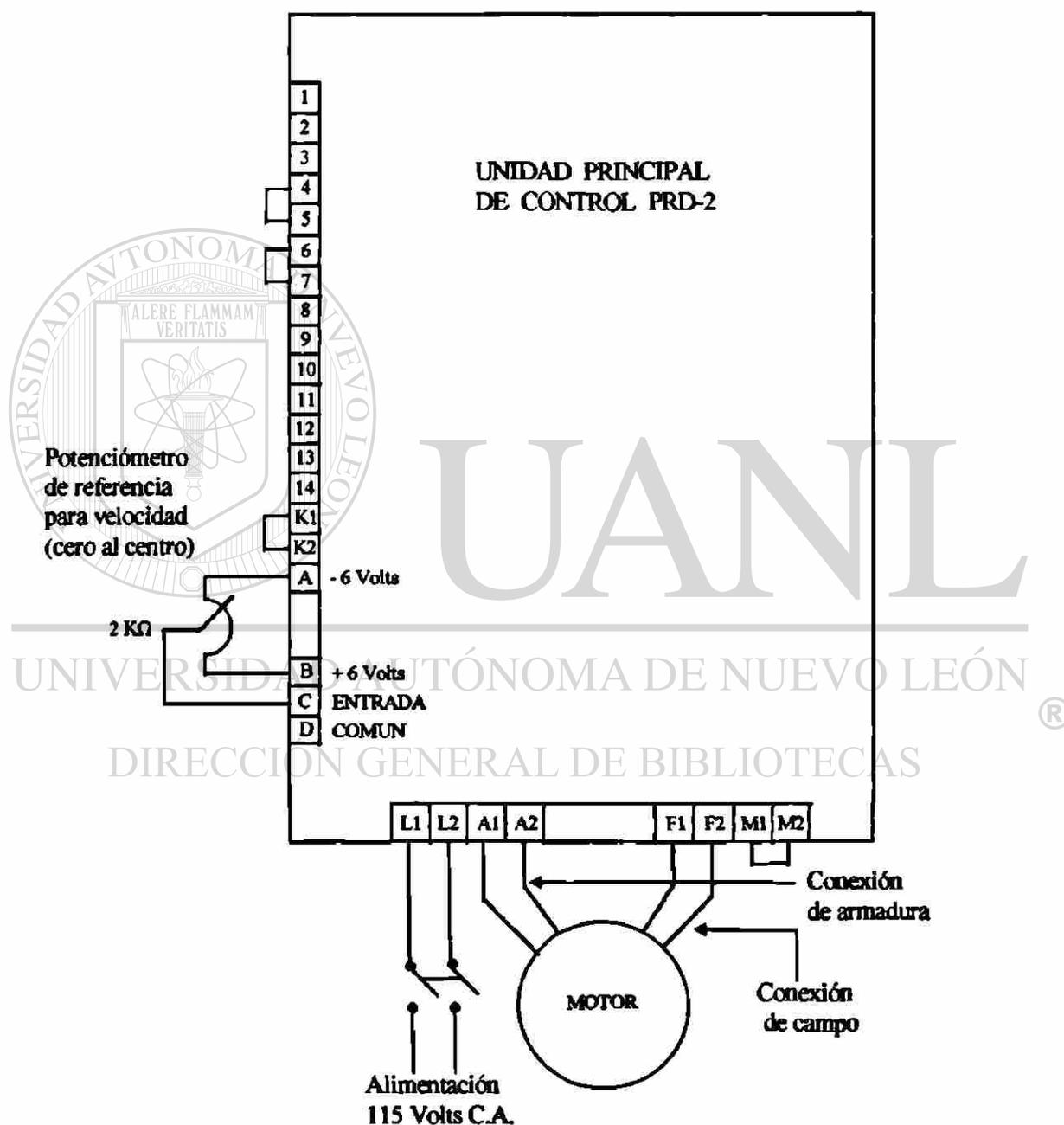


Figura 4.1.- Conexión del potenciómetro de velocidad.

El motor comienza su marcha cuando el potenciómetro se gira a partir del centro de su trayectoria y corre a máxima velocidad hacia delante cuando el potenciómetro se encuentra en un extremo de su recorrido; o máxima velocidad de reversa cuando se encuentra en el otro extremo. Si la operación es satisfactoria se procede a los ajustes de instalación.

#### 4.2.3.- Ajustes de instalación.

Se identifican ocho potenciómetros de ajuste que se encuentran localizados en la tarjeta principal "1TB" mostrada en el diagrama A2001-000-ES en el anexo 2. Todos los potenciómetros excepto el marcado con "IR", han sido ajustados desde fábrica y no necesitan ningún ajuste en instalaciones normales cuando se retroalimenta por la armadura. Tal es el caso en el presente trabajo.

En controles usando realimentación con tacómetro, el potenciómetro "IR" deberá estar completamente fijo en el sentido opuesto de las manecillas del reloj. El máximo ajuste de velocidad deberá efectuarse en campo, reajustando al máximo el potenciómetro. Como ajuste inicial, primeramente se acciona el potenciómetro "IR" de acuerdo a lo siguiente: El motor no deberá estar acoplado al engranaje del reductor o a cualquier carga externa. Se enciende la potencia de corriente alterna luego si se gira el potenciómetro "IR" en sentido de las manecillas del reloj, llega un punto en el que el motor empieza a comportarse en forma inestable. Después se gira el potenciómetro "IR" en el sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que la inestabilidad desaparezca. Entonces se gira el potenciómetro "IR" en ligeras reducciones (aproximadamente 20 % del espacio entre su funcionamiento estable y velocidad cero).

El procedimiento de ajuste normal no le da a la banda muerta cerca del cero, establecer la velocidad. (por ejemplo cualquier ligera rotación del ajuste de la velocidad o cualquier pequeño cambio en la señal de entrada, causará que el motor comience a girar). Esta sensible respuesta es ideal para aplicaciones en circuitos cerrados. Sin embargo en algunas aplicaciones de circuitos abiertos, el ligero giro hacia delante o hacia atrás de la velocidad que puede desarrollar cuando la señal de velocidad esta en cero, es indeseable. Los siguientes ajustes adicionales previenen que el motor se mueva

al crear un margen del  $\pm 2\%$  en toda la escala de la banda muerta alrededor de la velocidad cero.

Para crear la banda muerta, se giran los potenciómetros "+Bal" y "-Bal" completamente en el sentido de las manecillas del reloj. Apague el aparato y mueva el puente amarillo localizado en el centro del circuito principal desde la posición de alto denominada como "Hi" hasta la posición marcada como "Lo", es decir bajo. Se enciende el aparato y se operan los controles normalmente. El zumbido, el cual normalmente esta presente en la velocidad cero, desaparece.

#### 4.2.4.- Potenciómetros de ajuste.

Con excepción de los ajustes denominados como "IR" y "Max" (ajuste en el tacómetro), todos los demás potenciómetros están ajustados de fábrica y normalmente no deberán ser movidos a menos que se reemplace el modulo análogo. La función de cada ajuste se describe aquí únicamente como referencia.

- Potenciómetro de ajuste "PAR CERO".

Establece el punto cero en el medidor externo "% de par" ( si acaso se usa ) y el circuito limite del par interno.

- Potenciómetro de ajuste "CERO".

— Se establece la velocidad cero cuando el voltaje de entrada ( entre terminales "C" y "D" de "1TB" ) es cero.

- Potenciómetro de ajuste "+ LIM".

Determina la corriente positiva máxima ( la corriente fluye hacia afuera de la terminal A1 al motor ) que el control puede entregar. Este ajuste esta referido como limite "+ Par". La rotación del potenciómetro en el sentido de las manecillas del reloj, incrementará la corriente disponible.

- Potenciómetro de ajuste "- LIM".

Determina la corriente negativa máxima ( la corriente fluye hacia adentro de la terminal "A1" desde el motor ) que el control puede entregar. Este ajuste esta referido como limite "-Par". La rotación del potenciómetro en el sentido de las manecillas del reloj, incrementará la corriente disponible.

- Potenciómetro de ajuste "IR".

Eleva el voltaje de la armadura al incrementarse la carga en la flecha del motor, lográndose mantener la velocidad constante. La rotación del potenciómetro en el sentido de las manecillas del reloj nos da una mejor regulación de la carga . Ajustando demasiado en el sentido de las manecillas, causa que la velocidad del motor se incremente y también la carga lo cual provoca operación inestable.

- Potenciómetro de ajuste “MAX”.

Establece el máximo voltaje en la armadura proporcionado por el control cuando el potenciómetro de velocidad es ajustado al máximo. El valor del potenciómetro esta preestablecido de fábrica a 150 volts máximos de voltaje de armadura (para controles a 230 volts C.A.) ó a 75 volts de voltaje de armadura (para controles a 115 volts C.A.). En controles que usan retroalimentación con tacómetro, este ajuste puede requerir ser restablecido en el campo. La rotación del potenciómetro en el sentido de las manecillas, incrementa el voltaje máximo de armadura y la velocidad máxima del motor. Voltajes menores que los establecidos de fabrica, pueden ser ajustados; pero incrementarlos para proporcionar mayores voltajes, puede resultar una operación errática del motor, especialmente si el voltaje de línea de C.A. es bajo, lo cual no es recomendable.

- Potenciómetros de ajuste “+ Bal” y “- Bal”.

Establecen la cantidad de “crossfire” ( pulsos alternados de corriente positiva y negativa ) lo cual ocurre cuando el comando de velocidad es cero. Esto determina una respuesta de señal pequeña del control “PRD-2”. Girando ambos potenciómetros en el sentido de las manecillas elimina el “crossfire” y causa una banda muerta. Girando ambos potenciómetros en sentido contrario a las manecillas, incrementa el “crossfire” y se incrementa la sensibilidad a los cambios de pequeña señal de velocidad. Los ajustes establecidos de fábrica proporcionan adecuada sensibilidad para una buena servo-respuesta en la mayoría de los motores. Reemplazando el modulo de disparo, no es necesario el reajuste de estos dos potenciómetros.

Finalmente, ninguno de estos ajustes fue necesario ya que mediante la puesta en marcha bajo condiciones normales de servicio y operación, se comprobó el correcto funcionamiento de cada convertidor, tal como se describe en la sección siguiente. Además la realimentación se lleva a cabo mediante el voltaje de armadura del motor.

### 4.3.- Prueba de los convertidores.

Para comprobar el correcto funcionamiento de los convertidores se procedió de acuerdo a las instrucciones dadas por el fabricante, descritas en el apartado 4.2.2. tomando en cuenta que la realimentación efectuando las siguientes pruebas:

1.- Verificación de la compatibilidad de los voltajes de campo y armadura. En este caso el fabricante establece que estos valores de voltaje del motor no sean menores a los especificados en los datos de placa del convertidor. De acuerdo a los datos obtenidos y especificados se comprueba que si son adecuados; es decir 115 volts de armadura y campo del motor, para 100 y 75 volts respectivamente proporcionados por el convertidor considerando que su alimentación es de 115 volts C.A. Cabe aclarar que en esta aplicación los motores cuentan con embobinado sencillo de campo.

2.- Verificación del voltaje de alimentación de acuerdo al especificado en la placa del convertidor. En este caso se considera para 115 volts C.A.

3.- Conexión de acuerdo al diagrama de la figura 4.1. Cabe aclarar que el ajuste de la velocidad de referencia se realiza mediante potenciómetro externo, considerando velocidad de cero al centro; y velocidad máxima a la izquierda y a la derecha, mediante el giro del potenciómetro hacia sus extremos.

4.- La operación es satisfactoria al ajustar gradualmente el potenciómetro, desde el extremo correspondiente a velocidad máxima a la derecha, velocidad cero al centro y velocidad máxima a la izquierda en el extremo opuesto del potenciómetro.

5.- Cuando la operación es satisfactoria el fabricante da la opción de los ajustes de instalación mediante ocho potenciómetros ubicados en la tarjeta principal, en los cuales aclara que han sido ajustados de fábrica y que a excepción del marcado como "IR", no requieren ningún cambio en instalaciones normales cuando se usa voltaje de retroalimentación por armadura. Aunque existe la opción de reajustar este potenciómetro "IR", se ha dejado sin cambio alguno, debido a que sí se logra una buena regulación de la carga. Por lo tanto, como en esta aplicación no es necesario reajustar estos potenciómetros; se dejan sin cambio alguno, ya que se cumple con un funcionamiento normal y de operación estable.

6.- En cuanto a los ajustes posteriormente descritos por el fabricante, como el que habla sobre operar el sistema a 50 Hertz, doble devanado de campo, referencia de

velocidad por señal externa de voltaje, etc.; no aplican en este caso. Por lo tanto la siguiente verificación solo es respecto a las otras dos opciones de cómo establecer la referencia de velocidad.

7.- Finalmente se comprueba la variación de velocidad en un solo sentido de giro del motor, en donde el valor de velocidad cero corresponde a un extremo del potenciómetro de referencia de velocidad, y el valor máximo, corresponde a su extremo opuesto. También se puede elegir el cambiar el sentido de giro del motor ajustando de igual forma al potenciómetro. Para ello se realizaron las conexiones indicadas en diagrama de conexionado de la figura 4.1 en donde se indica que el potenciómetro se coloca entre las terminales A,C, y D; para un movimiento llamado "Forward" (hacia delante); y entre las terminales B, C y D; para un movimiento llamado "Reverse" (hacia atrás, ó reversa). Efectivamente mediante estas opciones de conexión, el convertidor logra controlar la velocidad del motor en un sentido ó en otro.

Estas pruebas se realizaron a ambos convertidores, comprobando sus óptimas condiciones, así como su buen desempeño para el control de velocidad.

#### 4.4.- Antecedentes del sistema de control.

Una vez que se ha logrado conocer las características tanto del sistema a controlar (motores, reductores y rodillos) como de los controladores (convertidores), así como también el haber comprobado sus condiciones de funcionamiento; se analiza la forma en que deberán adaptarse para trabajar en conjunto.

Como primer punto a considerar, se estudió la posibilidad de adaptar los dos convertidores de tal forma que se lograra cumplir con el doble control de variables; es decir velocidad y tensión. En este sentido se deben concatenar los dos convertidores de tal manera que la velocidad y la tensión en la banda, sean controladas para ambos sentidos de desplazamiento.

Esta posibilidad de funcionamiento deberá ser tal que para un desplazamiento de la banda hacia la izquierda, el motor y el rodillo ubicados en este mismo lado permitirán el enrollado, mientras que con el motor y el rodillo ubicados en el extremo opuesto (lado derecho del gabinete) se permita desenrollar la banda (véase la figura 4.2).

De esta forma el par del motor que hace girar al rodillo enrollador, debe ser superior al par del motor que mueve al rodillo desenrollador, lográndose así mantener cierta tensión en la banda. Es decir, el motor que mueve al rodillo desenrollador, será acarreado por medio de la banda actuando como un freno fijo; mientras que el motor que hace girar al rodillo enrollador, deberá ser el motor acarreador, el cuál debe regular la velocidad de movimiento de la banda.

Ahora bien, si el desplazamiento de la banda es en sentido contrario, es decir hacia la derecha, las funciones de control deberán ser invertidas. En este sentido el motor ubicado del lado derecho del gabinete, tomará el control de la velocidad de la banda, actuando con mayor par para acarrear al motor del lado izquierdo que ahora deberá aplicar el freno necesario para tensar la banda.

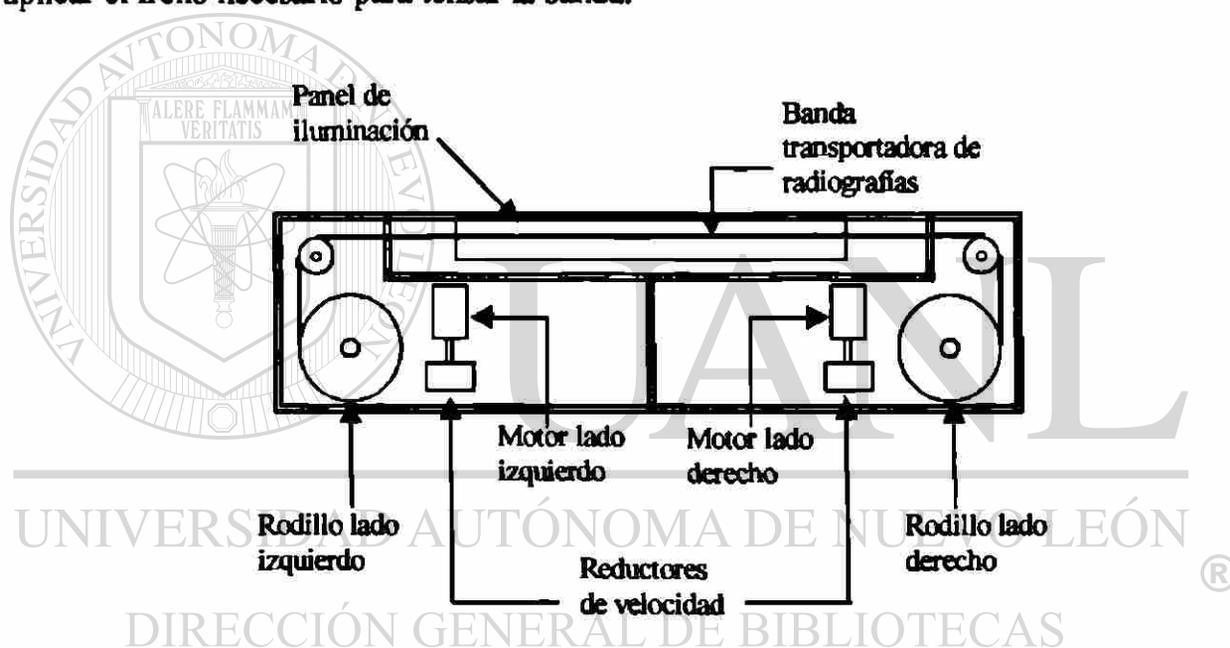


Figura 4.2.- Gabinete y componentes del interpretador de radiografías

En base a estos criterios de funcionamiento requeridos, los convertidores deberán ser adaptados para regular tanto velocidad como tensión de forma alternada, según el sentido de movimiento de la banda. La velocidad a la cual se moverá la banda es establecida mediante el ajuste del potenciómetro de referencia en cada convertidor ya que de esta manera se hace variar la velocidad de giro de uno u otro motor, según el sentido de movimiento de la banda. Para lograr tensar la banda como ya se mencionó, es a través de un par inverso de frenado desarrollado por el motor que esta siendo

acarreado. De acuerdo a esto, el par de frenado deberá ser menor que el par aplicado por el otro motor, ya que si no es así la banda estaría sometida a dos fuerzas quizás de igual magnitud pero de sentido contrario. Esto provocaría un desplazamiento nulo de la misma o inclusive su rompimiento. Este par inverso de frenado en cada motor se logra activando las condiciones en la regulación de corriente de armadura de cada convertidor, es decir; que además de trabajar como regulador de velocidad, lo haga como control de tensión mediante el ajuste del límite de corriente de armadura en el motor; para que de esta forma el par inverso del motor que está siendo acarreado, sea limitado a cierto valor máximo.

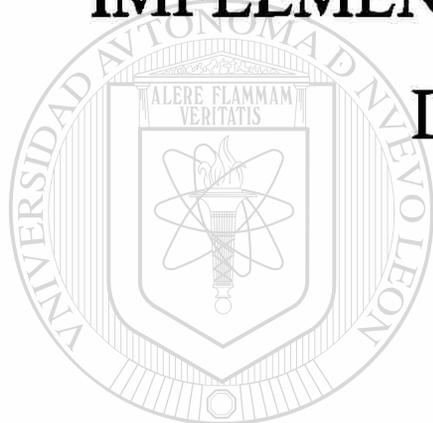
De acuerdo a lo anteriormente descrito los convertidores establecen el control de velocidad de cada motor para un mismo sentido de giro, solo que el motor cuyo ajuste de límite de corriente sea activado al instante del arranque del sistema, su par de torsión estará siendo limitado y de esta manera será forzado por el otro motor a través de la banda, a girar en sentido contrario a su movimiento normal.

Para lograr la activación y conmutación de los convertidores será necesario implementar un circuito de relevación mediante el cual se establezcan las condiciones de funcionamiento para ambos sentidos de movimiento de la banda. Esto se logrará mediante una estación de botones en donde se seleccione el sentido de movimiento de la banda, además del arranque y paro del sistema.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 5 DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL.



# UANL

### 5.1.- Introducción.

De acuerdo a los criterios anteriormente considerados para determinar el modo de operación y funcionamiento del equipo, el desarrollo y la implementación del sistema de control, se efectúa en dos etapas. Estas dos etapas del sistema de control son: los convertidores conmutados de corriente directa y el circuito de relevación requerido para el accionamiento y conmutación de los convertidores.

Por lo tanto en el presente capítulo se expone el análisis, desarrollo e implementación de este sistema de control de velocidad y tensión. Primeramente se presenta el circuito de regulación de los convertidores junto con los ajustes de velocidad y límite de corriente. Dichos ajustes son necesarios para establecer los valores de referencia de velocidad y tensión de la banda.

Enseguida se describe al circuito de accionamiento implementado mediante un tablero de mando en el que se ubica los botones de accionamiento y los potenciómetros

de referencia de velocidad y tensión. Por último se hace una descripción de la forma en que opera el sistema completo.

## 5.2.- Regulación en los convertidores.

Como ya se vio anteriormente en el capítulo 2, un convertidor conmutado de corriente directa, es un sistema electrónico capaz de regular la velocidad de un motor de C.D. con excitación independiente, mediante el método de control por voltaje de armadura, es decir, la alimentación de su campo es constante mientras que la de su armadura es variable.

Esta variación en la magnitud y polaridad del voltaje de armadura permite al motor girar en un sentido ó en otro y a diferentes velocidades desde un valor de cero hasta su velocidad nominal.

Cuando la velocidad a la cual esta girando el motor es incrementada por un factor no deseado como el sobreacarreo ó sobrevelocidad, el motor se comporta como generador de tal forma que el voltaje contraelectromotriz se vuelve un poco mayor que el voltaje aplicado. Por lo tanto, el sentido de la intensidad de corriente de armadura se invierte, lo que provoca un par inducido contrario, resultando que el motor se frene hasta lograr el valor de velocidad en el que se encontraba inicialmente. Así, uno de los dos convertidores estará operando a su respectivo motor bajo estas condiciones de funcionamiento moviendo al rodillo que enrollará la banda.

Mientras esto sucede con el motor y el rodillo en el que se envuelve la banda, el otro motor inicialmente es manejado por el convertidor de la misma forma y con un giro tal que su movimiento es también para tratar de enrollar la banda; pero, ¿qué es lo que sucede un instante inmediato después?.

Lo que sucede es que el primer motor desarrolla un par inducido mayor que “forza” a través de la banda, a que este segundo motor gire en sentido contrario, y finalmente su rodillo es obligado a girar en el mismo sentido que el otro.

Para describir este funcionamiento con el convertidor considérese el circuito de la figura 5.1. En ella se muestra en forma sencilla como actúa el convertidor bajo este régimen de funcionamiento. Cuando el conjunto de motor y rodillo es manejado para envolver la banda, el par desarrollado por el motor se establece en el mismo sentido que

su movimiento, Figura 5.1a; generándose una potencia positiva. Bajo estas condiciones de funcionamiento el convertidor regula la velocidad del motor en la forma ya conocida.

Ahora bien, cuando el movimiento del conjunto “motor-rodillo” es para desenvolver la banda; como ya se mencionó anteriormente, el motor es obligado a girar en sentido contrario a su movimiento inicial; por lo tanto el par desarrollado se opone a este movimiento (figura 5.1b). Al ocurrir esto, el voltaje de armadura que proporciona el convertidor cambia de polaridad, dando un potencial menos negativo (es decir, más positivo) que el generado debido al movimiento de acarreo.

De esta manera se mantiene el mismo sentido en la corriente de armadura y por lo tanto el mismo sentido del “par-motor” que se opone al movimiento de acarreo, y mediante el cual se establece el freno necesario para tensar la banda. Ahora esto implica un valor negativo de potencia.

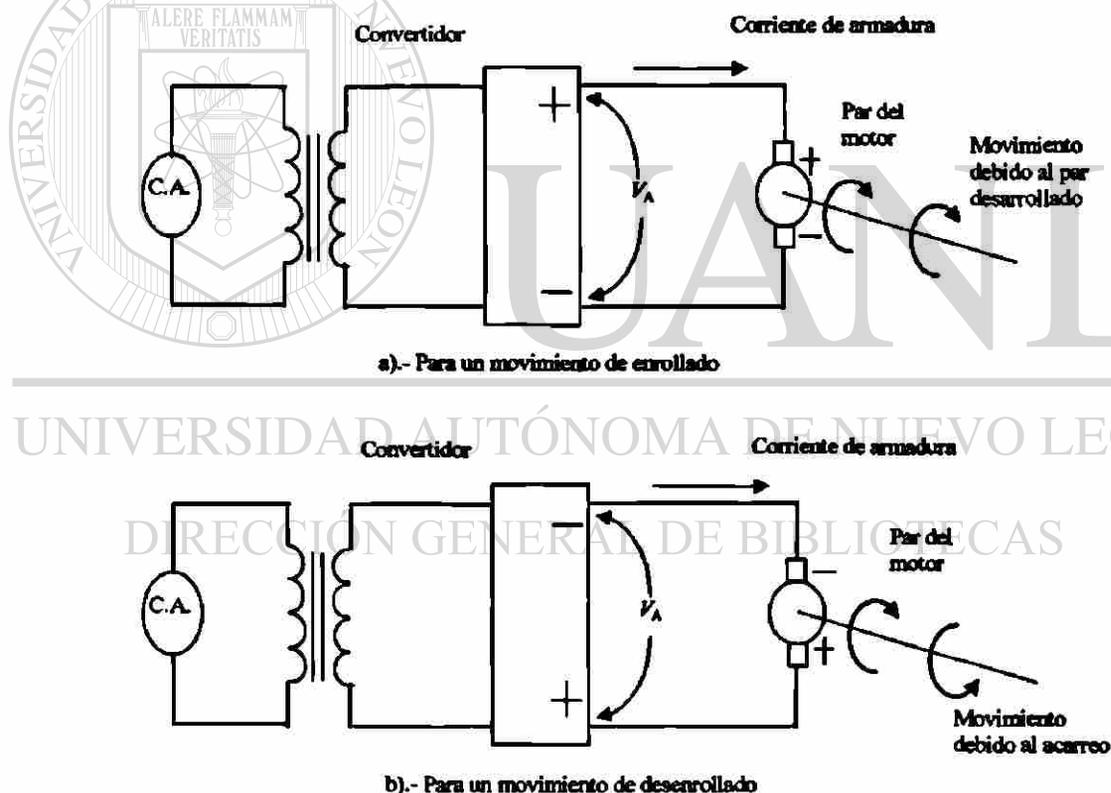


Figura 5.1.- Funcionamiento de los convertidores.

En este último caso, si la intensidad de corriente de armadura es limitada hasta cierto valor sin dejar que llegue al máximo, entonces el par del motor también se estará

limitando, y de esta forma se consigue que este par sea menor que el aplicado por el motor que mueve al rodillo enrollador de la banda.

Al momento de invertir el sentido de desplazamiento de la banda, el límite de corriente se aplica ahora al primer motor para limitar su par y lograr así que éste sea el acarreado. En resumen, aquel motor que al instante del arranque no se le aplique límite de corriente, desarrollará un par mayor que obligará al otro a mover su rodillo en el mismo sentido; es decir lo acarrea.

### 5.2.1- Funcionamiento del límite de corriente.

Considérese el circuito de la figura 5.2 en el que se explica cómo se limita la corriente de armadura del motor y consecuentemente el par desarrollado. Para una mejor comprensión de esta etapa el circuito se ha simplificado para representar de una forma más sencilla el modo en que trabaja.

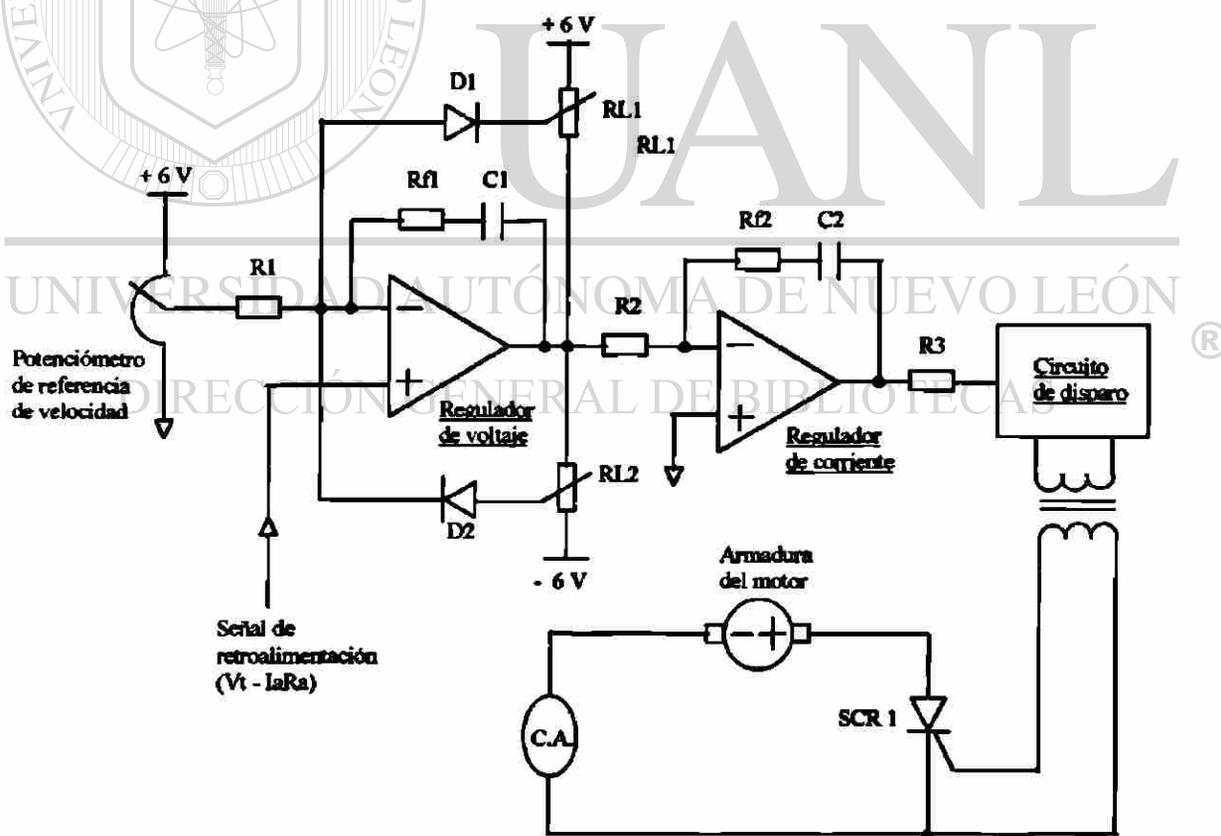


Figura 5.2.- Circuito de regulación y límite de corriente.

El circuito consta de tres etapas: regulador de velocidad, regulador de corriente y circuito de disparo. La primera etapa esta representada por un amplificador diferencial integrador, en la que se compara el valor de referencia ajustado en el potenciómetro de velocidad, con el valor medido de retroalimentación proveniente de la armadura. Llamemos a su salida de voltaje, acción de control, la cual es tomada como entrada de referencia por la etapa de regulación de corriente. Esta última está representada por un amplificador cuya salida activa el circuito de disparo para conmutar la etapa de potencia y de esta manera variar el voltaje y la corriente de armadura hacia el motor.

Como puede observarse, la señal de retroalimentación es el valor medido que se compara con el valor deseado y de allí se define el error a compensar. Esta señal de retroalimentación es el voltaje generado por el motor (fuerza contraelectromotriz), el cual depende en forma directamente proporcional de la velocidad de movimiento del motor. Esta relación tal como se definió en el capítulo 2, está dada por:

$$S = \frac{E_c}{K \cdot \Phi} = \frac{V_t - I_a \cdot R_a}{K \cdot \Phi}, \quad (2.26)$$

en la que:

$S$  = velocidad del motor en R.P.M.

$E_c$  = Voltaje generado ó fuerza contraelectromotriz,

$K$  = Constante de construcción de la máquina,

$\Phi$  = Flujo magnético proporcionado por el devanado de campo del motor,

$V_t$  = Voltaje en terminales de armadura,

$I_a$  = intensidad de corriente de armadura,

$R_a$  = Resistencia de armadura.

Al existir una diferencia entre el valor de referencia y el valor medido (voltaje retroalimentado generado en el motor) la salida del amplificador comienza a variar para compensar el error. Es aquí en esta etapa en donde se efectúa el límite de corriente de la armadura del motor, por lo tanto se requiere mayor atención a esta parte. Si en un momento dado, en el que no existe error, el voltaje de entrada llamado " $V_i$ " es igual a

cero, también lo será el voltaje de salida denominado “ $V_o$ ”. En este momento ninguno de los dos diodos tiene polarización, por lo tanto, se comportan como circuitos abiertos.

Ahora bien, al existir una señal de error, voltaje positivo por ejemplo “ $V_i = (+)$ ” cuya magnitud va en aumento, llega un instante en que este potencial positivo es ligeramente mayor que el potencial positivo en el cátodo del diodo “ $D_1$ ”, con lo cual se polariza directamente y conmuta al estado de conducción provocando una caída de voltaje de 0.7 volts entre sus terminales. El otro diodo “ $D_2$ ” se mantiene en estado de no conducción debido a la polarización inversa entre sus terminales. A partir de este momento la salida de voltaje “ $V_o$ ” que iba en aumento se limita a cierto valor máximo.

Este valor límite se debe al efecto regulador del diodo. Para ejemplificar este caso refiérase a la figura 5.3a, en la cual se muestra cómo se analiza esta parte del circuito.

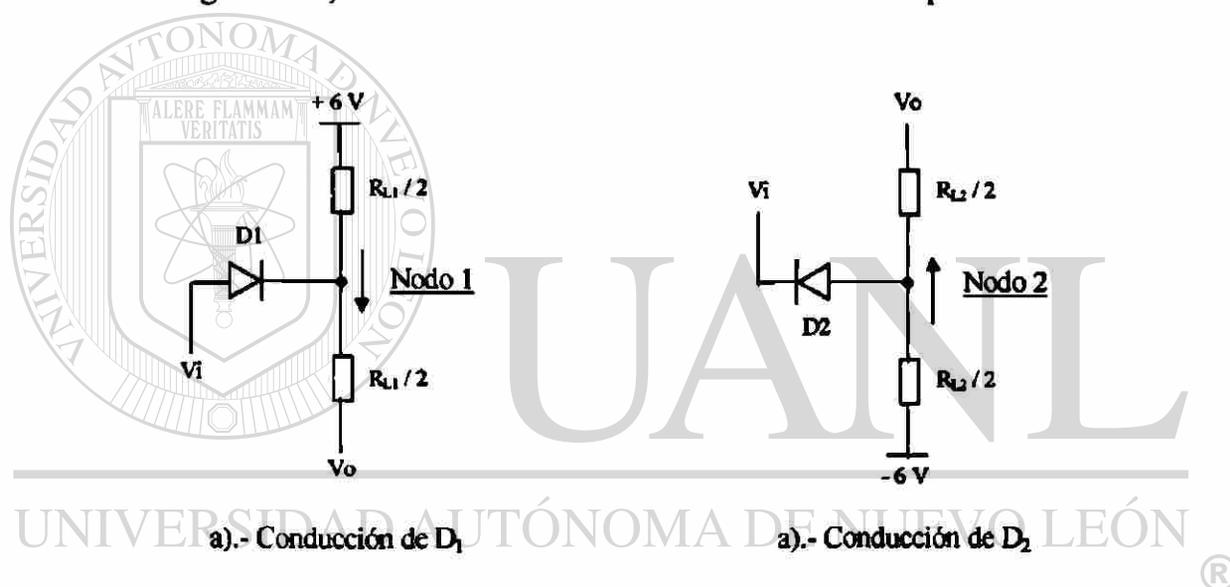


Figura 5.3.- Diodos recortadores para el límite de corriente

Una vez que el diodo “ $D_1$ ” es llevado a conducción y considerando que el potenciómetro de ajuste de límite de corriente “ $R_{L1}$ ” se establece a la mitad de su rango, por ejemplo 500 ohms, el valor límite del voltaje de salida “ $V_o$ ” será:

- En el nodo 1:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{+6 \text{ v} - (-0.7 \text{ v})}{500\Omega} = \frac{+6 \text{ v} - V_o}{1000\Omega},$$

$$\left(\frac{6.7 \text{ v}}{500\Omega}\right) \cdot 1000\Omega = 6 \text{ v} - V_o,$$

$$V_o = 6 \text{ v} - 13.4 \text{ v},$$

$$V_o = -7.4 \text{ volts.}$$

De esta manera si la señal de entrada aumenta, el voltaje de salida es limitado a este valor máximo de  $-7.4$  volts.

Por lo tanto como este valor de salida es la referencia a la etapa de regulación de corriente, está última sólo proporcionará una señal de salida de acuerdo al valor establecido en su entrada, y no más. Finalmente, el motor desarrolla un par equivalente a este valor límite de voltaje.

Por otro lado, considerando que ahora el error es negativo, es decir " $V_i = (-)$ ", y que su magnitud va en aumento; llega un instante en que este potencial negativo es ligeramente mayor que el potencial negativo en el ánodo del diodo " $D_2$ ", con lo cual se polariza directamente y conmuta al estado de conducción, provocando una caída de voltaje de  $0.7$  volts entre sus terminales. El otro diodo " $D_1$ " ahora se mantiene en estado de no conducción debido a la polarización inversa entre sus terminales. A partir de este momento la salida de voltaje " $V_o$ " que iba en aumento también se limita a cierto valor máximo. Este valor límite se mantiene regulado por del diodo " $D_2$ ".

Refiérase a la figura 5.3b en la cual se muestra en forma semejante al caso anterior, el análisis en ésta parte del circuito.

Una vez que el diodo " $D_2$ " es llevado a conducción y considerando de igual manera que el potenciómetro de ajuste de límite de corriente " $R_{L2}$ " se establece a la mitad de su rango, por ejemplo  $500$  ohms, el valor límite del voltaje de salida " $V_o$ " será:

- En el nodo 2:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{-6 \text{ v} - (0.7 \text{ v})}{500\Omega} = \frac{-6 \text{ v} - V_o}{1000\Omega},$$

$$\left(\frac{-6.7 \text{ v}}{500\Omega}\right) \cdot 1000\Omega = -6 \text{ v} - V_o,$$

$$V_o = -6 \text{ v} + 13.4 \text{ v},$$

$$V_o = 7.4 \text{ volts.}$$

Así que si la señal de entrada aumenta negativamente, el voltaje de salida es limitado a este valor máximo de 7.4 volts. Por lo tanto como este valor de salida es la referencia a la etapa de regulación de corriente, al igual que en el caso anterior pero ahora con " $V_i$ " negativo; solo proporcionará una señal de salida de acuerdo al valor establecido en su entrada, y no más. Finalmente, el motor desarrolla un par equivalente a este valor límite de voltaje.

En la gráfica de la figura 5.4, se muestra como el voltaje de salida " $V_o$ " de esta etapa aumenta conforme aumenta " $V_i$ ", hasta que se limita en +7.4 ó -7.4 volts. A partir de este instante " $V_o$ " se mantiene constante aunque " $V_i$ " continúe variando.

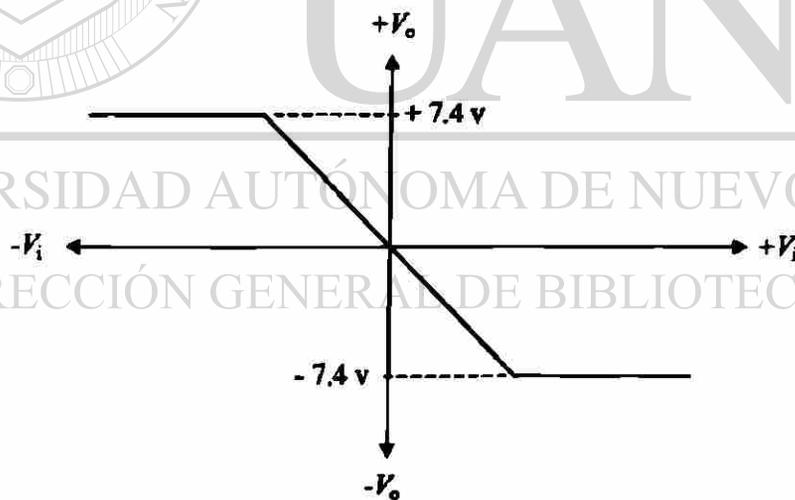


Figura 5.4.- Relación de voltajes en la etapa de regulación de velocidad.

En base al análisis anterior se concluye que al ajustar los potenciómetros denominados en este caso como " $R_{L1}$ " y " $R_{L2}$ ", se fija cierto valor de límite de corriente en el motor, correspondiente a cierta tensión en la banda.

Para lograr otro valor de voltaje límite distinto al anterior, los valores de resistencia de los potenciómetros son modificados tal como se muestra a continuación.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{-6 \text{ v} - (0.7 \text{ v})}{R_2} = \frac{-6 \text{ v} - V_0}{1000\Omega},$$

Suponiendo que ahora  $V_0 = 3$  volts; el valor de resistencia del potenciómetro correspondiente al lado de polarización fija y denominado como  $R_2$ , será de:

$$\left( \frac{-6.7 \text{ v}}{R_2} \right) \cdot 1000\Omega = -6 \text{ v} - 3 \text{ v},$$

$$R_2 = \frac{(6.7 \text{ v}) \cdot (1000\Omega)}{9 \text{ v}},$$

$$R_2 = 256.6 \Omega.$$

Así, para un valor menor de límite de voltaje, se fija un valor límite de corriente, tal que el motor desarrolla un par inducido más pequeño; lográndose con esto una menor tensión en la banda, ya que dicho par se opone en menor medida al par de acarreo del otro motor.

Para un caso contrario, es decir, si el ajuste en el potenciómetro es en el otro sentido, el valor límite se establece a una corriente mayor con lo cual se limita en menor medida el par del motor, aumentando así la tensión en la banda, esto debido a una mayor oposición al acarreo.

### 5.2.2.- Conexiones.

Para poder controlar el ajuste de límite de corriente en cada convertidor, el “puente” instalado desde fábrica es removido, y en su lugar se conecta el potenciómetro de ajuste de acuerdo a la figura 5.5.

Mediante la conexión directa de las terminales unidas por el puente, se aplica todo el voltaje disponible a la etapa de regulación de corriente, lográndose que el par

desarrollado por el motor sea el máximo. Este “puente” es el indicado en el diagrama A2001-000-ES del anexo 2: terminales 6 y 7 en la tarjeta principal “1TB”. De acuerdo a este esquema, el potenciómetro se conecta entre las terminales 7, 6 y 1, que corresponden a +6 volts, entrada y común, respectivamente. Esta entrada se dirige al módulo análogo denominado “AM-1” en el que se encuentra el circuito de control de velocidad y par-motor, y mediante el cual se establece el límite de corriente para el motor.

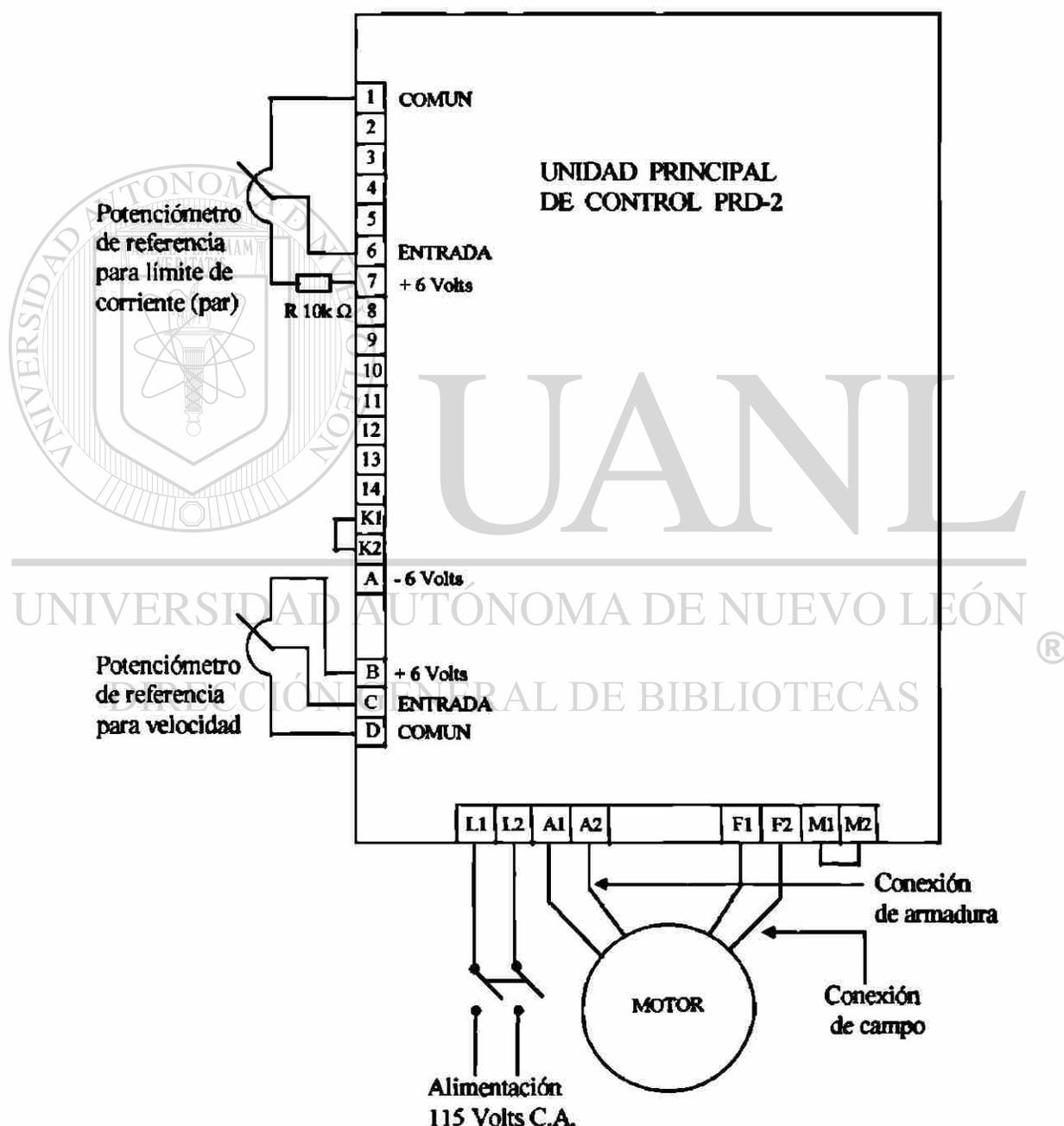


Figura 5.5.- Conexión del potenciómetro de referencia del límite de corriente.

De esta forma, al variar el potenciómetro desde un extremo hasta el otro, se estará aplicando un voltaje variable a la entrada del módulo análogo de control desde un valor de referencia igual a cero, hasta un valor máximo de referencia de + 6 volts.

Cabe aclarar que esta conexión es para ambos convertidores, ya que en los dos se requiere este ajuste del límite de corriente que no propiamente se da al mismo tiempo, sino en forma alternada.

Esto es, según el convertidor que al momento de la activación maneje al motor enrollador de la banda, en él no se aplicará el límite de corriente, logrando que desarrolle un par pleno o nominal.

Mientras tanto el otro convertidor sí se aplica el límite de corriente a su motor, con lo cual su par es limitado de acuerdo al valor establecido en el potenciómetro.

Una resistencia fija de 10 K $\Omega$  es conectada en serie con la terminal de cada potenciómetro, que va al voltaje de + 6 volts, para evitar que el límite de corriente sea nulo y por lo tanto que el par del motor aumente hasta su valor máximo. Es decir, en el supuesto caso que la resistencia del potenciómetro del lado de la entrada (terminal 6) sea cero, y considerando que no estuviese conectada la resistencia fija de 10 K $\Omega$ , todo el voltaje de polarización se estaría aplicando a la entrada de referencia, con lo cual no se limita la corriente de armadura hacia el motor. Consecuentemente el par desarrollado por este motor sería de la misma magnitud que el par desarrollado por el otro, la banda no se movería y se tensaría demasiado quizás hasta romperse. También puede suceder que alguno de los motores ó de los convertidores sufra algún daño debido a una sobrecarga. Esto hace muy necesario incluir esta resistencia fija para asegurar un valor “no-nulo” de límite de corriente.

Como puede verse es necesario coordinar el funcionamiento alternado de estos convertidores y de sus ajustes respectivos. Para tal efecto se desarrolla e implementa un circuito de conmutación mediante el cual también se consigue el arranque y paro del sistema. Este circuito se describe en el siguiente apartado.

### 5.3.- Circuito de Accionamiento.

Para poner en marcha el equipo y lograr que la banda se desplace en un sentido ó en otro, se ha desarrollado un circuito de accionamiento mediante el cual se establece la lógica necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.

Este circuito de accionamiento tal como se le ha llamado, permite el arranque y paro del sistema además de establecer el sentido de movimiento de la banda y de acuerdo a ello, activar ó desactivar el límite de corriente en cada convertidor según corresponda. En la figura 5.6 aparece el diagrama “escalera” en el que se detalla la lógica de operación establecida mediante este circuito.

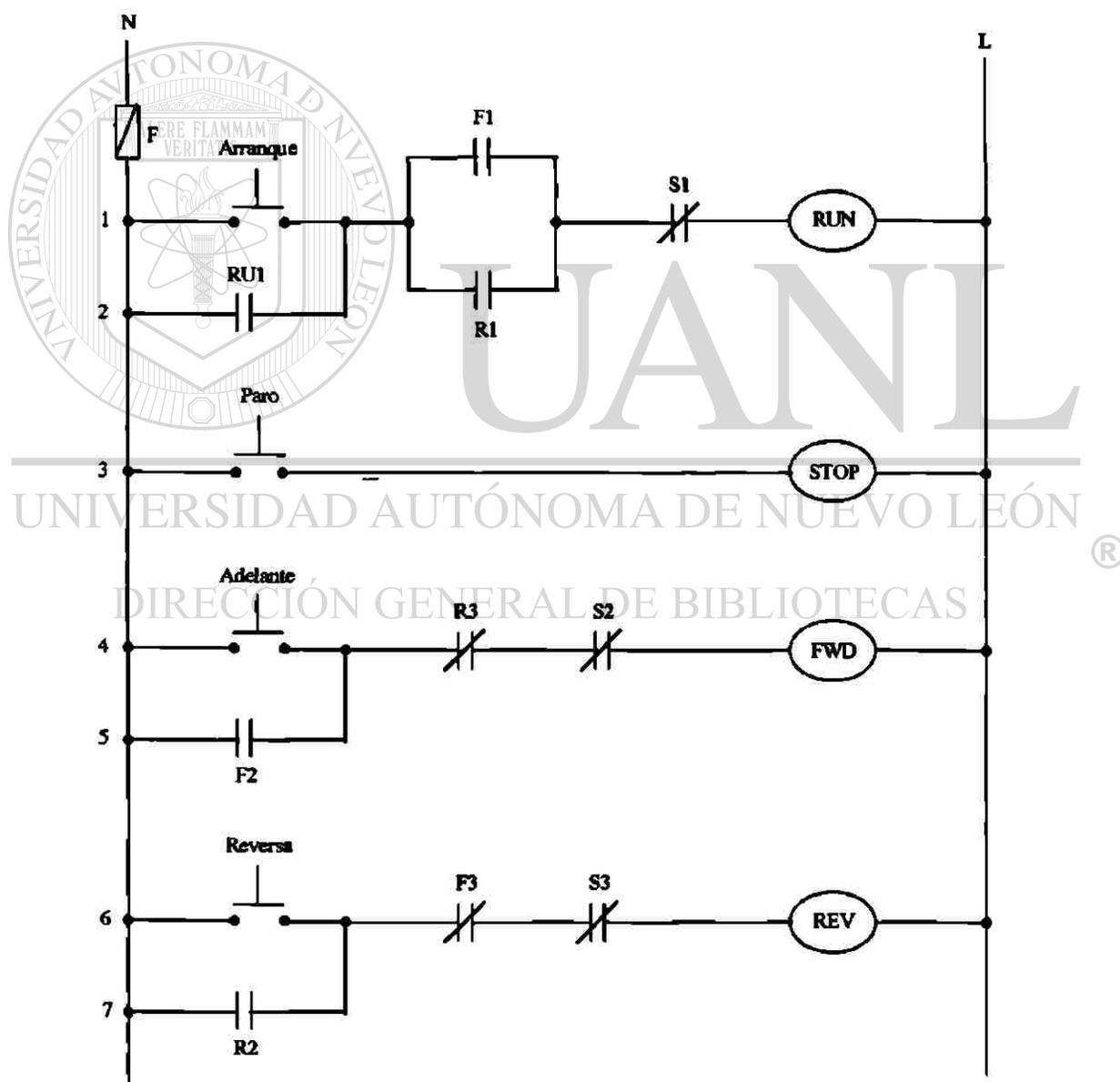


Figura 5.6.- Circuito de accionamiento por relevación.

El circuito incluye cuatro botones pulsadores de acuerdo al estado de operación en que se desee que funcione el sistema, esto son nominados como: arranque, paro, adelante y reversa. También, cuatro bobinas retentivas de relevadores electromagnéticos; dos de ellos con tres contactos de un polo doble tiro, y los otros dos relevadores con cuatro contactos también de un polo doble tiro.

Para describir el funcionamiento de este circuito de accionamiento y conmutación, refiérase al diagrama mostrado en la figura 5.6.

Para iniciar la marcha del sistema se pulsa el botón denominado como "arranque", además de uno de los dos botones que establecen el sentido de movimiento de la banda; ya sea el correspondiente al sentido de "adelante" ó el identificado como "reversa" que sirve para mover la banda en sentido contrario. Suponiendo que se elige mover la banda hacia adelante de tal manera que al pulsar este botón se energiza la bobina del relevador marcada como "FWD" (línea No.4). Esto es posible porque los contactos "R3" y "S2" se encuentran normalmente cerrados ó inactivos. Al mismo tiempo se cierra el contacto F1 (línea No.1) para dar permiso a la activación del arranque. Así mismo, también cierra el contacto "F2" (línea No.5) mediante el cual se mantiene energizada ésta bobina. El contacto "F3" (línea No.6) que está normalmente cerrado abre para impedir la activación del sistema en sentido de reversa evitando así que la bobina denominada como "REV" sea energizada al pulsar el botón respectivo. Finalmente si se acciona el botón de arranque, se energiza la bobina denominada como "RUN" cerrando su contacto "RU1" (línea No.2) a través del cual se mantiene energizada aunque se deje de pulsar el botón. En este instante se cierran los contactos "RU2" y "RU3" (véase el diagrama de la figura 5.7) los cuales conectan directamente las terminales "K1" y "K2" para el restablecimiento de energía de cada convertidor hacia su respectivo motor, lográndose finalmente el avance de la banda.

Aquí cabe detallar lo anteriormente mencionado en cuanto a la activación ó desactivación del límite de corriente para cada convertidor según el sentido de movimiento de la banda. Si el sentido de movimiento de la banda es hacia adelante, el convertidor No.1 ubicado en el lado izquierdo del gabinete (figura 4.2), establecerá el control de velocidad, con lo cual el motor del lado derecho será acarreado.

Para lograr esto el motor manejado mediante este convertidor debe desarrollar un par pleno, es decir no limitado.

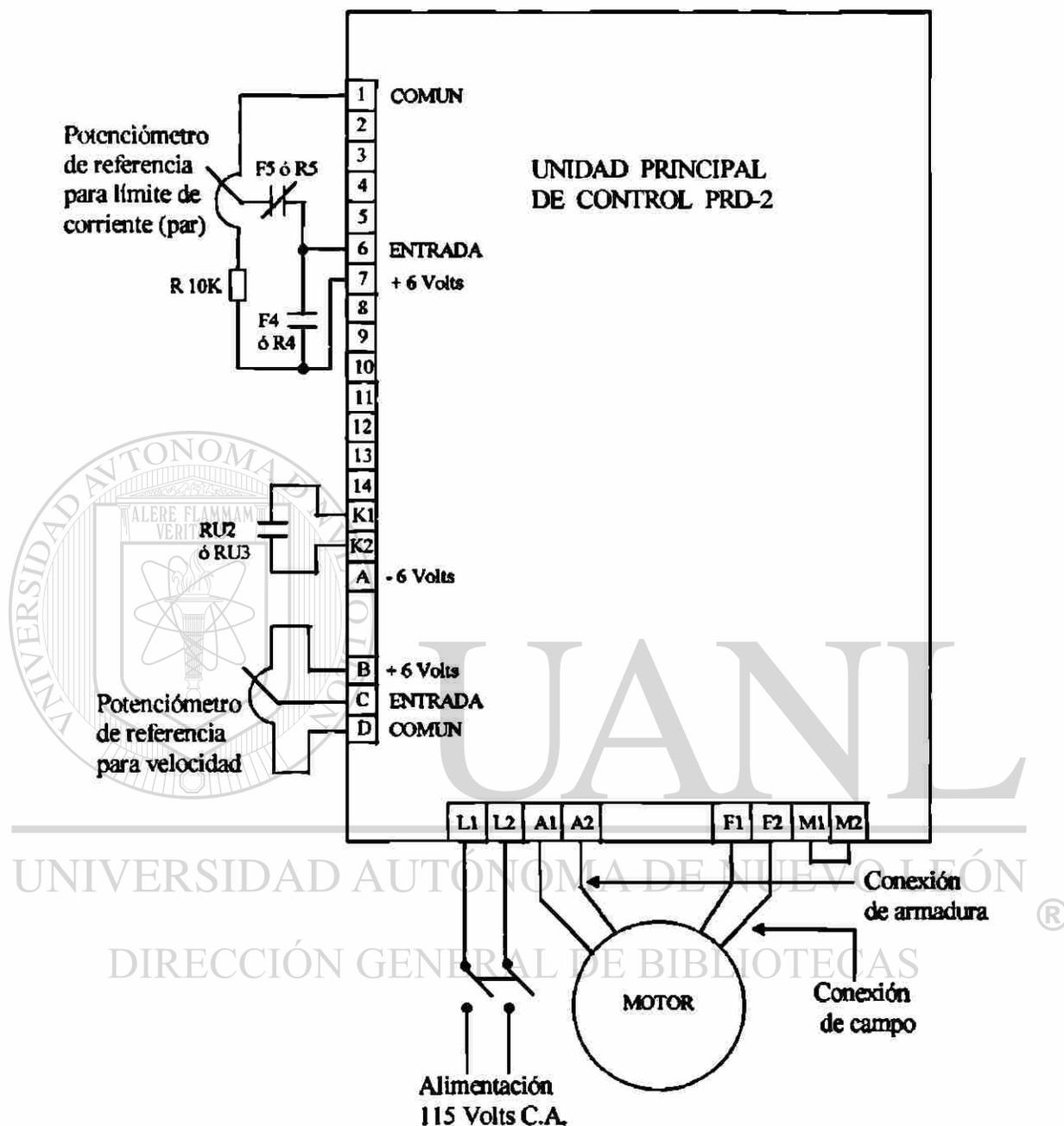


Figura 5.7.- Conexiones de contactos y potenciómetros en los convertidores

Para cancelar el límite de corriente se debe eliminar el efecto del potenciómetro de ajuste correspondiente; lo cual se logra mediante los otros dos contactos activados por la bobina "FWD". Estos contactos se disponen como se muestra en el esquema de la figura 5.7, en donde se observa que al momento de su activación, "F5" abre, desconectando la

terminal central del potenciómetro de la terminal 6 del convertidor. Al mismo tiempo cuando cierra "F4" se establece conexión directa entre las terminales 6 y 7 del convertidor aplicándose así toda la polarización de voltaje de + 6 volts a la entrada de referencia de su circuito de control. Esto implica que el valor de referencia del par que desarrolla el motor, no se limite. Finalmente la banda comenzará a enrollarse en el rodillo del lado izquierdo del gabinete, a una velocidad establecida y regulada por el convertidor de este mismo lado (convertidor No.1).

Para detener la marcha del sistema se pulsa el botón de "paro" (línea No.3); esto permite energizar la bobina de este relevador identificada como "STOP" mediante la cual conmutan los contactos normalmente cerrados "S1", "S2" y "S3" ubicados en las líneas No. 1, 4 y 6 respectivamente (figura 5.6). De esta forma se desactivan las bobinas de los relevadores de "arranque" y "adelante" (ó "reversa", según el sentido de movimiento establecido al inicio).

Una vez que el sistema se ha detenido, y al pulsar ahora el botón de "reversa", la secuencia de funcionamiento del circuito es semejante al caso anterior; es decir, primeramente se energiza la bobina de reversa "REV" (línea No.6) a través de los contactos "F3" y "S3" (línea No.6) que se encuentran normalmente cerrados porque está inactivos. Al soltar este botón la bobina se mantiene con energía a través de su contacto "R2". Al mismo tiempo se cierra el contacto "R1" dando permiso para energizar la bobina del relevador de arranque. Luego "RU2" y "RU3" cierran para activar nuevamente cada convertidor y así poner en marcha el sistema. Al igual que en el caso anterior, si el botón de arranque se deja de pulsar, la bobina se mantiene activada a través de su contacto "RU1".

Ahora en cuanto a el límite de corriente, este se aplica en el convertidor No.1 mediante la desactivación de los contactos "F4" y "F5" (figura 5.7), los cuales permiten conectar al potenciómetro de ajuste de límite de corriente entre las terminales 6 y 7 de este convertidor. Al mismo tiempo con la activación de los contactos "R4" y "R5" (figura 5.7), se desconecta el potenciómetro de límite de corriente del convertidor No.2 ubicado en el lado derecho del gabinete (figura 4.2).

Este último ahora tomará el control de velocidad de la banda y su motor desarrollará un par más grande, necesario para acarrear al motor y al rodillo del lado izquierdo. Esto permite que la banda se desplace en sentido contrario, es decir en reversa.

### 5.3.1.- Conexiones.

Se ha implementado un tablero de control en el que se ubica al circuito de accionamiento y a los potenciómetros de ajuste de velocidad y límite de corriente. Mediante este tablero de control se permite que el usuario accione y maneje el equipo a la manera deseada. Es aquí en donde se realizan las conexiones entre el circuito de accionamiento y los dos convertidores.

Se cuenta con dos pares de relevadores electromagnéticos asignados para cada estado de operación. Dos de ellos idénticos cuyas bobinas se han nombrado como "RUN" y "STOP" y que corresponden a las condiciones de arranque y paro, respectivamente. Estos relevadores cuentan con tres contactos de un polo doble tiro o de punto común, es decir tres contactos normalmente cerrados y tres normalmente abiertos. Para las condiciones de arranque a través de la activación de la bobina "RUN", se utilizan los tres contactos normalmente abiertos, y para lograr el estado de desactivación o paro del sistema, se utilizan los tres contactos normalmente cerrados del otro relevador cuya bobina se ha nombrado como "STOP". El otro par de relevadores también idénticos entre sí, cuentan con cuatro contactos de un polo doble tiro ó de punto común. Uno de ellos tiene como función dar marcha hacia adelante a la banda, una vez energizada su bobina a la cual se le ha llamado "FWD". El otro establece la marcha en reversa mediante la conmutación de sus contactos al activar su bobina nombrada como "REV". De cada uno de estos dos últimos relevadores se utilizan dos contactos normalmente abiertos y un contacto normalmente cerrado, todos ellos independientes. También se hace uso de un contacto normalmente cerrado con punto común, a uno normalmente abierto.

En la figura 5.8 se muestra la asignación que se ha dado a cada uno de los contactos utilizados. Los nombres asignados a cada contacto van de acuerdo a como se les ha llamado en el diagrama escalera del circuito de accionamiento mostrado en la figura 5.6.

También se emplea una caja metálica en cuya tapa se colocan los botones de accionamiento y los potenciómetros de ajuste de velocidad y límite de corriente, además de un galvanómetro de corriente directa implementado para visualizar la magnitud del voltaje de referencia en cada ajuste realizado.

#### Asignación de Contactos

<i>Relevador</i>	<i>Nombres y número de</i>			
Arranque ("Run")	RU1 	RU2 	RU3 	
Paro ("Stop")	S1 	S1 	S1 	
Adelante ("FWD")	F1 	F2 	F3 	F4  F5 
Reversa ("REV")	F1 	F2 	F3 	F4  F5 

Figura 5.8.- Asignación de los contactos utilizados de los relevadores.

El galvanómetro dado como amperímetro, tiene un rango de escala de 0 a 15 mA., y se le conecta en serie al terminal positivo una resistencia multiplicadora de 1 k $\Omega$  para lograr medir voltajes de 0 a 15 volts. Con esta escala es posible medir el voltaje ajustado en los potenciómetros de referencia de velocidad y límite de corriente, cuyo valor máximo es de 6 volts. Para visualizar el valor ajustado en cada potenciómetro, juntamente con el amperímetro, se utiliza un selector de cuatro posiciones, correspondientes a cada uno de los cuatro potenciómetro de ajuste, dos para cada convertidor (figura 5.9).

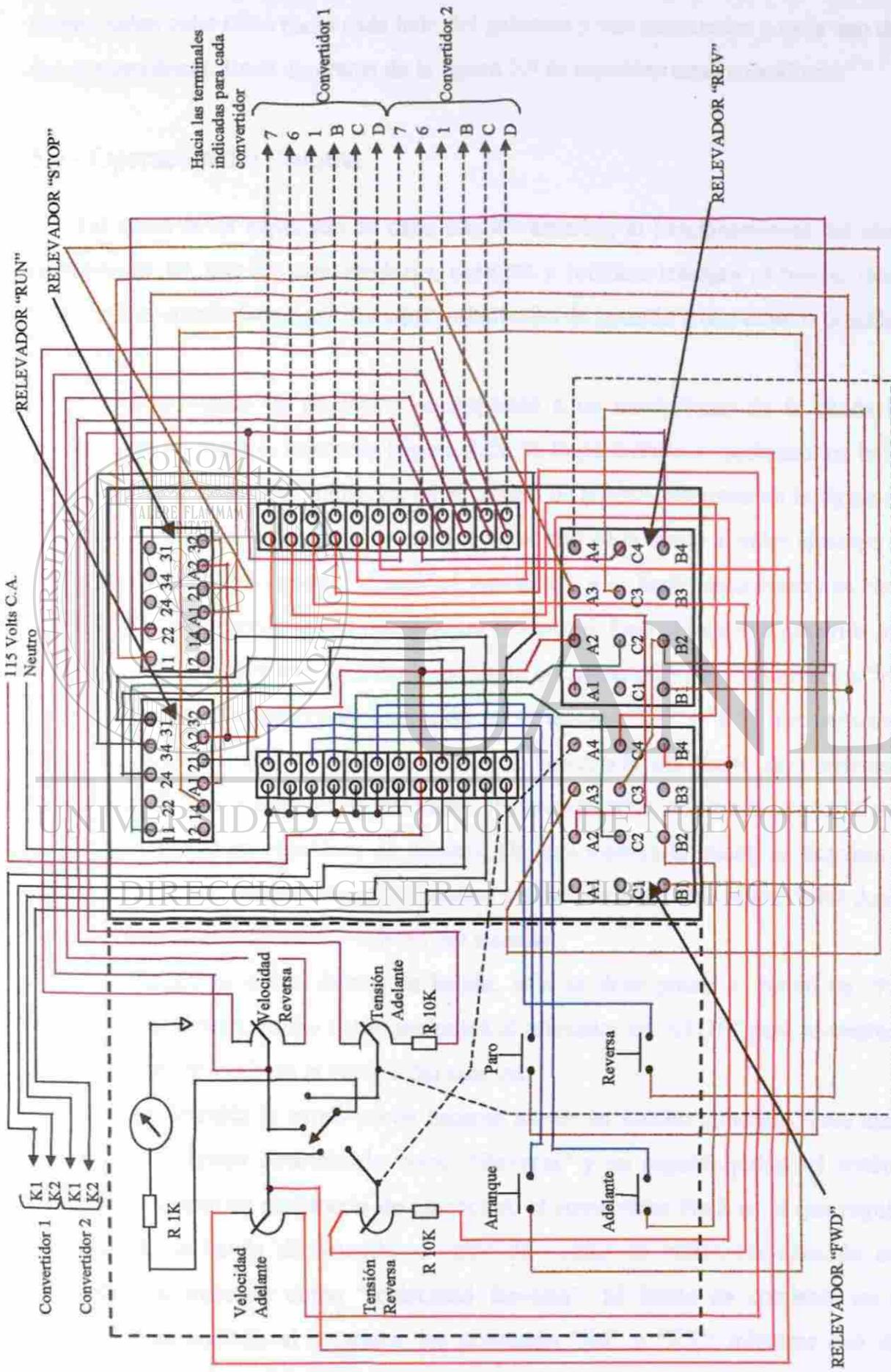


Figura 5.9.- Diagrama de conexiones en el tablero de control.

Además se utilizan dos tablillas de conexiones y cable de calibre 18. De esta caja de control salen ocho hilos hacia cada lado del gabinete y van conectados a cada uno de los dos convertidores. En el diagrama de la figura 5.9 se muestran estas conexiones.

#### 5.4.- Operación del Sistema.

Tal como se ha explicado en cada sección anterior, el funcionamiento del sistema completo es tal, que los convertidores, motores y rodillos, trabajan al mismo tiempo, solo que ejecutando funciones distintas y alternadas de acuerdo a dos estados posibles de operación.

El primer estado de operación corresponde a un movimiento de la banda cuyo desplazamiento hacia la izquierda (figura 4.2), se logra cuando se accionan los botones de “arranque” y “adelante” ubicados en el tablero de control mostrado en la figura 5.10. Para tal caso el convertidor No.1 controla la velocidad de la banda al valor ajustado en el potenciómetro marcado como “Velocidad Adelante”, y su límite de corriente es cero ya que el motor debe desarrollar el par máximo ó nominal. Esto último se logra en la forma ya vista en la sección anterior, es decir mediante la conmutación de los contactos “F4” y “F5”. Bajo estas condiciones de operación los contactos “R4” y “R5” que permanecen inactivos, permiten que el valor de voltaje de referencia del límite de corriente del convertidor No.2 sea establecido mediante el potenciómetro nombrado como “Tensión Adelante” ubicado en el tablero de control. De esta manera la banda se desplaza a la velocidad y tensión establecidas, pero pueden ser modificadas a un nuevo valor deseado sin que sea necesario detener la marcha del sistema.

Para cuando se desea detener la banda, solo se debe pulsar el botón de “Paro” ubicado en el tablero. Dicho botón accionará al relevador de “STOP” para conmutar sus contactos e interrumpir así la energía del sistema.

Una vez detenida la banda puede hacerse mover en sentido contrario. Para esto se debe pulsar el botón denominado como “Reversa” y en seguida pulsar el botón de “Arranque”. Ahora en este modo de operación, el convertidor No.2 es el que regula la velocidad de la banda de acuerdo al valor de voltaje de referencia ajustado en el potenciómetro marcado como “Velocidad Reversa”. El límite de corriente en este convertidor es anulado al conmutar los contactos “R4” y “R5”; mientras que en el

convertidor No.1, se ajusta el voltaje de referencia del límite de corriente, a través del potenciómetro identificado como "Tensión Reversa". De esta manera el motor que es accionado por este último convertidor (No.1), desarrollará un par menor y por lo tanto será acarreado a través de la banda por el motor que es manejado mediante el convertidor No.2.

Al igual que en el estado anterior de operación, es posible reajustar los valores de voltaje de referencia para velocidad y tensión en la banda. Así mismo, en todo momento se efectúa el control de estas dos variables, tanto para un sentido de movimiento como para el otro.

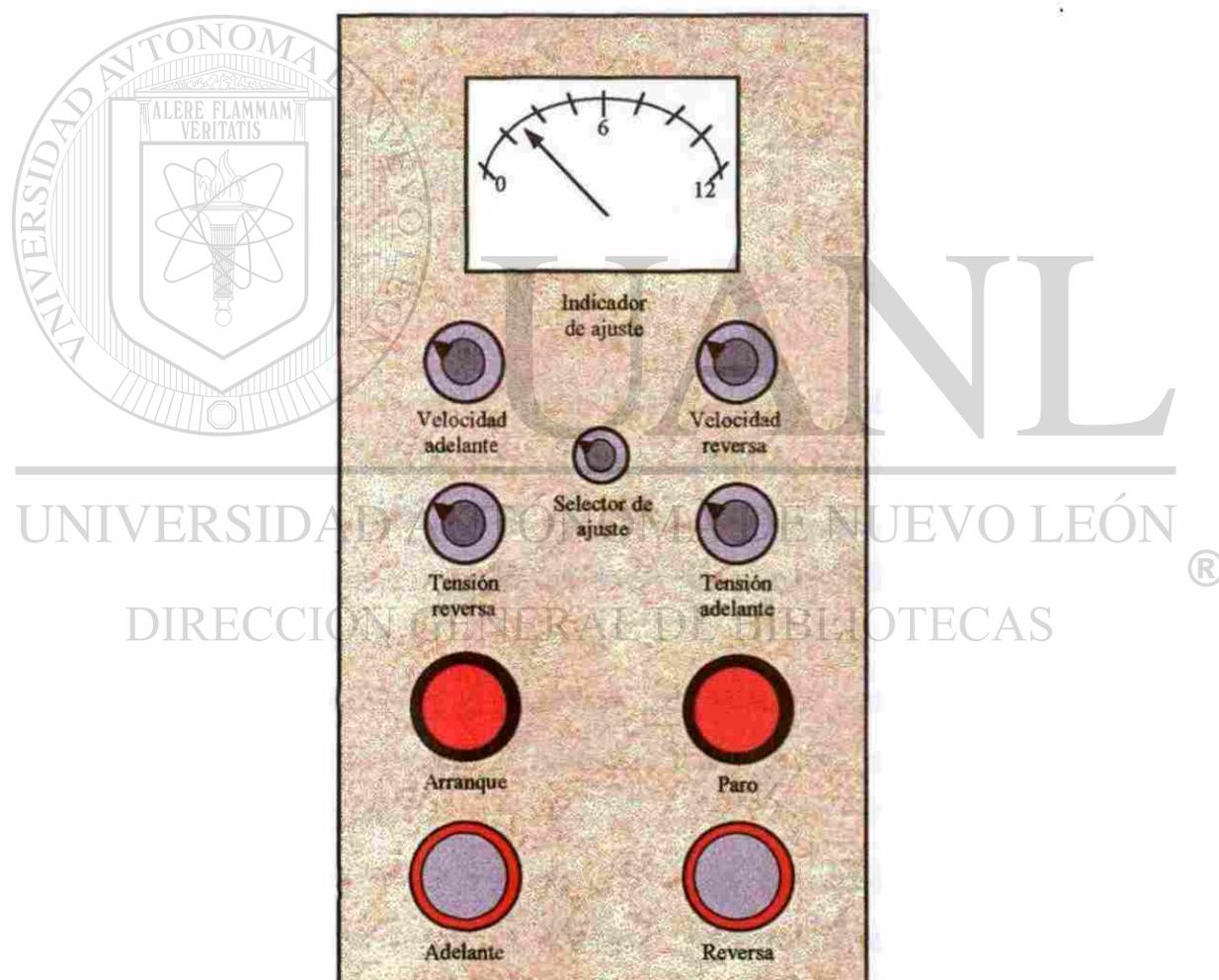
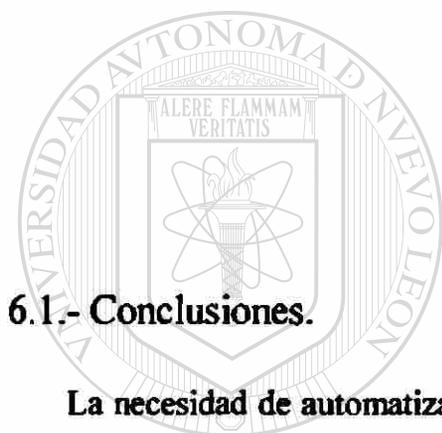


Figura 5.10.- Carátula del tablero de control.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.



### 6.1.- Conclusiones.

La necesidad de automatizar un equipo interpretador de radiografías para eficientar su funcionamiento y las eventualidades de implementación bajo un determinado criterio, fué lo que motivó a la realización de este trabajo. Así mismo, la visualización de un panorama en el que se contemplan retos técnicos, también contribuyó para desarrollar un trabajo práctico y experimental.

El reconocer el problema y encontrar una solución con equipo y material ya existente motivó también a lograr la automatización de éste dispositivo mediante un esquema totalmente distinto.

La solución implicó la utilización óptima de convertidores monofásicos con capacidad de regeneración, control de velocidad, y control de tensión mediante frenado regenerativo. Precisamente mediante la utilización de estos convertidores se logra observar la amplia gama de aplicaciones en que pueden ser implementados.

Los requerimientos para coordinar y establecer la lógica de funcionamiento entre los convertidores y el mecanismo de movimiento de la banda, llevó al desarrollo de un circuito de relevación cuyo objetivo final fue, que el control de las variables se realizara en ambos sentidos de movimiento de la banda, es decir que permitiera el enrollado de la misma hacia un lado ó hacia otro.

A pesar de que no se tratan criterios muy profundos o extensos en el área de control, muchas de las veces el desarrollo y la generación del conocimiento también tiene auge en el estudio de casos prácticos, tal como en este caso, en el que además se han desarrollado habilidades de análisis y se ha verificado la teoría básica de control.

## 6.2.- Recomendaciones.

Como ya se ha visto la regulación de velocidad y tensión se realiza exclusivamente mediante los convertidores acoplados a cada motor. Dentro del lazo de control los convertidores actúan como el compensador de la planta, en donde la planta está considerada como el conjunto de motores, reductores y rodillos.

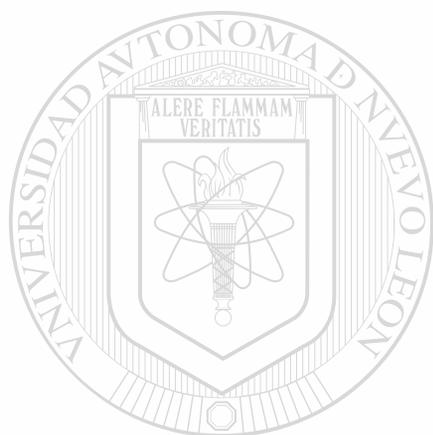
Se sugiere analizar la posibilidad de poder abrir éste lazo de control, para dejar que el compensador actúe como elemento final de control y así efectuar la compensación a través de un regulador externo tal como un control digital con computador o microprocesador.

Se elaboró también un acoplamiento que une los ejes de cada uno de los rodillos con un tacogenerador simple de corriente directa de imán permanente. Mediante este acoplamiento se puede efectuar la medición de velocidad en cada uno de los rodillos dada como un voltaje de 0 a 6.2 volts, correspondiente a una velocidad desde 0 hasta el valor nominal. Esto puede ser utilizado como señal de retroalimentación proveniente en forma más directa, de la planta que se está controlando, ya que se estaría midiendo la velocidad de movimiento de los rodillos la cual corresponde a la velocidad de la banda.

Por lo tanto se recomienda que en un estudio posterior se utilice ésta señal como retroalimentación hacia el control digital mencionado ó para implementaciones posteriores con nuevos algoritmos de control. De igual forma en un estudio más próximo, esta señal de realimentación puede obtenerse con un tacogenerador de mejores características mediante el cual se logre una señal con menor nivel de ruido y mayor

uniformidad, es decir, un voltaje de corriente directa con un bajo factor de rizo. De esta manera se puede analizar la respuesta del sistema y conocer así su desempeño como por ejemplo su característica de estabilidad.

Por otra parte, este prototipo del sistema enrollador quedó también preparado como material didáctico para la realización de prácticas con alumnos de ingeniería eléctrica e ingeniería de control.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## BIBLIOGRAFIA

- Gornáriz Castro, Spartacus; Biel Solé, Domingo; Matas Alcalá, José; Reyes Moreno, Miguel.  
*Teoría de control. Diseño electrónico.*  
 Grupo Alfaomega S.A. de C.V./ Ediciones UPC. 1999.
  
  - Ogata, Katsuhiko.  
*Ingeniería de control moderna. 3ª Edición.*  
 Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. 1998.
  
  - Richardson, Donald V.; Caisse, Arthur J. Jr.  
*Máquinas eléctricas rotativas y transformadores. Cuarta Edición.*  
 Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. 1997.
- 
- PolySpede Electronics.  
*PRD – 2. Single phase half-wave regenerative DC motor control. Basic Manual.®*  
 DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS
  
  - Boylestad, Robert; Nshelsky, Louis.  
*Electrónica. Teoría de circuitos.*  
 Prentice-Hall. Quinta edición 1998.

# LISTADO DE FIGURAS

Número de Figura	Nombre	Número de Página
2.1	Relación “salida-entrada” en un sistema de control.	9
2.2	Topología en sistemas de lazo abierto.	9
2.3	Topología en sistemas de lazo cerrado.	10
2.4	Sistema de lazo cerrado sometido a una perturbación	11
2.5	Ubicación de polos en función del valor de “ $\zeta$ ”.	14
2.6	Respuesta al escalón de un sistema de segundo orden.	15
2.7	Motor de corriente directa con excitación independiente.	22
2.8	Componentes básicos de un sistema de control para un motor de corriente directa.	24
2.9	Convertidor conmutado de cuatro cuadrantes.	25
2.10	Convertidor de modo conmutado de corriente directa.	26
3.1	Motor de corriente directa con excitación independiente con su eje acoplado a una carga.	32
3.2	Sistema mecánico reductor de velocidad.	35
4.1	Conexión del potenciómetro de velocidad.	44
4.2	Gabinete y componentes del interpretador de radiografías.	50
5.1	Funcionamiento de los convertidores.	54
5.2	Circuito de regulación y límite de corriente.	55
5.3	Diodos recortadores para el límite de corriente.	57

<b>5.4</b>	<b>Relación de voltajes en la etapa de regulación de velocidad.</b>	<b>59</b>
<b>5.5</b>	<b>Conexión del potenciómetro de referencia del límite de corriente.</b>	<b>61</b>
<b>5.6</b>	<b>Circuito de accionamiento por relevación.</b>	<b>63</b>
<b>5.7</b>	<b>Conexiones de contactos y potenciómetros en los convertidores.</b>	<b>65</b>
<b>5.8</b>	<b>Asignación de los contactos utilizados de los relevadores.</b>	<b>68</b>
<b>5.9</b>	<b>Diagrama de conexiones en el tablero de control.</b>	<b>69</b>
<b>5.10</b>	<b>Carátula del tablero de control.</b>	<b>71</b>
<b>A.1.1</b>	<b>Elección del modelo del convertidor de acuerdo a la cantidad de potencia de control en H.P. y según el enlace de derivación.</b>	<b>87</b>
<b>A.1a</b>	<b>Diodos semiconductores de la tarjeta E1508. ( Para todos los modelos PRD2 ).</b>	<b>96</b>
<b>A.1b</b>	<b>Puntos de conexión para la prueba de los "SCR". ( Todos los modelos PRD2, excepto el PRD2-200 ).</b>	<b>96</b>
<b>A.1c</b>	<b>Puntos de prueba en el módulo de potencia. Vista superior. (Solo para el modelo del convertidor PRD2-200).</b>	<b>97</b>

# GLOSARIO

- **ACC.-** Abreviación de aceleración. Asignación que se le da a un potenciómetro de ajuste en aplicaciones con control de aceleración-desaceleración.
- **Armadura.-** Parte móvil de un motor eléctrico llamado también rotor. Particularmente en lo que se refiere al devanado implicado en ésta parte.
- **“+Bal” ó “- Bal”.-** Abreviación de Balance positivo ó negativo en lo que respecta a los potenciómetros de ajuste de los convertidores. Estos determinan una respuesta de señal pequeña de control.
- **Cambio de Carga.-** Cambio en las condiciones de carga a las que está sometido un sistema. En ocasiones, estos es considerado como una perturbación.
- **Crossfire.-** Punto de disparo ó de conmutación de un tiristor de potencia ó de algún circuito de cambio.
- **DEC.-** Abreviación de desaceleración. Asignación que se le da a un potenciómetro de ajuste en aplicaciones con control de aceleración-desaceleración.
- **Drive.-** Convertidor conmutado de corriente directa para el control de velocidad de un motor.
- **Dow-Corning.-** Compuesto térmico aplicado a un dispositivo semiconductor para la disipación de potencia en forma de energía calorífica debido a un uso continuo.
- **Enrollador.-** Rodillo movido por un servomecanismo en el cual se envuelve una tira o banda.

- **Forward.-** Hacia adelante, en particular se refiere al movimiento hacia la izquierda de la banda transportadora de radiografías. También se abrevia como “FWD”.
- **Hardware.-** Referente a los circuitos electrónicos y conexión de un sistema.
- **Heatsink.-** Superficie ó área caliente. En particular se refiere a la superficie de un dispositivo de estado sólido calentada por la potencia disipada en forma de calor debido a un funcionamiento continuo.
- **Hi.-** Abreviación de “high”, que significa un valor alto ó máximo. En particular se refiere a un ajuste máximo ó a un máximo estado de operación.
- **+ Lim ó – Lim.-** Abreviación del límite de corriente en sentido negativo ó positivo hacia la armadura del motor, ajustado mediante dos potenciómetros.
- **Lo.-** Abreviación de “Low”, que significa un valor bajo ó mínimo. En particular se refiere a un ajuste mínimo ó a un mínimo estado de operación.
- **Manejadores.-** Se refiere a los convertidores conmutados que “manejan” a los motores de corriente directa.
- **Mat-Lab.-** Abreviación del término “mathematics laboratory” que significa laboratorio de matemáticas. Se refiere a un paquete computacional de programación mediante el cual pueden simularse sistemas de control.
- **MEGGER.-** Dispositivo eléctrico - electrónico de medición, utilizado para determinar la magnitud de aislamiento eléctrico de un circuito.
- **Perturbación.-** Factor externo a un sistema que provoca que no funcione dentro de las condiciones deseadas de operación.
- **Pins.-** Terminales ó patillas de conexión de un circuito integrado ó de una tablilla de conexiones.
- **Poly-spede Electronics.-** Nombre de la compañía estadounidense que fabrica los convertidores conmutados utilizados en el presente trabajo.

- **PRD-2.-** Se refiere al modelo o serie de los convertidores dado por el fabricante.
- **Regenerativo.-** Forma de controlar la velocidad de un motor cuando éste llega a trabajar como un generador de voltaje.
- **Reverse.-** Hacia atrás ó reversa, en particular se refiere al movimiento dirigido hacia la derecha de la banda transportadora de radiografías. También se abrevia como “REV”.
- **Run.-** Correr o arrancar. Se refiere a poner en marcha un equipo eléctrico ó electrónico.
- **SCR.-** Abreviación de “Silicon Controlled Rectifier”. Dispositivo electrónico llamado “rectificador controlado de silicio”.
- **Simpson 260.-** Instrumento de medición de resistencia eléctrica (ohmetro).
- **Stop.-** Detener o parar. Se refiere a detener ó desenergizar un equipo eléctrico ó electrónico.
- **Snap-on.-** Broche hermético ó conexión aplicada a presión.
- **Tensión – Adelante.-** Ajuste para tensar la banda cuando su movimiento es en sentido hacia adelante.
- **Tensión – Reversa.-** Ajuste para tensar la banda cuando su movimiento es en sentido hacia de reversa ó hacia atrás.
- **Transductor.-** Dispositivo que convierte una forma de energía en otro tipo de energía, es decir, a partir de una variable de entrada produce como salida otra de distinta naturaleza.

# ANEXOS

## A.1.- Información adicional de los convertidores PRD-2.

Esta información se proporciona como apoyo para estudios ó modificaciones posteriores. Incluye procedimientos para cambios de operación, de conexonado, ajustes según la aplicación requerida y una guía de inspección para la solución de problemas.

### A.1.1.- Encendido en sistemas con ajuste de velocidad sin potenciómetro.

Si la unidad de control contiene una interfase ó tarjeta de circuito con señal externa, (ambas están localizadas arriba de los módulos de la unidad de control), este procedimiento no aplica. Para instrucciones, véase el manual de opciones separadas. Si el sistemas no es de este tipo especial, identifíquelo y desconecte todos los cables de carga a la tarjeta terminal "1TB", terminales A,B,C y D. Conecte un extremo del cable puente bajo la terminal C. (Use un alambre aislado como cable puente; no toque las terminales o el cable puente aterrizado durante esta prueba). Encienda el aparato y toque el otro extremo del cable puente a la terminal A. El motor se acelerará hasta su máxima velocidad. Haga lo mismo pero en la terminal B. El motor se desacelerará rápidamente en reversa y se acelerara hasta su máxima velocidad de reversa. Ahora hágalo con la terminal D. El motor rápidamente se desacelerará hasta aproximadamente su velocidad cero. Si la operación es satisfactoria, apague el aparato, quite el cable puente y vuelva a conectar los cables externos a las terminales A,B,C y D de "1TB".

### A.1.2.- Ajustes para operación en 50 Hz.

Si el control fue recibido de fábrica ajustado para usarse en servicio monofásico de 60 HZ, los ajustes "+Bal" y "-Bal" deberán ser establecidos ó de lo contrario ocurrirá un excesivo "crossfire" al trabajar en 50 Hz. Gire ambos balances de los potenciómetros

completamente en el sentido de las manecillas para eliminar todo el “crossfire” e introduzca una banda muerta. En muchas aplicaciones esto nos dará una satisfactoria respuesta del control aún cuando se haya introducido una pequeña banda muerta. En aquellas aplicaciones que requieren de una respuesta óptima de control, el procedimiento deberá seguirse como se indica en el siguiente párrafo.

Con la energía desactivada, mueva el puente amarillo en el centro de la tarjeta E1489 hacia la posición “Bal”. Gire el potenciómetro “+Bal” y “-Bal” completamente en el sentido de las manecillas. Con el motor conectado al control, aplique la energía al control. Conecte un voltímetro que pueda leer milivolts de C.D. al “1TB-8” y al “1TB-1”. Ajuste el potenciómetro “-Bal” lentamente en dirección contraria a las manecillas. El aparato medirá -15 milivolts. Ahora ajuste el potenciómetro “+Bal” de tal forma que en el aparato se lea cero. Apague el equipo y coloque el puente amarillo en la posición “Hi”. El control está ahora listo para operación normal.

### A.1.3.- Cambio del voltaje de campo.

A menos que se especifique cuando se ordena, los controles PRD-2 son suministrados con voltaje de campo completo (100 Volts C.D. para 115 Volts C.A. y 200 Volts C.D. para 230 Volts C.A.) en las terminales “F1” y “F2” de la tarjeta terminal “10TB”. En aquellas aplicaciones que requieren mitad del voltaje de campo, el voltaje puede ser cambiado rápidamente en el campo con soldadura de hierro. Utilice soldadura de hierro de la que se usa para las tarjetas de PC a un máximo de 600 °F.

Con el aparato desconectado, quite los dos tornillos de la parte superior de la tarjeta PC E1489 al verse con la terminal “10TB” en la base. La tarjeta PC deberá estar ahora disponible para ser puesta boca abajo con los componentes de los circuitos inferiores. Desoldar el cable puente en la terminal tubular de prueba que es usada para la conexión del voltaje de campo completo en la tarjeta PC E1508. Resoldar este cable a la terminal tubular en el otro lado el cual es usado para abastecer el voltaje de campo medio. Cuando la unidad es energizada, el voltaje de campo deberá leerse ahora, nominalmente 50 Volts C.D. para controles a 115 Volts C.A. y 100 Volts C.D. para controles a 230 Volts C.A. Una vez más, para voltajes de campo completo, la capacidad máxima de corriente de entrega es de 2 amps.

#### A.1.4.- Opciones y modificaciones especiales.

Las características siguientes no están incluidas en las unidades estándar PRD-2, pero pueden ser especificadas al tiempo de comprarse y ser instaladas como opciones instaladas de fábrica.

##### A.1.4.1.- Opción aceleración - desaceleración.

La opción aceleración deberá ser especificada si los tiempos de aceleración-desaceleración ajustables, son los deseados. El PRD-2 acelera y desacelera un motor a relaciones limitadas únicamente por el establecimiento de los límites del par. La rápida respuesta resultante es deseable para muchas aplicaciones de posicionamiento de servos y circuito cerrado. La tarjeta de opción de aceleración deberá ser agregada para aplicaciones en las cuales se requiere de tiempos largos de aceleración y desaceleración para apropiadas respuestas del sistema. Están disponibles 3 diferentes ensambles de tarjetas de aceleración con varios rangos de tiempo de ajuste. Cuando es agregado este circuito enchufable, cambian los tiempos de aceleración-desaceleración, los cuales resultan desde 0 hasta 100 % en la velocidad del potenciómetro y este puede ser ajustado desde 0.15 hasta 11 segundos o desde 0.3 segundos hasta 14 segundos, ó desde 0.07 hasta 5 segundos, dependiendo de en cual opción de aceleración sea especificada.

La lógica interna en esta tarjeta, causa el tiempo de aceleración en el potenciómetro® "ACC" y el tiempo de desaceleración en el potenciómetro "DEC", para un correcto e independiente tiempo de aceleración y desaceleración, sin importar la dirección o la rotación del motor.

##### A.1.4.2.- Opción para interrupción de señal.

Esta opción deberá ser especificada en cualquier momento, es deseable u obligatorio que la entrada de la señal de velocidad sea interrumpida desde los controles de las líneas de entrada de C.A. Un ejemplo de un requerimiento para una señal de interrupción, pudiera ocurrir si dos ó mas dispositivos estuviesen corriendo desde una señal maestra de referencia. Otra instancia puede ser al considerar una señal de interrupción

mandatoria o sucede cuando la velocidad es programada desde una fuente de señal externa. Esta puede ser en muchos casos la tierra física.

La tarjeta de señal de interrupción, esta disponible en dos diferentes ensambles. Un nivel de voltaje de 0 a 6 volts o de 0 a 50 milivolts de entrada, nos darán una salida de 0 a 60 volts, si acaso se usa un ensamble apropiado de señal de interrupción. ( El de 0 a 50 milivolts es el mas frecuentemente usado en aplicaciones de torque. En estas aplicaciones el control pudiera en muchos casos ser usado con la opción del par programado, como se discute en la sección A.1.4.5).

#### A.1.4.3.- Opción de interfase para posición.

Esta tarjeta es utilizada en aplicaciones tales como posicionadores de válvula o en mesas posicionadoras para rayos X. Cuando esta tarjeta opcional es instalada, el potenciómetro de velocidad no es conectado. La salida de la tarjeta de control de posición ( una señal de error de posición ) actúa como una señal comando de velocidad y provoca que el motor se maneje automáticamente en la dirección requerida para forzar un acuerdo entre la colocación del potenciómetro en “posición de comando” y la “posición de retroalimentación”. El instrumento de proceso o señales de voltaje externo, también pueden ser usadas para comando de posición. Esta opción incluye provisión para un interruptor “Manual – Automático” y además interruptores limite de “fin de carrera”, los cuales pueden inhibir posteriores rotaciones del motor cuando actúa.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### A.1.4.4.- Retroalimentación por tacómetro de C.D.

El PRD-2 es capaz de usar tacómetro como retroalimentación. Si este es usado, deberá ser especificado al tiempo de comprar el equipo. Además, la velocidad base y el voltaje de C.D. de salida del tacómetro deberá ser especificada si el motor y el tacómetro no son adquiridos junto con el equipo.

Cuando se usa el tacómetro de retroalimentación, deberán montarse dos resistores entre las terminales “1 y 3” y “2 y 3” del PRD-2 “1TB”. Además, se debe remover el puente que está normalmente entre las terminales “4 y 5” del “1TB” en vez del puente conectado entre las terminales “3 y 5” del “1TB”. Los resistores son seleccionados para

que aparezcan aproximadamente 6 volts en la terminal "3" con respecto a la terminal "1" cuando el motor esta corriendo a la velocidad tope. Cuando la velocidad de entrada al "1TB-C" es negativa con respecto al común, el voltaje en "1TB-2" respecto al de "1TB-1" (terminales en las cuales se conecta el tacómetro) deberá ser positivo. Una polaridad incorrecta del voltaje del tacómetro será causa de que el motor arranque y llegue a su velocidad tope.

#### A.1.4.5.- Dispositivo programador del par.

Esta modificación es muy usada en algunas aplicaciones de embobinado. Las especificaciones de esta modificación, son cubiertas en un manual separado. El módulo análogo "AM-1 estándar" en la unidad PRD-2 se reemplaza con el módulo análogo "AM-2". La entrada normal "Comando de velocidad" ( 1TB-C ) se convierte en entrada "Comando de par" la cual comanda ambas cosas, magnitud y dirección del par. Los ajustes "+Lim" y "- Lim" los cuales normalmente funcionan como ajustes limite de par ( corriente ) vienen a ser ajustes limite de velocidad que limitan la magnitud de la velocidad pero no dictan la dirección de rotación.

#### A.1.5.- Motores usados con controles PRD-2.

Debido a la naturaleza de la media onda de los controles "PRD-2", los motores que son diseñados para usarse con control monofásico de onda completa, requieren revalorarse para usarse en un control PRD-2.

Como un ejemplo de esta revaloración, un motor de 1 HP valorado para usarse en un control monofásico de onda completa, cuando es usado en un control "PRD-2", deberá ser revalorado en corriente por un factor de 0.75 y en velocidad por un factor de 0.83. Los HP efectivos en este motor cuando se usa un control PRD-2 es de 2/3 HP. Estos mismos factores de revaloración, pueden ser aplicados para todos los motores usados con controles "PRD-2".

Cuando un motor es comprado de "Polyspede Electronics" para usarse con un "PRD-2", los factores arriba revalorados, ya han sido efectuados. Por lo tanto, si se

ordena un control de 2/3 HP con motor, el motor proporcionado indicará 2/3 HP en su placa, dado que este ya ha sido revalorado por "Polyspede Electronics".

Finalmente, el control PRD2-200 de 1.9 HP deberá ser usado en motores que tengan una inductancia de armadura de 8 milihenries ó mayores. Motores con menor inductancia provocaran mayores corrientes de entrada "RMS" que las que el control es capaz de manejar. Los motores catalogados por "Polyspede" para usarse con controles "PRD2-200", reúnen este requerimiento. (Una mínima inductancia de armadura no es un requisito en controles "PRD-2" para bajos HP, pero los motores usados deberán ser apropiadamente revalorados como se indica en el párrafo previo).

#### A.1.6.- Cambiando el control de las medidas de H.P.

Aunque existen al menos 11 distintos modelos, el "PRD-2" es actualmente dividido en 3 grandes grupos de control. Dentro de cada grupo y entre algunos grupos, los controles de medidas de HP pueden ser cambiados substituyendo un enlace derivado apropiado. Lo siguiente es una lista de 3 grupos en los cuales las medidas de HP pueden ser variados.

- Grupo 1 PRD2-16 al PRD2-66, 115 V ( 1/6 a 2/3 HP).  
Los controles pueden ser usados en aplicaciones de 1/6 a 2/3 HP, 115 V.
- Grupo 2 PRD2-34 al PRD2-125, 230 V ( 1/3 a 1 1/4 HP)  
Los controles pueden ser usados en aplicaciones de 1/3 a 1 1/4 HP 230 V.
- Grupo 3 PRD2-200, 230 V ( 1.9 HP )  
Los controles pueden ser usados en aplicaciones de 1/3 a 1 1/4 HP, 230 V en caso de requerirse.

Cuando se cambia el enlace de derivación, es necesario que la nueva derivación sea montada a la tarjeta en la misma secuencia. El enlace derivado deberá ser posicionado primeramente en el soporte y juntamente montado en el otro "hardware". Seleccione la derivación de la tabla A.1.1. mostrada a continuación.

Modelo	Voltaje de control	H.P. de control	Corriente normal de entrada RMS		Enlace Shunt Req'D	Tipo de fusible 10 FU 14 FU	Grupo de control
PRD2-16	115 V	1 / 6	6	2.2	C	A	1
PRD2-20		1 / 5	7	3.0	E	A	
PRD2-33		1 / 3	10	4.3	H	A	
PRD2-50		1 / 2	14	6.0	K	A	
PRD2-66		2 / 3	17	8.0	M	A	
PRD2-34	230 V	1 / 3	6	2.2	C	B	2
PRD2-51		1 / 2	8	3.0	F	B	
PRD2-67		2 / 3	10	4.3	H	B	
PRD2-101		1	14	6.0	K	B	
PRD2-125		1 1/4	17	8.0	M	B	
PRD2-200	230 V	1.9	25	11.3	Q	C	3

Tabla A.1.1. Elección del modelo del convertidor de acuerdo a la cantidad de potencia de control en H.P. y según el enlace de derivación.

#### A.1.6.- Guía para la solución de problemas.

La mayoría de los mal funcionamientos que son encontrados en el uso del control "PRD-2" pueden resumirse conforme se indica a continuación:

- a) El motor no gira o gira en una sola dirección.
- b) El motor gira inestablemente
- c) El motor gira únicamente a la velocidad tope o sobrevelocidad
- d) El sistema funde los fusibles o bota interruptores, repetidamente.

Las siguientes secciones indicarán las posibles áreas de problema y algunas de las posibles causas. Los comentarios se relacionan al chasis abierto del PRD-2 estándar, a menos que se indique lo contrario.

### A.1.6.1.- El motor no gira.

1.- Asegúrese que el voltaje de C.A. apropiado esté en las terminales de entrada “L1” y “L2”.

2.- Asegúrese que todos los fusibles no estén fundidos. Reemplace los fundidos.

3.- Asegúrese que la referencia de la velocidad de entrada en la terminal “C” de “1TB”. Verificar si el voltaje esta variando desde 0 hasta + ó -6 volts, desde -6 V hasta +6V así como también si el potenciómetro está girando entre los dos extremos de rotacion. Si los voltajes no son los apropiados, refiérase al dibujo “A2001-000-ES” y al “A2001-000-EW” respectivamente, ubicados en el anexo 2. Mida que los -6V y +6V estén disponibles en las terminales “1TBA” y “B” con respecto al común (1TB-D).

4.- Cheque que los puentes estén presentes entre “1TB-4” y “5”, “1TB6” y “7”, “1TBK1” y “K2”, y “10TB-M1” y “M2”. En ciertas aplicaciones de sistemas, algunos puentes permanentes pueden ser reemplazados por cierres de contactos. Refiérase a los esquemas específicos especiales de clientes, para mas detalles.

5.- Cheque que la clavija este firmemente enchufada en su lugar y que la clavija sea la apropiada para el control que esta siendo usado. Esto quiere decir que el número de la clavija debe coincidir con el número que indica el diagrama A2001-001-ES para las varias opciones en las que el control se está usando. ( La clavija esta designada como 2PL.).

6.- Cheque que el puente amarillo esté en la posición “Lo” ó bien en la posición “Hi”. Si el puente esta en la posición “Bal”, el motor no girará. La posición “Bal” es usada únicamente cuando se establecen los potenciómetros “+Bal” y “-Bal”. Durante una corrida normal, la posición “Hi” es usada normalmente. Esta posición proporciona un beneficio amplificado de error de alta velocidad y por lo tanto una buena regulación. El beneficio de la posición “Lo” es usado normalmente con los sistemas de retroalimentación de tacómetro, en donde la velocidad cero no es permisible. El establecer las posiciones “Lo” junto con las apropiadas “+Bal” y “-Bal” lograrán esta condición de cero velocidad.

7.- Verifique que los potenciómetros “+Lim” y “-Lim” no hayan sido girados completamente en el sentido contrario de las manecillas del reloj. Con las escobillas de los potenciómetros “+Lim” y “-Lim” aproximadamente al 75 % de la posición en el

sentido de las manecillas, los controles serán programados para aproximadamente una máxima corriente del 150% de la corriente del motor. Si se establece la posición completamente en el sentido opuesto de las manecillas, se programará para una corriente de motor, "cero".

8.- Si el control esta equipado con una unidad de interrupción de señal de aceleración y/ó con una tarjeta de interfase de posición, el problema pudiese estar en las tarjetas de opciones. Véase el esquema A2001-001-ES (anexo 2) y los esquemas de las tarjetas de varias opciones y asegúrese que las salidas sean las apropiadas a las varias entradas. Si la clavija "num.1" está disponible, las opciones de señal de disyuntor y/ó aceleración, pueden ser desviadas removiendo la clavija abastecida, substituyendola por la clavija "num.1". Si acaso son abastecidas las opciones de posición interfase ó la opción de señal externa, el "5PL" deberá ser desconectado. Conecte o acople un velocímetro conforme se indica en el esquema A2001-000-EW y cerciórese que existe un apropiado control de la operación.

9.- Asegúrese de que existe un voltaje de campo apropiado en "10TB-F1" y "F2". El voltaje deberá ser 100 Volts C.D. ó 50 Volts C.D. para controles de 115 Volts, ó bien de 100 Volts C.D. para controles de 230 Volts. Si coincide el voltaje de campo, quite la alimentación del control y desconecte las terminales del campo. Verifique las resistencias conforme a las pruebas del motor. Sin embobinado en el campo, pueden provocarse altas corrientes en el motor sin que se produzca par de salida. (este paso no aplica a motores "PM" ).

#### A.1.6.2.- El motor corre en forma inestable.

1.- Si oscila la velocidad del motor, decrece el "IR". Refiérase a la sección 4.2.4 para un apropiado ajuste del potenciómetro "IR". ( En controles con retroalimentación de tacómetro, este ajuste deberá ser establecido en posición al sentido contrario a las manecillas.)

2.- Mida el voltaje de campo presente en "10TB" en las terminales "F1" y "F2". El voltaje deberá corresponder con el voltaje de campo acoplado y los requerimientos.

3.- En sistemas que usan tacómetro retroalimentado, la operación inestable puede resultar si el acoplamiento entre el motor y el tacómetro, es deslizante o corredizo.

Transfiera el control al voltaje retroalimentado de la armadura. Si la operación es suave, el problema esta probablemente en el tacómetro. Para hacer la transferencia, quite el puente entre "1TB-3" y "5" y conecte un puente entre "1TB" terminales "4" y "5").

4.- Motores con campos en serie, no son convenientes para usarse en aparatos regenerativos. Si tal motor es usado, las conexiones a los campo en serie ( "Leads S1 y S2" ) deberán ser omitidos para una operación estable. Si la omisión de estas conexiones no resultan en una operación estable, el motor no deberá ser utilizado.

#### **A.1.6.3.- El motor corre únicamente a velocidad tope o sobre velocidad.**

1.- Verifique que el voltaje en "1TB-C" varíe entre limites de -6V a +6V al estar girando el potenciómetro entre los extremos de su recorrido.

2.- En controles que usan armadura con retroalimentación de voltaje, deberá estar presente un puente entre "1TB" terminales "4" y "5".

3.- En controles que usan tacómetro retroalimentado, no deberá estar presente un puente entre las terminales arriba indicadas, además la polaridad del voltaje del tacómetro, deberá ser la apropiada. El voltaje en "1TB-2" respecto a "1TB-C" ( común), deberá ser positivo cuando el voltaje de entrada a "1TB-C", es negativo.

4.- Si los pasos arriba indicados 1 al 3 resultan positivos, el problema pudiera estar en las tarjetas de opciones, si estas son incluidas. Para conocer si los problemas están en las opciones, refiérase a la sección A1.6.1. párrafo 8.

5.- Si los pasos arriba indicados 1 al 4 son negativos, verifique que haya un apropiado voltaje de campo y resistencia, conforme se indica en la sección 1.6.1 párrafo 9. Un campo abierto o bien un muy bajo voltaje de campo o cargas muy ligeras, pueden causar velocidad excesiva del motor aún con bajo voltaje de armadura.

#### **A.1.6.4.- Los fusibles del control se funden repetida u ocasionalmente.**

1.- Inicialmente inspeccione en forma visual el control, para verificar que no tenga arandelas, alambres, sujetadores de hojas, etc. cerca de los fusibles y de los "SCR's" ó del modulo de "SCR". Verifique que la terminal y las conexiones "snap-on" estén bien apretadas.

2.- Apagado el equipo, verifique correctamente el motor de C.D. y todos los alambres del mismo. Verifique las conexiones del motor, especialmente aquellas que están en la caja de conductores. Refiérase a la sección A.1.7 para inspección del motor.

3.- Si están fundidos los fusibles "11FU" y "13 FU" en la tarjeta "E1508", verifique que el fusible sea el apropiado, es decir, de 3 amp. Con el motor apagado, verifique que el campo del motor no este en corto. Con el campo del motor desconectado del control, la resistencia de campo no deberá medir menos de 25 ohms, en campo de 50 Volts C.D., y menos de 50 ohms en campos de 100 Volts de C.D. ó de 100 ohms en campos de 200Volts. Con el campo aún desconectado del control, verifique también que los diodos "D201" al "D204" no estén en corto circuito. Refiérase a la sección A.1.8 y a la figura A.1a. del anexo 2 para las inspecciones apropiadas.

4.- Si los fusibles principales de entrada "10FU" y/ó "14FU" están fundidos (El "14Fu" se proporciona únicamente en controles a 230 Volts ), el problema puede ser por "SCR's" defectuosos. Desconecte temporalmente la conexión a los dos "SCR's" discretos ó el modulo cubo de fuerza en los controles de 1.9 H.P. y verifique los "SCR's". Refiérase a la sección A.1.8.2 y A.1.8.3 y a las figuras A.1b. y A.1c. Reemplace los "SCR's" defectuosos.

5.- Si los diodos de campo y los "SCR's" resultan apropiadamente, remueva todos los alambres externos tales como A1, A2, F1, F2, el potenciómetro de velocidad, coenxiones, etc. y verifique que ninguno de los alambres externos se encuentren en corto circuito o aterrizados.

6.- Si todas las inspecciones previas son negativas, el problema está probablemente en la tarjeta PC principal "E1489" ó en el análogo, ó en los enchufes de los módulos de disparo. Si el análogo y/ó los módulos de disparo están disponibles, estos pueden tratar de rectificar el problema. Si no, el problema esta entonces en la tarjeta "PC E1489".

Si es así, regrésela a la fabrica "Poyspede" para su reparación. (Si un nuevo módulo análogo es substituido, puede ser necesario reajustar ligeramente algunos de los potenciómetros como se describe en las secciones 4.2.3 y 4.2.4).

### A.1.7.- Averías o problemas en el motor.

Las siguientes pruebas podrán ser de ayuda en la localización de posibles problemas en el motor. Antes de hacer alguna prueba, desconecte la corriente, la armadura y los campos, del control.

#### A.1.7.1.- Cortos en el gabinete y armazón.

Usando un "Megger" para prueba de potencia de 400 volts, verifique las fugas de resistencia del armazón del motor hacia los conectores "A1" y "A2" y hacia los campos del motor. Lecturas de menos de 10,000 ohms, indican posibles problemas. Un cortocircuito indica la necesidad de reparación inmediata. Para verificar los cortocircuitos, puede utilizarse un óhmetro o un probador de continuidad, si acaso el "Megger" no esta disponible. Reconfirme la lectura mientras se gira la armadura con la mano.

#### A.1.7.2.- Campo abierto ó en corto circuito.

Verifique la resistencia entre los campos del motor. La resistencia no deberá ser menos de 100 ohms o mayor que 1,200 ohms para campos conectados para operación de 200 volts de C.D. Para campos de 100 volts de C.D. la resistencia no deberá ser menor a 50 ohms y para campos de 50 volts de C.D., no deberá ser menor a 25 ohms.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### A.1.7.3.- Armadura abierta.

Un óhmetro entre "A1" y "A2" deberá indicar una resistencia menor a 10 ohms. Gire la flecha del motor muy suavemente, mientras observa el óhmetro. Debido al magnetismo residual en motores con devanado en derivación, o en motores de imanes permanentes, se producirá una "f<sub>cem</sub>" (fuerza contra-electromotriz), por la rotación. Esto provocará que el óhmetro lea cambios durante la rotación. Por lo tanto, después de mover la flecha un poco, pare y verifique las lecturas de la resistencia. Una alta lectura de la resistencia en cualquier posición de la flecha del motor cuando esta es detenida, es

una indicación de problema. Armaduras abiertas son usualmente el resultado de escobillas defectuosas, segmentos quemados del conmutador ó alambres duros.

#### A.1.8.- Prueba de los semiconductores.

##### A.1.8.1.- Verifique los diodos del campo.

Refiérase a la figura A.1a. Ubicada en el anexo 2 para verificar los diodos de campo. Temporalmente quite del control el campo del motor. Hay cuatro diodos (“D201” al “D204”) que deberán ser inspeccionados en la tarjeta “E1508”. Para la verificación, use un “Simpson 260” ó equivalente. Coloque el conector (+) del medidor en el ánodo del diodo “D201” y el (-) en el cátodo. Con estas conexiones y el aparato medidor en la escala Rx1, deberá obtenerse una lectura de 5 a 15 ohms. Cambie los conectores en posiciones opuestas en el diodo y la lectura deberá indicar abierto debido a que la resistencia podrá estar al menos algunos 100 kilo-ohms. Repita esta operación para los diodos “D202”, “D203”, y “D204”. Si se encuentra alguno de estos diodos defectuoso, el control deberá ser devuelto a la fábrica para su reparación, ya que estos diodos no se consideran reemplazables en el campo.

##### A.1.8.2.- Pruebas discretas para SCR. (Aplican a todos los controles excepto a los de 1.9 H.P. de 230 volts).

Los “SCR's” discretos son aparatos de contacto aislado. El alambre rojo a cada aparato es el ánodo. El amarillo es el cátodo y el verde es la entrada. Una prueba simple con un óhmetro, no es señal conclusiva de que el “SCR” esté bien, pero los “SCR's” que estén abiertos o cortocircuitados, pueden ser detectados. Verifique uno por uno los SCR, removiendo los tres conectores conectados a la tarjeta E1508. Reconecte los tres conectores los cuales están codificados en color a la tarjeta, antes de proceder a verificar el siguiente “SCR”. Refiérase a la figura A.1b.

Conecte el positivo al aparato medidor en el ánodo del diodo y el negativo en el cátodo. El “Simpson 260” ó equivalente, deberá medir algunos cientos de ohms. La misma alta resistencia deberá ser leída cuando los conectores del medidor estén colocados en posición opuesta.

Ahora conecte un cable conector del aparato medidor a la salida y el otro al cátodo. Con la salida positiva respecto al cátodo, el aparato deberá medir de 10 a aproximadamente 50 ohms. Con la polaridad del aparato en el otro sentido, la resistencia deberá medir aproximadamente de 40 a 15 ohms.

Reemplace cualquier "SCR" que este defectuoso por uno bueno. Si se reemplaza cualquier "SCR", use un compuesto térmico como el "Dow Corning DC-4" ó equivalente entre las superficies de montaje del "SCR" y el área caliente. ("heatsink"). También verifique que los 3.9 ohms de entrada de los resistores "R133" y "R134" estén en buenas condiciones y que no hayan sido abiertos.

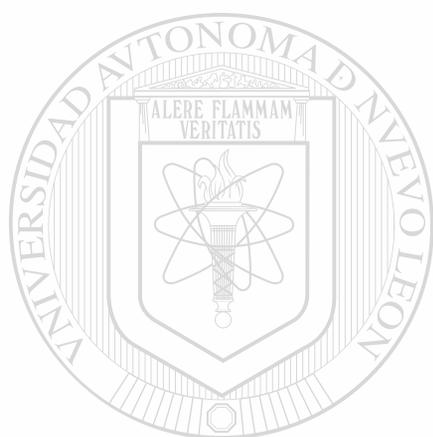
### A.1.8.3.- Prueba del cubo de potencia de SCR.

El cubo de potencia en el control "PRD2-200", contiene ambos "SCR's". Temporalmente quite todos los alambres y la barra en el cubo de potencia. Marque apropiadamente todos los alambres de tal forma que puedan ser recolocados. Refiérase a la figura 1c en el anexo 2. Con el medidor conectado a un ánodo y a un cátodo del SCR como se muestra en la figura 1c, el medidor deberá leer alta resistencia independiente de la polaridad del conector del medidor. La resistencia leída usando un "Simpson 260" o equivalente, deberá ser al menos algunos cientos de kilo-ohms. Ahora conecte una terminal del medidor al cátodo y la otra terminal a la salida de un "SCR". Usando un "Simpson 260" o equivalente en la escala Rx1, deberá leerse una resistencia de aproximadamente 10 a 150 ohms independientemente de la polaridad del medidor. La resistencia puede variar por la polaridad del medidor en la salida y también las conexiones del cátodo, pero deberán caer dentro de este rango de resistencia.

Repita el procedimiento arriba indicado para los otros SCR. Reemplace el módulo del "SCR" en caso de encontrarse con una falla. Use un compuesto térmico como el "Dow Corning DC-4" para una buena transferencia térmica entre la base del módulo de fuerza y la superficie de montaje.

Antes de instalar un nuevo módulo, reemplazar los conectores en el modulo viejo, examine los "pins" (puntos de conexión ) de salida "G1" y "G2". Estos deberán estar libres de cualquier sustancia, compuesto o de alguna otra contaminación en toda su superficie de uso. Raspe cualquier cosa extraña usando un desarmador pequeño.

**También verifique que los 3.9 ohms de entrada de los resistores “R133” y “R134” estén en buenas condiciones.**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## A.2.- Diagramas eléctricos de los convertidores.

En este apartado se proporcionan las figuras y los diagramas de conformación y conexionado de los convertidores PRD-2.

Primeramente se muestran a continuación las figuras en las que se representan los dispositivos semiconductores de estado sólido mostrando los puntos de conexión para la comprobación de su correcto funcionamiento.

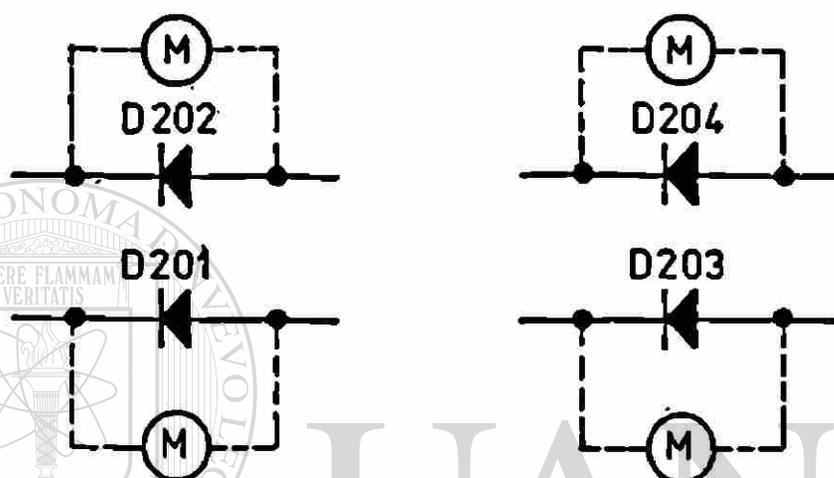


Figura A.1a.- Diodos semiconductores de la tarjeta E1508. ( Para todos los modelos PRD2 ).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

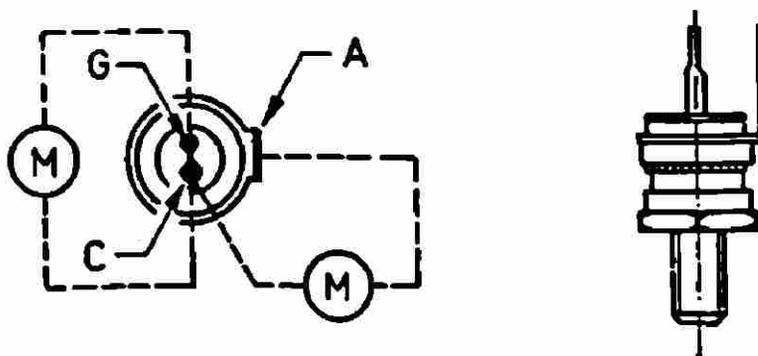


Figura A.1b.- Puntos de conexión para la prueba de los "SCR". ( Todos los modelos PRD2, excepto el PRD2-200 ).

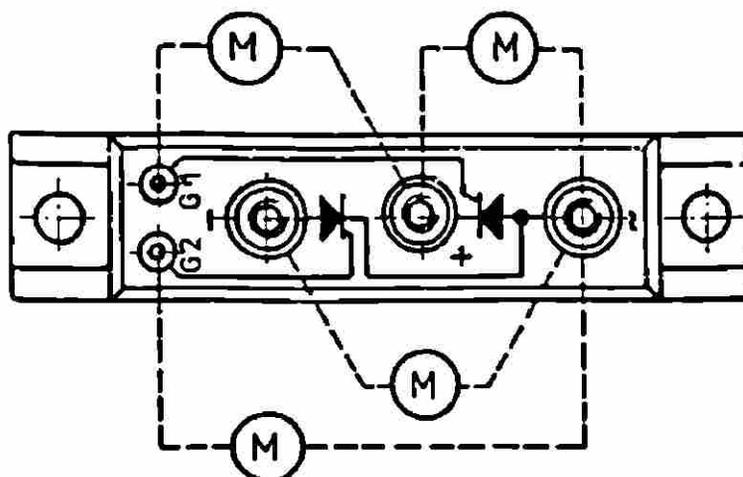


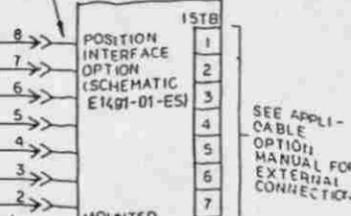
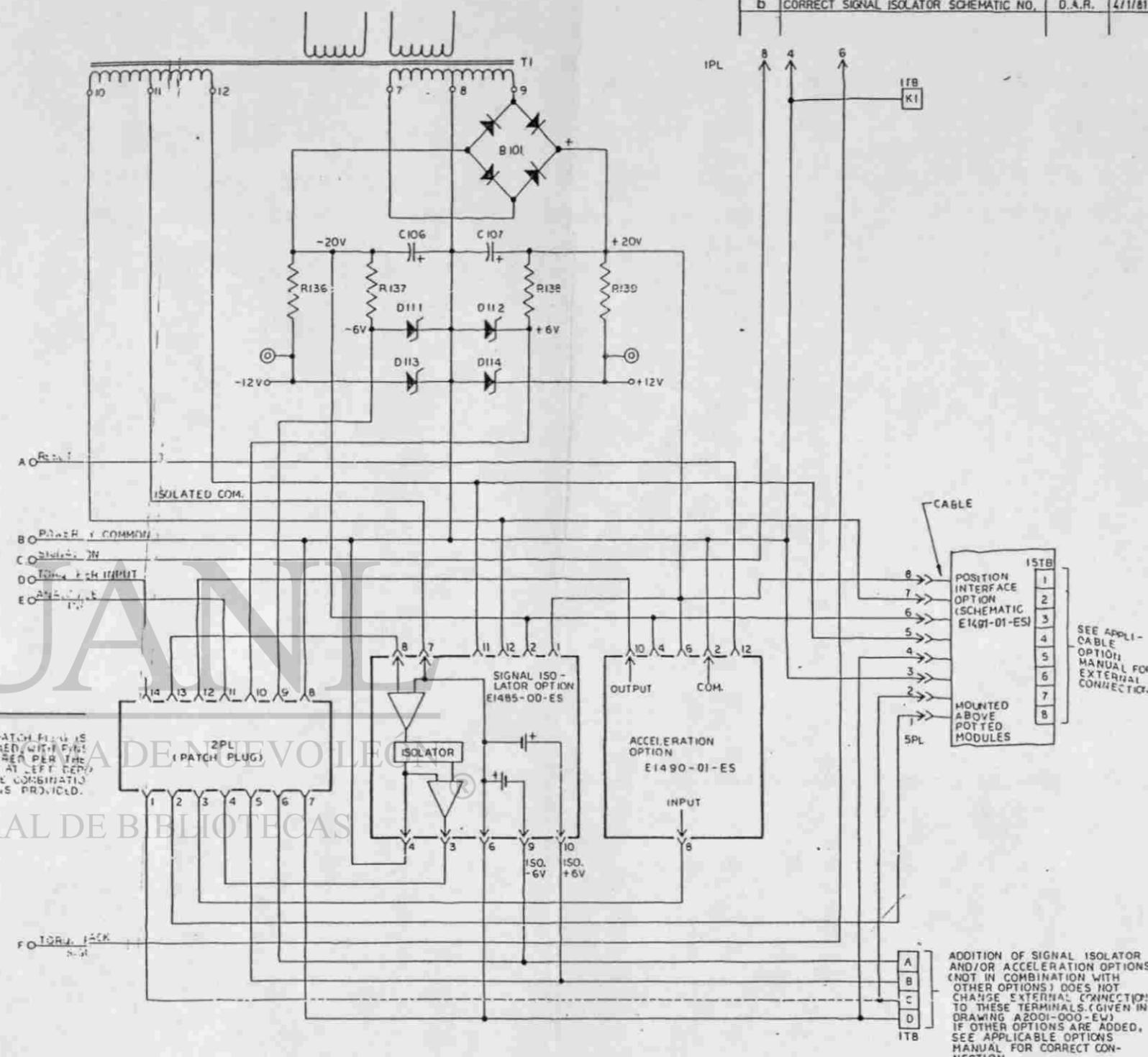
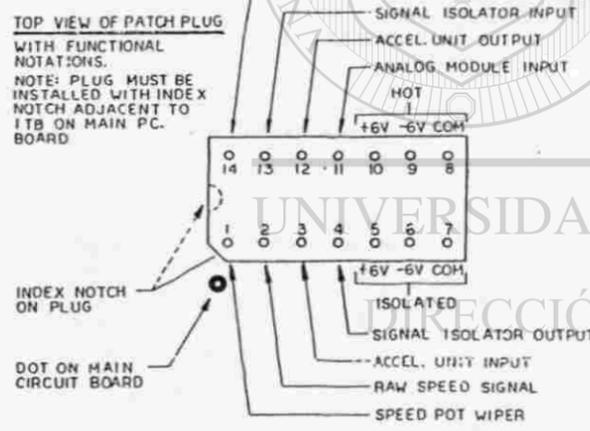
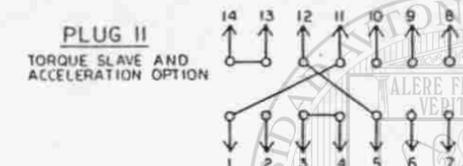
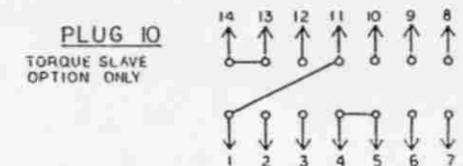
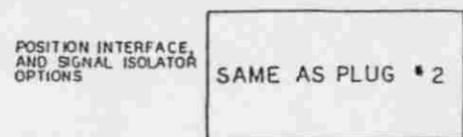
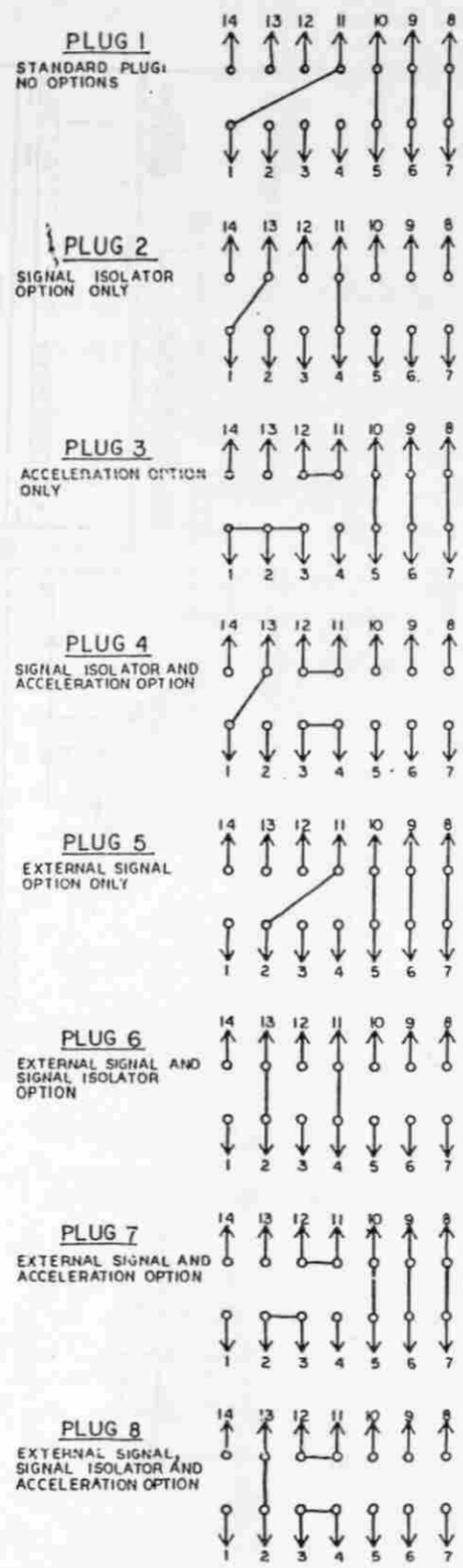
Figura A.1c.- Puntos de prueba en el módulo de potencia. Vista superior. (Solo para el modelo del convertidor PRD2-200).

Enseguida se encuentran los diagramas de conformación y conexión de los convertidores "PRD-2".

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

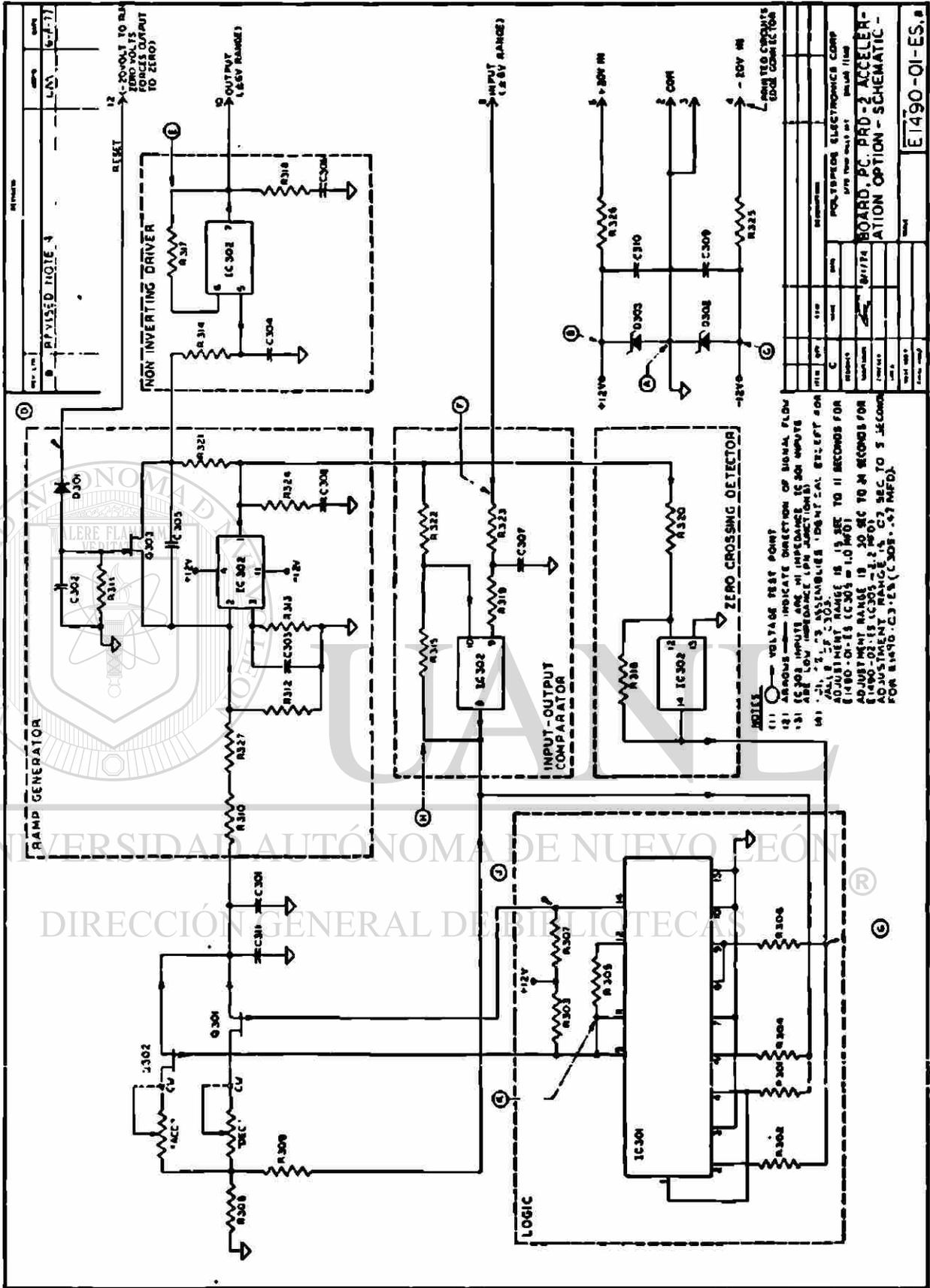
REVISION			
REV	LIST	APP'D	DATE
a	PIN NUMBER CHANGES, SIG. ISO. OPTION, ALSO CORRECTIONS ON PATCH PLUGS	L.H.	9/23/74
b	CORRECT SIGNAL ISOLATOR SCHEMATIC NO.	D.A.R.	4/1/81



ADDITION OF SIGNAL ISOLATOR AND/OR ACCELERATION OPTIONS (NOT IN COMBINATION WITH OTHER OPTIONS) DOES NOT CHANGE EXTERNAL CONNECTIONS TO THESE TERMINALS. (GIVEN IN DRAWING A2001-001-ES). IF OTHER OPTIONS ARE ADDED, SEE APPLICABLE OPTIONS MANUAL FOR CORRECT CONNECTION.

THIS SCHEMATIC REPLACES AREA A OF THE BASIC SCHEMATIC A2001-000-ES IF OPTION CIRCUIT CARDS ARE ADDED TO THE BASIC UNIT. DETAILED SCHEMATICS OF THE OPTION CIRCUIT CARDS ARE INCLUDED IN THE APPLICABLE OPTIONS MANUAL.

ITEM	QTY	SYM	DESCRIPTION
D			POLYSPEDE ELECTRONICS CORP.
DESIGNED BY		DATE	6770 THIN HILLS AVE DALLAS, TEXAS
DRAWN BY		DATE	PRD-2 REGENERATIVE DRIVE OPTIONS INTERCONNECTION SCHEMATIC
CHECKED BY		DATE	
APP'D BY			
SCALE			DRAWING NO. A2001-001-ES

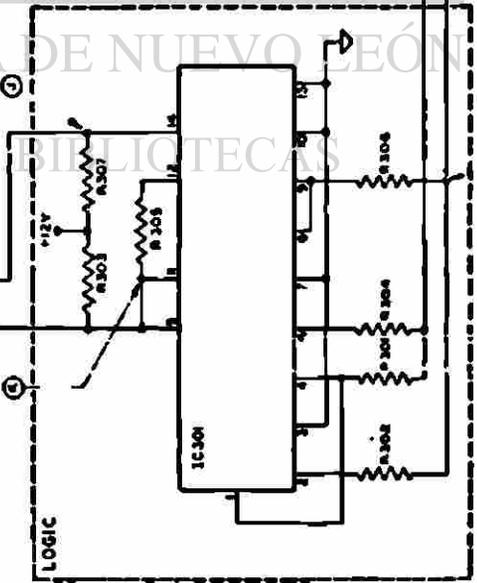
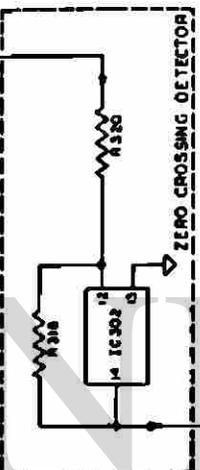
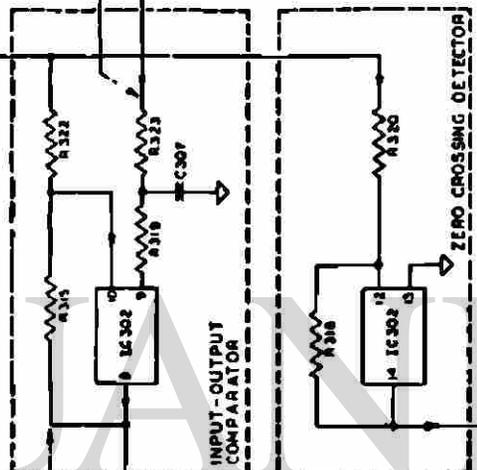
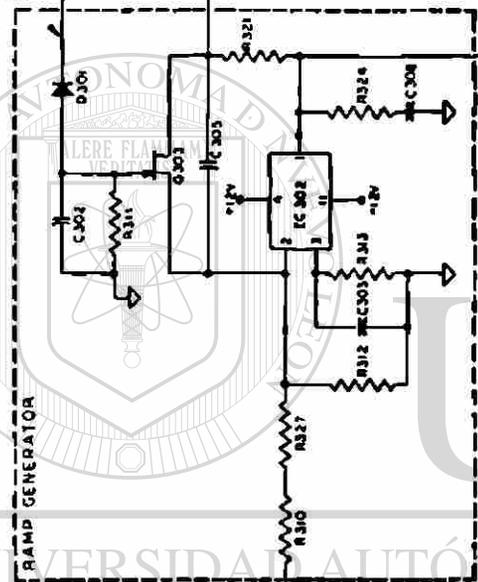
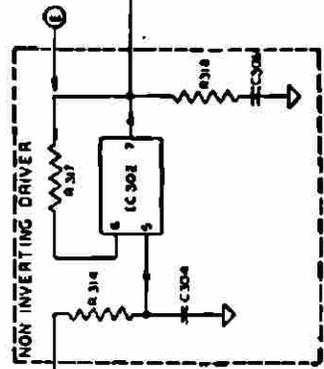


REVISED NOTE 4

12 -120VOLT TO RAMP ZERO VOLTS FORCES OUTPUT TO ZERO)

RESET

OUTPUT (2.5V RANGE)



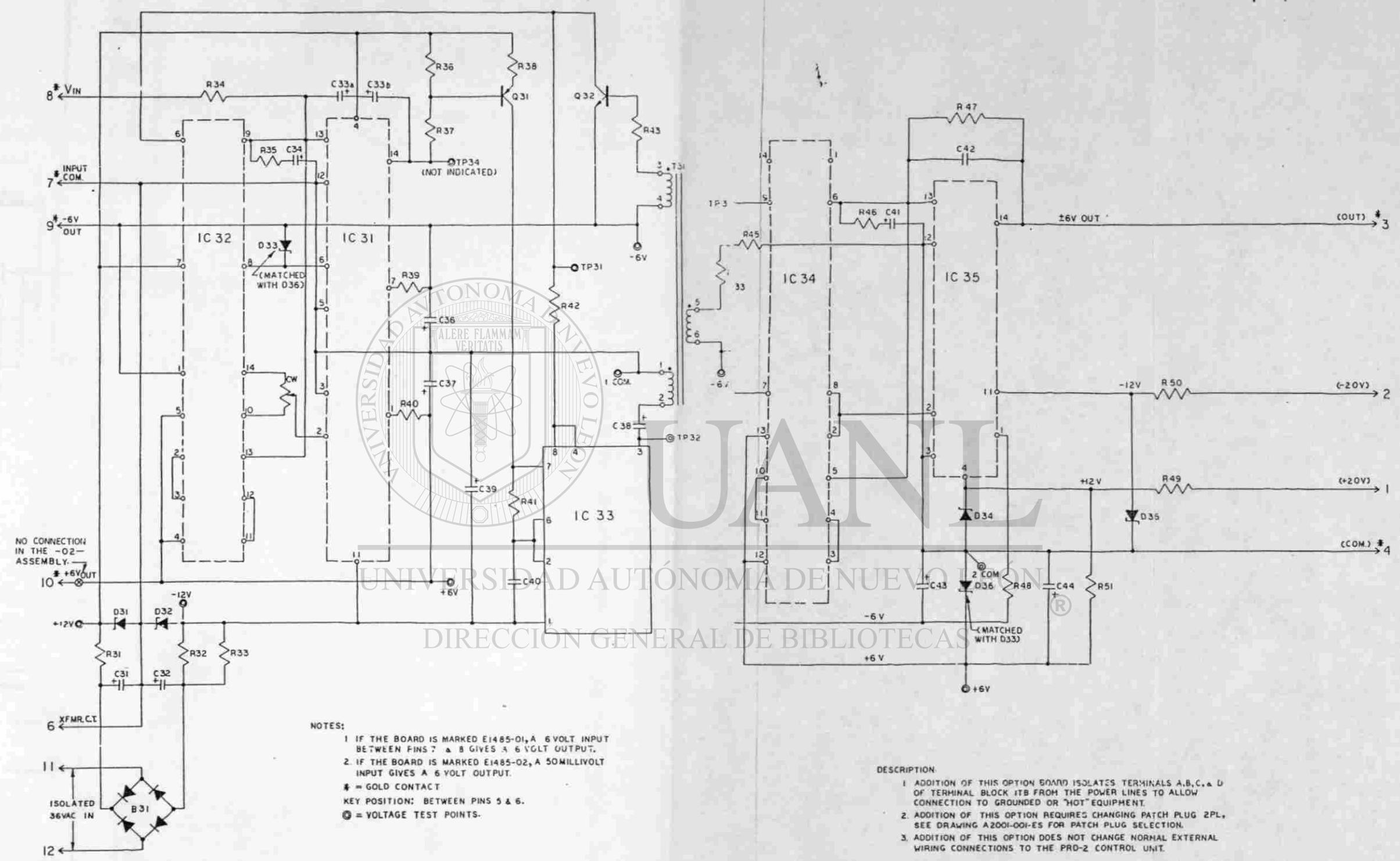
- NOTES**
- (1) VOLTAGE TEST POINT
  - (2) ARROWS INDICATE DIRECTION OF SIGNAL FLOW
  - (3) IC 302 INPUTS ARE HI IMPEDANCE IC 303 INPUTS ARE LOW IMPEDANCE (ON JUNCTIONS)
  - (4) J1, J2, J3 ASSEMBLIES IDENTICAL STREET FOR JUNE 1978
  - (5) IC 302 IS 1.0 SEC TO 11 SECONDS FOR ADJUSTMENT RANGE IS 20 SEC TO 24 SECONDS FOR 1490-01-ES (C305 IS 1.0 SEC)
  - (6) ADJUSTMENT RANGE IS 20 SEC TO 24 SECONDS FOR 1490-01-ES (C305 IS 1.0 SEC)
  - (7) ADJUSTMENT RANGE IS 20 SEC TO 24 SECONDS FOR 1490-01-ES (C305 IS 1.0 SEC)

REVISED NOTE 4	DATE	BY
12 -120VOLT TO RAMP ZERO VOLTS FORCES OUTPUT TO ZERO)		
RESET		
OUTPUT (2.5V RANGE)		

ET490-01-ES, Rev. 1	DATE	BY
BOARD, PC, PRD-2 ACCELERATION OPTION - SCHEMATIC -		
IC 300	IC 301	IC 302
IC 303	IC 304	IC 305
IC 306	IC 307	IC 308
IC 309	IC 310	IC 311
IC 312	IC 313	IC 314
IC 315	IC 316	IC 317
IC 318	IC 319	IC 320
IC 321	IC 322	IC 323
IC 324	IC 325	IC 326
IC 327	IC 328	IC 329
IC 330	IC 331	IC 332
IC 333	IC 334	IC 335
IC 336	IC 337	IC 338
IC 339	IC 340	IC 341
IC 342	IC 343	IC 344
IC 345	IC 346	IC 347
IC 348	IC 349	IC 350
IC 351	IC 352	IC 353
IC 354	IC 355	IC 356
IC 357	IC 358	IC 359
IC 360	IC 361	IC 362
IC 363	IC 364	IC 365
IC 366	IC 367	IC 368
IC 369	IC 370	IC 371
IC 372	IC 373	IC 374
IC 375	IC 376	IC 377
IC 378	IC 379	IC 380
IC 381	IC 382	IC 383
IC 384	IC 385	IC 386
IC 387	IC 388	IC 389
IC 390	IC 391	IC 392
IC 393	IC 394	IC 395
IC 396	IC 397	IC 398
IC 399	IC 400	IC 401
IC 402	IC 403	IC 404
IC 405	IC 406	IC 407
IC 408	IC 409	IC 410
IC 411	IC 412	IC 413
IC 414	IC 415	IC 416
IC 417	IC 418	IC 419
IC 420	IC 421	IC 422
IC 423	IC 424	IC 425
IC 426	IC 427	IC 428
IC 429	IC 430	IC 431
IC 432	IC 433	IC 434
IC 435	IC 436	IC 437
IC 438	IC 439	IC 440
IC 441	IC 442	IC 443
IC 444	IC 445	IC 446
IC 447	IC 448	IC 449
IC 450	IC 451	IC 452
IC 453	IC 454	IC 455
IC 456	IC 457	IC 458
IC 459	IC 460	IC 461
IC 462	IC 463	IC 464
IC 465	IC 466	IC 467
IC 468	IC 469	IC 470
IC 471	IC 472	IC 473
IC 474	IC 475	IC 476
IC 477	IC 478	IC 479
IC 480	IC 481	IC 482
IC 483	IC 484	IC 485
IC 486	IC 487	IC 488
IC 489	IC 490	IC 491
IC 492	IC 493	IC 494
IC 495	IC 496	IC 497
IC 498	IC 499	IC 500

ET490-01-ES, Rev. 1

REVISION			
REV LTR	DESCRIPTION	APP'D	DATE
a	ADDED DESCRIPTION & PICTURE	L.M.	6-10-75
b	ADDED TP32, MINOR CORRECTIONS	L.M.	9/25/75

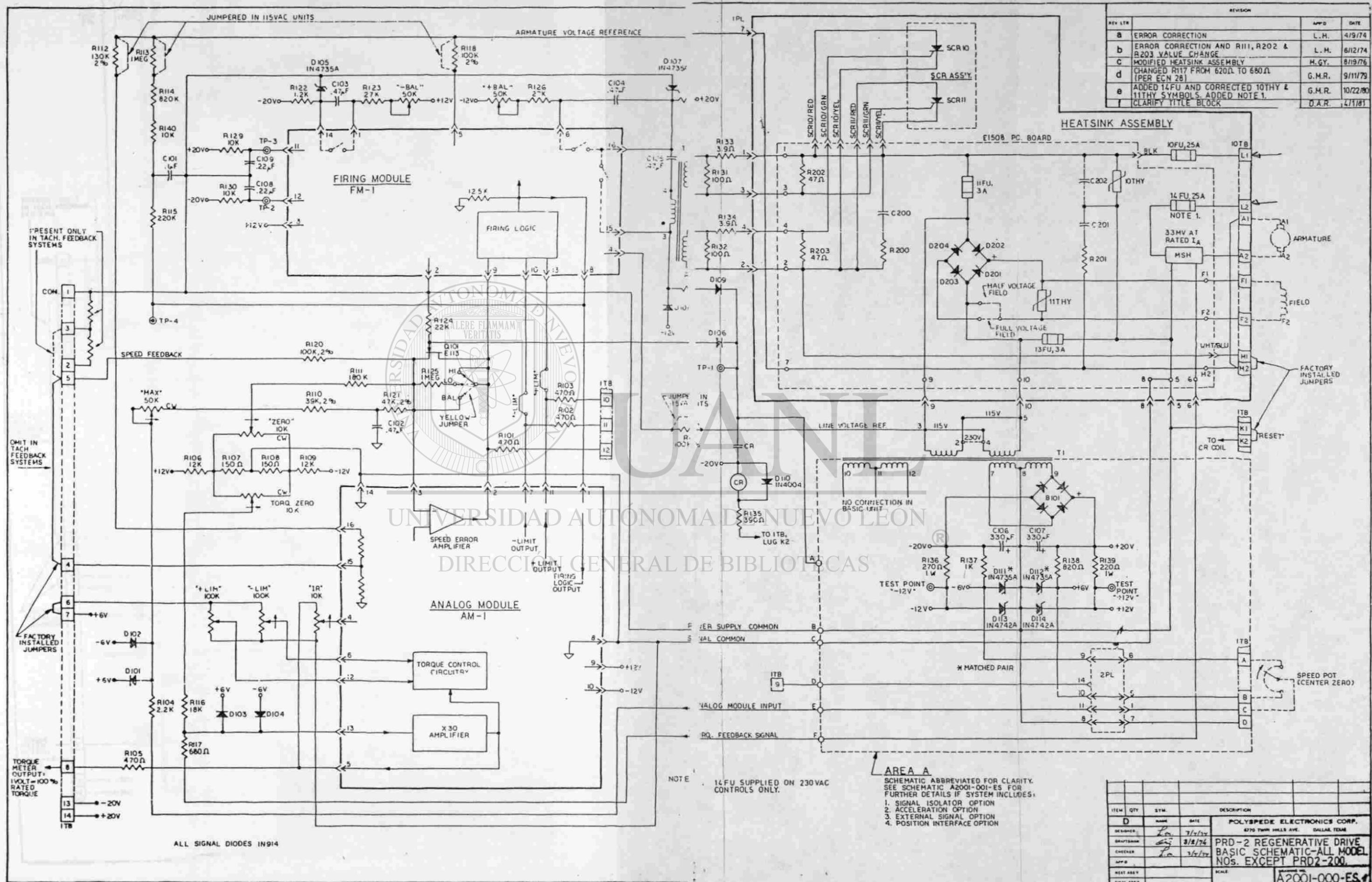


NO CONNECTION IN THE -02- ASSEMBLY.

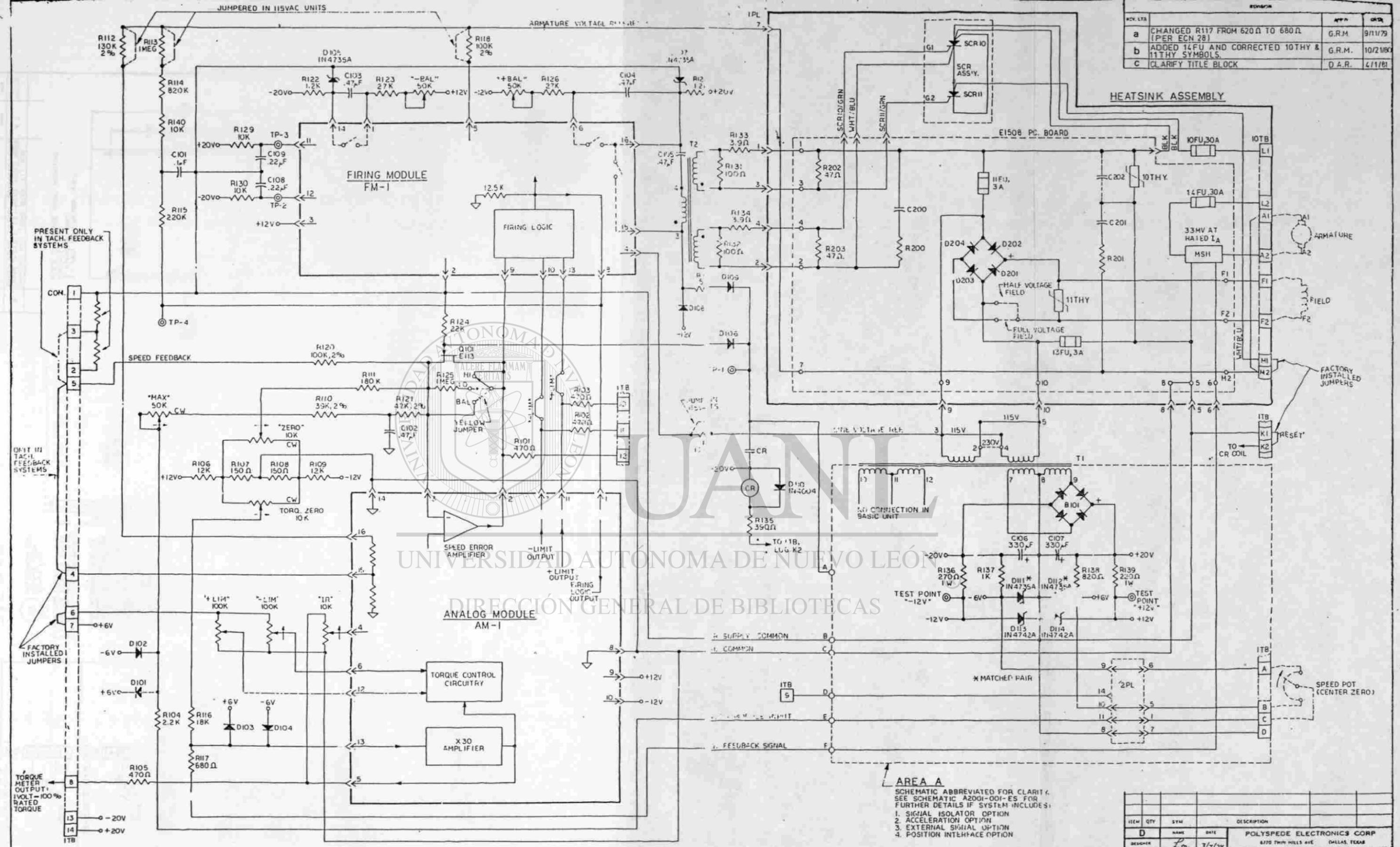
- NOTES:
- 1 IF THE BOARD IS MARKED E1485-01, A 6 VOLT INPUT BETWEEN PINS 7 & 8 GIVES A 6 VOLT OUTPUT.
  - 2 IF THE BOARD IS MARKED E1485-02, A 50MILLIVOLT INPUT GIVES A 6 VOLT OUTPUT.
- \* = GOLD CONTACT  
 KEY POSITION: BETWEEN PINS 5 & 6.  
 ⊙ = VOLTAGE TEST POINTS.

- DESCRIPTION
- 1 ADDITION OF THIS OPTION BOARD ISOLATES TERMINALS A, B, C, & D OF TERMINAL BLOCK ITB FROM THE POWER LINES TO ALLOW CONNECTION TO GROUNDED OR "HOT" EQUIPMENT.
  - 2 ADDITION OF THIS OPTION REQUIRES CHANGING PATCH PLUG 2PL, SEE DRAWING A2001-001-ES FOR PATCH PLUG SELECTION.
  - 3 ADDITION OF THIS OPTION DOES NOT CHANGE NORMAL EXTERNAL WIRING CONNECTIONS TO THE PRD-2 CONTROL UNIT.

ITEM	QTY	SYM	DESCRIPTION
D			POLYSPED ELECTRONICS CORP. 8710 TRIN HILLS AVE DALLAS TEXAS
DESIGNED BY			
APPROVED BY	T.J.S.	12-2-74	PRD-2 SIGNAL ISOLATOR SCHEMATIC, BOARD E1485
DATE			
SCALE			
DRAWING NO.			E1485-00-ES,b



REV. LTR	DESCRIPTION	APP'D	DATE
a	CHANGED R117 FROM 620Ω TO 680Ω (PER ECN 28)	G.R.M.	9/11/79
b	ADDED 14FU AND CORRECTED 10THY & 11THY SYMBOLS.	G.R.M.	10/2/80
c	CLARIFY TITLE BLOCK	D.A.R.	4/1/81



ALL SIGNAL DIODES IN914

**AREA A**  
 SCHEMATIC ABBREVIATED FOR CLARITY. SEE SCHEMATIC A2001-001-ES FOR FURTHER DETAILS IF SYSTEM INCLUDES:  
 1. SIGNAL ISOLATOR OPTION  
 2. ACCELERATION OPTION  
 3. EXTERNAL SIGNAL OPTION  
 4. POSITION INTERFACE OPTION

ITEM	QTY	SYM	DESCRIPTION
<b>D</b>			
DESIGNER	DATE	POLYSPEDE ELECTRONICS CORP 8770 TRIN HILLS AVE DALLAS, TEXAS	
DRAWN	DATE	PRD-2 REGENERATIVE DRIVE BASIC SCHEMATIC	
CHECKED	DATE	PRD2-200 CONTROL ONLY	
APP'D	DATE	SCALE	
NEXT ASSY		DRAWING NO. A2004-000-ES	
FINAL ASSY			





# RESUMEN

## AUTOBIOGRAFICO

Fco. Agustín Vázquez Esquivel

Alaska # 685,

Privadas Luxemburgo.

Código postal 25230, Saltillo Coahuila.

Correo electrónico: favazqueze@netscape.net.

### **Generales:**

- Fecha y lugar de nacimiento: 17 de Diciembre de 1971; Saltillo Coahuila.
- Nombre de los padres: Sr. Ing. Fco. J. Vázquez Galván y Sra. M.C. Ana Ma.

Guadalupe Esquivel Zuñiga.

- Ocupación: Docente en el área de Ingeniería Mecánica en la Universidad Autónoma de Coahuila dentro de la Facultad de Ingeniería.
- Candidato a: Obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en control, presentando como tesis el trabajo que lleva por título "Control de velocidad y tensión en un interpretador de radiografías".

### **Estudios:**

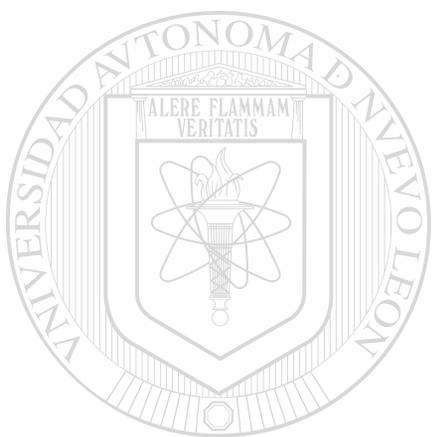
- Ingeniería Industrial en Electrónica. Titulado en Septiembre de 1996. Instituto Tecnológico de Saltillo.
- Diplomado en Automatización Industrial. Duración: 120 Horas. Impartido por: Festo Didáctico de México.

***Actividades laborales:***

- Ayudante de electricista en el departamento de mantenimiento dentro de la empresa Forjacero S.A., colaborando en la reinstalación de maquinaria y cableado. De Diciembre de 1989 a Enero de 1990.
- Auxiliar en el departamento de control de calidad dentro de la empresa Mabe, División Lavadoras; elaborando Instrucciones de calidad, apoyando a auditores de calidad para la supervisión y medición de productos terminados, y actualizando información dentro del programa denominado "autocontrol". De Septiembre 1995 a Enero de 1996.
- Docente en las áreas de Instrumentación y Neumática en la Universidad Autónoma de Coahuila dentro de la Facultad de Ingeniería.
- Instructor en cursos de capacitación a personal técnico en la industria; en el área de Neumática y Electrónica básica.
- Elaboración de prácticas de laboratorio y manuales de estudio en las áreas de Instrumentación y Control, y de Neumática.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



