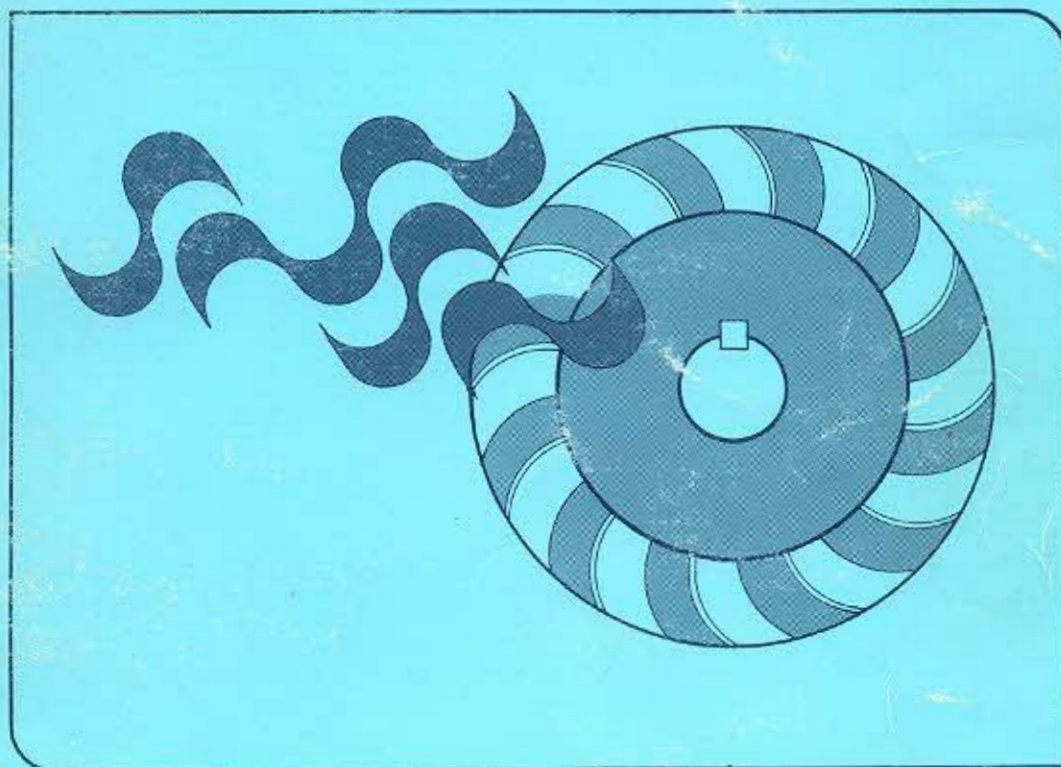




ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA



apuntes para un
manual de diseño,
estandarización y
fabricación de equipos
para pequeñas
centrales hidroeléctricas

**APUNTES PARA UN
MANUAL TECNICO
DE
DISEÑO, ESTANDARIZACION Y FABRICACION DE
EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS**

VOLUMEN V

**REGULADORES DE VELOCIDAD
ELECTRICO - ELECTRONICOS
CON CONTROL POSITIVO DE FLUJO**

ELABORADO POR:

ING. CESAR VITERI CADENA

1988



CONTENIDO

	Página
Capítulo I - Introducción	1
Capítulo II - Descripción general y tipos de reguladores con control positivo de flujo	5
2.1 Posibles esquemas de control de los reguladores eléctrico-electrónicos con control positivo de flujo	12
Capítulo III - Diseño funcional del regulador de velocidad	20
Sección I - Parte mecánica y de control	20
3.1 Modelo matemático del sistema	20
3.1.1 Ecuaciones asociadas con el sistema de suministro de agua	22
3.1.2 Ecuaciones asociadas con el grupo turbina generador	24
3.1.3 Ecuaciones asociadas con los elementos del regulador de velocidad propiamente dicho	26
3.2 Diagrama de bloques general	34
3.3 Forma de cálculo de la estabilidad y calidad del transitorio	34
3.3.1 Consideraciones simplificativas del modelo matemático inicial	37
3.3.2 Cálculo del transitorio	38
3.3.3 Estudio de estabilidad del sistema de control	42

3.4	Cálculo de parámetros para la simulación y para el cálculo de estabilidad	43
3.5	Cálculo de la seguridad de la instalación	47
3.6	Cálculo de parámetros del servomotor de fuerza	50
3.6.1	Diámetro del pistón de servomotor de fuerza	50
3.6.2	Diámetro de la válvula distribuidora "D2".	54
3.6.3	Secciones de paso de aceite al servomotor de fuerza para las maniobras de cierre y apertura	54
3.6.4	Fuerza sobre el carrete de la válvula de carrete del servomotor de fuerza	55
3.6.5	Fuerza en la palanca de realimentación del servomotor de fuerza	55
3.7	Cálculo de los parámetros del servomotor piloto	57
3.8	Servomotor eléctrico	59
3.8.1	Velocidad de respuesta del servomotor eléctrico	60
3.8.2	Selección del motorcito eléctrico	62
3.9	Cálculo de la bomba de engranajes	62
Sección II - Parte electrónica		92
3.10	Esquema del circuito	92
3.10.1	Acciones de control	92
3.10.2	Requerimientos de operación del regulador eléctrico-electrónico	96

3.11	Elementos por bloque del regulador eléctrico-electrónico	98
3.11.1	Velocidad de referencia (Vd)	98
3.11.2	Sensor de velocidad de la turbina	98
3.11.3	Circuito comparador	100
3.11.4	Circuito PID	100
3.11.5	Bloque de seguridad	102
3.11.6	Filtro	102
3.11.7	Amplificación de potencia	107
3.11.8	Servomotor	107
3.11.9	Transductor de desplazamiento	109
3.11.10	Señal de control manual	109
3.11.11	Osciladores	111
3.11.12	Indicador de velocidad de la turbina	111
3.11.13	Fuentes reguladas de tensión	114
3.11.14	Circuito general resultante	116
3.12	Diseño de detalle de la parte electrónica	116
3.12.1	Transductor de velocidad de la turbina	118
3.12.2	Velocidad de referencia (Vref)	121
3.12.3	Señal de error	125
3.12.4	Circuito PID	125
3.12.5	Señal de desplazamiento	130

3.12.6	Oscilador senoidal	136
3.12.7	Transductor de potencia eléctrica consumida en la carga	143
3.12.8	Filtro	144
3.12.9	Amplificador de potencia	144
3.12.10	Indicador del sentido de giro (del servomotor)	149
3.12.11	Control manual	150
3.12.12	Indicador de velocidad de la turbina	152
3.12.13	Bloque de seguridad	154
3.12.14	Fuentes de polarización	155
3.12.15	Fuente para servomotor	160
Capítulo IV	- Estandarización	162
Capítulo V	- Recomendaciones para la fabricación y montaje	165
	Parte mecánica	165
	Parte electrónica	169
Anexo 1	- Ejemplo práctico	182
Apéndice A	- Programa para la simulación del sistema de control	277
Apéndice B	- Programa para el cálculo de raíces	285
Apéndice C	- Programa para el cálculo de los coeficientes	289
Anexo 2	- Planos	292

PRESENTACION

La mayor fuente energética disponible en América Latina es la Hidroenergía, con un potencial superior a los 800.000 Mw, de los cuales apenas el 13% se aprovecha actualmente.

La región en su conjunto está en capacidad de plantearse un desarrollo intensivo de la hidroenergía, si se considera que la tecnología requerida es ampliamente conocida y que, en los diferentes países latinoamericanos, existen experiencias, capacidad de ingeniería de proyectos, empresas de construcción y, en muchos de ellos, la infraestructura necesaria para la fabricación de equipamiento para centrales hidroeléctricas de cualquier tamaño.

En materia de pequeñas centrales hidroeléctricas (P.C.H), que desempeñarán un papel muy importante en América Latina, OLADE cuenta con un programa integral que incluye desde la evaluación de las cuencas hidrológicas, para aprovechamiento en pequeña escala, hasta el desarrollo, adaptación y transferencia de tecnología de diseño para equipos y plantas. Todo ello, orientado a promover en este campo la creación y consolidación del mercado latinoamericano de tecnología y suministros de esta materia.

La disponibilidad de conocimientos amplios, así como la experiencia acumulada sobre el particular, han permitido desarrollar en América Latina una tecnología adecuada para la fabricación de equipos para las P.C.H.

OLADE y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUUDI) celebraron, en marzo de 1985, un Contrato para el desarrollo de un Manual conformado por siete volúmenes, denominado MANUAL TECNICO PARA DISEÑO, FABRICACION Y ESTANDARIZACION DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS.

La preparación del presente Volumen por parte de OLADE responde a la necesidad de proporcionar y difundir las bases tecnológicas requeridas para iniciar la producción de Reguladores Eléctrico-electrónicos con control positivo de flujo, y que contiene criterios técnicos necesarios para diseñar, establecer series estandarizadas y fabricar este tipo de reguladores. Es importante dejar claramente establecido que las hipótesis asumidas y métodos de cálculo expuestos en el presente Volumen, si bien han sido cuidadosamente analizadas, por razones financieras no han sido comprobadas en prototipos ni en condiciones reales de trabajo, por lo que los reguladores que se construyan según las mismas, deberán ser sometidos a un proceso inicial de ajuste y calibración.

CAPITULO I

INTRODUCCION

En este capítulo se presenta un resumen de los diferentes tipos de reguladores de velocidad de mini y micro turbinas tales como: oleo - mecánicos, eléctrico-electrónicos con control positivo de flujo y electro-electrónicos con disipación de carga. Además se indica el contenido de cada capítulo de que se compone el presente manual.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas actualmente tienen como principal función el servir a poblaciones rurales aisladas, de modo que una unidad abastece en forma total de electricidad a la red eléctrica del sitio (las pequeñas centrales hidroeléctricas no trabajan en forma interconectada) y esta regula sola la frecuencia de la red. Para esta forma de operación es necesario prácticamente solo el control de velocidad o de frecuencia de la central, el cual puede ser efectuado sea por medio de un regulador oleo - mecánico o por medio de un regulador eléctrico - electrónico con control positivo de flujo. El sistema de control de velocidad o de frecuencia trabaja en este caso como un sistema regulador, es decir, aunque cambie el requerimiento de energía de la red haciendo que se cambie momentáneamente la velocidad de la turbina, el sistema de control responde para que se mantenga la velocidad angular dentro de valores cercanos al valor nominal de trabajo. Así la pequeña central hidroeléctrica va entregando potencia a la red de acuerdo a lo que ella lo requiera, a una frecuencia constante, cuando el lazo de control ha pasado su transitorio.

En contraste con la forma de operación de las pequeñas centrales hidroeléctricas, las grandes centrales hidroeléctricas operan en forma interconectada. La unidad está trabajando en una red en la cual la potencia es mucho más grande que la que genera la unidad. Para este caso se necesita otro esquema de control, el cual se lo muestra en la figura 1.[1] Como se puede apreciar se necesita dos lazos de control: un lazo principal que actúa en base a la frecuencia y potencia de la red a través del "control automático de generación" sobre un lazo menor que constituye el lazo de control de velocidad. En este contexto el lazo de velocidad viene a trabajar como un sistema seguidor, aunque cuando la central opera en vacío trabaja como un regulador.

En los últimos años dada la forma aislada antes mencionada como trabaja una pequeña central hidroeléctrica, que da lugar a que la principal variable a controlarse sea la frecuencia, se ha ideado una forma de control indirecto de la misma mediante el control de la carga de la red. Es decir como en funcionamiento permanente hay una correspondencia (relación funcional), entre valores de la potencia eléctrica (que se intercambia entre el generador y la red) y valores de frecuencia, si se mantiene constante la potencia se logra mantener la frecuencia constante. La forma de mantener constante la potencia y en su valor nominal es mediante la inclusión en la red de un banco de resistencias en donde se disipa la potencia generada en exceso por el generador con relación a la potencia nominal. De este modo mediante un sistema de regulación apropiado que se lo conoce como "control eléctrico - electró-

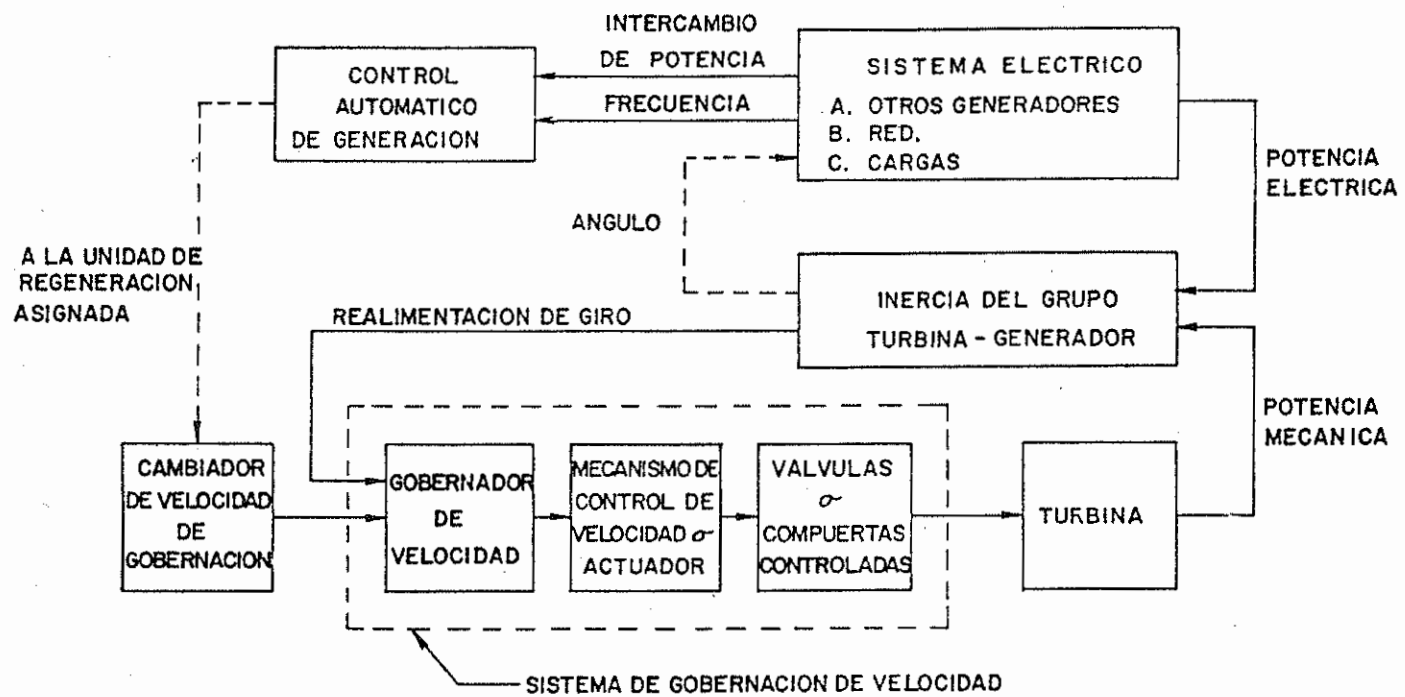


Fig. 1. Ubicación del Regulador de Velocidad con Control Positivo de Flujo (sistema de Gobernación de Velocidad) en el esquema Básico de control de una Central Hidroeléctrica, que forma parte de un sistema interconectado.

nico con disipación de carga" y el banco de resistencias antes mencionado se logra controlar indirectamente la frecuencia de la red. En este caso el control no actúa sobre el mecanismo de distribución de la turbina sino que actúa sobre el banco de resistencias, es decir sobre la parte eléctrica de la pequeña central hidroeléctrica.

Si se comparan los reguladores de velocidad con el de disipación de carga se verá que:

- a) Los reguladores de velocidad son más conocidas y se tiene una experiencia e información a nivel mundial, para su diseño y construcción.
- b) Dada la característica del control de disipación de carga, la pequeña central estará todo el tiempo operando a plena carga con la posible reducción de su vida útil.

El regulador de velocidad oleo - mecánico ha sido usado desde el siglo pasado hasta la presente fecha con buenos resultados. Con el advenimiento de la electrónica, en las centrales de potencia se ha ido cambiando el regulador oleo - mecánico por uno eléctrico - electrónico con control positivo de flujo. Las razones principales son:

- a) La construcción de un regulador oleo - mecánico involucra una avanzada tecnología en su construcción mecánica ya que algunas de sus piezas deben ser construidas con gran precisión, debido a que algunos de sus mecanismos forman parte de lo que se podría considerar como el cerebro del lazo de control, el mismo que debe enviar información (contenida en señales de tipo mecánico como desplazamientos) precisa al resto del sistema.
- b) La tecnología electrónica permite fácilmente conseguir precisión desde el punto de vista constructivo y además conseguir fácilmente acciones de control modernas, que dan lugar a lazos de control precisos como son las acciones de control "Proporcional - Integral - Derivativa", con la consiguiente ventaja en la regulación de velocidad.
- c) Si alguna vez las pequeñas centrales llegan a funcionar en forma interconectada y si se desarrolla la construcción de los reguladores eléctrico - electrónicos con control positivo de flujo, estos sistemas pueden ser fácilmente incorporados a esta forma de funcionamiento.

El presente volumen que trata sobre "Reguladores de Velocidad Eléctrico - Electrónicos con control Positivo de Flujo", es una parte del manual de Diseño, Estandarización y Fabricación de Equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas, que OLADE viene desarrollando de acuerdo al convenio de cooperación técnica entre OLADE-ONUDI.

Los reguladores de velocidad objeto del presente documento son aplicables a turbinas Pelton y Michell - Banki.

En el capítulo II se estudia el diagrama de Bloques General de un regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de Flujo. Se analizan algunas posibilidades y se escoge un tipo de regu

lador que más ventaja presenta desde el punto de vista de desempeño en la regulación, costos, mantenimiento y posibilidades constructivas de ciertas partes del regulador en la Región.

El capítulo III trata sobre el estudio teórico del lazo correspondiente al regulador de velocidad escogido. Comprende un estudio de estabilidad y respuesta en tiempo del sistema, para determinar los parámetros del regulador de velocidad. También se presentan los esquemas de los circuitos eléctricos que se usan en el diseño escogido, las consideraciones constructivas y de montaje de cada uno de los elementos del sistema así como su forma de cálculo.

En los capítulos IV y V se analizan las características en base a las cuales se puede realizar la estandarización de los reguladores con control positivo de flujo aplicables en un rango de 5 - 5000 Kw y se dan recomendaciones para fabricación y montaje.

El presente volumen incluye un ejemplo de cálculo de un regulador de velocidad objeto del presente documento, así como planos y tablas de dimensiones.

Los diseños y metodología que dan en el presente documento son para el uso de países e instituciones. Cuando se use la información del presente documento se debe hacer referencia al manual de OLADÉ, así como también cuando se usen diseños incluidos en este documento para fines de fabricación de reguladores eléctrico - electrónicos de velocidad con control positivo de flujo; estos deberán llevar en forma visible la frase "Tecnología - OLADÉ".

CAPITULO II

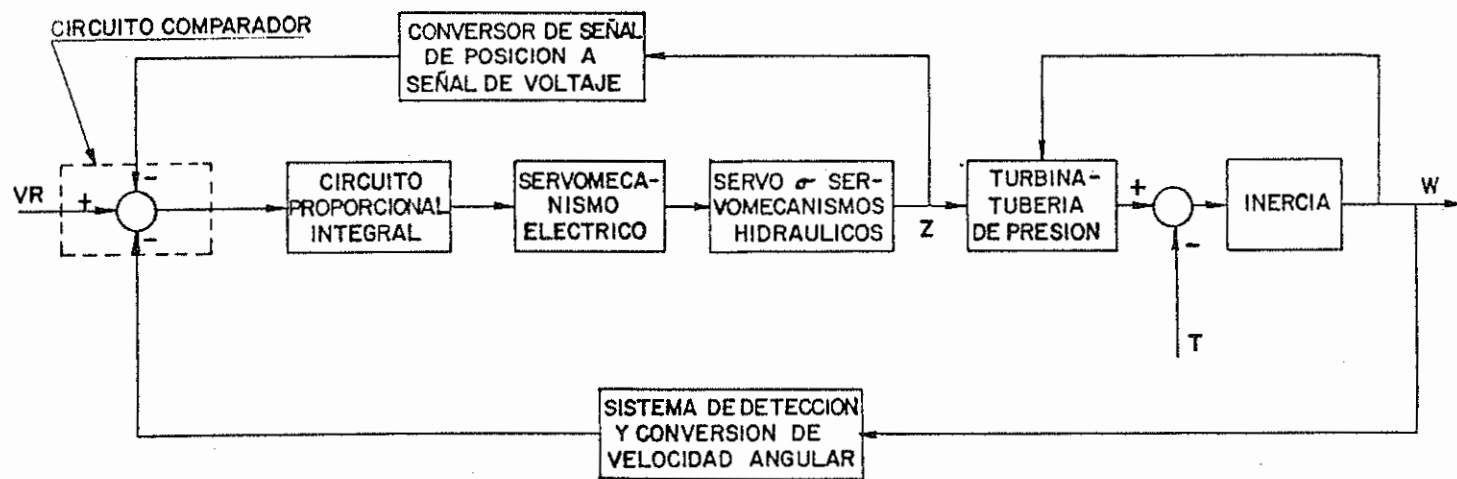
DESCRIPCION GENERAL Y TIPOS DE REGULADORES CON CONTROL POSITIVO DE FLUJO

El capítulo presente comprende la descripción de un regulador de velocidad con control positivo de flujo y un análisis comparativo de los diferentes tipos de reguladores, para escoger uno a ser desarrollado en el presente manual.

En la figura 2 se presenta el diagrama de bloques correspondiente a un regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de Flujo.[2] Se pueden apreciar 2 lazos de control; el principal que corresponde a la realimentación de la velocidad y el secundario cuya realimentación corresponde a la posición del mecanismo de distribución de la turbina. Para el caso de turbinas Pelton o Banki esta posición puede ser relacionada con la potencia de la unidad, (potencia hidráulica), de modo que el lazo antes mencionado podría considerarse como uno que controla indirectamente la potencia. Dentro del punto de vista teórico se puede considerar al arreglo como un tipo de control en cascada, en el cual el lazo seguidor es el correspondiente a la realimentación de la posición del mecanismo de distribución de la turbina.

Los bloques funcionales que aparecen en la figura 1 están asociados con tareas operacionales que deben ser cumplidas por las diferentes partes del sistema así:

- a) El "Sistema de Detección y Conversión de Señal" detecta la velocidad angular y la convierte en una señal de voltaje proporcional a ella.
- b) El "Conversor de Posición a Voltaje", capta la señal de posición "z" y la convierte en una señal de voltaje proporcional a ésta.
- c) El "Circuito Comparador", resta las señales: voltaje de referencia que lleva la información de la velocidad angular deseada menos las señales de voltaje que llevan información de la posición "z" y de la velocidad angular de la turbina respectivamente.
- d) El Circuito Proporcional Integral derivativo hace las veces de un ente decidor de la actuación de los servomecanismos sobre la posición "z", actuación que se basa en información compuesta en forma aditiva de tres partes: una proporcional al error (acción proporcional), otra proporcional a la integral del error (acción integral) y una tercera proporcional a la derivada del error (acción derivativa).
- e) El servomecanismo eléctrico sirve como un elemento conversor de la señal del voltaje generado por el circuito proporcional integral de rivativo, en una señal de desplazamiento de alguna parte del servomecanismo hidráulico. Es decir hace de interfase entre una parte del sistema de control que es puramente electrónica con otra parte del mismo que es de naturaleza mecánica.
- f) El "Bloque servo o servomecanismos hidráulicos" como su nombre lo indica, se relaciona con actuadores hidráulicos que causan el desplaa



VR: VOLTAJE DE REFERENCIA
 Z : SEÑAL DE POSICION DEL MECANISMO DE
 DISTRIBUCION DE LA TURBINA
 W: VELOCIDAD ANGULAR
 T: TORQUE DE CARGA SOBRE EL EJE DE
 LA TURBINA

Fig. 2. Bloques funcionales de un regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de Flujo, con forma de control "El cascada".

miento "z". Dependiendo de la potencia de la unidad y por ende del torque necesario para mover el mecanismo de distribución de la turbina, pueden ser necesarios uno o dos actuadores hidráulicos. El primer actuador hidráulico actuaría como un preamplificador de fuerza.

- g) Los últimos bloques "Sistema turbina tubería de presión, inercia" corresponden funcionalmente a todo el sistema que genera la potencia mecánica en el eje de la turbina (tubería de presión, inercia - compuesta de rodete de la turbina y de la del generador, etc).

Además de los elementos indicados en los bloques funcionales de la figura 2, se necesitan ciertos dispositivos auxiliares para que el sistema pueda funcionar y son:

- a) Una fuente de potencia que consiste principalmente de un transformador, de un circuito rectificador y de un regulador de voltaje. La fuente alimenta de corriente continua a los circuitos antes mencionados y a los elementos "Convertor de señal de posición a señal de voltaje", "Sistema de conversión y detección" y "Servomecanismo eléctrico".
- b) Circuito hidráulico para los servomotores hidráulicos, que se muestra en la figura 3.[3]
- c) Sistema de seguridad que actúan sobre la bomba de circuito hidráulico (punto b) y sobre el circuito del servomecanismo eléctrico (ver figura 4). Son necesarios además arreglos de interruptores que permiten pasar de una forma manual de operación a una forma automática (ver figura 5).

El diagrama de bloques de la figura 2 corresponde a un tipo de regulador de velocidad con control positivo de flujo. En realidad pueden haber algunos tipos de reguladores con control positivo de flujo, los cuales pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Los de funcionamiento oleo - mecánico.
- b) Los de funcionamiento eléctrico - electrónico.

Con relación a los de funcionamiento oleo-mecánico, OLADE en su manual "Manual de Regulador Oleo - Mecánico de Velocidad" presenta una descripción de muchos de los posibles tipos de reguladores Oleo - mecánicos. Los tipos que mejores características presentan desde el punto de vista de exactitud y calidad de regulación se muestran en las figuras 6 y 7 respectivamente. El arreglo de la figura 6 presenta compensación temporal y permanente en base a palancas, planos inclinados y dashpot así como sistemas de preamplificación y de distribución de fuerza. El esquema de la figura 7 corresponde al adoptado por OLADE para el desarrollo del "Manual del Regulador Oleo - Mecánico de Velocidad" y presenta básicamente las siguientes características:

- a) Sistemas de Preamplificación y de distribución y fuerza.
- b) Compensación temporal, conseguido mediante un arreglo de barra, plano inclinado y resorte que actúan sobre el sistema hidráulico de

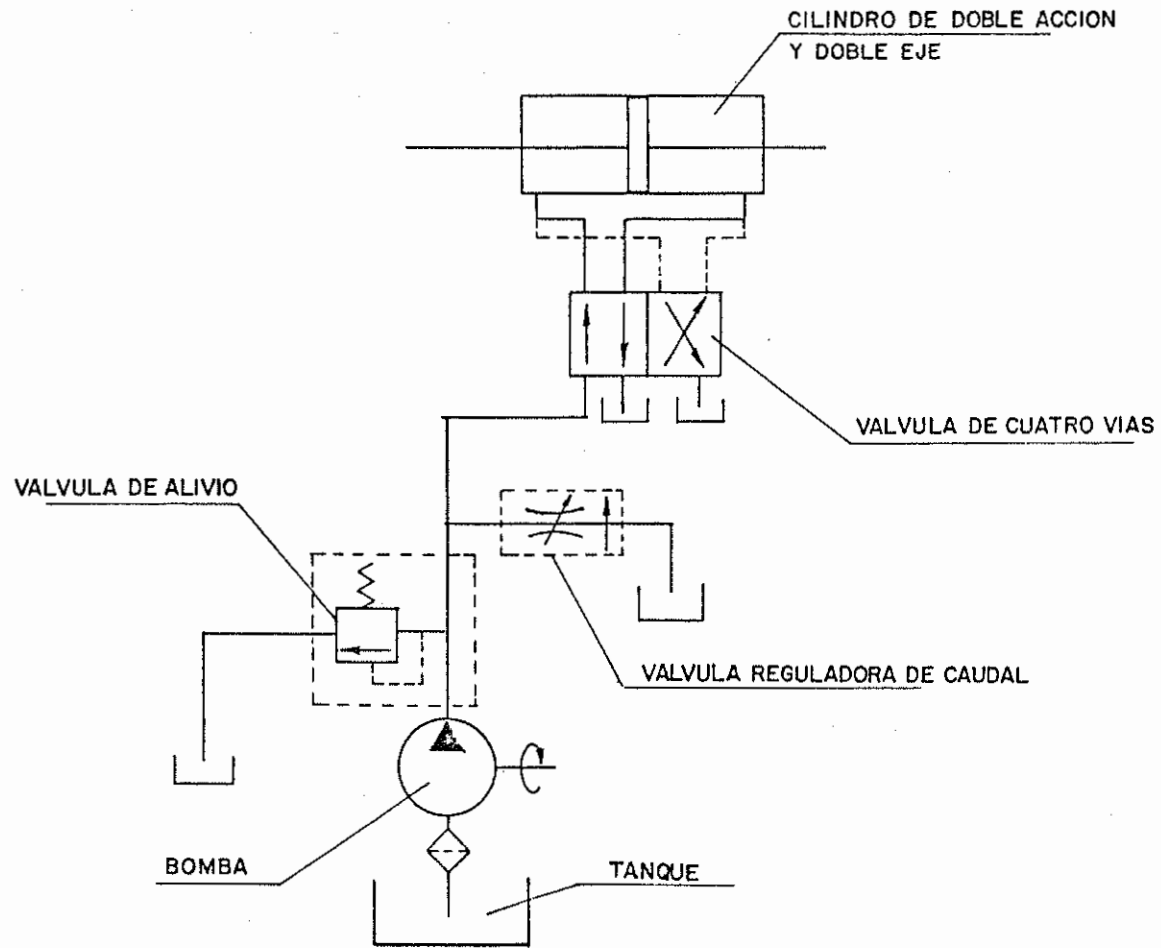


Fig. 3. Circuito hidráulico para los servomecanismos hidráulicos.

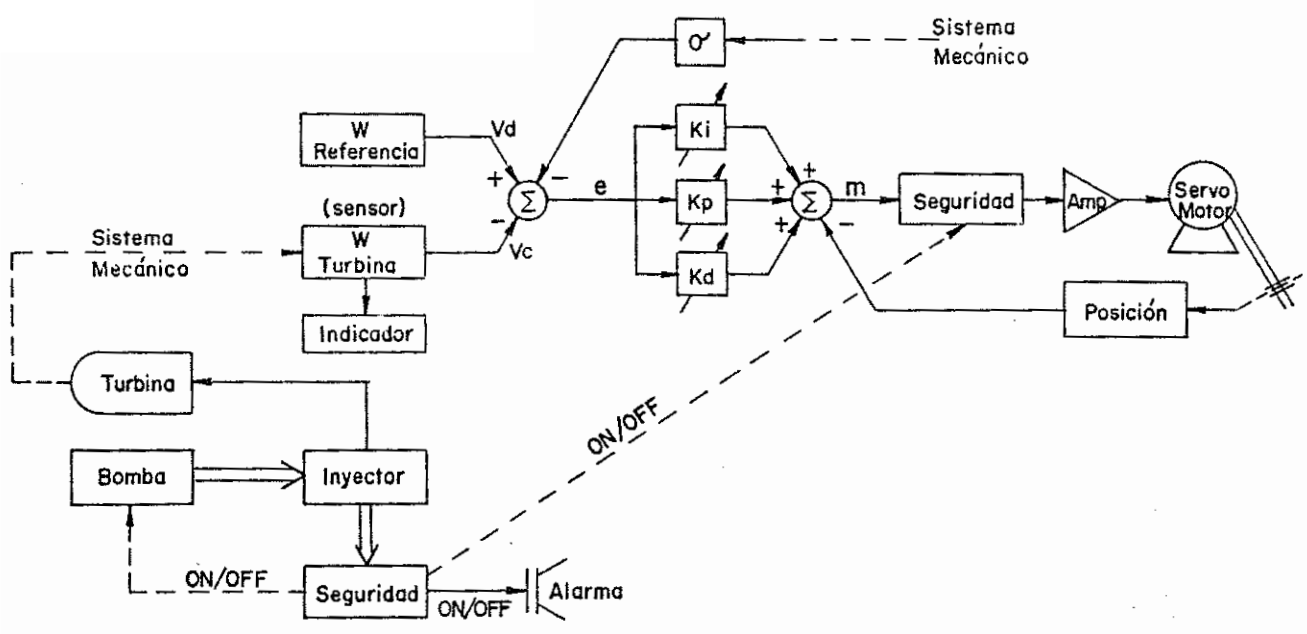
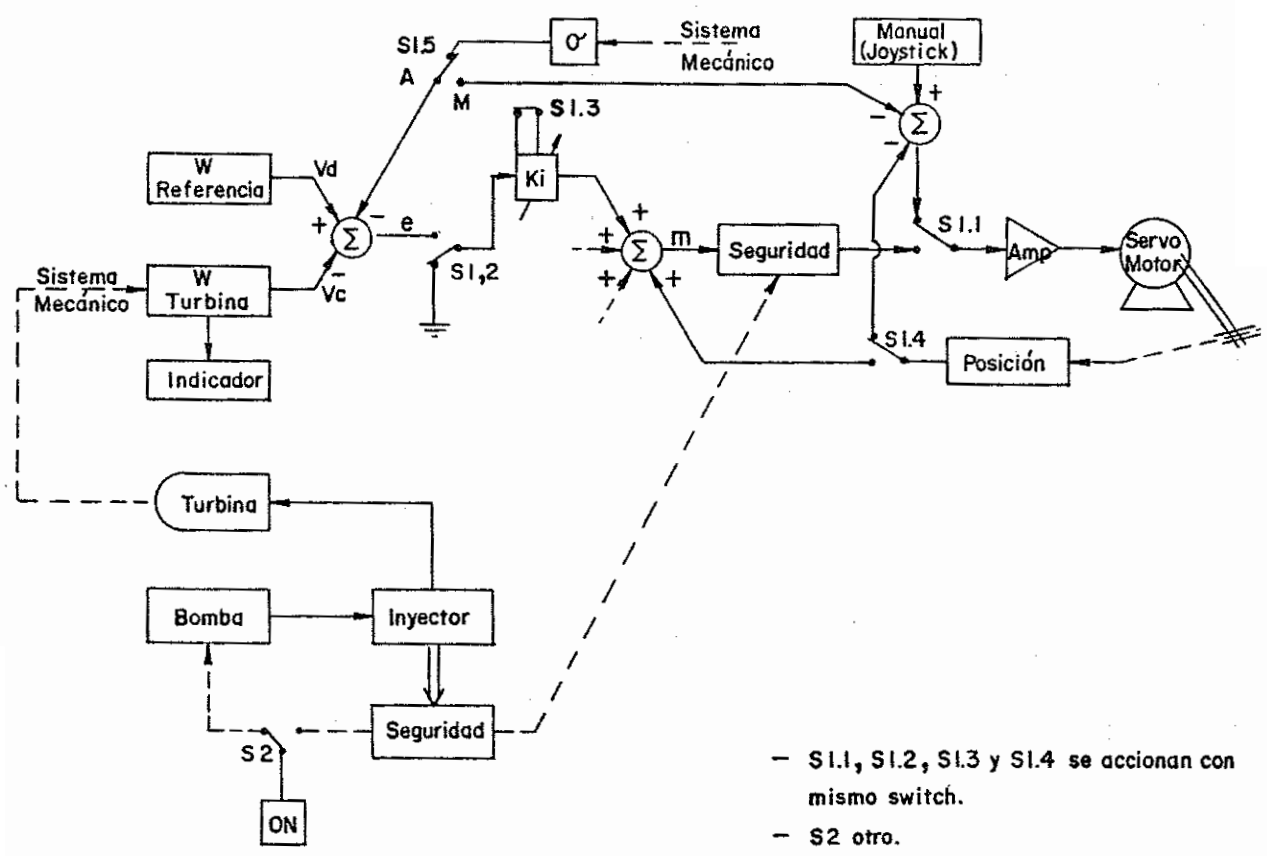


Fig. 4. Ubicación de los sistemas de seguridad.



- S1.1, S1.2, S1.3 y S1.4 se accionan con mismo switch.
- S2 otro.

Fig. 5. Arreglo de interruptores para el paso de operación manual o automático.

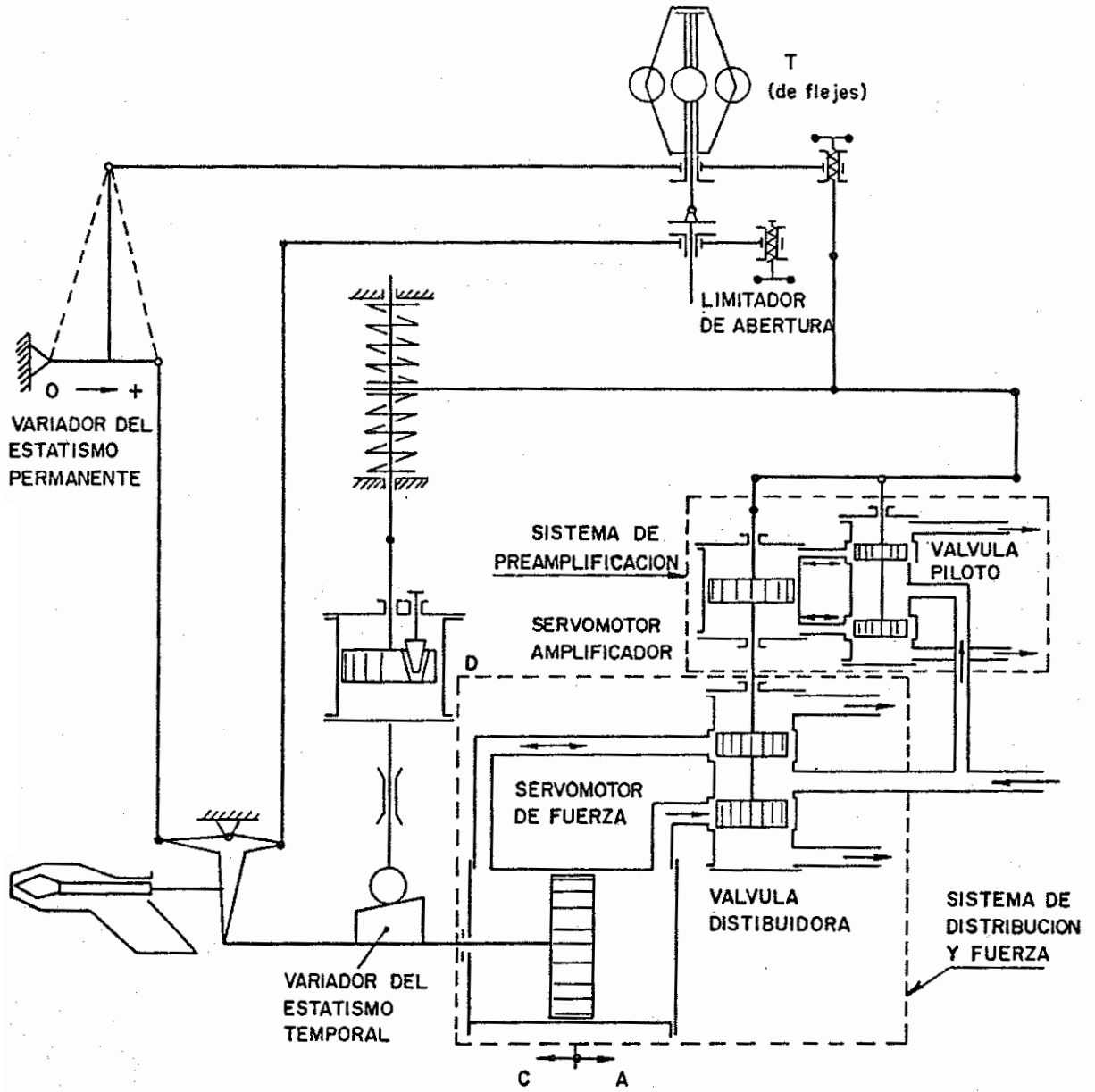


Fig. 6. Esquema de un regulador de velocidad oleo - mecánico con control positivo de Flujo con compensaciones temporal y permanente.

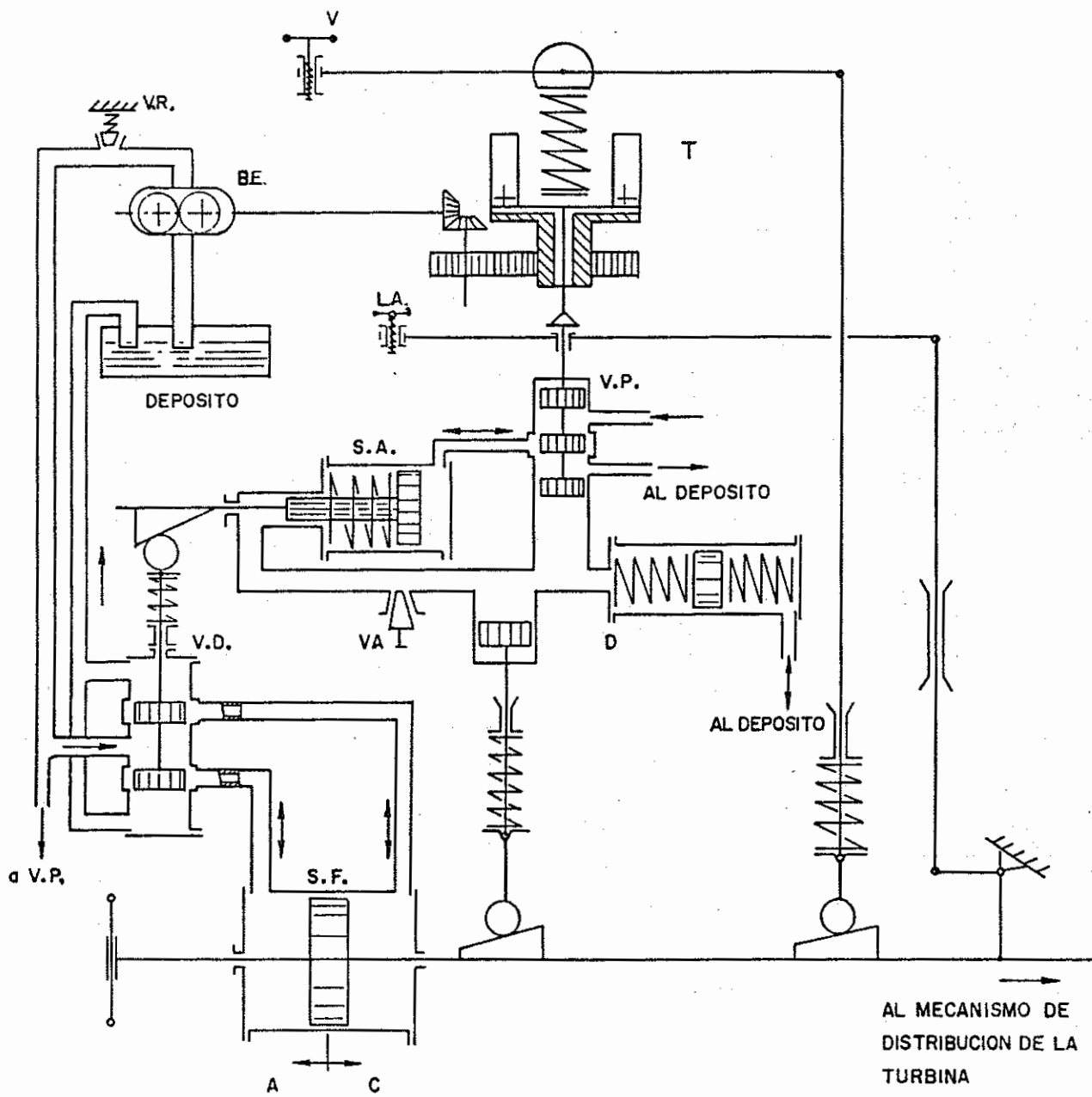


Fig. 7. Esquema del regulador oleo - mecánico adoptado por la "OLADE" para su manual de construcción y estandarización.

preamplificación a través de un pistoncito.

- c) Compensación permanente, que se logra mediante conexiones mecánicas actuando sobre la tensión del resorte del taquímetro.

En términos de costo, los reguladores de velocidad oleo - mecánicos con control positivo de flujo pueden tener un precio más bajo que los reguladores eléctrico - electrónicos. Sin embargo en los reguladores oleo mecánicos resulta difícil construir los mecanismos de precisión que forman parte de lo que se podría considerar el cerebro del lazo de control. En cambio la tecnología electrónica permite fácilmente conseguir precisión desde el punto de vista constructivo y además conseguir fácilmente acciones de control modernas, que dan lugar a lazos de control precisos, como son las acciones de control "Proporcional Integral Derivativa". Si se considera esto, el regulador eléctrico - electrónico con control positivo de flujo resulta más fácil construirlo en la región que su homólogo oleo - mecánico.

2.1. POSIBLES ESQUEMAS DE CONTROL DE LOS REGULADORES ELECTRICOS - ELECTRONICOS CON CONTROL POSITIVO DE FLUJO

En esta parte se presentan las diferentes posibilidades de esquemas para un regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de flujo.

En la figura 8 [2] se presenta un esquema de control, en el que se hace uso de elementos de los reguladores oleo - mecánicos (DASHPOT) con fines de mejorar el desempeño del sistema. Es decir se trata de un sistema con algunos componentes de tipo mecánico. La característica fundamental de este esquema es que se lo puede conceptuar como un arreglo en el que intervienen dos formas de control: la una tipo feedback y la otra de tipo feed-forward de ganancia. La forma feedforward de ganancia se la consigue mediante la toma de señal de potencia que actúa sobre el arreglo hidráulico compuesto de servo o servomecanismos hidráulicos con el Dashpot. La forma feedback se la consigue con la realimentación de la velocidad y está dotada de acciones de control "proporcional derivativa". Se conoce que un arreglo en el que haya las formas de control, la de forma feedback y la de tipo feedforward de ganancia puede dar lugar a un buen desempeño del esquema de control en términos de velocidad de respuesta y exactitud que un arreglo donde haya sólo la forma feedback.

Otro arreglo de elementos que da lugar al esquema de control presentado en la figura 2, en el que se le puede identificar una forma "Control en Cascada". El circuito "Proporcional integral derivativo" puede ser de tipo "Proporcional Integral".

Un arreglo que da lugar a dos formas de control, la feedback y la feedforward de ganancia (con la consiguiente ventaja en el aspecto técnico) es el presentado en la figura 9. La acción de control asociada con el lazo feedback es de tipo "proporcional integral". Dada la facilidad de implementación de este arreglo usando tecnología eléctrica - electrónica se presenta ésta como la alternativa más representativa dentro del aspecto técnico.

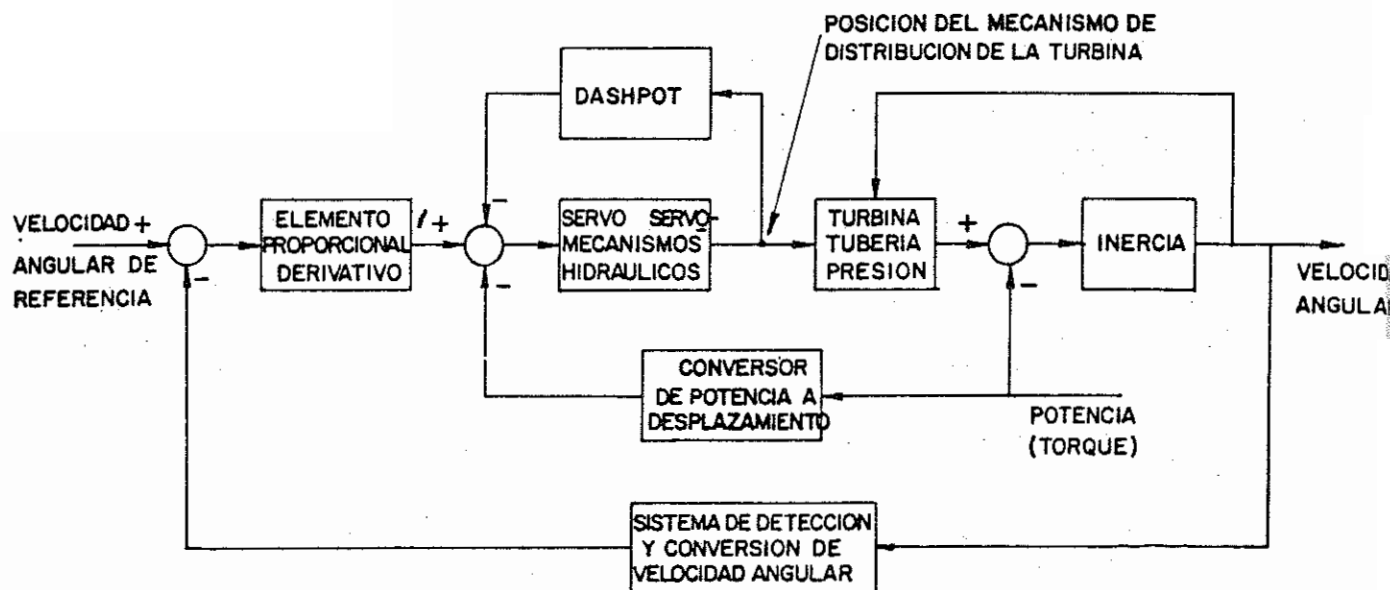


Fig. 8. Bloques funcionales de un regulador de velocidad eléctrico - electrónico - hidráulico con control positivo de Flujo.

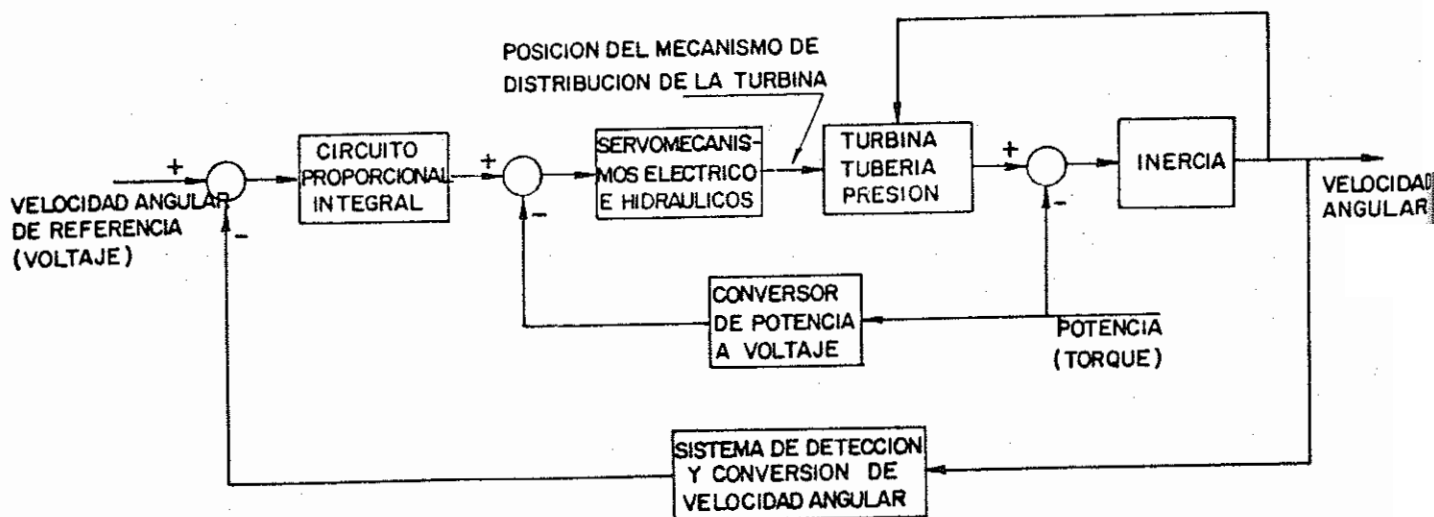


Fig. 9. Bloques funcionales de un regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de Flujo, que da lugar a las formas de control "Feedback" y "Feedforward de ganancia".

Como una alternativa en la que se disminuiría ciertos componentes en el arreglo de control, en la figura 10 se presenta un esquema en el que existe una sola forma de control, la forma tipo "Feedback", con acciones de control "Proporcional Integral Derivativa". En la figura 11 se presenta la alternativa anterior pero con acción de control "Proporcional integral".

En el cuadro # 1 se presenta una lista de la mayoría de los posibles reguladores de velocidad, eléctrico - electrónicos con control positivo de flujo junto con sus características de exactitud, posibilidad del desarrollo del regulador o de alguna de sus partes en la región, facilidad de mantenimiento por personal no especializado, vida útil.

Con relación a la exactitud y calidad de regulaciones, esta ha sido obtenida en parte basándose en la teoría de los sistemas de control, en la que se dan criterios para establecer la calidad de regulación, por ejemplo dentro de los lazos realimentador, para un sistema de control cuya función de transferencia del sistema controlado no sea muy simple (como es el caso del control de velocidad de turbinas), se sabe que una acción de control, Proporcional - Integral - Derivativa (PID) es más efectiva que una de equipo Proporcional Integral (PI), para disminuir los sobretiros de la respuesta. En el caso de la introducción del control en cascada con la realimentación de la posición del mecanismo de distribución de la turbina (filas 3 y 4 del cuadro No. 1) de un trabajo de la referencia [4] se sabe que dicha realimentación ayuda a disminuir los sobretiros de la respuesta transitorio (con el consiguiente beneficio de la regulación), para el caso de tiempo de arranque de agua bajas. Sin embargo el arreglo, para esas condiciones da lugar a un pequeño error de estado estacionario (offset) con relación a los casos de la primera y segunda fila del cuadro # 1.

Con relación a las posibilidades del desarrollo del regulador o de alguna de sus partes en la región, se debe indicar que se podría realizar la construcción de los servomecanismos hidráulicos y de los elementos del circuito hidráulico. Se debe importar el servomotor eléctrico, y se puede realizar la construcción de la parte electrónica, con resistencias, condensadores, circuitos integrados, etc. que venden en los locales comerciales, las cuales han sido importadas. Existirán ciertos circuitos integrados que se las tenga que importar directamente así como los transductores de posición llamados "Transformadores Lineales Diferenciales Variables" (LVDT) si se los usa en lugar de potenciómetros.

La facilidad de mantenimiento depende del tipo de mantenimiento que debe tener el regulador de velocidad. Considerando el bajo costo relativo del regulador de velocidad frente al de la pequeña Central Hidroeléctrica y la continuidad de servicio de la Pequeña Central Hidroeléctrica, el tipo de mantenimiento exige unidades completas de reposición preferiblemente mediante sistemas "duplex" o en forma de conjuntos de repuestos preensamblados. Si a este factor se suma el hecho de disponer de un manual de calibración y reparación de los reguladores así como bancos de pruebas de los mismos en sitios estratégicamente localizados en la Región, se puede calificar a la "facilidad de mantenimiento por personal no especializado" como muy buenas como se indica en el cuadro # 1, (para todos los tipos de reguladores).

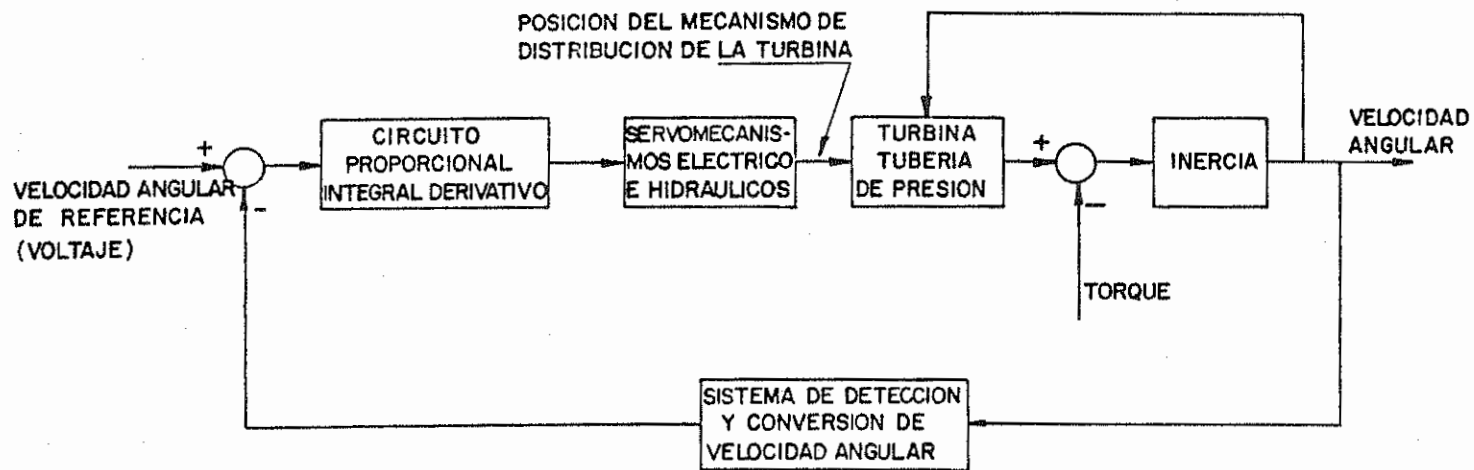


Fig. 10. Bloques funcionales de un regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de Flujo tipo realimentado con acción de control "Proporcional Integral Derivativa".

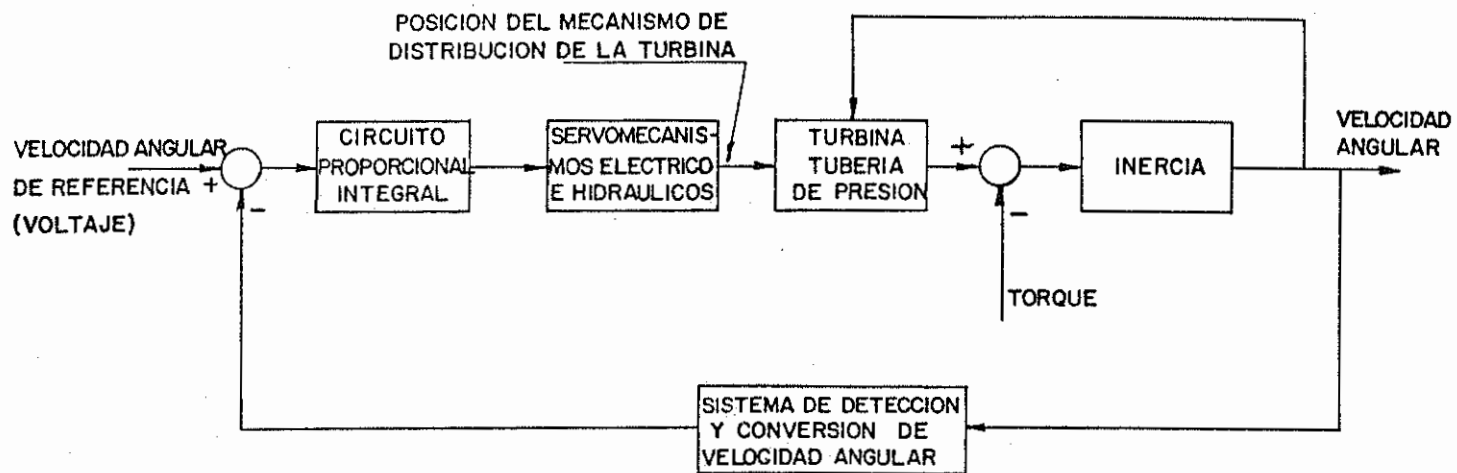


Fig. 11. Bloques funcionales de un regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de Flujo tipo realimentado con acción de control "Proporcional Integral".

CRITERIOS PARA LA SELECCION DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD
ELECTRICO-ELECTRONICOS CON CONTROL POSITIVO DE FLUJO

Tipo de reguladores eléctrico-electrónico con control positivo de flujo.	Exactitud y calidad de regulación.	Posibilidades de desarrollo del regulador o de algunas de sus partes en la región.	Facilidad de mantenimiento por personal no especializado.	Vida útil
Lazo cerrado con acción de control PI*.	Regular	Buenas	Muy buena.	Grande
Lazo realimentado con acción de control PID*.	Buena	Buenas	Muy buena	Grande
Control en cascada con circuito PI (realimentación de la posición del MDT**).	Buena	Buenas	Muy buena	Grande
Control en cascada con circuito PID***	Muy buena	Buenas	Muy buena	Grande
Lazo realimentado con acción de control "PI" o "PID" combinado con Feed forward de ganancia.	Optima	Buenas	Muy buena	Grande

* - Proporcional Integral.

** - Mecanismo de Distribución de la Turbina.

*** - Proporcional Integral Derivativa.

CUADRO # 1

Con relación a la vida útil se debe considerar lo siguiente:

Si parte de un buen diseño "electrónico y mecánico del regulador de velocidad así como de un buen proceso de fabricación, de mantenimiento y operación, se puede calificar a la vida útil como "Grande". Desde el punto de vista constructivo los diferentes tipos de reguladores no presentan mayores diferencias (estúdiense cuadro # 2).

Tipos de reguladores con control positivo de Flujo.	Elementos en exceso con relación al esquema básico "Lazo realimentado con acción de control" "Proporcional Integral" P-I
Lazo realimentado con acción de control PI*.	
Lazo realimentado con acción de control PID**.	Circuito derivador (En base a un amplificador operacional) y filtro.
Control en cascada con circuito PI (realimentación de la posición del MDT)***.	Transductor de posición (puede ser un potenciómetro o un transformador lineal diferencial variable).
Control en cascada con circuito PID.	Transductor de posición y circuito derivador.
Lazo realimentado con acción de control PID combinado con Feedforward de ganancia.	Transductor de corriente y circuito derivador.

CUADRO # 2

* PI - Proporcional Integral.

** PID - Proporcional Integral Derivativa.

*** MDT - Mecanismo de Distribución de la Turbina.

En el cuadro # 2 se presenta los elementos que en exceso se tendría en los diferentes esquemas de control con relación al esquema básico que es el "lazo realimentado con acción de control PI". Es decir todos los esquemas tendrían los elementos del esquema básico como son:

- a) Servo o servomotores hidráulicos junto con su circuito hidráulico.
- b) Servomotor eléctrico.
- c) Circuitos electrónicos básicos (comparador, captador de velocidad, fuentes de potencia, etc).

d) Sistemas de protección, alarmas y arreglo de interruptores para cambio de operación manual o automática.

En esta forma todos los esquemas de regulación tendrán un costo básico más el costo de los elementos en exceso con relación al esquema básico y el costo de la instalación de esos elementos. Si se analiza estos últimos costos se verá que son irrelevantes frente al costo básico, de modo que la selección del mejor esquema no se lo haría en base a costo.

Examinando los cuadros # 1 y # 2 se ve que la principal variable para la selección de reguladores de velocidad eléctrico electrónicos con control positivo de flujo es la calidad de regulación. La mejor opción se presenta entonces para el tipo de control, "lazo realimentado con acción de control PID combinado con Feedforward de ganancia" y será adoptado en el presente manual. El esquema anterior permitirá además facilidad de adaptación para el funcionamiento interconectado en caso de necesitarlo.

CAPITULO III

DISEÑO FUNCIONAL DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

En este capítulo se presenta el diagrama de bloques asociado con el funcionamiento dinámico del lazo de control correspondiente al regulador eléctrico - electrónico con control positivo de flujo escogido para su desarrollo en el presente manual, cual es, el lazo realimentado con acción de control Proporcional Integral Derivativa y feed forward de ganancia. Se llega además a determinar la descripción matemática del sistema en términos de variables de estado y la ecuación característica del mismo que sirve de base para el análisis de estabilidad. Con la descripción matemática del sistema en términos de variables de estado y usando el método numérico de "RUNGE KUTA de 4to. orden", se soluciona el sistema de ecuaciones diferenciales antes mencionado. Con la solución obtenida para algunos casos y condiciones de limitar al máximo la duración del tiempo transitorio y de limitar los picos máximos de esa respuesta transitorio se puede llegar a determinar los parámetros de diseño del regulador.

En este capítulo además se presentan los esquemas detallados de los diferentes circuitos y partes mecánicas (servomecanismos hidráulicos, acoples mecánicos). Se incluyen además formas de cálculos y diseños bajo consideraciones constructivas y de montaje, de cada uno de los elementos del sistema.

SECCION I

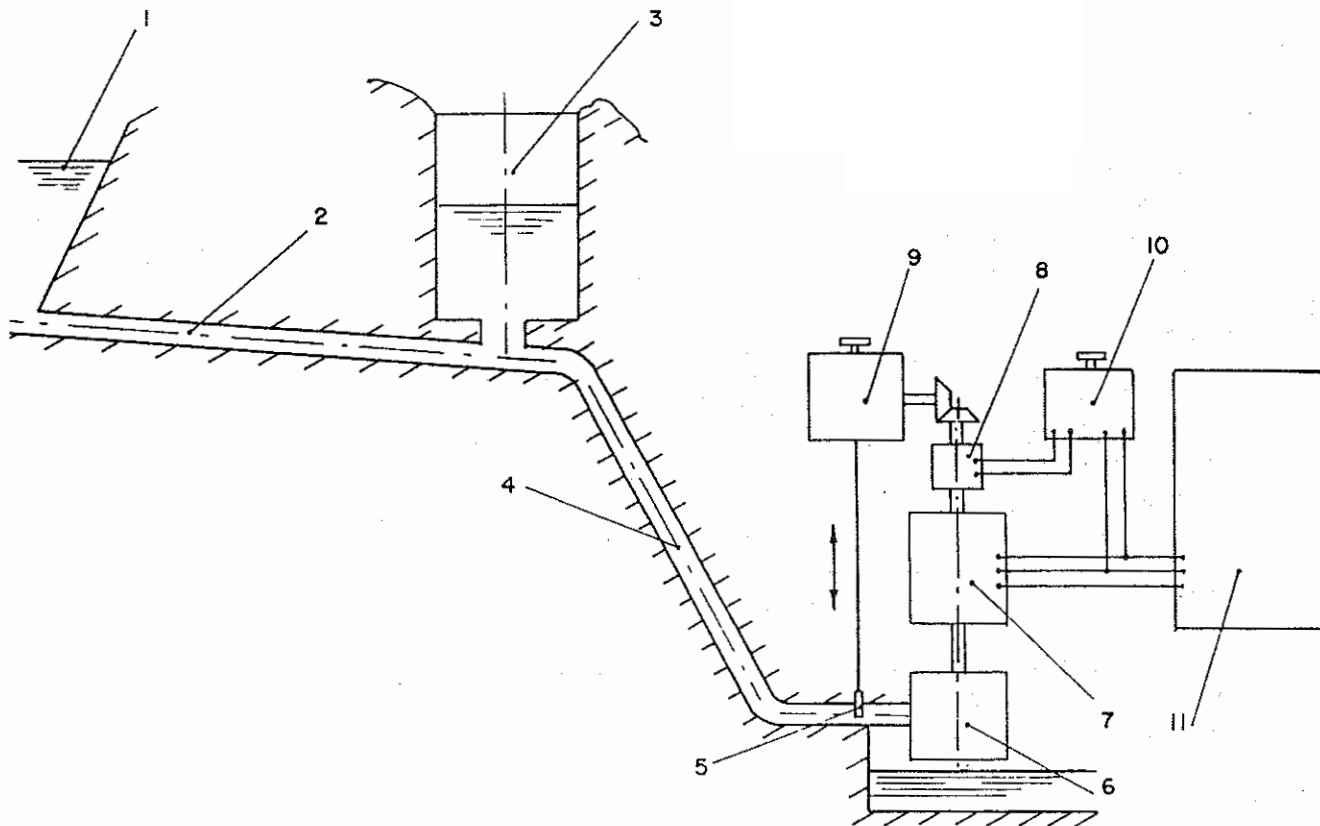
PARTE MECANICA Y DE CONTROL

3.1. MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA [4] [5] [6]

La ubicación del regulador de la velocidad con control positivo de flujo dentro de una instalación hidroeléctrica típica se muestra en la figura 12, la cual incluye un regulador de tensión. Se pueden identificar algunas partes en el esquema como:

- a) El sistema de suministro de agua, compuesta de: el reservorio, la galería, tubería forzada, chimenea de equilibrio.
- b) El grupo turbina generador, compuesto de: el distribuidor de la turbina, la excitatriz, el regulador de tensión y la carga.
- c) El regulador de velocidad que en este caso es de tipo feedback, con acciones de control PID, combinado con feedforward de ganancia.

A continuación se presentan las ecuaciones asociadas con las diferentes partes de la instalación.



- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1. Reservorio | 7. Generador eléctrico |
| 2. Galería | 8. Excitatriz |
| 3. Chimenea de equilibrio | 9. Regulador de velocidad |
| 4. Tubería forzada | 10. Regulador de tensión |
| 5. Distribuidor de la turbina | 11. Red Eléctrica |
| 6. Turbina hidráulica | |

Figura 12. Una instalación hidroeléctrica típica (Sistema de control).

3.1.1. Ecuaciones asociadas con el Sistema de Suministro de Agua

En la figura 13 se presenta un esquema en el que se indica las variables que están asociadas con las diferentes partes del sistema de suministro de agua.

Las hipótesis principales en las que se basa la presentación de las ecuaciones son:

1. Se considera al agua incomprensible.
2. Las paredes de la galería y de tubería forzada se consideran inelásticas.

a) La ecuación de la galería es:

$$T_{wg} \frac{d}{dt} (\Delta q_g) + \Delta h_{ch} + 2k_g \cdot \Delta q_g = 0 \quad (1.1)$$

Donde:

t , tiempo

Δq_g y Δh_{ch} , representan variaciones relativas del caudal en la galería y la caída en la chimenea de equilibrio respectivamente.

k_g , coeficiente de pérdida de la galería, como fracción a la caída neta.

T_{wg} , tiempo de arranque del agua en la galería (seg) se la calcula así:

$$T_{wg} = \frac{L_g \cdot V_{0g}}{g \times H_0} \quad (1.2)$$

Donde:

V_{0g} , velocidad del agua en la galería (m/seg.)

H_0 , caída neta (m)

L_g , longitud de la galería

g , gravedad.

b) La ecuación en la chimenea de equilibrio es:

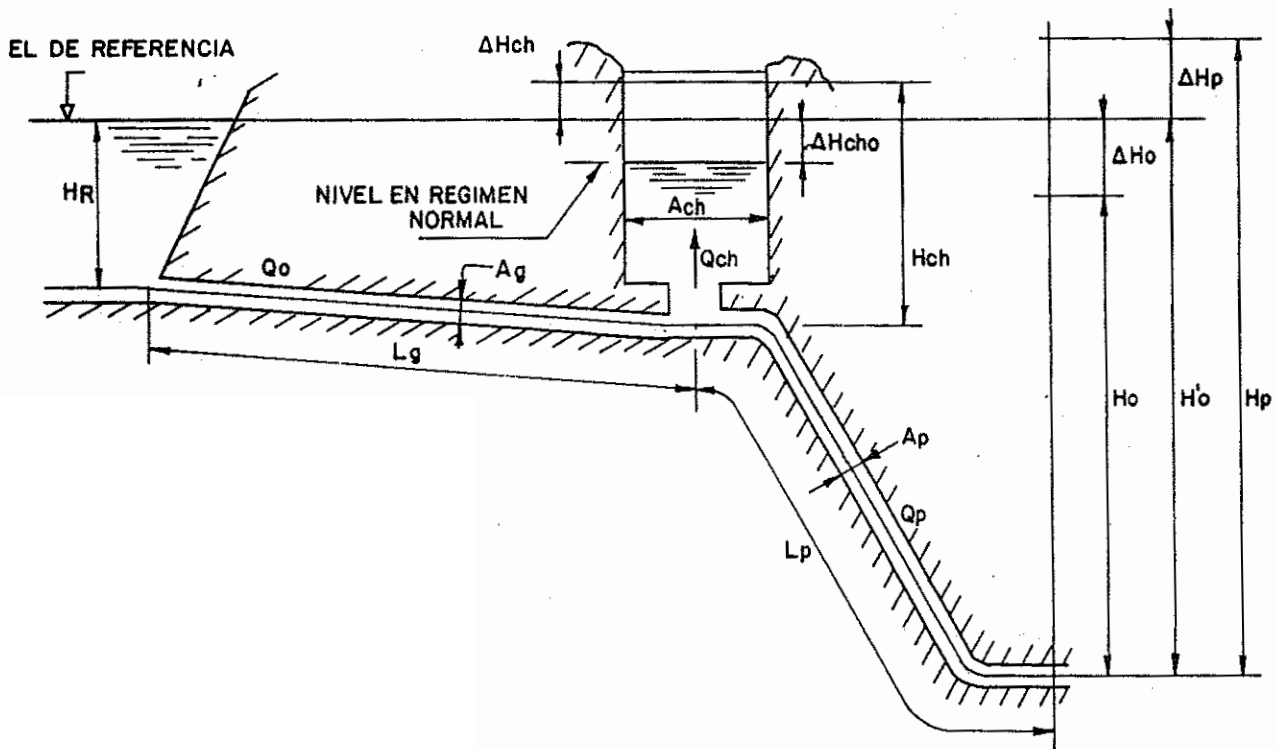


Figura 13. Diagrama de definición de variables para el modelo matemático del sistema de suministro de agua.

$$\Delta q_g - \Delta q_p = T_{ch} \frac{d}{dt} (\Delta h_{ch}) \quad (1.3)$$

Donde:

Δq_p , variación relativa del caudal en la tubería forzada.

T_{ch} , constante de tiempo de la chimenea (seg), se la calcula así:

$$T_{ch} = \frac{A_{ch} \times H_0}{Q_0} \quad (1.4)$$

Donde:

A_{ch} , área de la sección recta de la chimenea (m²).

Q_0 , caudal nominal.

c) La ecuación correspondiente a la tubería forzada es:

$$T_w \cdot \frac{d}{dt} (\Delta q_p) + \Delta h_p - \Delta h_{ch} + 2K_{pr} \cdot \Delta q_p = 0 \quad (1.5)$$

Donde:

Δh_p , variación relativa de la caída en la tubería forzada.

K_{pr} , coeficiente de pérdidas en la tubería forzada, como fracción respecto a la caída neta.

T_w , tiempo de arranque del agua en la tubería forzada - (seg), su expresión es:

$$T_w = \frac{L_p \times V_{op}}{g \times H_0} \quad (1.6)$$

Donde:

L_p , longitud de la tubería forzada (m).

V_{op} , velocidad del agua en la tubería forzada (m/seg).

3.1.2. Ecuaciones asociadas con el grupo turbina generador

a) Ecuación de la turbina

Las ecuaciones de estado estable de la turbina en términos de variables "expresadas en por unidad" son de la forma:

$$q_p = q_p(h_p, w, x) \quad m_t = m_t(h_p, w, x) \quad (1.7)$$

Es decir tanto el caudal en la tubería forzada como el momento motor de la turbina son funciones de la caída en la tubería de presión h_p , la velocidad angular de la turbina w y del desplazamiento de mecanismos de distribución de la turbina x .

Para pequeñas variaciones relativa de las variables con relación a sus valores de equilibrio, aplicando los principios de la linealización se obtiene:

$$\Delta q_p = \left(\frac{\partial q_p}{\partial h_p} \right)_0 \Delta h_p + \left(\frac{\partial q_p}{\partial w} \right)_0 \Delta w + \left(\frac{\partial q_p}{\partial x} \right)_0 \Delta x \quad (1.8)$$

$$\Delta m_t = \left(\frac{\partial m_t}{\partial h_p} \right)_0 \Delta h_p + \left(\frac{\partial m_t}{\partial w} \right)_0 \Delta w + \left(\frac{\partial m_t}{\partial x} \right)_0 \Delta x \quad (1.9)$$

Donde el subíndice "o" indica condición normal de funcionamiento. Es decir los derivados parciales deben ser evaluadas en el punto asociado con la condición normal de funcionamiento.

Δw , Δx , Δm , representan variaciones relativas de la velocidad angular, del desplazamiento del mecanismo de distribución de la turbina y del torque motor de la turbina.

Las derivadas parciales se las designa normalmente en la siguiente forma:

$$a_{11} = \left(\frac{\partial q_p}{\partial h_p} \right)_0 \quad ; \quad a_{12} = \left(\frac{\partial q_p}{\partial w} \right)_0 \quad ; \quad a_{13} = \left(\frac{\partial q_p}{\partial x} \right)_0$$

$$a_{21} = \left(\frac{\partial m_t}{\partial h_p} \right)_0 \quad ; \quad a_{22} = \left(\frac{\partial m_t}{\partial w} \right)_0 \quad ; \quad a_{23} = \left(\frac{\partial m_t}{\partial x} \right)_0$$

y se las determina de las curvas de estado estacionario respectivas de la turbina; usando los valores nominales de las variables. Particularmente a_{22} es negativa y se la conoce como "Coeficiente de autoreglaje de la turbina".

b) Ecuación del generador

El generador ejerce un torque resistente, que es función de la velocidad angular con la que gira el generador y la carga de la red. La función es no lineal, sin embargo puede ser linealizada para pequeñas variaciones alrededor de la condición normal de funcionamiento. Así:

$$\Delta m_g = a_{22}'' \Delta \omega + \Delta m_{gored} \quad (1.10)$$

Donde:

Δm_g , variación relativa del torque resistente del generador.

Δm_{gored} , variación relativa de la carga de la red.

El coeficiente a_{22}'' , representa la sensibilidad de la potencia resistente a variaciones de la velocidad angular (variaciones de la frecuencia), y toma en cuenta las características de la curva tensión - frecuencia (curva de estatismo) del regulador de tensión.

c) Ecuación del grupo

Tiene la siguiente forma:

$$T_m \frac{d \Delta \omega}{dt} = \Delta m_t - \Delta m_g \quad (1.11)$$

Donde:

T_m , tiempo de arranque mecánico. Se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_m = \frac{1}{37205} \times \frac{P_D^2 \times N_0^2}{g \cdot w_0} \text{ seg} \quad (1.12)$$

Donde:

P_D^2 , es el factor de inercia del grupo (Kg-m²)

N_0 , velocidad del grupo (RPM)

w_0 , es la potencia de la unidad en (Kw)

3.1.3. Ecuaciones asociadas con los elementos del regulador de velocidad propiamente dicho

En las figuras 14 y 15 se muestra la ubicación de los elementos del

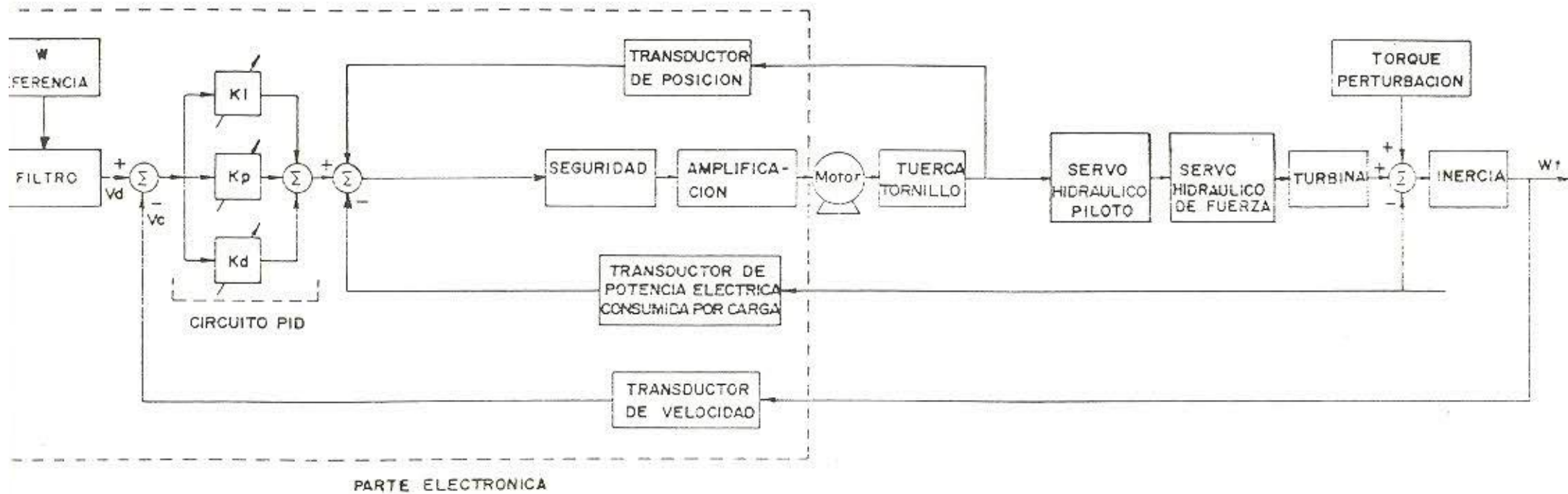
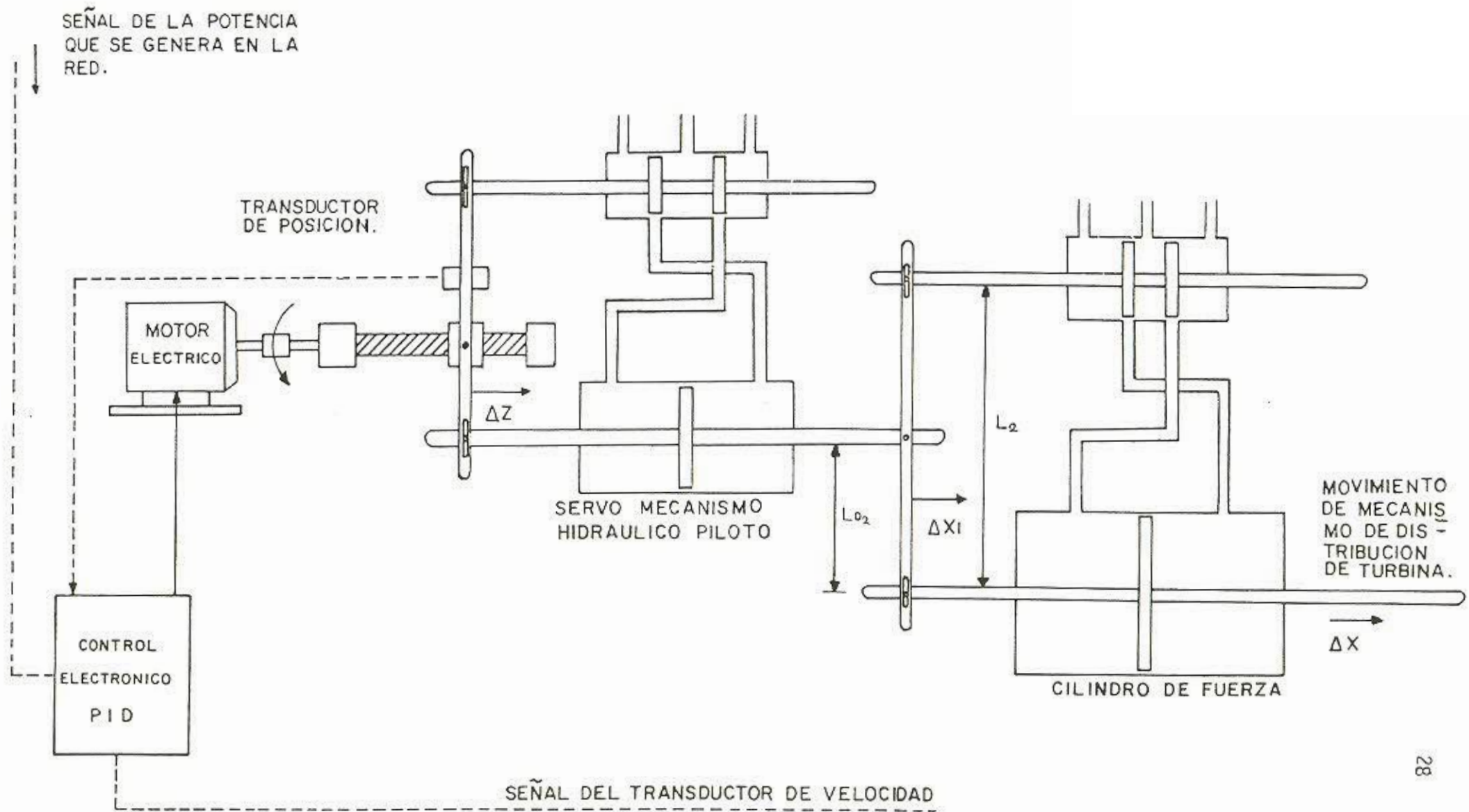


FIGURA 14. DIAGRAMA GENERAL DE BLOQUES CON REALIMENTACION DE POTENCIA DE CARGA

Figura 15. Ciertos elementos del Regulador de Velocidad.



regulador velocidad propiamente dicho [4]. En la figura 15 con mayor de talle se identifican los servomecanismos hidráulicos de fuerza, piloto y el servomecanismo eléctrico. "El control eléctrico PID" comprende el circuito comparador, el circuito PID, el amplificador de potencia del servomotor eléctrico, etc. La figura 14 presenta en forma esquemática la función de cada elemento del regulador propiamente dicho.

A continuación se presentan las ecuaciones de cada uno de los elementos antes mencionados:

a) Ecuación de los servomecanismos hidráulicos.

Para el servomecanismo de fuerza:

$$\tau_2 \frac{d \Delta x}{dt} + \Delta x = \Delta x_1 \quad (1.13)$$

Donde:

Δx_1 , variación relativa del desplazamiento del pistón del servopiloto.

Δx , variación relativa del desplazamiento del pistón del servo de fuerza. Hay casos en los que solo se usa el servomecanismo de fuerza.

τ_2 , constante de tiempo del servomecanismo hidráulico de fuerza (seg). Se la calcula así:

$$\tau_2 = \frac{A_{S2}}{Cv_2 \left(\frac{L_2}{L_{O2}} - 1 \right)} \quad (1.14)$$

Donde:

A_{S2} , área útil del cilindro del servo de fuerza (cm²).

Cv_2 , sensibilidad de flujo de la válvula de carrete (cm²/seg). Se la expresa así:

$$Cv_2 = \frac{Q_{S2}}{X_2} \quad (1.15)$$

Donde:

Q_{S2} , caudal que suministra la bomba de engranajes al servo de fuerza (cm³/seg).

X_2 , desplazamiento máximo del carrete de la válvula de carrete, el cual causa saturación.

La ecuación para el servomecanismo piloto es similar a la del servo-

$$\tau \frac{d \Delta x_1}{dt} + \Delta x_1 = \Delta z \quad (1.16)$$

Donde:

τ , constante de tiempo del servo piloto, se la determina mediante la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{A_s \left(\frac{L_0}{L} - 1 \right)}{C_{v_0} \left(\frac{L_0}{L} - 1 \right)} \quad \text{y} \quad C_{v_0} = \frac{X}{Q_s} \quad (1.17)$$

Donde:

A_s , C_{v_0} , Q_s , X_1 , etc. son las variables del servo piloto correspondientes a las variables A_z , C_{v_2} , Q_{s_2} , X_2 del servomecanismo de fuerza y sus unidades son iguales.

Δz , es la variación relativa del desplazamiento del punto donde se ejerce su acción el servoelectrónico en la barra de realimentación del servomecanismo hidráulico piloto.

b) Ecuación del subsistema compuesto del servomotor eléctrico amplificador, transductor de posición y tuerca tornillo.

$$\tau_1 \frac{d \Delta z}{dt} + \Delta z = K_M \Delta v \quad (1.19)$$

Mediante un diseño del subsistema, se puede tener una constante de tiempo del mismo, de modo que se tenga un buen desempeño del lazo de control en lo que se refiere a calidad del transitorio.

τ_1 , constante de tiempo del subsistema. Se la calcula mediante la siguiente expresión:

$$\tau_1 = \frac{K_\theta, K_T, K_R}{K_B + K_T, K_R} \quad (1.20)$$

Las variables K_a , B , K_b , K_T , K_θ se definen más adelante en la sección 3.8.1. La variable K_R se define más adelante en esta sección.

Δv , variación relativa del voltaje de alimentación al subsistema en cuestión.

Δz , variación relativa del desplazamiento que imprime el servoelectrónico a la palanca de realimentación del servo piloto.

K_M , sensibilidad estática del subsistema compuesto del servomotor eléctrico, transductor de posición, etc. Se calcula así:

$$K_M = \frac{1}{K_r} \cdot \frac{V_0}{Z_0} \quad (1.21)$$

Donde:

Z_0 , desplazamiento nominal del punto donde ejerce su acción el servoeléctrico en la barra de realimentación de servomecanismo piloto.

V_0 , voltaje nominal de entrada al sistema considerado en este punto.

K_r , sensibilidad del transductor de posición (Volt/cm) se la puede determinar de la curva de calibración estática del transductor si se trata de un "transformador de núcleo variable o mediante la siguiente ecuación, si se trata de un transductor potenciométrico.

$$K_r = \frac{\Delta V'}{\Delta D'} \cdot K_g \quad (1.22)$$

Donde:

$\Delta V'$, diferencia de voltajes límites (máximo y mínimo) de alimentación al potenciómetro.

$\Delta D'$, distancia máxima que puede recorrer el contacto deslizante del potenciómetro.

K_g , ganancia del circuito a la salida del potenciómetro.

c) Ecuación del filtro

$$\tau_F \frac{\Delta W_R'}{dt} + \Delta W_R' = \Delta W_R \quad (1.23)$$

Donde:

ΔW_R , variación relativa de la velocidad angular de referencia.

$\Delta W_R'$, variación relativa de la velocidad angular de referencia a salida del filtro.

τ_F , constante de tiempo del filtro (seg), se la calcula así:

$$\tau_F = R_{102} \cdot C_{25} \quad (1.24)$$

Donde:

R_{102} , resistencia de la rama de realimentación del amplificador operacional (ver sección 3.12.8).

C_{25} , capacidad del condensador de la rama de realimentación del amplificador operacional.

d) Ecuaciones del punto suma a la entrada del subsistema considerado en el punto b).

$$\Delta v_1 = \Delta V_c + \sigma \Delta_{gored} \quad (1.25)$$

Donde:

ΔV_c , variación relativa del voltaje de salida del circuito - PID. Para esta variación se toma como referencia el voltaje V_0 , voltaje nominal de aplicación al subsistema considerado en el punto b).

σ , ganancia relativa del transductor de potencia eléctrica consumida por la carga. Se calcula así:

$$\sigma = K_c \frac{P_{g0}}{V_0'} \quad (1.26)$$

Donde:

V_0' , voltaje nominal del transductor de potencia a su salida.

P_{g0} , potencia eléctrica nominal generada.

K_c , sensibilidad estática del transductor de potencia, que relaciona el cambio de potencia eléctrica generada con el cambio de voltaje a la salida del transductor de potencia eléctrica consumida por la carga.

e) Ecuación del circuito PID

$$\Delta V_c = K_p \Delta e + K_I \int_0^t \Delta e \, dt + K_d \left(\frac{d\Delta e}{dt} \right) \quad (1.27)$$

Donde: $\Delta e = \Delta W_{R'} - \Delta W$

K_p , sensibilidad de la acción proporcional, se la calcula así:

$$K_p = \frac{R_{104} + P_p}{R_{27}} \quad (1.28)$$

Donde:

R_{104+Pp} , resistencia de la rama de realimentación del amplificador operacional que proporciona la acción de control proporcional (ver sección 3.12.4).

R_{27} , resistencia a la entrada del amplificador operacional que proporciona la acción de control proporcional (ver sección 3.12.4).

K_I , sensibilidad de la acción integral, se la calcula así:

$$K_I = \frac{1}{C_{13}(P_i + R_{103})} \quad (1.29)$$

Donde:

C_{13} , capacidad del condensador de la rama de realimentación del amplificador operacional que proporciona la acción integral (ver sección 3.12.4).

(P_i+R_{103}) , resistencia a la entrada del amplificador operacional que proporciona la acción de control integral.

K_d , sensibilidad de la acción derivativa, se la calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_d = C_{24} (P_d + R_{31}) \quad (1.30)$$

Donde:

(P_d+R_{31}) , resistencia de la rama de realimentación del amplificador operacional del circuito que proporciona la acción derivativa, y

C_{24} , capacidad del condensador a la entrada del amplificador operacional del circuito que proporciona la acción derivativa.

En el procedimiento de cálculo general, mediante un cálculo de computación (ver sección 3.3.2.) se determinan los valores de K_p , K_I , K_d , los cuales a su vez sirven para determinar los valores de resistencias máximas y capacidad de los condensadores de los circuitos que proporcionan las acciones de control, de modo que se den un rango adecuado de variación a los parámetros K_p , K_I , K_d según el caso de diseño.

3.2. DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL [6]

Haciendo uso de las ecuaciones que describen cada una de las partes del sistema "Regulador de velocidad eléctrico-electrónico con control positivo de flujo", escogido para el presente manual se obtiene el diagrama de bloques representado en la figura 16. En el que se pueden apreciar los bloques correspondientes a las diferentes partes del sistema. En la figura 17 se presenta el diagrama de bloques. Pero sin indicar a que partes del sistema corresponden los bloques. A partir de este último diagrama y considerando como variable de entrada la variación de la carga (caso más usual) se llega luego de una reducción en Bloques a la siguiente ecuación de transferencia.

$$\frac{\Delta W(s)}{\Delta m} = \frac{\left[1 - \sigma \bar{T}_2(s) \left(a_{23} - \frac{a_{21} a_{12}}{a_{11} - \bar{T}_1(s)} \right) \right] \frac{a_{11} - \bar{T}_1(s)}{T_m S [a_{11} - \bar{T}_1(s)] - [a_{22}(a_{11} - \bar{T}_1(s)) - a_{12} a_{21}]} }{1 - G_c(s) \bar{T}_2(s) \left(a_{23} - \frac{a_{21} a_{12}}{a_{11} - \bar{T}_1(s)} \right) \frac{a_{11} - \bar{T}_1(s)}{T_m S [a_{11} - \bar{T}_1(s)] - [a_{22}(a_{11} - \bar{T}_1(s)) - a_{12} a_{21}]}}$$

Donde:

$$G_c(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (1.32)$$

$G_c(s)$, función de transferencia del circuito PID.

$$\bar{T}_2(s) = \frac{K_M}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau s + 1)} \quad (1.33)$$

$\bar{T}_2(s)$, función de transferencia del sistema, "servo eléctrico, servo piloto y servo de fuerza".

$\bar{T}_1(s)$, función de transferencia del sistema de suministro de agua (ver figura 17 para identificarlo).

3.3. FORMA DE CALCULO DE LA ESTABILIDAD Y CALIDAD DEL TRANSITORIO

En esta parte se presenta la descripción matemática del Regulador de velocidad eléctrico - electrónico con control positivo de flujo en su versión de variables de estado, obtenidas en base a ciertas consideraciones que se indican más abajo. El sistema de ecuaciones diferenciales que se llega a obtener es lineal y sirve para pequeñas variaciones de las variables con relación a sus valores nominales de funcionamiento. La solución del sistema de ecuaciones diferenciales permite simular el desempeño del regulador y en base a esto se determinan los parámetros que dan lugar a una buena respuesta transitoria.

Figura 16. DIAGRAMA FUNCIONAL DE UNA CENTRAL HIDROELECTRICA TIPICA - UNIDAD EN MARCHA AISLADA

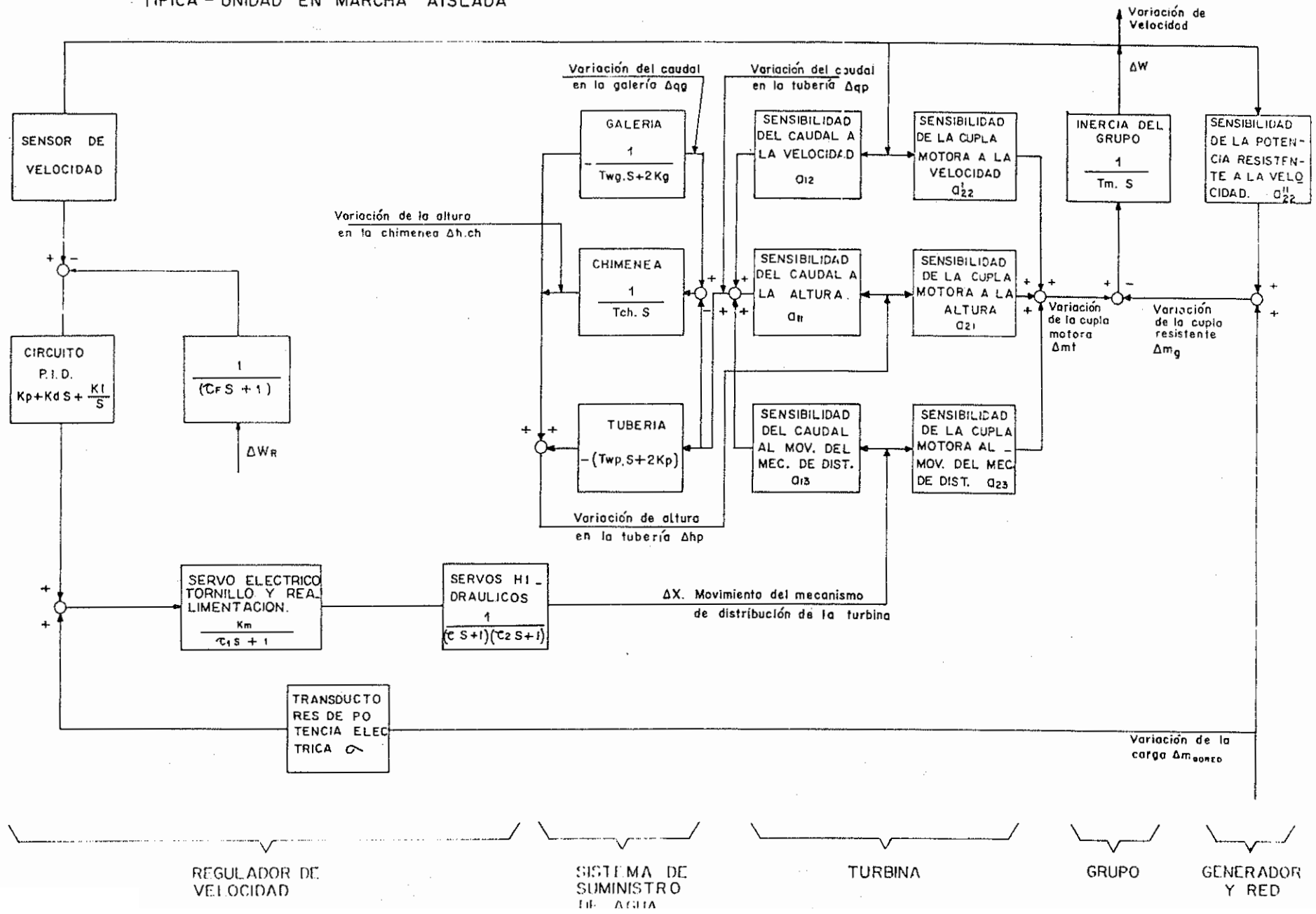
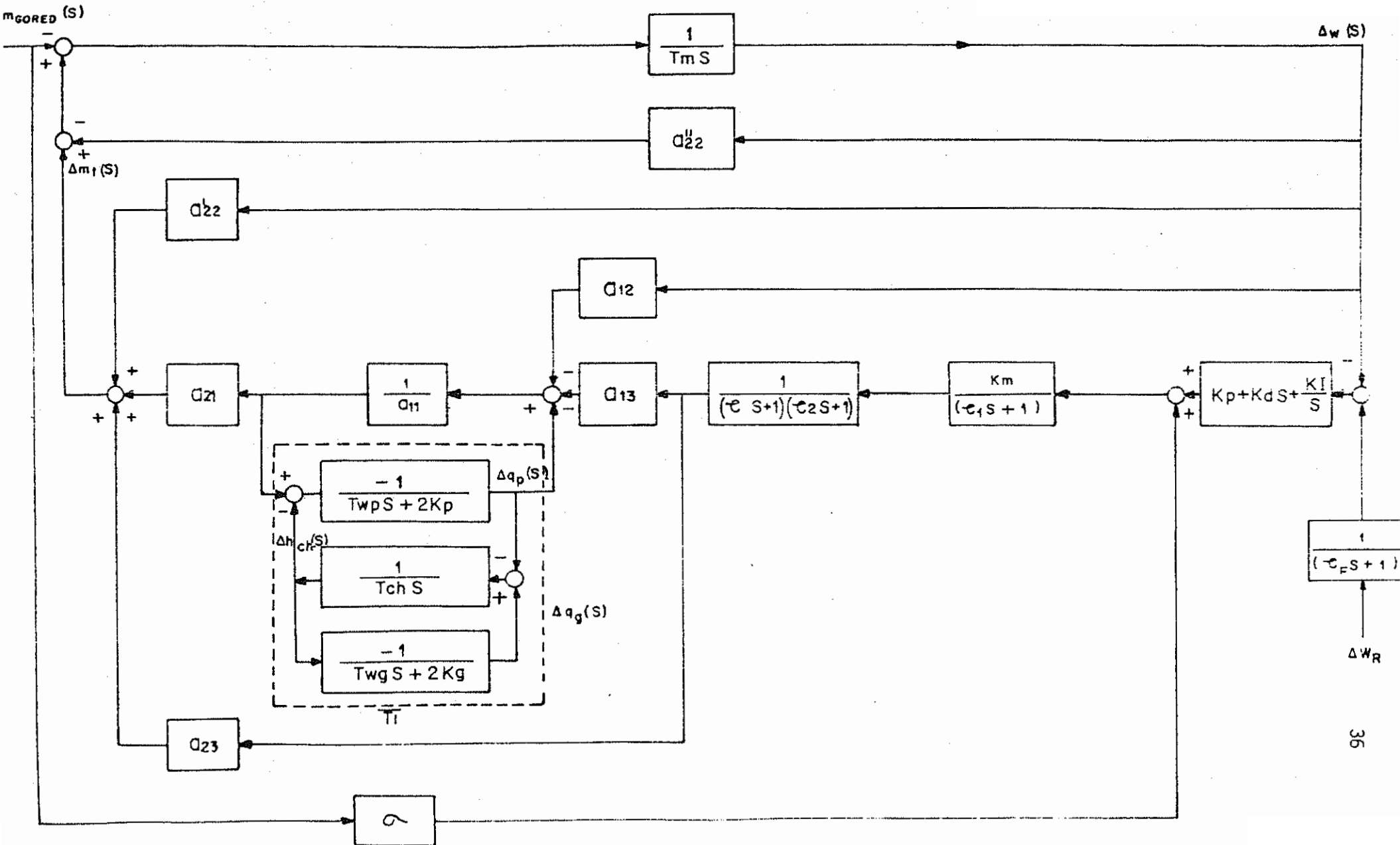


Figura 17. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA CENTRAL



El método de solución que se sigue es el método numérico de RUNGE KUTA.

Para el estudio de la estabilidad del sistema se obtiene la ecuación característica del mismo en base a una de las matrices de la descripción matemática del sistema en variables de estado.

3.3.1. CONSIDERACIONES SIMPLIFICATIVAS DEL MODELO MATEMATICO INICIAL [6]

Las siguientes consideraciones permiten obtener un modelo matemático del sistema más simple. En efecto se llega a obtener una ecuación característica de 5to. orden solamente.

1. La chimenea de equilibrio aísla la galería del resto de componentes del sistema de control. Esta consideración es equivalente a decir que no hay variación del caudal en la galería con relación a su valor nominal, de modo que:

$$\Delta q_g = 0$$

2. Considerando pequeñas variaciones de la carga se asume que el nivel de la chimenea de equilibrio permanece constante, de modo que

$$\Delta h_{ch} = 0$$

3. La resistencia hidráulica de la tubería forzada que causa pérdidas es despreciable de modo que:

$$K_{pr} = 0$$

4. Se diseña el servomotor piloto y su sistema hidráulico de modo que su constante de tiempo sea despreciable.

En base a las consideraciones 1, 2 y 3 la función de transferencia $\bar{T}_1(s)$ del sistema de suministro de agua se reduce a:

$$\bar{T}_1(s) = \frac{\Delta q_p(s)}{\Delta h_p(s)} = - \frac{1}{T_w S} \quad (1.34)$$

Se debe aclarar que las condiciones 1 y 3 corresponden al caso de "Centrales Hidoeléctricas", al aplicarse al caso de "Pequeñas Centrales Hidroeléctricas" puede resultar que por efectos del factor de escala (si se considera que desde el punto de vista funcional una "Pequeña

Central Hidroeléctrica" no es sino una "Central Hidroeléctrica" a escala) esas consideraciones no sean completamente aplicables. Al seguir el proceso de diseño del "Lazo de Control" basado en esas consideraciones puede resultar que los valores calculados de los parámetros ajustables del lazo K_p , K_I , K_d sean algo diferente a los reales, por lo cual requerirá un proceso de calibración extra en la "Pequeña Central Hidroeléctrica".

Sin embargo, la mayoría de las "Pequeñas Centrales Hidroeléctricas" no poseen chimenea de equilibrio y en estos casos las ecuaciones correspondientes a la galería y chimenea de equilibrio desaparecen del modelo matemático, por lo cual no son necesarias las consideraciones 1) y 2), para simplificar este modelo. Es decir el modelo matemático que se presenta en la siguiente sección es perfectamente aplicable al caso de "Pequeñas Centrales Hidroeléctricas", que no posean chimenea de equilibrio.

3.3.2. Cálculo del Transitorio

Partiendo de las consideraciones anteriores se llegan a definir las siguientes ecuaciones que describen al sistema de control, para el caso que se tome como entrada el cambio de torque de carga a la turbina y/o el cambio de la velocidad de referencia.

Ecuaciones del sistema de suministro de agua:

$$T_w \frac{d}{dt} (\Delta q_p) = - \Delta h_p \quad (1.35)$$

Ecuaciones del grupo turbina generador:

$$\Delta q_p = a_{11} \Delta h_p + a_{13} \Delta x \quad (1.36)$$

$$\Delta m_t = a_{21} \Delta h_p + a_{22} \Delta w + a_{23} \Delta x \quad (1.9)$$

(Se considera que el coeficiente a_{12} es cero, lo cual es válido para turbinas Pelton y Banki).

$$\Delta m_g = a_{22} \Delta w + \Delta m_{GORED} \quad (1.10)$$

$$T_m \frac{d\Delta w}{dt} = \Delta m_t - \Delta m_g \quad (1.11)$$

Ecuaciones asociadas con los elementos del regulador:

$$\tau_2 \frac{d\Delta x}{dt} + \Delta x + \Delta x_1 \quad (1.13)$$

$$\Delta x_1 = \Delta z \quad (1.37)$$

$$\tau_1 \frac{d\Delta z}{dt} + \Delta z = K_M \Delta v \quad (1.19)$$

$$\Delta v = \Delta v_C + \sigma \Delta m_{GORED} \quad (1.25)$$

$$\Delta v_C = K_p \Delta e + K_I \int_0^t \Delta e dt + K_d \frac{d}{dt} (\Delta e) \quad (1.27)$$

$$\Delta e = \Delta W_R - \Delta W_R e^{-t/\tau_F}$$

$$\Delta v_I = K_I \int_0^t \Delta e dt \quad (1.38)$$

Mediante un proceso de combinaciones y reemplazos de las ecuaciones anteriores se llega a la siguiente descripción matemática del sistema en términos de variables de estado. [7]

$$\begin{aligned} \frac{d \Delta z}{dt} = & b_{11} \Delta z + b_{12} \Delta x + b_{13} \Delta w + b_{14} \Delta q_p + b_{15} \Delta v_I + P_M \Delta m_{gored} + \\ & + P_R \cdot \frac{\Delta W_R}{F} e^{-t/\tau_F} + P_W (\Delta W_R - W_R e^{-t/\tau_F}) \end{aligned} \quad (1.39.1)$$

$$\frac{d \Delta X}{dt} = b_{21} \Delta Z + b_{22} \Delta X \quad (1.39.2)$$

$$\frac{d \Delta W}{dt} = b_{32} \Delta X + b_{33} \Delta W + b_{34} \Delta q_p + P_2 \Delta m_{\text{gored}} \quad (1.39.3)$$

$$\frac{d \Delta}{dt} q_p = b_{42} \Delta X + b_{44} \Delta q_p \quad (1.39.4)$$

$$\frac{d \Delta v_I}{dt} = b_{53} \Delta W + P_3 (\Delta W_R - \Delta W_R e^{-t/\tau_F}) \quad (1.39.5)$$

Donde:

Δv_I , es el voltaje de salida del circuito que proporciona la acción integradora.

$$b_{11} = - \frac{1}{\tau_1} \quad (1.40)$$

$$b_{12} = - \frac{K_M K_D}{T_m} \left(\frac{a_{23} a_{11} - a_{21} a_{13}}{a_{11}} \right) \left(\frac{1}{\tau_1} \right) \quad (1.41)$$

$$b_{13} = - \left(K_M K_p + \frac{K_M K_d}{T_m} a_{22} \right) \left(\frac{1}{\tau_1} \right) \quad (1.42)$$

$$b_{14} = - \frac{K_M K_d}{T_m} \cdot \frac{a_{21}}{a_{11}} \cdot \frac{1}{\tau_1} \quad (1.43)$$

$$b_{15} = \frac{K_M}{\tau_1} \quad (1.44)$$

$$P_M = \frac{1}{\tau_1} \left(\frac{K_M K_d}{T_m} + K_M \sigma \right) \quad (1.45)$$

$$P_W = \frac{K_p K_M}{\tau_1} \quad (1.46)$$

$$P_R = \frac{K_d K_M}{\tau_1} \quad (1.47)$$

$$b_{21} = \frac{1}{\tau_2} \quad (1.48)$$

$$b_{22} = -\frac{1}{\tau_2} \quad (1.49)$$

$$b_{32} = \frac{1}{T_m} \left(\frac{a_{23} a_{11} - a_{21} a_{13}}{a_{11}} \right) \quad (1.50)$$

$$b_{33} = \frac{a_{22}}{T_m} \quad (1.51)$$

$$b_{34} = \frac{a_{21}}{a_{11} T_m} \quad (1.52)$$

$$P_2 = -\frac{1}{T_m} \quad (1.53)$$

$$b_{42} = \frac{1}{T_w} \cdot \frac{a_{13}}{a_{11}} \quad (1.54)$$

$$b_{44} = -\frac{1}{T_w a_{11}} \quad (1.55)$$

$$b_{53} = -KI \quad (1.56)$$

$$P_3 = KI \quad (1.57)$$

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes constantes (descripción matemática del sistema en términos de variables de estado), para condiciones iniciales cero y cierto valor de torque de carga, dan lugar a las siguientes "funciones solución" $\Delta X_1(t)$, $\Delta X(t)$, $\Delta W(t)$, $\Delta q_p(t)$, $\Delta v_I(t)$. En base a la función solución $W(t)$, se puede ver como es la respuesta en tiempo del sistema de control, de la cual se puede apreciar si los transitorios desaparecen rápidamente, si el sistema tiene tendencia a la inestabilidad, si hay sobretiros, para ciertos valores de los parámetros del sistema (K_p , K_I , K_d , T_m , T_w , etc.).

Realizar la solución a mano resulta demasiado largo por lo que se ha implementado un programa de computación que por medio del método numérico de RUNGE KUTA [8], resuelve el sistema de ecuaciones antes mencionado.

El diagrama de flujo del programa y el listado del mismo se presenta en el Apéndice A.

El uso del programa anterior permite simular el desempeño del lazo de

control y en base a esto se puede determinar que valores de K_p , K_I y K_d se deben tener en cada caso para llegar a un sistema estable y de óptima velocidad de respuesta (que los transitorios desaparezcan rápido), así como que los sobretiros sean bajos.

3.3.3. Estudio de estabilidad del sistema de control [7]

De la descripción matemática del sistema de control en términos de variables de estado se puede obtener la siguiente matriz de coeficientes de las variables de estado:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{32} & b_{33} & b_{34} & 0 \\ 0 & b_{42} & 0 & b_{44} & 0 \\ 0 & 0 & b_{53} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De la matriz antes mencionada se puede definir la ecuación característica en base a la solución del siguiente determinante igualado a cero

$$\begin{vmatrix} b_{11}-\lambda & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22}-\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{32} & b_{33}-\lambda & b_{34} & 0 \\ 0 & b_{42} & 0 & b_{44}-\lambda & 0 \\ 0 & 0 & b_{53} & 0 & 0-\lambda \end{vmatrix}$$

Reduciendo por menores el determinante se llega a la siguiente ecuación característica:

$$\lambda^5 + C_4\lambda^4 + C_3\lambda^3 + C_2\lambda^2 + C_1\lambda + C_0 = 0 \quad (1.58)$$

Donde:

$$C_4 = -(b_{11} + b_{22} + b_{33} + b_{44}) \quad (1.59)$$

$$C_3 = b_{11}.b_{22} + b_{33}.b_{44} + (b_{11} + b_{22})(b_{33} + b_{44}) - b_{12}.b_{21} \quad (1.60)$$

$$C_2 = -b_{33}.b_{44}(b_{11} + b_{22}) - b_{11}.b_{22}(b_{33} + b_{44}) - b_{14}.b_{42}.b_{21} + b_{12}.b_{21}(b_{33} + b_{44}) - b_{13}.b_{32}.b_{21} \quad (1.61)$$

$$C_1 = b_{11}.b_{22}.b_{33}.b_{44} - b_{42}.b_{13}.b_{34}.b_{21} + b_{14}.b_{42}.b_{21}.b_{33} \\ - b_{12}.b_{21}.b_{33}.b_{44} + b_{13}.b_{32}.b_{21}.b_{44} - b_{21}.b_{53}.b_{15}.b_{32} \quad (1.62)$$

$$C_0 = - b_{21}.b_{53}.b_{15}.b_{34}.b_{42} + b_{21}.b_{53}.b_{15}.b_{32}.b_{44} \quad (1.63)$$

Mediante la obtención de las raíces de la ecuación característica que se la puede realizar, haciendo uso de programas hechos que disponen las calculadoras programables (como la HP 41-C, en su módulo de matemáticas) se puede identificar si el sistema es o no estable. Será estable si sus raíces reales son negativas o sus raíces complejas tienen su parte real negativa.

El valor absoluto de la parte real de las raíces complejas, cuando el sistema es estable permite también estimar el tiempo de duración de los componentes de respuesta transitoria y por ende en base de esto se puede estimar la calidad de los transitorios.

Para la solución de la ecuación característica, como ayuda se presenta en el Apéndice B los listados de dos programas que permiten determinar en base a prueba y error, los coeficientes de los factores cuadráticos $(\lambda^2 + u.\lambda + v)$ [8] de un polinomio de quinto grado, no optimizados, hay ocasiones que durante su manejo es necesario hacer interrupciones de ellos en forma manual para seguir con el proceso de prueba y error.

3.4. CALCULO DE PARAMETROS PARA LA SIMULACION Y PARA EL CALCULO DE ESTABILIDAD

De la sección anterior se pueden identificar los siguientes parámetros que entran en la simulación del sistema de control y para su cálculo de estabilidad:

1. Constantes estáticas de la turbina a_{11} , a_{13} , a_{21} , a_{22} , a_{23} .
2. La ganancia relativa del transductor de potencia, σ .
3. Las constantes de tiempo del filtro y del servomecanismo hidráulico de fuerza, τ_F , τ_2 y la del servomotor eléctrico τ_1 .
4. Los tiempos de arranque del agua y mecánico T_w y T_m .

Para la determinación de las constantes estáticas de la turbina a_{11} , a_{13} , a_{21} , a_{23} es necesario obtenerlas de las curvas características estáticas de la turbina, usando como punto de linealización, el punto nominal de funcionamiento. Así por ejemplo la constante a_{23} se la determinaría de las curvas de estado estacionario $M_t = M_t(H_p, N, X)$, para el punto nominal de funcionamiento H_{p0} , N_0 , M_{t0} , X_0 .

Las letras mayúsculas se usan para designar valores de variables absolutas (no relativas).

Su forma de cálculo sería:

$$a_{23} = \frac{\Delta Mt}{\Delta X} \left| \begin{array}{c} Hp_0 \\ N_0 \\ X_0 \end{array} \right. \cdot \frac{X_0}{Mt_0} \quad (1.64)$$

Donde:

$$\frac{\Delta Mt}{\Delta X} \left| \begin{array}{c} Hp_0 \\ N_0 \\ X_0 \end{array} \right.$$

Es una expresión aproximada para la derivada parcial $\partial ML / \partial X$ de la función expresada en las curvas antes mencionadas. Con especial precisión se debe determinar la constante a_{23} .

La constante a_{22} (coeficiente de autorregulación del sistema), involucra el coeficiente de autorregulación de la turbina a_{22}' y el de la carga a_{22}'' . El de la turbina se la obtiene de las curvas características de la turbina y el de la carga, que depende de las características del generador y la carga puede obtenerse de datos de la bibliografía.

En la tabla 1 se presentan algunos valores típicos de los parámetros:

ORDEN DE MAGNITUD DE COEFICIENTES DE AUTORREGULACION [6]

	a_{22}''	a_{22}'	$a_{22} = a_{22}' - a_{22}''$
<u>Turbina</u>			
En general		aprox. - 1	
Alta velocidad específica		aprox. - 0,6	
<u>Generador</u>			
Carga de la red: motores solamente (torque constante)	0		-1
Carga resistiva con regulador de voltaje.	-1		0
Sin regulador de voltaje.	+1 a +4		

Tabla # 1

En la tabla 2, se presentan valores típicos e ideales de las constantes estáticas de la turbina. [4]

Con respecto a la ganancia relativa del transductor de potencia σ ésta debe ser tal magnitud que se logre establecer el feedforward de ganancia. Para que esto suceda σ se lo debe determinar de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{1}{K_M \times a_{23}} \quad (1.65)$$

Las constantes de tiempo del filtro y del servomecanismo hidráulico de fuerza deben ser de tal magnitud que no se produzca un cierre brusco del mecanismo de distribución de la turbina durante la ejecución del control y se la determina de la simulación. Igual consideración se debe tomar en cuenta para constante de tiempo del servo-eléctrico.

CONSTANTES ESTATICAS DE LAS TURBINAS (TIPICAS E IDEALES)

Constantes Estáticas de Turbinas	Típicas	Ideales
a_{11}	0,58	0,5
a_{13}	1,10	1,0
a_{21}	1,4	1,5
a_{22}	-1	-1
a_{23}	1,5	1,0

Tabla # 2

Con relación a la constante de tiempo del servopiloto τ , para la simulación se la considera despreciable. El diseño de éste debe entonces considerar esto (una variable fácil con la que se puede jugar en este caso es el caudal de suministro de la bomba de aceite - Q_s hacia el circuito hidráulico del servomecanismo hidráulico piloto).

Con relación al cálculo del tiempo de arranque del agua T_w y del tiempo de arranque mecánico T_m , se necesitan conocer además de la velocidad nominal del grupo hidráulico, N_0 (necesaria para el cálculo de las constantes estáticas de la turbina) ciertos valores relativos a la instalación de la Pequeña Central Hidroeléctrica.

a) Datos de la instalación hidráulica:

Caída neta, $(H_0)_m$

Caudal nominal, Q_0 (m^3/seg).

Característica de la tubería forzada:

Material (Módulo de elasticidad, EP (Kg/C_2)).

Diámetro interior DP (m).

Espesor tp (m)

Longitud L_p (m).

b) Datos del grupo hidráulico:

Potencia nominal W_0 (Kw).

Velocidad nominal N_0 (RPM) (ya mencionado antes).

Producto de inercia Pd^2 ($Kg-m^2$).

El producto de inercia del grupo y de la volante (si la requiere) se estima en la siguiente sección que trata sobre el cálculo de la seguridad de la instalación:

c) Otros datos:

Tipo de carga.

Producto de inercia de la volante PD^2_v ($Kg-m^2$).

En base a estos datos, el tiempo de arranque del agua (en la tubería forzada T_w) se la estima mediante la siguiente expresión: (ecuación 1.6).

$$T_w = \frac{L_p \cdot V_{oP}}{gH_o} \quad (\text{seg}) \quad (1.6)$$

Donde:

V_{oP} , es la velocidad del agua de la tubería forzada y se la calcula de la siguiente forma:

$$V_{oP} = \frac{4 Q_o}{\pi \cdot D_p^2} \quad (\text{m/seg}) \quad (1.66)$$

El tiempo de arranque mecánico del grupo T_m , se lo estima usando la siguiente ecuación:

$$T_m = \frac{1}{37205} \cdot \frac{PD^2 \cdot N_o^2}{g \cdot W_o} \quad (1.12)$$

El factor PD^2 que considera el correspondiente al grupo y a la volante se la puede calcular en base al método dado en la siguiente sección (CALCULO DE LA SEGURIDAD DE LA INSTALACION), que se la ha transcrito del "Manual de Reguladores Oleo - Mecánico de Velocidad" (Volúmen III, tomo I), del Manual Técnico para Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de la OLADE.

3.5. CALCULO DE LA SEGURIDAD DE LA INSTALACION

El cálculo de la seguridad de la instalación consiste en definir el valor adecuado del tiempo de cierre total (T_s) del mecanismo de control de flujo de la turbina así como el factor PD requerido del sistema (grupo más volante) a fin de garantizar que las máximas elevaciones de presión de la tubería (golpe de ariete) y de la velocidad del grupo que siguen a la acción del regulador después de un desbalance total de carga (caso más desfavorable) queden dentro de los límites recomendados. Para su determinación se requieren conocer los datos de operación de la central hidroeléctrica, ya dados en la sección an

terior. La metodología que se usará para su cálculo es la siguiente:

1. Determinación de parámetros iniciales de cálculo

- Velocidad de propagación de la onda de presión en la tubería (a)
Se usa la fórmula de Allievi

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{E D_p}{E_p t_p}}} \quad (\text{m/seg}) \quad (1.67)$$

E es el módulo de elasticidad del agua, $2 \times 10^9 \text{ Kg/m}^2$.

- Tiempo elástico (T_e) llamado también período de la tubería forzada y representa el tiempo de duración de una ida y vuelta de la onda de presión a lo largo de la tubería, partiendo del mecanismo de regulación de flujo de la turbina.

Por lo tanto su expresión es:

$$T_e = \frac{2L_p}{a}$$

- Tiempo de cierre (T_s), para la selección de su valor pueden tomarse como referencia, los siguientes valores:

$T_s = 2$ a 5 seg., caso de turbinas Francis y Michell Banki;

$T_s = 10$ a 20 seg., caso de turbinas Pelton que cuentan con desviadores de chorro.

- Cifra característica de la tubería (ρ), llamado también parámetro de Allievi.

$$\rho = \frac{T_w}{T_e} \quad (1.68)$$

- Tiempo relativo de cierre (θ), se denomina también constante de operación del mecanismo de control de flujo de la turbina.

$$\theta = \frac{T_s}{T_e} \quad (1.69)$$

- ### 2. Determinación del máximo aumento de presión en la tubería (Δh_m):
- En general, para las plantas hidroeléctricas es usual adoptar un tiempo de cierre T_s mayor que el tiempo elástico T_e , por lo que el fenómeno producido por el cierre del mecanismo de control de flujo

de la turbina puede clasificarse como un "golpe de ariete con cierre lento" ($\theta > 1$). Según esto, el aumento máximo de presión en la tubería puede calcularse a partir de la siguiente fórmula de Allievi.

$$\Delta h_m = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\theta} \left(\frac{\rho}{\theta} + \sqrt{\left(\frac{\rho}{\theta}\right)^2 + 4} \right) K \quad (1.70)$$

Donde:

K, factor de compensación, tomado como 1,2.

La sobrepresión máxima calculada en base a esta fórmula no deberá sobrepasar del 40%.

En caso de tener una sobrepresión máxima mayor que el máximo recomendado, se podría aumentar el valor del tiempo de cierre o incorporar limitadores de presión a la central.

3. Estimación del PD^2 requerido y de la elevación máxima de velocidad del grupo (Δn_m)

Esta parte del cálculo se enfoca a determinar el valor requerido del factor de inercia del sistema (grupo más volante), para el tiempo de cierre definido a fin de satisfacer una elevación máxima de velocidad determinada.

Este cálculo puede hacerse a partir de la fórmula:

$$PD^2_{req} = 730.320 K_A \frac{W_0 T_s}{N_0^2 [(\Delta h_m + 1)^2 - 1]} \quad (\text{kg} - \text{m}^2) \quad (1.71)$$

Donde:

K_A , factor que permite introducir el efecto del golpe de ariete (sobrepresión) en la sobrevelocidad del grupo. Su expresión, para las condiciones usuales de operación de una central hidroeléctrica ($\theta > 1$), es:

$$K_A = 0,5 + 0,75\left(\frac{\rho}{\theta}\right) - 0,125\left(\frac{\rho}{\theta}\right)^2 \quad (1.72)$$

Δn_m , sobrevelocidad máxima del grupo; generalmente en el rango: 0,25 a 0,35.

3.6. CALCULO DE PARAMETROS DEL SERVOMOTOR DE FUERZA

Su cálculo está dirigido principalmente a determinar los diámetros de la válvula distribuidora "D₂" y el servomotor "Ds₂" respectivamente.

Parte de esta sección se ha copiado textualmente del "Manual de Reguladores Oleo - Mecánico de Velocidad", (Volumen III, tomo I), del Manual Técnico para Diseño, Estandarización y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de la OLADE.

La metodología que se presenta a continuación tomará como referencia el esquema de la figura 18.

3.6.1. Diámetro del Piston del Servomotor de Fuerza [6]

Se calcula a través de la ecuación que define el volumen de trabajo del servomotor (V₂).

$$V_2 = K_v \cdot \frac{A_2}{P_2} \quad (1.73)$$

Donde:

K_v = 1,25, valor recomendado por la WOODWARD GOVERNOR COMPANY.

P₂ = presión en el circuito de aceite. Para la disposición - tomada para el sistema de distribución y fuerza tiene por expresión:

$$P_2 = P_t - \Delta P_{02} \quad (1.74)$$

con:
$$\Delta P_{02} = \frac{A_2}{V_2}$$

P_t , presión de trabajo que usualmente varía en el rango de 10 a 35 Kg/cm².

A₂ , capacidad de trabajo del servomotor, se determina en base a la relación:

$$A_2 = 1,1 \cdot F_{\max} Y_{02} \quad (1.75)$$

Donde:

3.6. CALCULO DE PARAMETROS DEL SERVOMOTOR DE FUERZA

Su cálculo está dirigido principalmente a determinar los diámetros de la válvula distribuidora "D₂" y el servomotor "Ds₂" respectivamente.

Parte de esta sección se ha copiado textualmente del "Manual de Reguladores Oleo - Mecánico de Velocidad", (Volumen III, tomo I), del Manual Técnico para Diseño, Estandarización y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de la OLADE.

La metodología que se presenta a continuación tomará como referencia el esquema de la figura 18.

3.6.1. Diámetro del Piston del Servomotor de Fuerza [6]

Se calcula a través de la ecuación que define el volumen de trabajo del servomotor (V₂).

$$V_2 = K_v \cdot \frac{A_2}{P_2} \quad (1.73)$$

Donde:

K_v = 1,25, valor recomendado por la WOODWARD GOVERNOR COMPANY.

P₂ = presión en el circuito de aceite. Para la disposición - tomada para el sistema de distribución y fuerza tiene por expresión:

$$P_2 = P_t - \Delta P_{02} \quad (1.74)$$

con:
$$\Delta P_{02} = \frac{A_2}{V_2}$$

P_t , presión de trabajo que usualmente varía en el rango de 10 a 35 Kg/cm².

A₂ , capacidad de trabajo del servomotor, se determina en base a la relación:

$$A_2 = 1,1 \cdot F_{\max} \cdot Y_{02} \quad (1.75)$$

Donde:

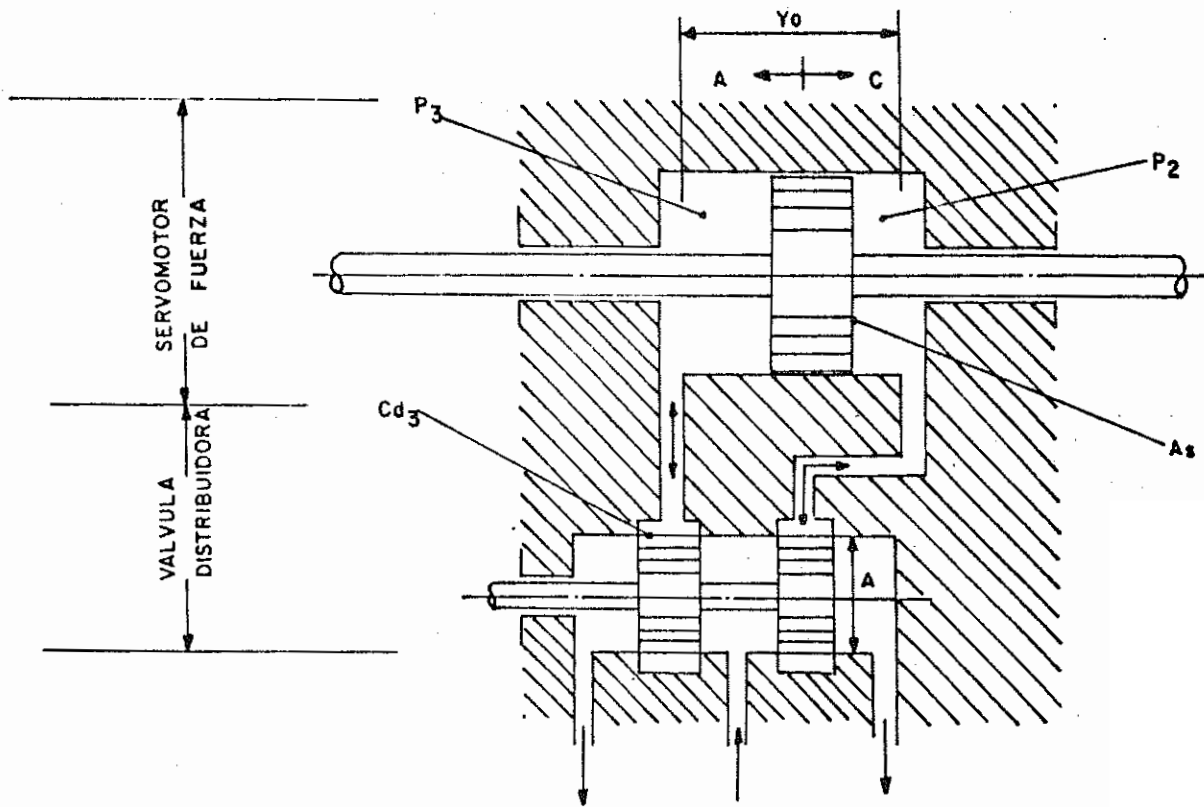


Figura 18. Sistema de distribución y fuerza.

F_{\max} , es la fuerza máxima requerida por el servomotor para el accionamiento del mecanismo de control de agua de la turbina. Esta fuerza se obtiene del diagrama compuesto, resultante de superponer el diagrama de fuerzas sobre el mecanismo de control de agua, el correspondiente al de la fuerza ejercida por el servomotor (ver figura 19).

Y_{02} , carrera del servomotor, que depende de:

- . El tamaño del regulador.
- . La magnitud del desplazamiento entre el cierre y abertura - del dispositivo de control de agua de la turbina.
- . De la relación de brazos de palanca del mecanismo que conecta el vástago del servomotor al dispositivo de control de agua de la turbina.
- . En el diseño del mecanismo de palancas, se buscará obtener una relación lo más lineal posible entre el desplazamiento del servomotor y del dispositivo de control de agua de la turbina.

El valor Y_{02} se puede tomar entre 5 y 25 cm.

Definido el volumen V_2 , se determina el diámetro del cilindro del servomotor D_{s2} , a partir de la relación:

$$D_{s2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} (A_{s2} + A_{vs2})} \quad (1.76)$$

Donde:

A_{s2} , es el área útil de acción del aceite en el servomotor, y está dado por:

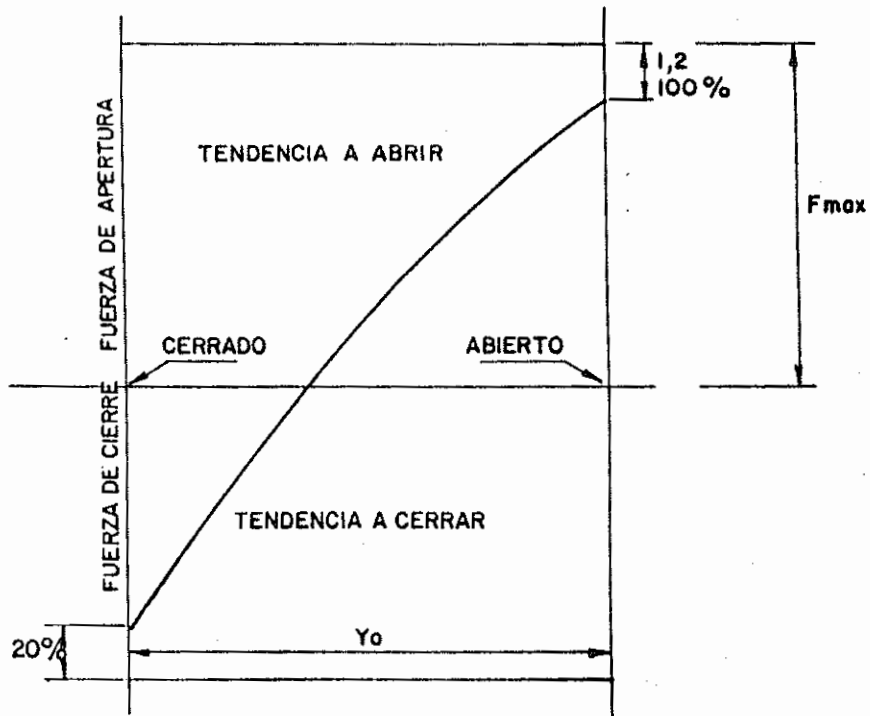
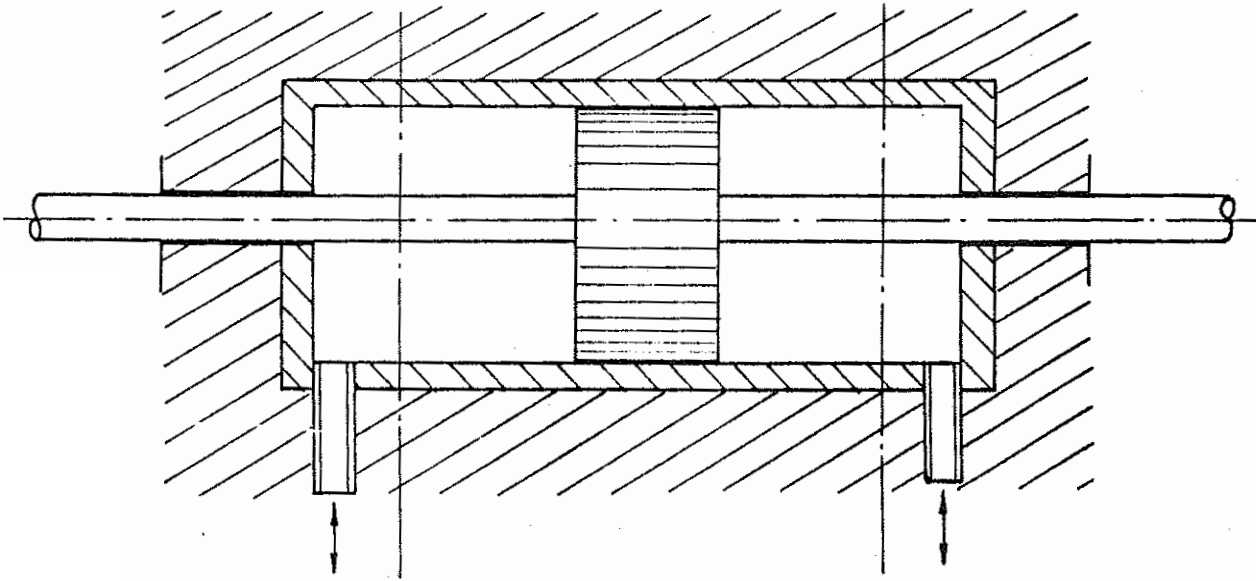
$$A_{s2} = \frac{V_2}{Y_{02}} \quad (1.77)$$

A_{vs2} , es la sección del vástago del pistón del servomotor y se determina por la relación:

$$A_{vs2} = \frac{1,2 F_{\max}}{\sigma_{vs}} \quad (1.78)$$

Donde:

σ_{vs} , es el esfuerzo de trabajo del material del vástago y está dado por:



$$A = 1,1 F_{max} \cdot Y_o$$

Figura 19. DIAGRAMA DE FUERZAS EN EL VASTAGO DEL SERVOMOTOR

$$\sigma_{VS} = \frac{S_0}{n} \quad (1.79)$$

S_0 , límite de elasticidad del material del vástago.

n , coeficiente de seguridad tomado entre 2 y 4.

3.6.2. Diámetro de la válvula distribuidora "D₂"

Su cálculo puede hacerse a partir de la ecuación práctica:

$$D_2 = K_2 \cdot V_2 \quad (1.80)$$

Donde:

K_2 , constante estimada a partir de la relación D_2/V_2 de reguladores existentes.

Para la estimación de " K_2 " se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones en relación al regulador del manual y al que se tome de referencia:

El rango de presiones a usarse en el regulador.

La similitud en la disposición del conjunto válvula distribuidora-servomotor.

Características del elemento de control de agua de la turbina sobre la cual actúa el regulador.

El valor de " D_2 " calculado podrá ser reajustado, teniendo en consideración las características propias del diseño.

3.6.3. Secciones de paso de aceite al servomotor de fuerza para las maniobras de cierre y abertura [9]

Dado que el servomotor es de doble efecto, las secciones de paso para cierre y abertura serán iguales y se los determina haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$S_2 = \frac{A_{S_2} \cdot Y_{02}}{C_{d_2} \cdot T_S} \frac{1}{\sqrt{\frac{2g}{\gamma} \frac{A_2}{V_2}}} \quad (1.81)$$

Donde:

Cd_2 , coeficiente de estrangulamiento en el área de paso de la válvula de carrete del servomotor de fuerza, $Cd_2 = 0,6$

γ , peso específico del aceite.

3.6.4. Fuerza sobre el carrete de la válvula de carrete del servomotor de fuerza [9]

Se trata de determinar la fuerza de reacción hidráulica que se genera sobre el carrete de la válvula de carrete, debido al flujo de aceite a través de sus pórticos que tienden a recentrar la válvula. La magnitud de esta fuerza es función del flujo a través de la misma y de la caída de presión a través de ella como se indica en la siguiente expresión:

$$F_{t2} = 2Q_{s2} \sqrt{\rho P_{V2}} \cos \theta' \quad (1.82)$$

Donde:

Q_{s2} , caudal de aceite a través de la válvula, depende de la capacidad de la bomba de aceite. Se la puede determinar así:

$$Q_{s2} = \frac{A_{s2} \cdot Y_{02}}{T_s} \quad (1.83)$$

$$\theta' = 0^\circ - 69^\circ$$

ρ , densidad del aceite.

P_{V2} , $2 \Delta P_2$

ΔP_2 , caída de presión a través de la válvula. Se la puede tomar como la presión máxima que puede darse en la línea de aceite, para un cálculo conservador.

3.6.5. Fuerza en la palanca de realimentación del servomotor de fuerza

En lo posible se debe aplicar la fuerza del servomotor piloto en la parte central de la palanca de realimentación del servomotor de fuerza. Sin embargo, si no es posible por espacio físico se lo puede aplicar en cualquier punto de la misma, entre el vástago del pistón del servomotor de fuerza y su carrete de la válvula de carrete. (Si se aplica en otro punto se deben considerar los respectivos cambios en las fórmulas correspondientes). La figura 20 muestra un es

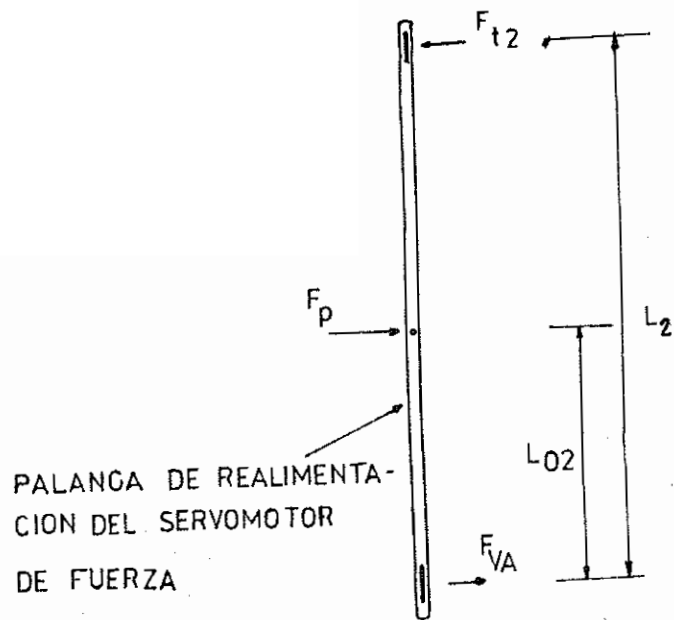


Figura 20. Fuerzas en la palanca de realimentación del servomotor de fuerza.

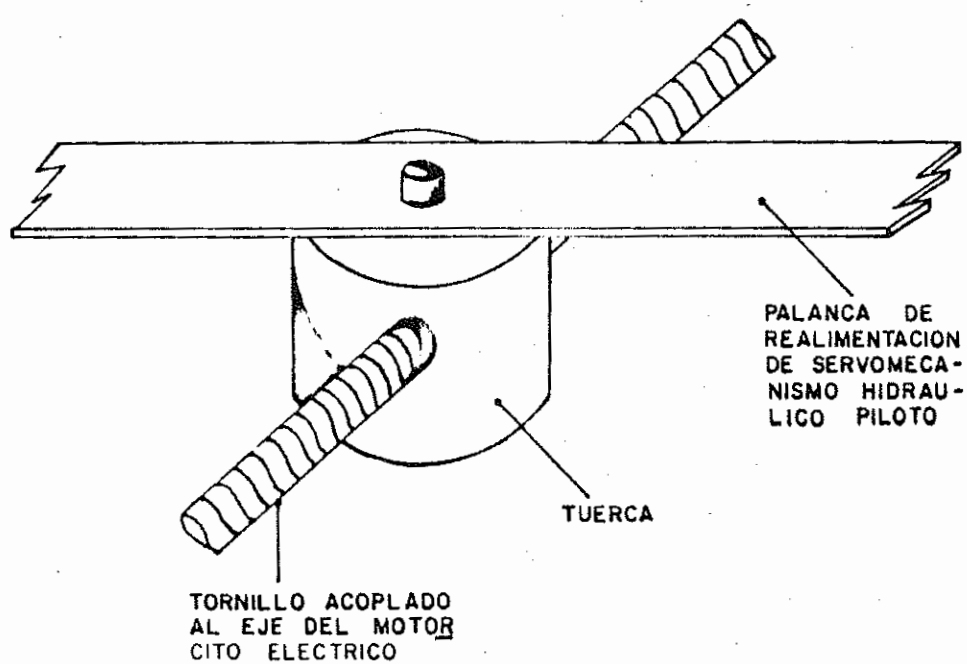


Figura 21. Acople entre el eje del motor eléctrico y la palanca de realimentación (acople tuerca - tornillo).

quema de las fuerzas.

Del diagrama de fuerzas anterior la fuerza del servo piloto FP es:

$$F_p = \frac{F_{t_2} \times L_2}{L_{o_2}} \quad (1.84)$$

3.7. CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL SERVOMOTOR PILOTO

Su cálculo va dirigido a determinar los parámetros equivalentes de su homólogo, el servomotor de fuerza, esto es, entre otras cosas por ejemplo, diámetro de la válvula distribuidora D, diámetro del servomotor Ds, etc. La manera de obtener esos parámetros es mediante fórmulas iguales a las del caso del servomotor de fuerza.

Para designar los parámetros del servomotor piloto, no se usará subíndice numérico. A continuación se presentan esas fórmulas:

Servomotor piloto:

Capacidad de trabajo:

$$A = 1,1. (2 \cdot F_p) \cdot Y_0 \quad (1.75)$$

Y_0 , varía por lo general entre 4 y 8 mm.

Volumen de trabajo del servomotor piloto:

$$V = \frac{K_v \cdot A}{P} \quad (1.85)$$

K_v , (1,25 - 1,5), valor óptimo de $K_v = 1,5$.

$$P = P_t - \Delta P_0 \quad \text{y} \quad \Delta P_0 = \frac{A}{V} \quad (1.74)$$

Diámetro del cilindro del servomotor piloto Ds:

$$D_s = \sqrt{\frac{4}{\pi} (A_s + A_{vs})} \quad (1.76)$$

$$A_s = \frac{V}{Y_0} \quad (1.77)$$

Sección del vástago del pistón del servomotor piloto:

$$A_{vs} = \frac{1,2 \times F_p}{\sigma_{vs}} \quad (1.78)$$

$$\sigma_{vs} = \frac{S}{n} \quad (1.79)$$

Si la sección A_{vs} calculada resulta muy baja, se debe escoger un diámetro manejable, desde el punto de vista constructivo de VALVULA DE CARRETE DEL SERVO - PILOTO.

Diámetro de la válvula:

$$D = K \cdot V \quad (1.80)$$

Secciones del paso de aceite:

$$s = \frac{Q_s}{C_d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \cdot \frac{A}{V}}} \quad (1.81)$$

Donde:

Q_s , caudal del aceite que va al servomotor piloto, depende del arreglo hidráulico del sistema de fuerza. Considerando - que se debe tener una baja constante de tiempo en el ser- vo - piloto, se debe proporcionar un arreglo hidráulico tal que Q_s sea lo suficientemente grande para que τ sea inferior a 0,02 seg.

Fuerza sobre el carrete de la válvula de carrete del servomotor pi- loto:

$$F_t = 2Q_s \sqrt{\rho p_v} \cos \theta' \quad (1.82)$$

Para este caso la fuerza que debe hacer el motorcito eléctrico a través de sus acoples (ver figura 21) a la palanca de realimenta- ción del servopiloto depende de su punto de aplicación y viene da- da por:

$$F_M = \frac{F_t \cdot L}{L_0} \quad (1.84)$$

Es de notar que esta fuerza es de tipo estático, en realidad el mo- torcito eléctrico trabaja en el estado transitorio en paradas y a

rranques; la fuerza total y por ende el torque que se debe generar en el motorcito eléctrico debe vencer la fuerza de inercia, la fuerza estática expresada en la ecuación anterior y fuerzas de fricción viscosas propias del motorcito eléctrico y de la válvula de carrete del servo piloto.

3.8. SERVOMOTOR ELECTRICO

El servomotor eléctrico produce una señal de giro a su eje, la misma que es convertida en una señal de desplazamiento en un punto de la palanca de realimentación del servomecanismo hidráulico. La conversión de giro en desplazamiento se lo hace a través del acople mostrado en la figura 21. El motor eléctrico debe generar un torque en su eje capaz de poder mover la varilla de realimentación y el carrete de la válvula de carrete y además permitir una aceleración del conjunto de modo que el torque del motor eléctrico vendría dado por la siguiente expresión:

$$T_M = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_{MS} \quad (1.86)$$

Donde:

B , coeficiente de fricción viscosa.

T_{MS} , torque estático para inicial el movimiento.

J , inercia del conjunto reflejado al eje del motor.

θ , giro del eje del motorcito eléctrico.

El torque para inicial el movimiento considera entre otras cosas el rozamiento que se da en el acople tuerca tornillo y viene dado por la siguiente fórmula: [10]

$$T_{MS} = \frac{F_M \cdot D_m}{2} \cdot \frac{\cos \phi \tan \ell + u}{\cos \phi - u \tan \ell} \quad (1.87)$$

Donde:

D_m , diámetro medido del tornillo.

u , coeficiente de fricción (0,2).

ℓ , ángulo de hélice (un valor puede ser de 2,5 grados).

ϕ , ángulo de rosca (un valor puede ser de 30 grados).

En cuanto a la inercia del conjunto, (reflejada) al eje del motor, esta considera la inercia del rotor, la masa del carrete de la válvula de carrete, la inercia de la varilla de realimentación y cierta relación de transmisión que se da a través de la palanca de realimentación y el acople tuerca tornillo. Mediante la siguiente fórmula se puede determinar el valor de esa inercia reflejado al eje del motor.

$$J = J_r + J_v \left(\frac{K_\theta}{L_0} \right)^2 + m_{vv} K_\theta^2 \left(\frac{L}{L_0} \right)^2 \quad (1.88)$$

Donde:

J_r , momento de inercia del rotor del motorcito eléctrico con relación a su eje de giro.

J_v , momento de inercia de la varilla de realimentación.

m_{vv} , masa del carrete de la válvula.

K_θ , relación de transmisión del acople tuerca tornillo,
 $\left(\frac{\text{milímetros de avance}}{\text{vuelta}} \right)$

$$K_\theta = \frac{\Delta z}{\Delta \theta} \quad (1.89)$$

Donde:

Δz , desplazamiento incremental de la tuerca.

El momento de inercia de la varilla de realimentación puede determinarse así:

$$J_v = \frac{m_v L^2}{3} \quad (1.90)$$

Donde:

m_v , masa de la palanca de realimentación del servo motor piloto.

3.8.1. Velocidad de respuesta del servomotor eléctrico

Para la implementación del programa de computación que permite simular el lazo de control, se ha considerado (en la descripción matemática del sistema en variables de estado) que la velocidad de respuesta del conjunto servoeléctrico, amplificador, transductor de posición, etc. es de tal magnitud, que puede representarse por una ecuación de primer orden.

$$K_M' = \frac{\Delta z'(s)}{\Delta v'(s)} = \frac{K_M'}{\tau_1 s + 1} \quad (1.91)$$

En forma estricta, la función de transferencia es de segundo orden, (despreciando la constante de tiempo eléctrica) de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta z'(s)}{\Delta v'(s)} = \frac{K_M'}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1} \quad (1.92)$$

(El apóstrofe indica que no se trata de variación relativa de las variables, sino absoluta).

Donde:

ω_n , frecuencia natural de este subsistema.

ξ , razón de amortiguamiento de este subsistema.

La frecuencia natural viene dada por la siguiente expresión:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_r K_T K_\theta}{R_a J}} \quad (1.93)$$

Donde:

K_r , sensibilidad estática del transductor de posición. (ver su cálculo en la sección 3.1.3.).

K_T , constante de torque del motorcito eléctrico (dato de catálogo).

K_θ , sensibilidad estática del arreglo tuerca tornillo. (mm/vuelta).

R_a , resistencia de armadura. (Resistencia del motorcito eléctrico).

La razón de amortiguamiento viene dada por la siguiente fórmula:

$$\xi = \frac{R_a B + K_b \cdot K_T}{\sqrt{J \cdot R_a K_r K_\theta K_T^2}} \quad (1.94)$$

Donde:

K_b , constante de velocidad (de la fuerza contra-electromotriz).

Con las dos fórmulas anteriores se puede calcular los parámetros frecuencia natural y razón de amortiguamiento. Si sus valores son de tal magnitud que se da la siguiente relación:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \ll \frac{25}{\omega_n}$$

entre esos coeficientes de la función de transferencia, se comprobaría que la función de transferencia puede aproximarse a una de primer orden.

Para la determinación de B es conveniente considerar un 25% más alto que el valor del coeficiente de fricción viscosa propia del motorcito eléctrico, para tomar en cuenta la fricción viscosa que se produce en el carrete de la válvula del servomotor hidráulico piloto.

3.8.2. Selección del motorcito eléctrico

Para la selección del motorcito eléctrico deben tomarse en cuenta los siguientes criterios:

- a) El servomotor debe ser de corriente continua, que pueda vencer el torque estático y pueda acelerar fácilmente.
- b) Que permita a todo el subsistema compuesto del motor CD, amplificador, transductor de posición, tuerca - tornillo, etc. tener una característica dinámica de modo de poder representar - su función de transferencia como una de primer orden.

3.9. CALCULO DE LA BOMBA DE ENGRANAJES [6]

La bomba de engranajes a calcularse será del tipo de dientes rectos tallados exteriormente y de piñones iguales (figura 22).

Ancho de los Engranajes

Se calculará a partir de la siguiente ecuación:

$$b = \frac{Q}{0,002 \cdot z \cdot M^2 \cdot N_B \cdot \eta_{v01}} \quad (1.95)$$

Donde:

$$Q = K \frac{V}{T_s} \quad (1.96)$$

caudal efectivo en lt/min.

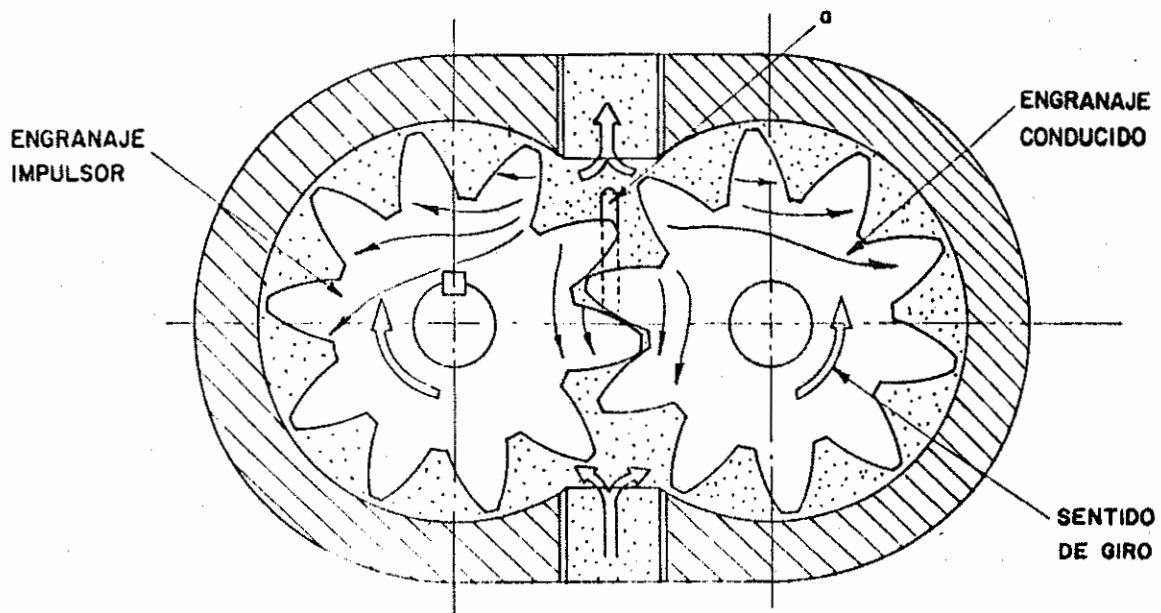


Figura 22. Bomba de engranajes de piñones iguales, dentado recto y exterior.

K , coeficiente que considera el exceso de aceite requerido por el servomotor para una carrera completa a fin de compensar posibles fugas.

T_s , tiempo de cierre en seg. del mecanismo de distribución de la turbina.

V , volumen requerido por el servomotor en lt.

Z , número de dientes.

M , módulo del engranaje en cm.

N_B , velocidad de rotación de la bomba en RPM.

η_{vol} eficiencia volumétrica.

Recomendaciones:

$$K = 1,5 \text{ o más}$$

$$T_s = (3 - 15) \text{ seg}$$

$$Z = (10 - 20) \text{ dientes}$$

$$Z_{OPTIMO} = (12 - 16) \text{ dientes}$$

$$\eta_{vol} = (0,75 - 0,90)$$

Dimensiones Adicionales de los Engranajes

Diámetro de Paso : $d_p = Z \cdot M$ (cm)

Angulo de Posición : $\phi = 20^\circ$ o 25°

Diámetro Exterior : $d_e = d_p + 2 \cdot M$ (cm)

Diámetro Interior : $d_i = d_p - 2,5 M$ (cm)

Cálculo de los Engranajes:

A fin de seleccionar el material a usar en los engranajes, se de terminan los requerimientos mínimos de esfuerzos por resistencia y por fatiga superficial, adoptado para ello el método propuesto por el AGMA. Para aplicar esta metodología se requiere conocer:

La fuerza tangencial F_t' actuante sobre los engranajes, expresada por:

$$F_t' = 145.200 \frac{P}{d_p \cdot N_B} \quad (1.97)$$

Donde:

d_p , diámetro de paso del engranaje en cm.

N_B , velocidad de rotación de la bomba en RPM.

p , la potencia absorbida por la bomba transmitida de engranaje a otro, expresada por:

$$p = \frac{Q \cdot \Delta p}{456 \eta}$$

Donde:

Q , caudal efectivo (lt/min)

Δp , elevación de presión del aceite en Kg/cm².

η , rendimiento total (aproximadamente 0,7).

Cálculo por Resistencia

El esfuerzo admisible mínimo (S_{at_m}) calculado en la raíz del diente está dado por la siguiente expresión:

$$S_{at_m} = \frac{F_t'}{M \cdot b} K \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (1.98)$$

Con:

$$K = \frac{K_O}{K_V} \cdot \frac{K_S K_M}{J} \cdot \frac{K'_T K'_R}{K_L} \quad (1.99)$$

Donde:

K_0 , factor de sobrecarga.

K_V , factor dinámico.

K_S , factor de tamaño.

K_m , factor de distribución de carga.

J' , factor geométrico.

K'_T , factor de temperatura.

K'_R , factor de seguridad.

K_L , factor de vida.

Para las condiciones de operación de la bomba en el regulador:

K , se determina en las tablas 3 y 4 considerando como fuente de poder un motor eléctrico y como carga la bomba de engranajes con marcha uniforme.

K_V , se puede evaluar utilizando las curvas de la figura 23.

K_S , factor que para engranajes de acero adecuadamente seleccionados y en tratamiento térmico correcto toma el valor de $K_S = 1,0$.

K_m , se obtiene de la tabla 5 teniendo en cuenta las condiciones del soporte y el ancho del diente del engranaje.

J , se puede evaluar utilizando las figuras (24) y (25) complementadas con la figura (26). Se supone que los factores teóricos de concentración de esfuerzos no son afectados mayormente por el grado de acabado superficial, plasticidad, esfuerzos residuales y por otros factores.

K_L , se determina la Tabla 6 teniendo en cuenta la duración y la dureza del diente del engranaje.

K'_T , toma el valor de 1,00 para engranajes que operan a temperaturas menores que 71°C. (160° F).

EJEMPLOS TIPICOS DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS MAQUINAS

FUENTE DE PODER

Uniforme	Motor eléctrico, turbina.
Choques pequeños	Motores de combustión interna multicilíndricas.
Choques medianos	Motor de combustión interna de un cilindro.

CARGAS EN LAS MAQUINAS MOVIDAS :

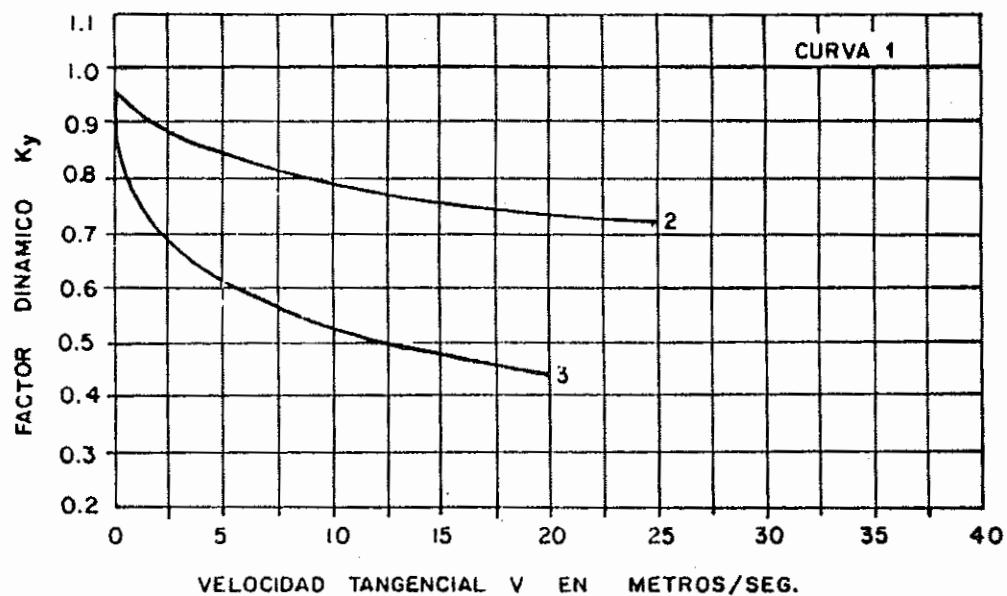
Uniforme	Ventiladores centrífugos, agitadores de líquidos, transportadores de fajas con alimentación uniforme.
Choques moderados	Sopladores lobulares, agitador de líquido - sólido, transportador de faja con alimentación variable.
Choques fuertes	Chancadoras de minerales, compresor de un sólo cilindro, transportadores reciprocantes.

Tabla # 3

FACTORES DE SOBRECARGA K_c , C_0

FUENTE DE PODER	CARGA EN LA MAQUINA MOVIDA		
	UNIFORME	CHOQUE MODERADO	CHOQUE FUERTE
Uniforme	1,00	1,25	1,75
Choques pequeños	1,25	1,50	2,00
Choques medianos	1,50	1,75	2,25

Tabla # 4



Curva 1. Para engranajes de alta precisión afeitados o rectificadas sometidos a cargas dinámicas pequeñas.

Curva 2. Para engranajes de alta precisión afeitados o rectificadas sometidos a cargas dinámicas.

Curva 3. Para engranajes acabados con fresa madre o cepillados.

$$\text{VELOCIDAD TANGENCIAL } v_t = \frac{\pi \cdot d_p \cdot N_B}{6000} \quad \text{m/seg}$$

Figura 23. Factor dinámico Kv.

FACTORES DE DISTRIBUCION DE CARGA K_m , C_m

CONDICION DEL SOPORTE	ANCHO DEL DIENTE EN mm			
	<50	150	230	>400
Montaje cuidadoso, juego pequeño de cojinetes, deflexión elástica mínima, engranajes de precisión.	1,3	1,4	1,5	1,8
Montaje menos rígido, engranajes menos preciso, 100 o de contacto.	1,6	1,7	1,8	2,0
Montaje y precisión tal que no produzca contacto completo del diente.				más de 2,0

Tabla # 5

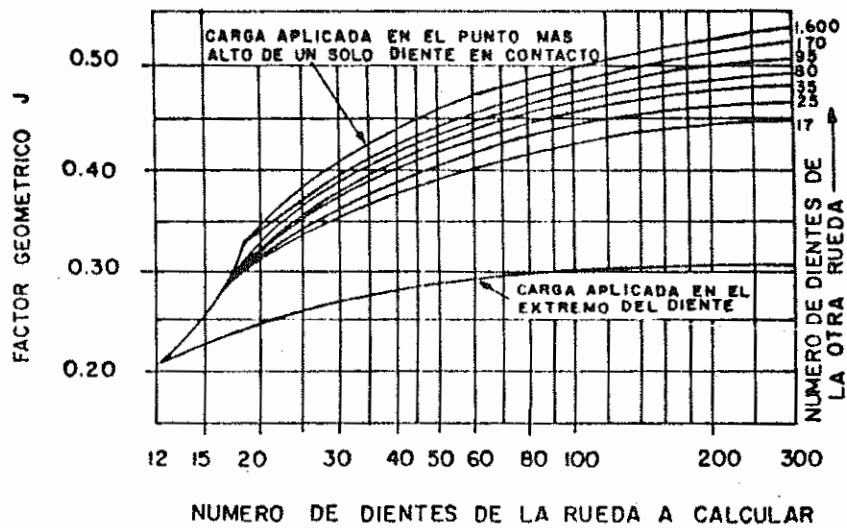


Figura 24. Factores geométricos, engranajes rectos, 20° ángulo de presión.

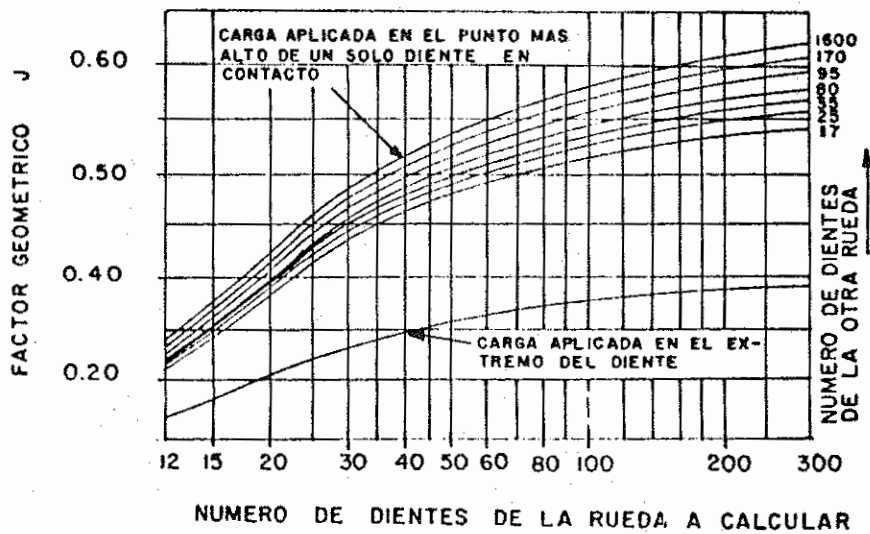
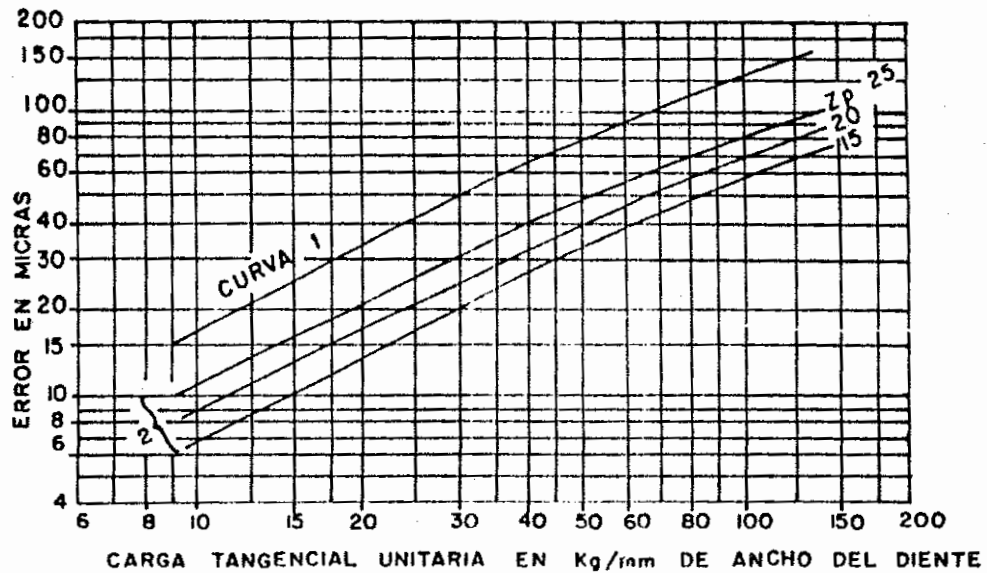


Figura 25. Factores geométricos, J , engranajes rectos 25° ángulo de presión, addendum standar.



La figura 26 dá las variaciones en acción medidas en el paso base (Pb) de las ruedas y que permiten determinar la existencia o no de la repartición de la carga. Si los errores son menores que los de la curva (2) de la figura 23, usar las curvas superiores de las figuras 24 y 25, y si los errores son mayores que los de la curva (1), usar las curvas inferiores de las figuras 24 y 25.

$$\text{CARGA TANGENCIAL UNITARIA} = \frac{F_t}{b}$$

Figura 26. Guía para limitar el error en acción de engranajes rectos.

FACTOR DE VIDA K_L

NUMERO DE CICLOS	160 BHN	250 BHN	450 BHN	CAPA DURA + CARBURIZADA
10^3	1,6	2,4	3,4	2,7
10^4	1,4	1,9	2,4	2,0
10^5	1,2	1,4	1,7	1,5
10^6	1,1	1,1	1,2	1,1
10^7	1,0	1,0	1,0	1,0
10^8	1,0 - 0,8	1,0 - 0,8	1,0 - 0,8	

+ Dureza de la capa dura: 55 - 63 Rc

Tabla # 6

K'_R , se determina de la Tabla 7 de acuerdo a la confiabilidad.

Con el valor de S_{atm} calculado, definiremos el material a usar en los engranajes, teniendo en cuenta los esfuerzos permisibles tabulados en la Tabla 8.

Para los valores de S_{atm} que aparecen en rangos de esfuerzos, los valores inferiores pueden ser usados para el diseño en general y los superiores se sugiere usarlos para materiales de alta calidad con adecuado tratamiento térmico.

Cálculo para fatiga superficial (S_{ac})

Para calcular la carga límite que prevenga el efecto destructivo de la picadura se aplicará la siguiente fórmula fundamental:

$$S_{acm} = C \sqrt{\frac{F't}{dp.b}} \quad (1.200)$$

Donde:

S_{acm} , esfuerzo admisible mínimo de contacto en Kg/cm².

C, está dado por la siguiente expresión:

$$C = C_p \sqrt{\frac{C_o}{C'_v} \cdot C_s \frac{C_m C_f}{I} \frac{C_T \cdot C_R}{C_L \cdot C_H}} \quad (1.201)$$

Donde:

C_p , coeficiente que depende de las propiedades elásticas.

C_o , factor de sobrecarga.

C'_v , factor dinámico.

C_s , factor de tamaño.

C_m , factor de distribución de carga.

C_f , factor de condición superficial.

I, factor geométrico.

C_L , factor de vida.

FACTOR DE SEGURIDAD RESPECTO A LA RESISTENCIA A LA FATIGA K'_R

REQUERIMIENTO	K_R
Alto confiabilidad	$\geq 1,50$
De 100 falla uno	1,00
De 3 falla uno	0,70

Tabla # 7

ESFUERZOS PERMISIBLES PARA ENGRANAJES RECTOS

MATERIAL	TRATAMIENTO TERMICO	DUREZA MINIMA C ROTURA MINIMA	ESF. Sat (Kg/mm ²)
	Normalizado	140 BHN	13,4 - 17,6
	Templado y revenido	180 BHN	17,6 - 23,2
	Templado y revenido	300 BHN	25,4 - 33,1
	Templado y revenido	450 BHN	31,0 - 41,5
Acero	Capa dura carburizada	55 Rc	38,7 - 45,8
		60 Rc	42,3 - 49,3
	Endurecida por inducción o templado en llama:		
	En todo el diente	54 Rc	31,7 - 38,7
	Superficialmente	54 Rc	15,5
	AISI 4140, nitrurado	Capa dura 53 Rc núcleo 300 BHN	26,1 - 29,6

Tabla # 8

- C_H , factor de relación dureza.
- C_T , factor de temperatura.
- C_R , factor de seguridad.

Para las condiciones de operación del regulador, los valores de los coeficientes "C" se obtendrán de la siguiente manera:

- C_p , Se definirá de la Tabla 9 teniendo en cuenta las características mecánicas del material a usar en la construcción del engranaje.
- C_o , toma del mismo valor del K_o ya definido.
- C'_v , se evalúa usando las curvas de la figura 27 con la velocidad tangencial del engranaje como dato de entrada.
- C_s , toma el valor de 1,00 para engranajes rectos, en aplicaciones generales.
- C_f , toma el valor de 1,00 para engranajes con buen acabado superficial.
- I , se evalúa teniendo en cuenta los efectos de las proporciones dimensionales como: El ángulo de presión ($\phi' = 20$ grados), la relación de transmisión y el número de dientes de los engranajes. Utilizaremos para ello las curvas de las figuras (28) y (29).
- C_T , toma el valor de 1,00 para una temperatura menor que 121 grados C (250 grados F).
- C_R , se determina de la Tabla 10 para cálculos en general.
- C_L , este factor ajusta la carga permisible para un determinado número de ciclos de operación, usaremos para su determinación la curva de la figura 30.
- C_H , toma el valor de 1,00 para engranajes rectos.

Con el valor del coeficiente C, calcularemos el esfuerzo mínimo por fatiga superficial S_{acm} requerido para el material del engranaje. Este valor nos permitirá seleccionar el material de los engranajes teniendo en cuenta los esfuerzos permisibles de contacto que aparecen en la Tabla 11.

COEFICIENTE ELASTICO C_p

MATERIAL DEL PINON	MODULO DE ELASTICIDAD (Kgs/mm ²)	MATERIAL DEL ENGRANAJE		
		ACERO	FO.	FDO
Acero	$2,1 \times 10^4$	61,0		53,0
Fe. Fdo.	$1,34 \times 10^4$	53,0		48,0

Tabla # 9

Figura 27. Factor dinámico Cv.

- Curva 4. Engranajes acabados con fresa madre o afeitados.
- Curva 3. Engranajes de alta precisión afeitados o rectificadas sometidos a cargas dinámicas.
- Curva 2. Engranajes de alta precisión afeitados o rectificadas sometidos a cargas dinámicas pequeñas.

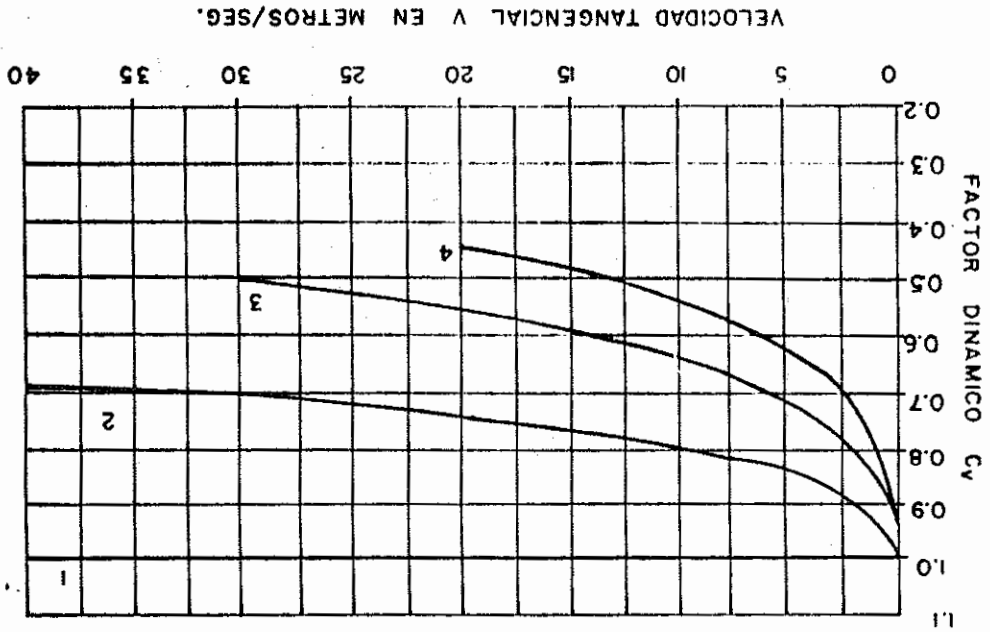


Figura 29. Factor geométrico, I, para engranajes rectos, 20° de ángulo de presión, altura recortada (dientes mochos).

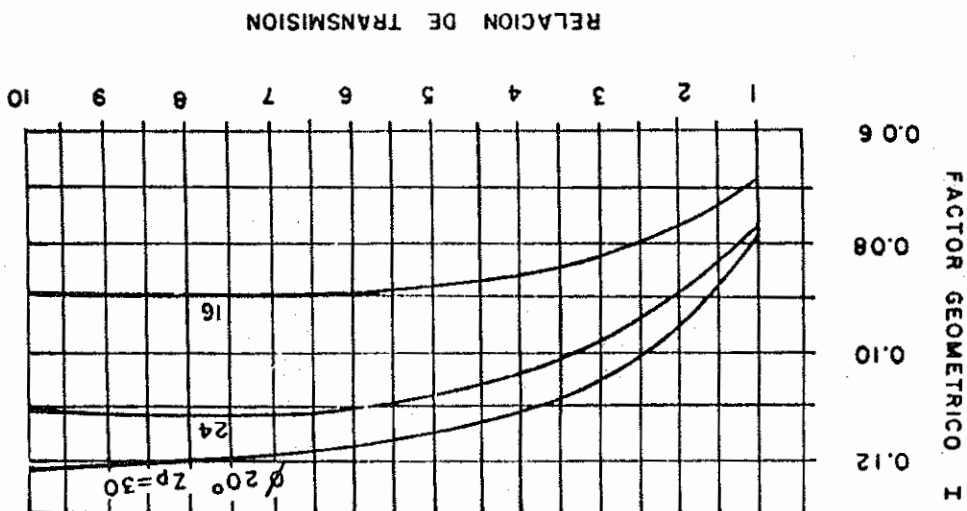
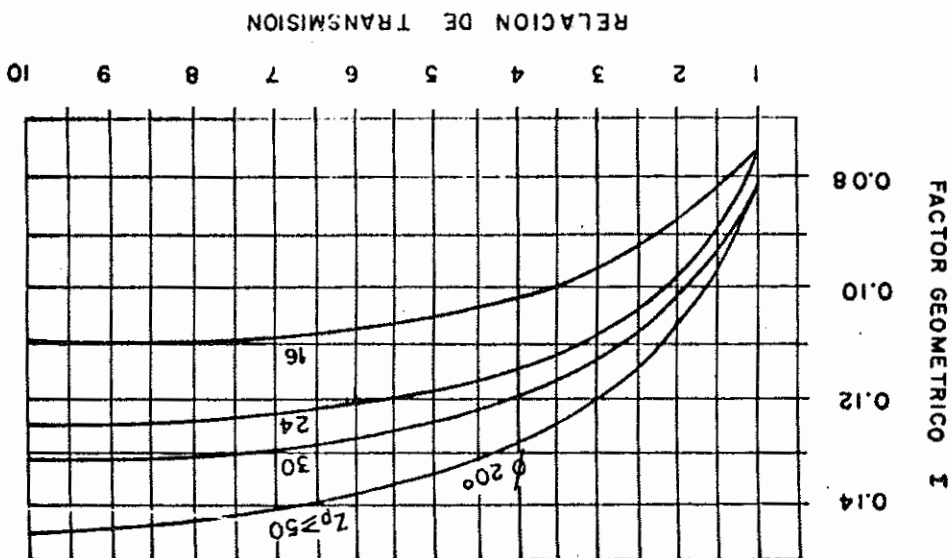


Figura 28. Factor geométrico, I, para engranajes rectos, 20° de ángulo de presión, altura completa, adendum standard.



FACTOR DE SEGURIDAD C_R

REQUERIMIENTO	C_R
Alta confiabilidad	$\geq 1,25$
De 100 falla uno	1,00
De 3 falla uno	0,80

Tabla # 10

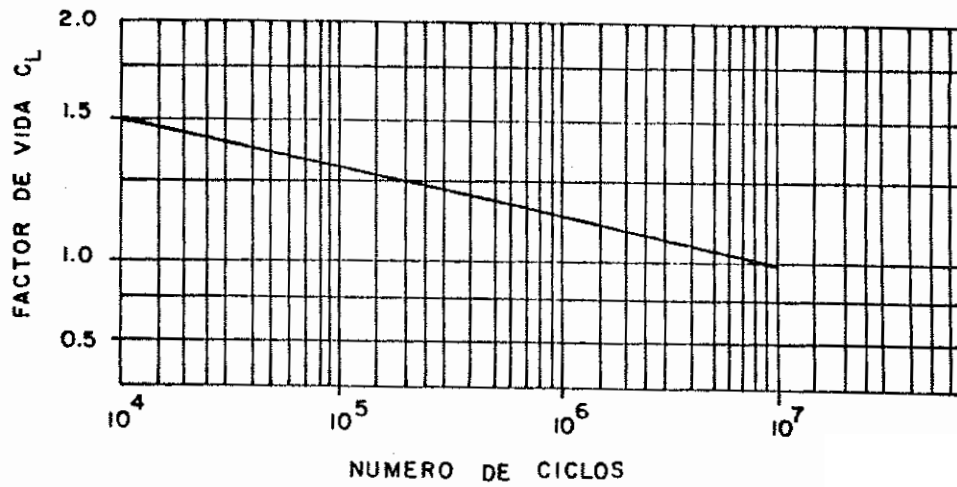


Figura 30. Factor de vida.

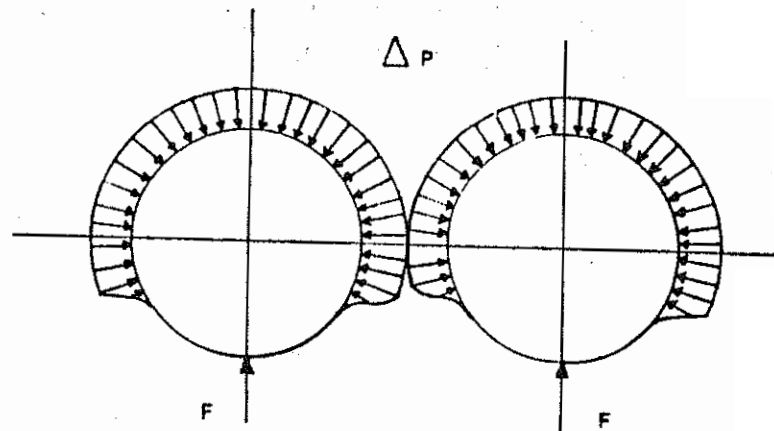


Figura 31. Debido a las fugas entre la parte superior de los dientes y los lados de los engranajes con la caja, el aceite entre los espacios de los dientes ya está con una cierta presión antes de llegar a la zona de descarga o de alta presión. Con esta consideración, la fuerza sobre los ejes y cojinetes de los engranajes, debido a la presión de aceite, puede calcularse de acuerdo a:

$$F = \Delta p \cdot b \cdot d \cdot e$$

ESFUERZOS DE CONTACTO PERMISIBLES S_{ac}

MATERIAL	DUREZA SUPERFICIAL MINIMA	S_{ac} Kgs/mm ²
	Endurecido en toda la sección del <u>diente</u> :	
	180 BHN	60 - 67
	240 BHN	74 - 81
	300 BHN	84 - 95
Acero	360 BHN	102 - 113
	440 BHN	120 - 134

Tabla # 11

Cálculo del Eje de los Engranajes

Las fuerzas actuantes en el eje motriz de los engranajes son:

La fuerza de flexión ejercida por la transmisión por el eje del motor eléctrico al eje motriz de la bomba.

La transmisión se realizará por fajas en "V", esta fuerza puede tomarse igual a:

$$F_{tr} = 2(F_1 - F_2) = 290.400 \cdot \frac{P}{d_p' \cdot N_B} \quad (1.202)$$

Donde:

F_1 , tracción en el ramal tirante de la correa en Kg.

F_2 , tracción en el ramal flojo de la correa en Kg.

d_p' , diámetro de paso de la polea en cm.

Fuerzas sobre los engranajes, las cuales son debidas a presión generada en el fluido (figura 31).

$$F_p = \Delta p \cdot b \cdot d_e \quad (\text{Kg}) \quad (1.203)$$

Donde:

b , ancho del engranaje en cm.

d_e , diámetro exterior del engranaje en cm.

$\Delta p = 0,65P_1$ a $0,75 P_1$

Potencia transmitida por:

La fuerza tangencial: F_t'

La fuerza radial: $F_r = F_t' \cdot \tan \phi$

(ϕ , ángulo de presión).

Otras fuerzas que se generan, como:

Fuerza debido al paso de la polea conducida.

Conociendo las fuerzas actuantes, se construyen los diagramas de momentos flectores "M" y de torque T, con cuyos valores máximos M (Kg - cm) y T_{MAX} (Kg - cm) se determina el diámetro del eje motriz requere

rido, aplicando la ecuación de la ASME - Este diámetro deberá ser chequeado por fatiga y por deformación; el diámetro del eje conducido puede tomarse igual al del eje motriz.

Cálculo del eje por resistencia:

$$C_d = \frac{16}{\pi d_b^3} \sqrt{(C_m \cdot M_{\max})^2 + (C_t \cdot T_{\max})^2} \quad (1.204)$$

Donde:

C_d , esfuerzo de diseño del material del eje en Kg/cm, tomado como:

$$C_d = 0,3 s_y \quad \text{o} \quad C_d = 0,18 s_u$$

S_y , límite de fluencia en tracción.

S_u , resistencia a la tracción.

Se toma el valor que resulte menor, en caso que el eje lleve chaveta, se deberá multiplicar el C_d obtenido por 0,75.

d_b , diámetro del eje motriz de la bomba en cm.

C_m , C_t coeficientes de servicio, dependen del modo de aplicación de la carga (gradual o súbita). Para el caso del regulador de velocidad podemos considerar $C_m = 1,5$ y $C_t = 1,0$ (eje giratorio con carga constante).

Chequeo del eje por fatiga, se hace a partir de:

$$d_b^3 = \frac{32 n}{\pi} \sqrt{\left(\frac{T_{\max}}{s_y}\right)^2 + \left(\frac{M_{\max}}{S_e}\right)^2} \quad (1.205)$$

Donde:

n , factor de seguridad, se buscará tener $n \geq 1,5$

S_e , límite de fatiga correcto, que tiene por expresión:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e$$

Donde:

S_e , límite de la fatiga obtenido en ensayos de probetas, para acero se puede tomar:

$$S'_e = 0,5 S_u \text{ cm}$$

$$S_u \leq 14.000 \text{ Kg/cm}^2$$

K_a , factor de acabado superficial.

K_b , factor de tamaño.

K_c , factor de confiabilidad.

K_d , factor de temperatura.

K_e , factor por concentración de esfuerzos.

K_f , factor por efectos varios.

Para las condiciones de operación de la bomba de engranajes en el regulador de velocidad tenemos:

K_a , determinado de las curvas de la figura 32, teniendo en cuenta que el eje de la bomba será de material acero.

K_b , toma el valor de 1,00 para el diseño en general.

K_c , está expresado por: $K_c = 1 - 0,08D$.

Donde:

D , depende de la estimación de probabilidades de fallas que se haga. En la tabla 12 se dan algunos valores típicos - de probabilidad de falla.

K_d , toma el valor de 1,00 para las condiciones de temperatura establecidas anteriormente.

K_e , toma el mismo valor que K_f , valor que puede ser determinado de las curvas de la figura 33.

Chequeo del eje por deformación.

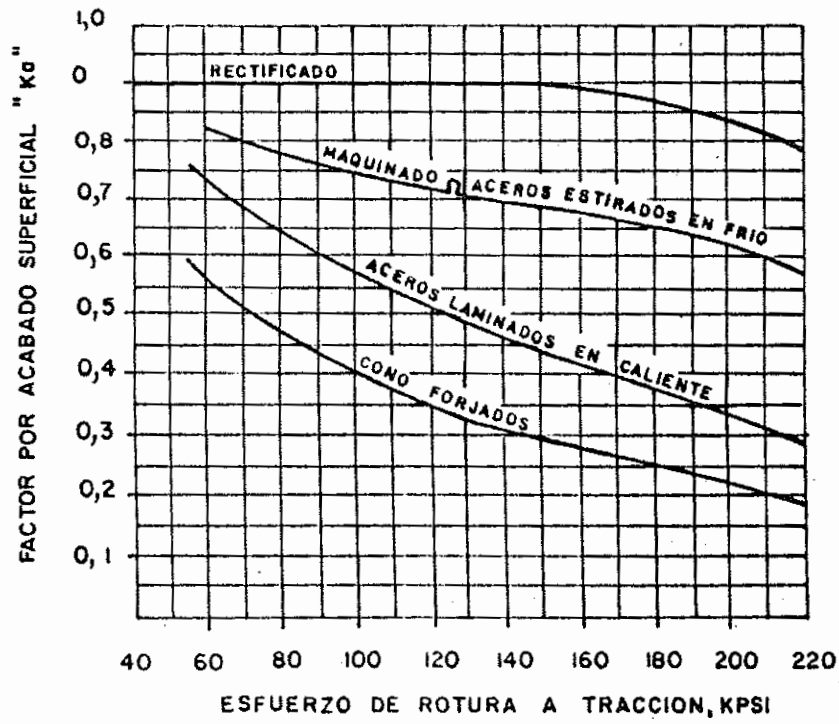


Figura 32. Factor por acabado superficial "Ka"

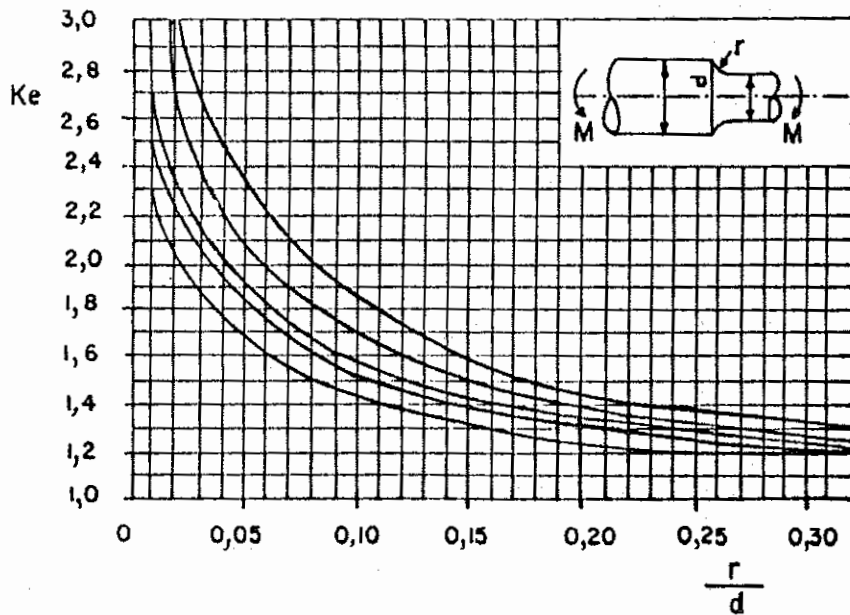


Figura 33. Eje de sección circular sometido a flexión, esfuerzo nominal basado en diámetro menor.

UNIDADES TIPIFICADAS PARA DIFERENTES PROBABILIDADES DE FALLA

PROBABILIDADES DE FALLA %	UNIDADES TIPIFICADAS "D"
0,001	4,34
0,01	3,74
0,1	3,10
0,5	2,58
1,0	2,33
2,0	2,06
3,0	1,88
4,0	1,75
5,0	1,65
7,0	1,48
10,0	1,28

Tabla # 12

Deformación torsional, se hace con la fórmula

$$\theta'' = 203,72 \cdot \frac{T_{\max}}{G \cdot d_b^3} \quad (1.206)$$

Donde:

θ'' , deformación angular del eje en radianes.

G , módulo de rigidez al corte, para el acero es $8 \times 10^5 \text{Kg/cm}^2$

Se deberá tener:

θ'' (0,01745 radianes), para la longitud contemplada en la fórmula.

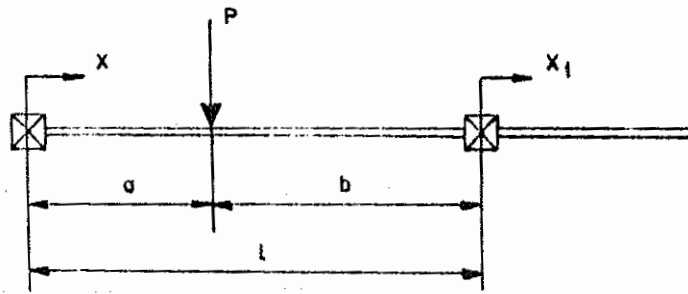
Deformación lateral, su cálculo se puede hacer en base a los casos I y II que se esquematizan en las figuras 34 y 35 en ellas se formula adicionalmente las fórmulas a usarse.

La mayor deformación " Δ " que se obtenga deberá limitarse a un máximo de:

$$\Delta_{\max} = \frac{L}{1200} \quad (\text{cm}) \quad (1.207)$$

Donde:

L , longitud del eje entre apoyos en cm.



$$\cdot \Delta (x < a) = \frac{P \cdot b \cdot x}{6 E \cdot I \cdot l} (l^2 - b^2 - x^2)$$

$$\cdot \Delta (x \geq a) = \frac{P \cdot a \cdot (l - x)}{6 E \cdot I \cdot l} (2l \cdot x - x^2 - a^2)$$

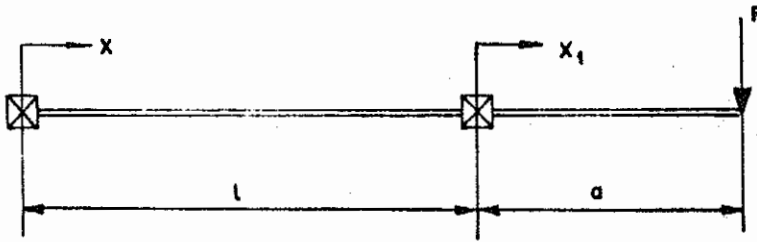
El máximo, para $a \geq b$, se da en $x = \sqrt{\frac{a \cdot (a + 2 \cdot b)}{3}}$

$$\Delta_{\text{máx}} = \frac{P \cdot a \cdot b \cdot (a + 2 \cdot b)}{27 E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (a + 2 \cdot b)}$$

$$\cdot \Delta (x_1) = \frac{P \cdot a \cdot b \cdot x_1}{6 E \cdot I \cdot l} (l + a)$$

En las fórmulas presentadas, I es el momento de inercia del eje.

Figura 34. Fórmulas para el cálculo de la deformación lateral del eje de la bomba de engranajes: Caso I.



$$\Delta, 0 < x < l) = \frac{P \cdot a \cdot x}{6 E \cdot I \cdot l} (\ell^2 - x^2), \text{ siendo:}$$

$$\Delta_{\text{máx}} (x = \frac{\ell}{\sqrt{3}}) = 0.06415 \frac{P \cdot a \cdot \ell^2}{E \cdot I}$$

$$\Delta (x_1) = \frac{P \cdot x_1}{6 E \cdot I} (2 \cdot a + 3 \cdot a \cdot x_1 - x_1^2), \text{ con:}$$

$$\Delta_{\text{máx}} (x_1 = a) = \frac{P \cdot a^2}{3 E \cdot I} (\ell + a)$$

Figura 35. Fórmulas para el cálculo de la deformación lateral del eje de la bomba de engranajes: Caso II.

SECCION II

PARTE ELECTRONICA

3.10. ESQUEMA DEL CIRCUITO

En primer lugar se presenta el diagrama general de bloques del sistema, en el cual se ha delimitado con línea punteada a la parte electrónica de sistema de control de velocidad de la turbina. Luego se hará una breva revisión de las principales acciones de control, para seguidamente pasar a definir los elementos de cada bloque.

La figura 14 muestra un diagrama donde se indica la parte electrónica del regulador de velocidad que se trata en el presente manual.

3.10.1. Acciones de control

En este apartado todos los bloques se presentarán, usando ciertos circuitos típicos que se usan en electrónica. Básicamente se usa el amplificador operacional, como circuito integrado, en diversas configuraciones para obtener los efectos deseados.

Un típico diagrama de lazo de control realimentado es el presentado en la figura 36. V_d = valor deseado, V_c = variable controlada, e = error, G = control y m = variable manipulada. [11]

3.10.1.a. Acción de control SI - NO (ON - OFF)

Control de dos posiciones, donde el elemento de control tiene solo dos posiciones fijas "conectado y desconectado".

Características:

- Simple.
- Económico.
- Alto uso en calefacción, termostatos, etc.
- Banda diferencial (zona muerta).

Esta acción de control se observa en el circuito de la figura 37.

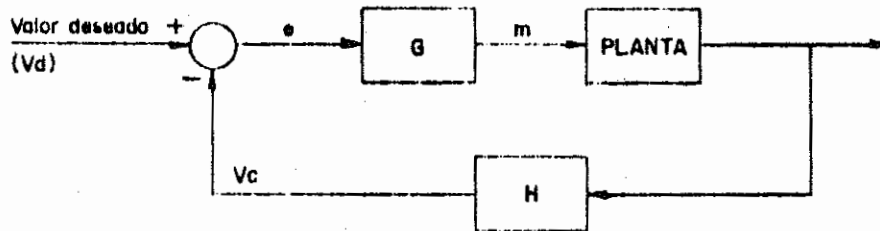


Figura 36. Lazo de control básico.

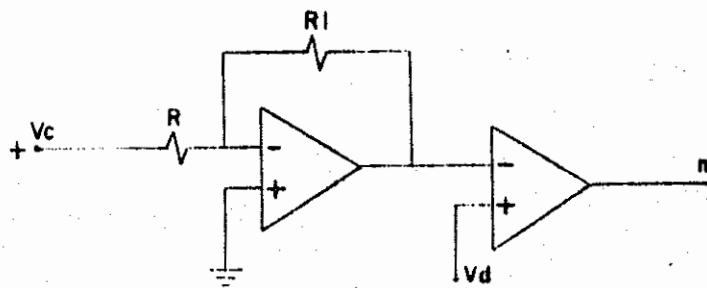


Figura 37. Circuito para acción de control de dos posiciones.

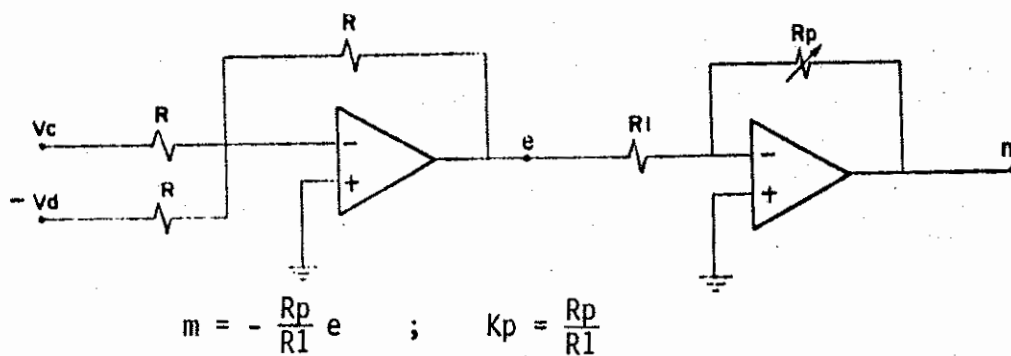


Figura 38. Circuito para acción de control proporcional.

3.10.1.b. Acción de control proporcional

La señal manipulada es, algebraicamente, proporcional al error, el cual es la diferencia entre la señal controlada y valor deseado ($V_d - V_c$).

Características:

- Relación lineal continua.
- Simple y común.
- Respuesta rápida.
- Estabilidad al proceso.
- Desviación permanente (offset).

En general la acción de control proporcional se consigue con un amplificador con ganancia ajustable, esta ganancia se la conoce como factor K_p . Se sabe que para mayor K_p se tiene:

1. Menor offset.
2. Menor estabilidad. Razón por la cual el valor de K_p se elige por compromiso entre la estabilidad y el offset.

Para obtener la acción de control proporcional se usa normalmente - un circuito como el presentado en la figura 38.

3.10.1.c. Acción de control integral

Se basa en la integración de la señal de error; esta acción cambia en forma proporcional a la integral del error. [11]

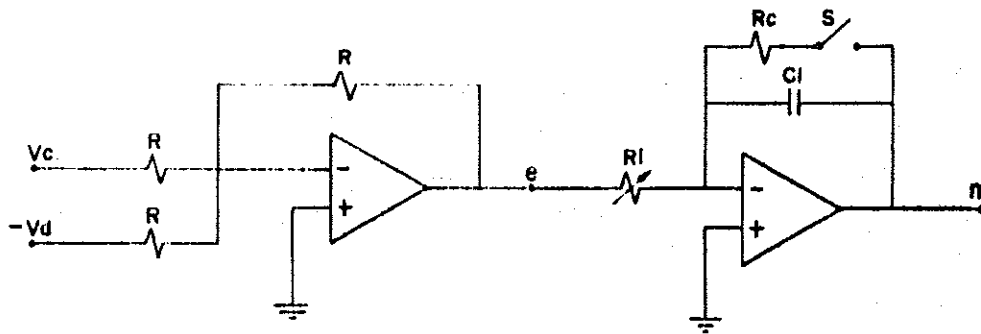
Características:

- Offset nulo.
- Puede generar inestabilidad.

Su configuración resulta también sencilla como se observa en el circuito de la figura 39.

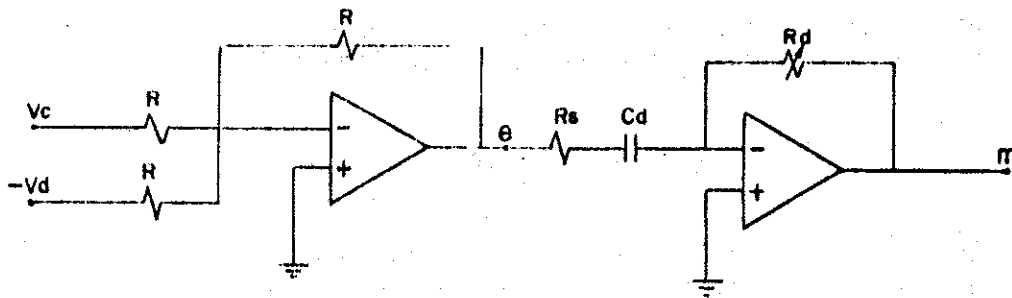
3.10.1.d. Acción de control derivativo

Presenta una relación lineal continua entre la rata del error y la variable manipulada. [11]



$$m = \frac{-1}{R_i C_i} \int_0^t e(t) dt + V_{ci} \text{ en } t = t_0 \text{ es cero; } K_i = 1/(R_i C_i) \text{ (} R_i C_i \text{ variables)}$$

Figura 39. Circuito para acción de control integral.



$$m = -R_d C_d (de/dt) ; K_d = R_d C_d. \text{ (} R_d C_d \text{ variables)}$$

Figura 40. Circuito para acción de control derivativo.

Característica:

- Rapidez en respuesta frente a transitorios.
- Necesita estar acompañado de control proporcional.
- Buena respuesta a altas frecuencias.

Esta acción resulta ser la que más problemas presenta, debido a que genera ruidos de alta frecuencia que pueden desestabilizar al sistema. Sin embargo, esto se puede solucionar mediante un filtro apropiado. El circuito normalmente usado es el presentado en la figura 40.

3.10.1.e. Acción de control PID

Tiene la mezcla de todas las características anteriores, por su acción de control proporcional, integral y derivativo. Conviene realzarlo con parámetros desacoplados puesto que permite la variación independiente de cada uno de los parámetros o constantes de control. La gran ventaja es que al tener las tres modalidades, la variable controlada resultante va a ser altamente controlada en tres aspectos fundamentales: rapidez de respuesta, estabilidad y offset nulo. (Ver figura 41 para identificar el circuito).

Lo anterior justifica el hecho que el tipo de control a seleccionar se es justamente el PID, para ser usado en el regulador de velocidad del presente manual. [4]

3.10.2. Requerimientos de operación del regulador electro-electrónico [4]

- Cambio de operación manual/automático.
- Macro y micro ajuste de parámetros (K_p , K_i , K_d).

Alarma y seguridad en:

1. Carrera del servomotor eléctrico.
2. Carrera del mecanismo de distribución de la turbina.

Seguridad:

- Autoprotección del regulador.

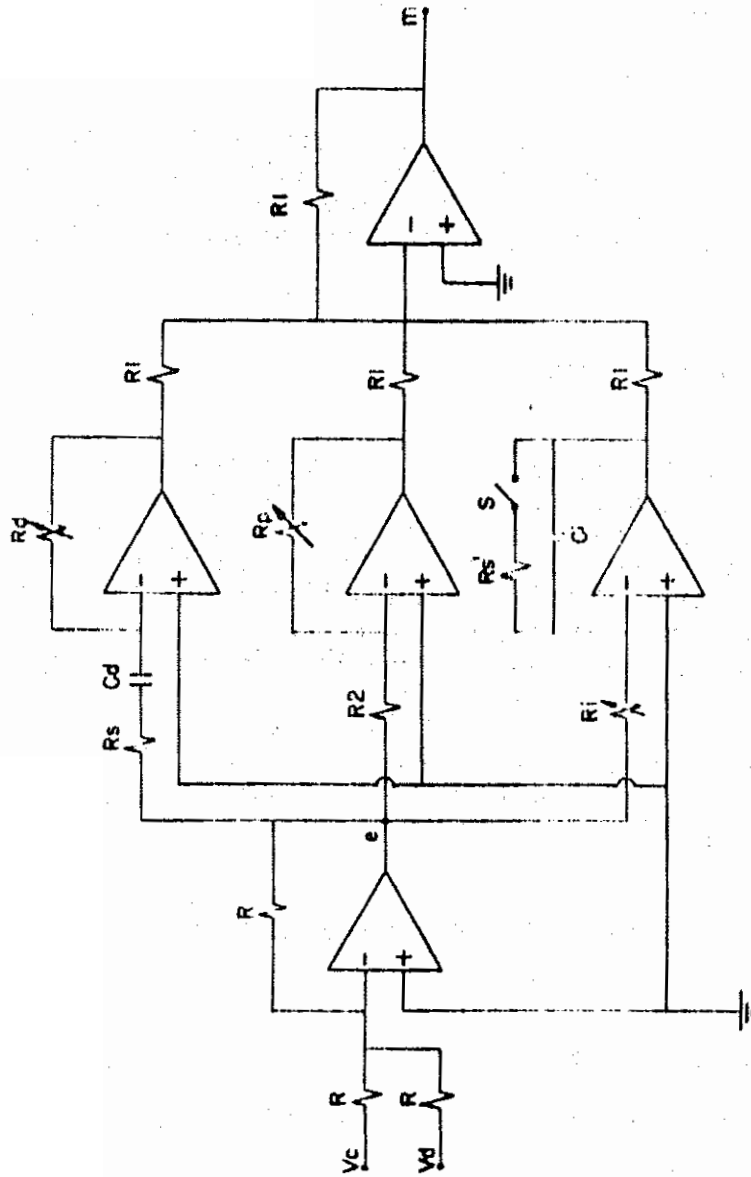


Figura 41. Circuito para acción de control PID de parámetros desacoplados,

Salidas (tomas) para verificar el funcionamiento de la turbina y del mismo regulador:

1. Señal de error.
2. Velocidad de referencia.
3. Voltajes del regulador.
4. Velocidad de la turbina.

Señalización de:

1. Activado del regulador.
2. Velocidad de la turbina cerca o igual a la nominal.

3.11. ELEMENTOS POR BLOQUE DEL REGULADOR ELECTRICO-ELECTRONICO

En este punto, se presentan los elementos electrónicos con los que se implementa cada bloque, los mismos que posteriormente se usan - en el cálculo de detalle. [4]

3.11.1. Velocidad de referencia (Vd)

Electricamente es un voltaje deseado o de referencia, que permite fijar la velocidad de la turbina. Este voltaje debe ser igual al generado por el sensor de velocidad, y su etapa correspondiente - (convertidor frecuencia - voltaje), cuando la velocidad de la turbina es igual a la deseada (velocidad nominal de la turbina). Cabe anotar que el voltaje dado por el sensor de velocidad depende del tipo y diseño de éste, el voltaje de referencia debe ser compatible con éste. Si se quiere diseñar un circuito estandar para el "voltaje de referencia" éste debe ser de buena adaptabilidad a los diferentes sensores. Es importante indicar que el circuito para el voltaje de referencia debe ser preciso y estable.

Si se parte del hecho que el voltaje de alimentación al circuito del "voltaje de referencia" es regulado, el circuito recomendado - es el presentado en la figura 42.

3.11.2. Sensor de velocidad de la turbina

Existen varios métodos para sensar la velocidad de la turbina, siendo el más adecuado un tacómetro. De los posibles tipos de tacóme-

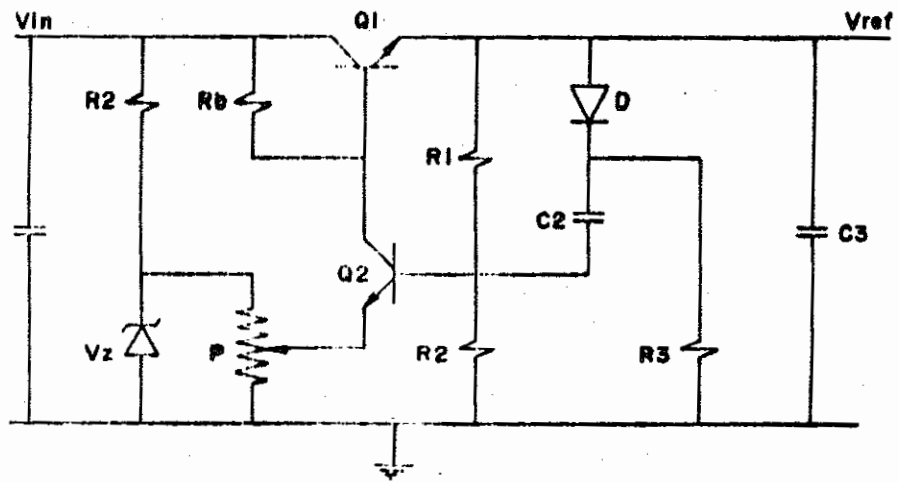


Figura 42. Circuito para el voltaje de referencia.

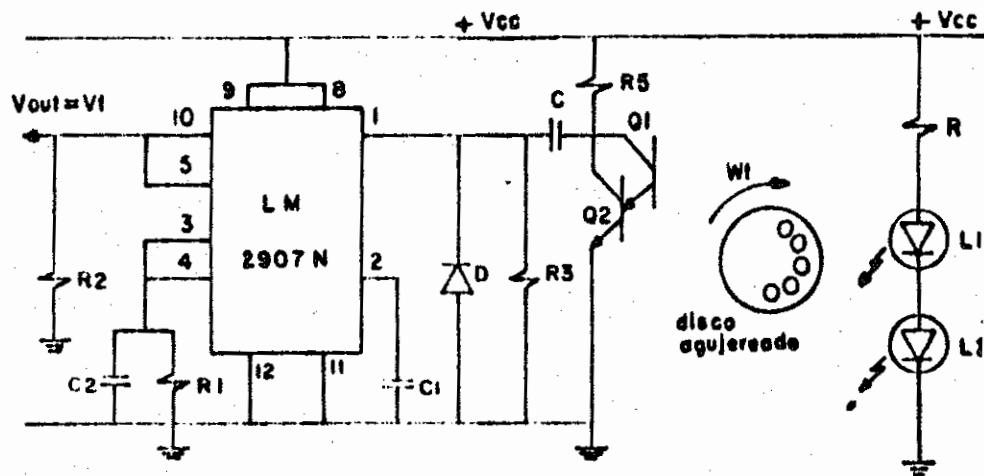


Figura 43. Circuito del sensor de velocidad y obtención de V_t .

tros en el presente trabajo se ha seleccionado un foto-tacómetro, el cual como todos los foto-tacómetros basan su funcionamiento en el efecto foto-eléctrico de los semiconductores. Para el foto-tacómetro se escoge un foto-transmisor sensible tanto a la luz como al infrarojo. Iluminando la base del foto-transmisor y cortando el haz de luz sucesivamente, se generan pulsos en el colector del transistor. Estos pulsos son transformados en un voltaje (V_t). Una manera para satisfacer lo anterior es:

1. Cortar el haz de luz mediante un disco agujereado, el cual está montado en el eje de la turbina.
2. Filtrar los pulsos obtenidos.
3. Introducir estos pulsos en un convertidor de frecuencia a voltaje (existen muchos circuitos integrados que permiten hacerlo), teniendo finalmente el voltaje V_t que es lo que interesa.

El circuito recomendado es el presentado en la figura 43. En dicha figura se especifica el circuito integrado a usarse, aunque existen otras alternativas.

Q_1 es básicamente el foto-transistor, el cual está conectado en par Darlington con Q_2 para obtener mayor ganancia de corriente. Ambos Q_1 y Q_2 pueden venir en una sola pastilla. El disco puede ser de cualquier material, se han hecho pruebas satisfactorias usando plástico opaco. L_2 es testigo de que L_1 está funcionando y es éste el que transmite el haz de luz hacia Q_1 .

3.11.3. Circuito comparador

Para obtener la señal de error se restan la velocidad de referencia filtrada, (asociada con el voltaje V_r) menos la velocidad de la turbina (asociada con el voltaje V_t). Esto se hace mediante el circuito presentado en la figura 44. El potenciómetro P permite variar la ganancia del amplificador operacional. Se recomienda que esta ganancia sea como máximo alrededor de la unidad.

3.11.4. Circuito PID

Este bloque es implementado por el circuito presentado en la sección 3.10.1.e. y que se muestra ya interrelacionado en otras partes vecinas del sistema en la figura 45. Nótese que en la parte de la acción integral el capacitor C_i se descarga cuando el selector $S1.2$ (manual/automático) está en su posición manual. De este modo se inicia el proceso automático con condiciones iniciales nulas en el integrador. [11]

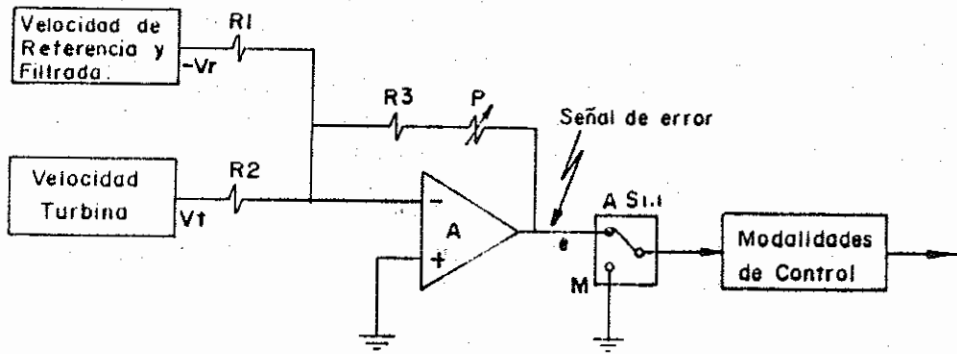


Figura 44. Circuito Comparador.

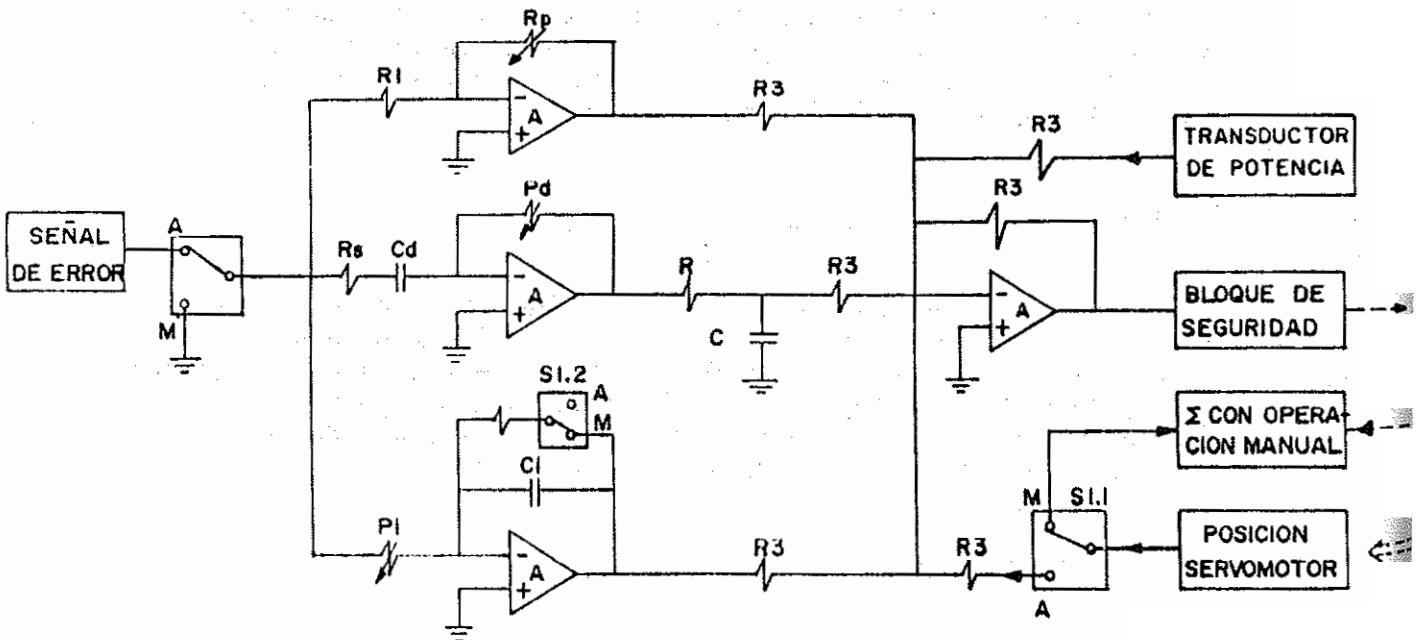


Figura 45. Circuito de la etapa de control.

3.11.5. Bloque de seguridad

Esta etapa se implementa entre otras cosas (que se describen más adelante), para limitar la acción del mecanismo de distribución de la turbina dentro de un rango aceptable de trabajo, permitiendo que dicho mecanismo no se enclave ni en su posición extrema abierta ni en su posición extrema cerrada. También puede preverse esto en la construcción mecánica.

La ubicación del bloque de seguridad se observa en la figura 46. Este actúa anulando la acción del servomotor - eléctrico. Para esto lleva a cero la señal que entra al amplificador de potencia. Existe sin embargo la posibilidad de retardo en el orden de seguridad por lo cual es conveniente anular la acción de los servomecanismos hidráulicos. Para ello es necesario apagar la bomba eléctrica de aceite que alimenta a esos servomecanismos. Es conveniente que el bloque de seguridad actúe simultáneamente sobre las dos partes antes mencionadas. [4]

Para limitar la carrera del mecanismo de distribución de la turbina se deben colocar topes de fin de carrera que accionen interruptores, los mismos que dan información al circuito de seguridad. El circuito utilizado es el presentado en las figuras 47 y 48. El relé RC1 se activa cuando se acciona S1 ó S2, cerrando RC1.2 el cual activa RC2, cerrando RC2.1 que activa la alarma. A la vez RC1.1 se abre y apaga la bomba de aceite. Este estado permanece hasta pasar el regulador a operación manual y sacar del enclavamiento al mecanismo de distribución de la turbina, para lo cual se deberá también arrancar la bomba, en forma manual, usando b1 y b2.

Existe un tercer contacto de RC1, el RC1.3 que lleva a cero el voltaje procesado del control antes de que ingrese al amplificador de potencia que maneja el servomotor apagándolo. El circuito usado es el mostrado en la figura 49.

3.11.6. Filtro

Este tiene la función de introducir un retardo de tiempo suficientemente grande, como para prevenir un cierre brusco (o apertura) del mecanismo de distribución de la turbina. Puede implementarse de dos maneras, un filtro RC con resistencia y condensador o uno con filtro activo, involucrando otro amplificador operacional. Es necesario usar el filtro activo, porque se trabajará a frecuencia muy baja. [12]

Este filtro es pasa bajo y la frecuencia de corte debe ser compatible con el retardo requerido. El filtro pasa bajo de primer orden es el presentado en la figura 50. La ganancia proporcional $R2/R1$,

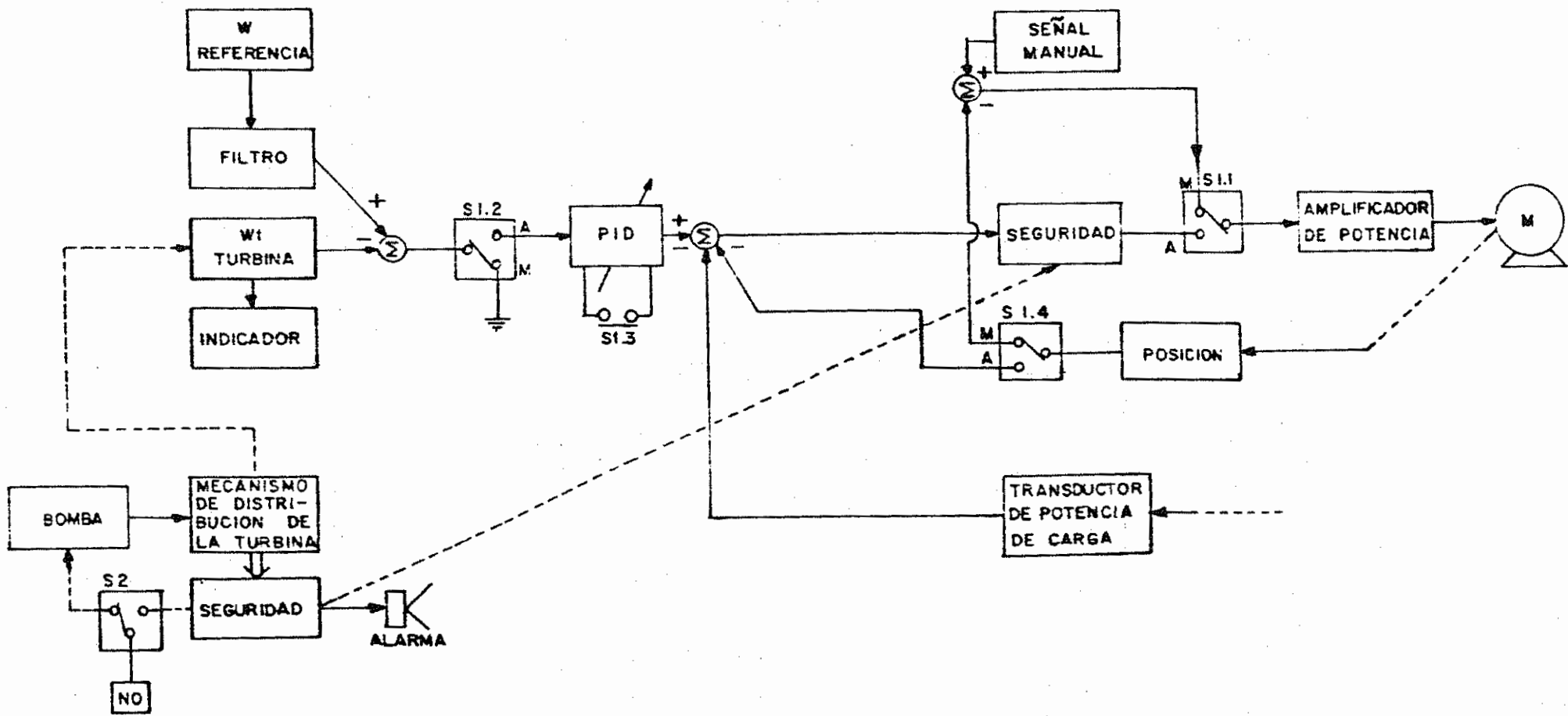


Figura 46. a) Esquema donde se presenta la conexión entre los elementos del regulador Eléctrico - Electrónico, para operación manual.

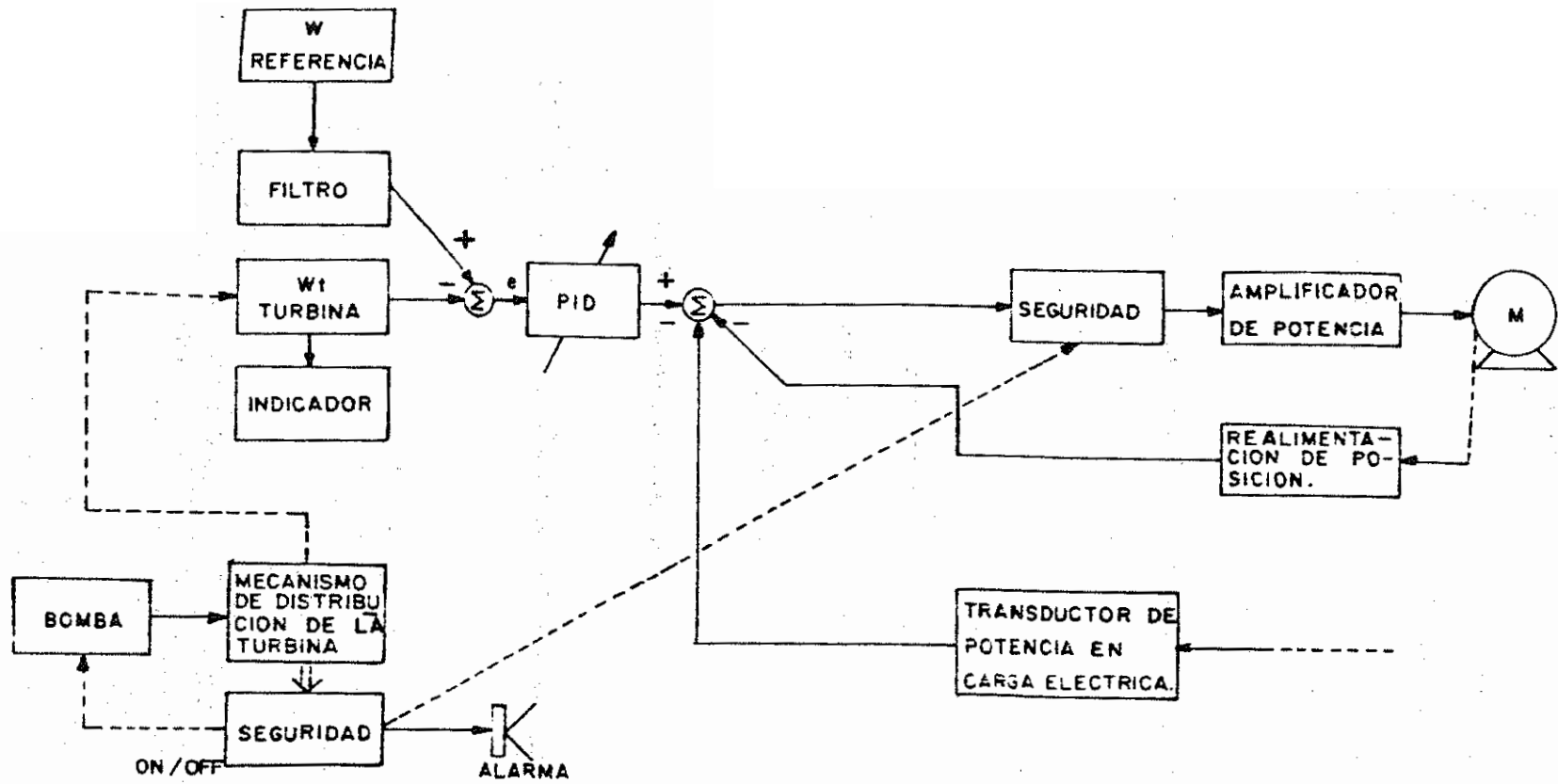


Figura 46. b) Esquema donde se presenta la conexión entre los elementos del regulador Eléctrico - electrónico, para operación automática.

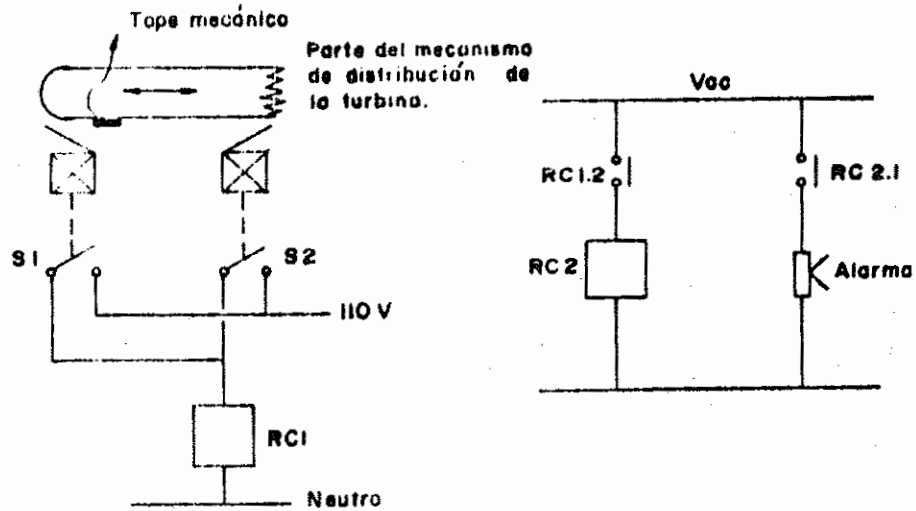


Figura 47. a) Circuito detector de fin de carrera.

Figura 47. b) Alarma.

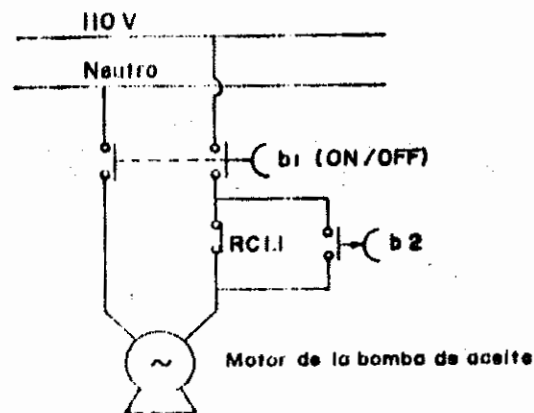


Figura 48. Circuito de desconexión de bomba. RC.1.1. es contacto NC relé RC.1.1.

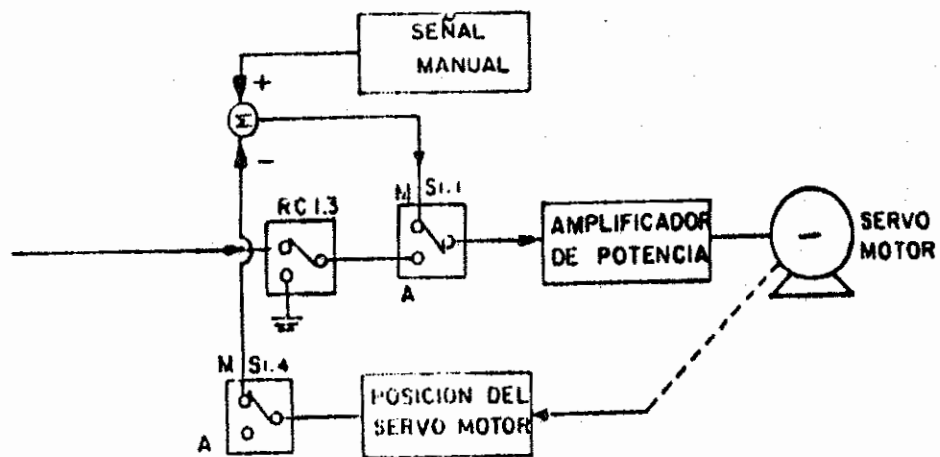


Figura 49. Parte del circuito de seguridad RC1.3 (es parte del sistema de seguridad). S1. selecciona manual/automático.

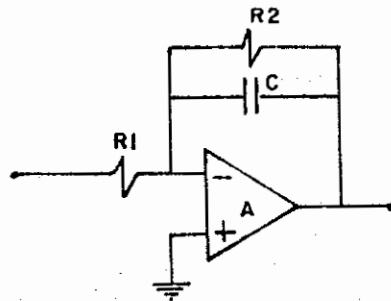


Figura 50. Circuito del filtro activo.

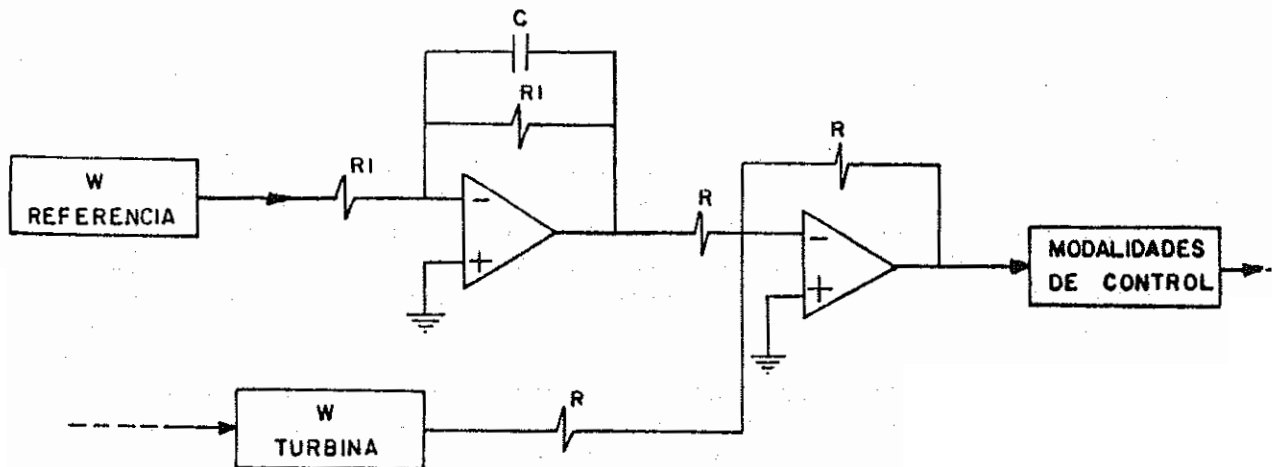


Figura 51. Circuito del filtro y realimentación de posición.

puede hacerse igual a uno, entonces $R1 = R2$, con lo que no se afecta a las anteriores ganancias.

La salida del filtro se suma con la realimentación de la velocidad angular, teniéndose el circuito de la figura 51.

3.11.7. Amplificación de potencia

Para manejar el servomotor eléctrico (primer actuador) es necesario de una interface de potencia que amplifica la señal voltaje proveniente del control (sea automático o manual). Esta amplificación de potencia, se consigue con transistores adecuados que puedan manejar la corriente de consumo del servomotor eléctrico. Los transistores se conectan en configuración seguidor emisor complementario, como se indica en la figura 52. [12]

La señal de voltaje ingresa por D1 y D2 que a través de R1 se polarizan rápidamente. El objetivo de los diodos D1 y D2 es crear una pequeña zona muerta dentro de la cual pueda caer los pequeños ruidos que, cuando el error debe ser cero (por lo tanto servomotor parado), podrían ser amplificados y mover al servomotor. El amplificador operacional A1 está conectado como seguidor de voltaje que excita a T1 y T2 con ondas positivas y T1' y T2' con negativas; R2 es la realimentación necesaria para A1.

Se incluyen también los fusibles F1 y F2 para casos de rotor bloqueado o corto circuito, en que la corriente podría subir a niveles peligrosos para T2, T2' y el servomotor.

3.11.8. Servomotor

Como se mencionó, el servomotor eléctrico es el primer actuador del sistema, su voltaje y el consumo nominal determinan el amplificador de potencia, así como la fuente de alimentación. El servomotor se recomienda sea de corriente continua y de voltaje bajo (12 - 24 Volt) para evitar un voltaje excesivo en los acumuladores el momento del arranque.

Es conveniente que de alguna manera se indique el sentido de giro del servomotor, en el panel de control, para lo cual es necesario el circuito presentado en la figura 53. R5 es de bajo valor (= 1 ohm) sirven para absorber oscilaciones generadas cuando se interrumpe o invierte, en forma de escalón, la tensión aplicada al inducido del motor, debido a la fuerza contraelectromotriz. Las oscilaciones generadas, al realimentarse al circuito seguidor, podrían generar en algunos casos inestabilidad (hecho encontrado experimentalmente). También esta resistencia limita la corriente de arranque del servo, y aumenta su torque de arranque. En general mejora las características de funcionamiento de esta etapa. [13]

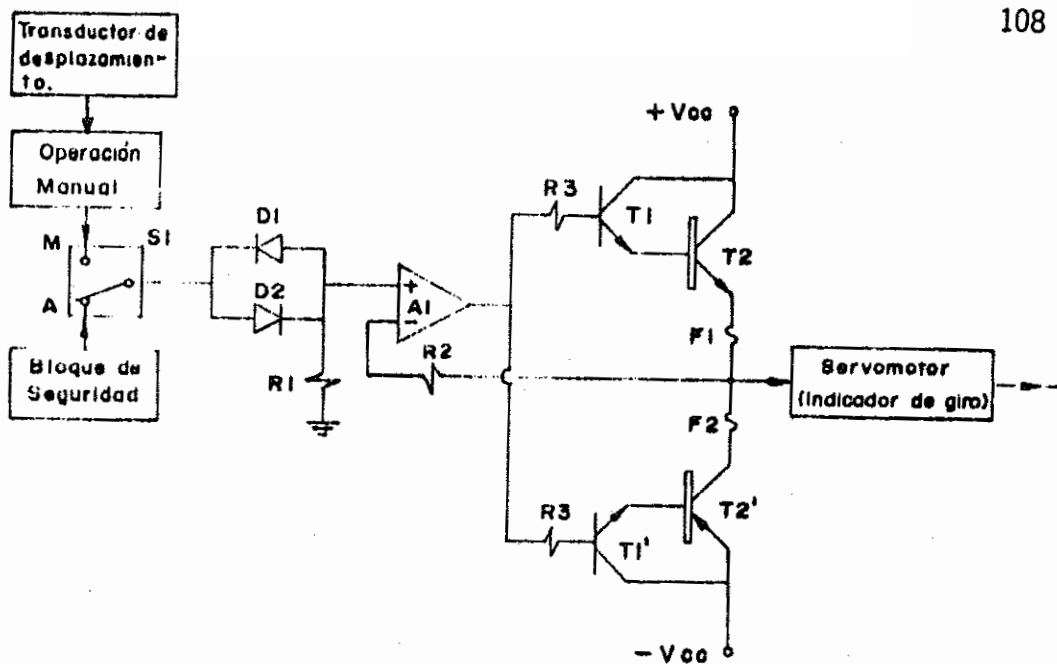


Figura 52. Circuito del amplificador de potencia.

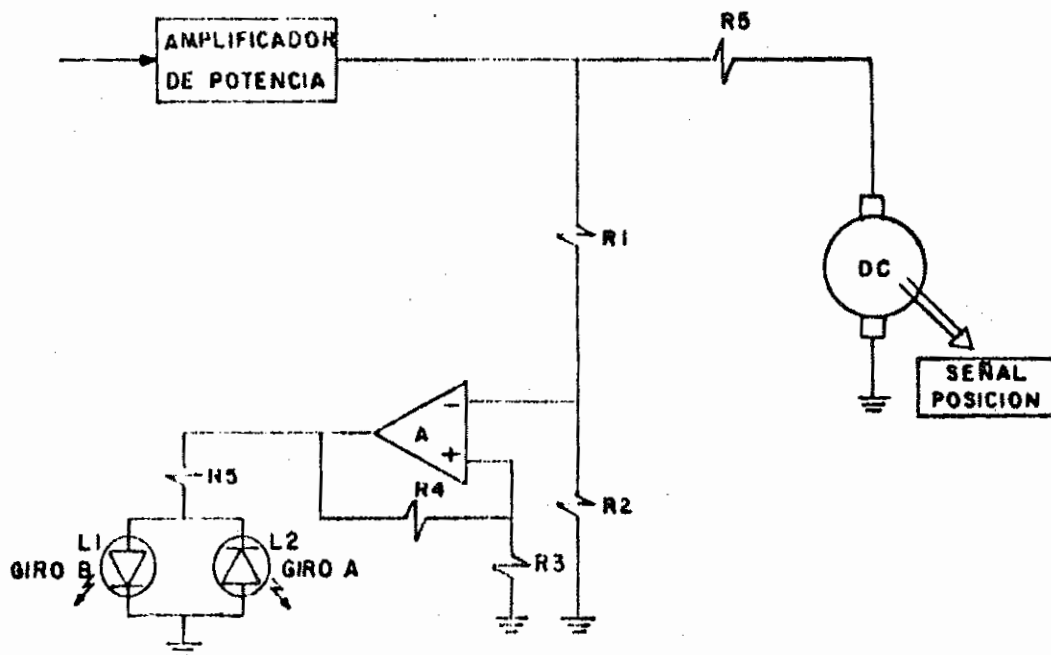


Fig. 53. Circuito del servomotor, con indicación de giro.

3.11.9. Transductor de desplazamiento

En la figura 14 se puede identificar, en el sistema total la ubicación del transductor de desplazamiento. AL eje del servomotor eléctrico está acoplado un tornillo el cual permite desplazar una tuerca en la que se pivota la palanca del servohidráulico piloto, (ver figura 21). Es justamente la posición de ese punto pivote lo que se realimenta para ser sumada (restada) con el voltaje resultante de las acciones de control PID o manual, (pasando por un circuito sumador) para ingresar al amplificador de potencia que maneja el servo. La razón de esta realimentación es convertir la acción integral del motorcito eléctrico en acción proporcional.[4]

El transductor de desplazamiento puede ser de tipo potenciométrico, inductivo o de tipo piezo-eléctrico. Se recomienda que sea de tipo inductivo pues trabaja satisfactoriamente en condiciones duras. - Transductores de tipo potenciométrico pueden cambiar sus características fácilmente ante la presencia de polvo, agua, etc. aunque trabaja satisfactoriamente con mantenimiento continuo. El inconveniente del transductor de tipo piezo-eléctrico en su costo.

En las figuras 54 y 55 se presentan los circuitos correspondientes al sensor de tipo inductivo (transformador de núcleo variable) y al sensor potenciométrico.

En el caso del circuito de la figura 55, el potenciómetro P1 genera un voltaje positivo o negativo, cuyo valor se lo puede modificar en base al circuito restador (formado por A1) y luego, la señal, pasa al selector manual/automático. Al moverse la tuerca en el tornillo se mueve también la pata central de P1. [4]

En el caso de la figura 54 se usa un transformador de núcleo variable, el cual cambia la tensión efectiva del secundario al variar la posición del núcleo. Mediante A1 se resta de un valor diferencial (V_{ref3}) que representa el punto de equilibrio y pasando por el selector de M/A se suma con la señal de voltaje automático o manual. En este caso las resistencias P1, R2, R1 y P2, R4 y R3 deben tener la misma relación de ganancia.

3.11.10. Señal de control manual

La necesidad del control manual aparece cuando se arranca por primera vez la turbina o cuando se ha activado el sistema de seguridad. En ambos casos se busca, manualmente, la velocidad nominal de la turbina (o cercana) pasando luego al modo con control automático.

El control manual se realiza básicamente mediante la suma de dos señales, la señal de posición y la manual (con macro y micro ganancia) esta señal manual se la obtiene con un par de potenciómetros montados a 90° y sus ejes acoplados a una palanca (joystick). [4][7][11]

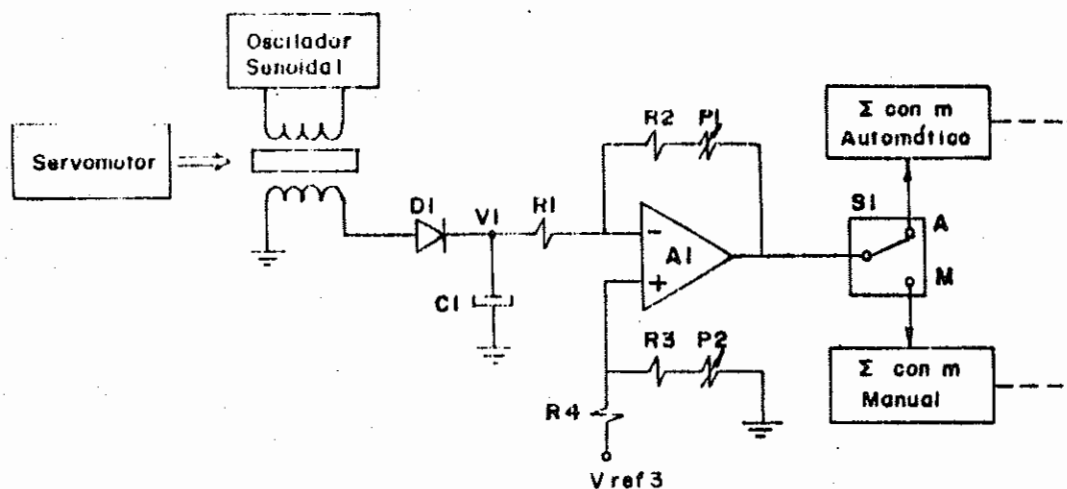


Figura 54. Circuito de la obtención de la señal de desplazamiento por método de transformador de núcleo variable.

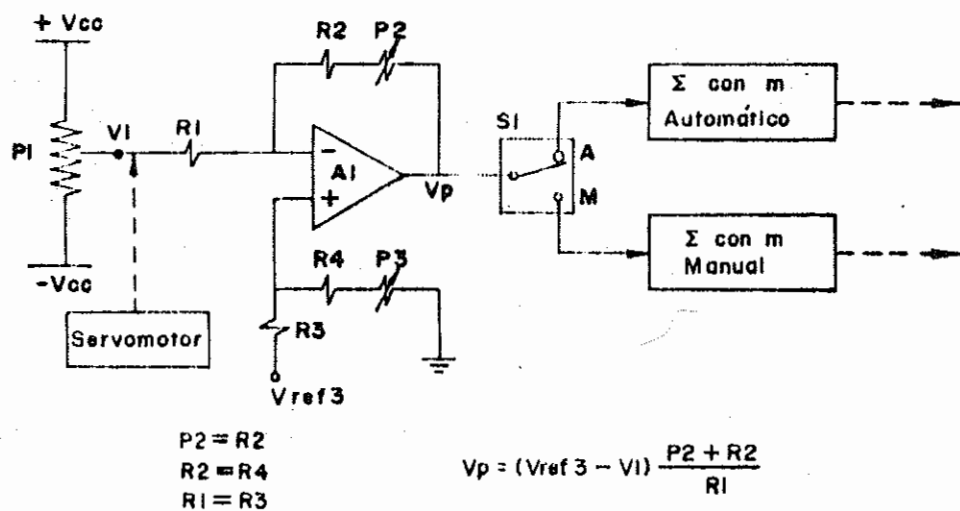


Figura 55. Circuito correspondiente a la señal de desplazamiento por método potenciométrico.

En las figuras 56 y 57 se presenta un bosquejo del montaje de los potenciómetros P1 y P2. Cuando la palanca se mueve sobre el eje Y o X aparece un voltaje negativo o positivo en la toma central. En sentido Y positivo o (negativo) actúa solo P1 y aparece voltaje positivo (negativo) en su toma central; en sentido X positivo (negativo) sólo actúa P2 y aparece voltaje positivo (negativo) en su toma central. En cambio en el primer cuadrante, aparece un voltaje positivo en P1 y negativo en P2, en el cuarto cuadrante ambos son negativos, en el segundo cuadrante P1 es positivo y P2 es positivo y en el tercer cuadrante P1 es negativo y P2 es positivo.

El comportamiento anterior permite obtener altos voltajes en los cuadrantes II y IV y el resultante de la diferencia entre P1 y P2, en los cuadrantes I y III y como resultante la suma en el amplificador A1. En el mismo amplificador operacional se suma la señal de posición realimentada, permitiendo posicionar el servomotor a decuadamente. Como se observa en el circuito de la figura 56, la señal de salida de A1 va al selector de control manual/automático, pasando luego al amplificador de potencia.

Los diodos D1 a D4 permiten generar una brecha de no funcionamiento en el caso de que la palanca no esté correctamente posicionada en el centro.

3.11.11. Osciladores

Cuando se usa como sensor de desplazamiento el transformador de núcleo variable, es necesario alimentar el primario del transformador con una señal alterna que puede ser cuadrada, triangular o senoidal. Por razones de minimización de armónicas, se escoge la onda senoidal. Es necesario que la onda sea lo más estable posible tanto en frecuencia como en amplitud, para lo cual debe existir un desacoplamiento de impedancia entre el transformador y el generador de onda. Este efecto se alcanza con el circuito de la figura 58, cuya frecuencia fundamental permanece estable debido a que ésta se genera en la etapa anterior que genera la onda senoidal (primero se forman ondas cuadradas y triangulares). [11]

Existen otros métodos para generar ondas senoidales, se ha escogido éste porque sigue usando amplificadores operacionales. Además como se dijo, la frecuencia fundamental es fijada por A1 y A2, y por tanto es independiente de la carga. A3 permite el desacoplamiento de impedancia, muy favorable en este caso, pues el transformador es de núcleo variable.

3.11.12. Indicador de velocidad de la turbina

De alguna manera conviene conocer la velocidad a la que está girando la turbina. Puede hacerse mediante un indicador con display o

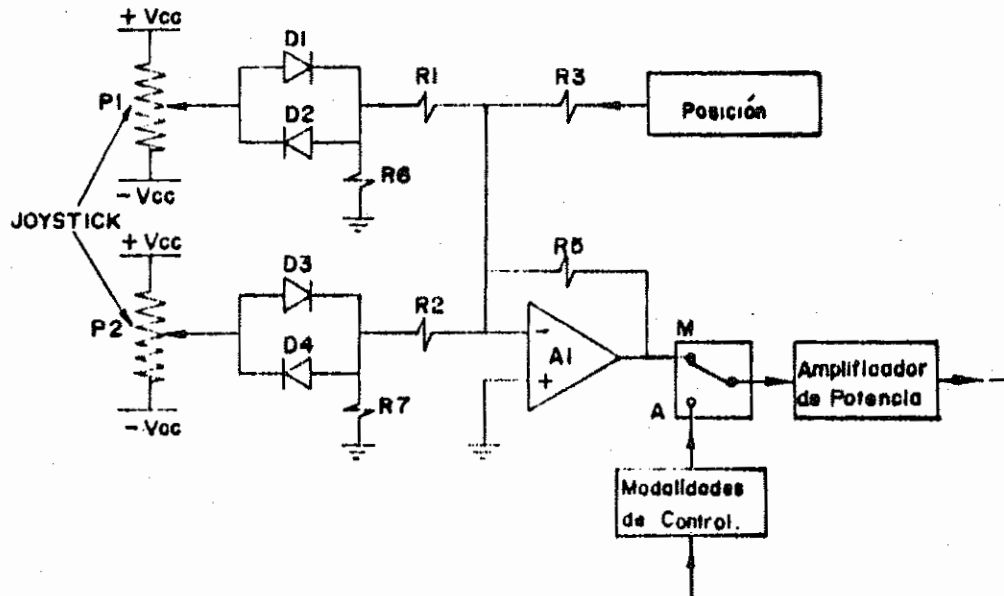


Figura 56. Circuito para control manual mediante joystick (P1 y P2)

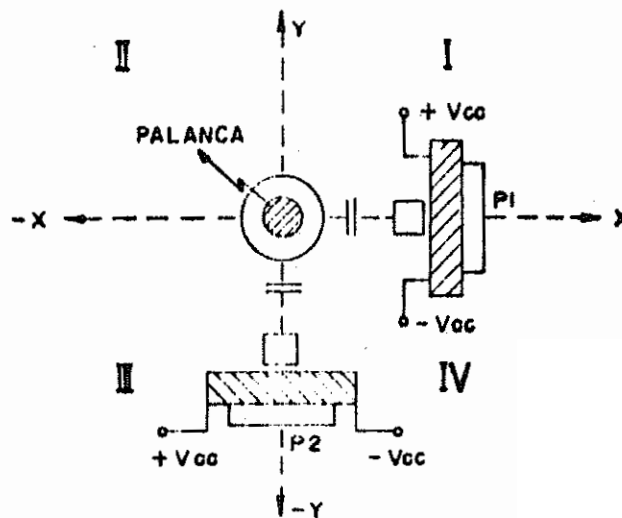


Figura 57. Montaje de P1 y P2.

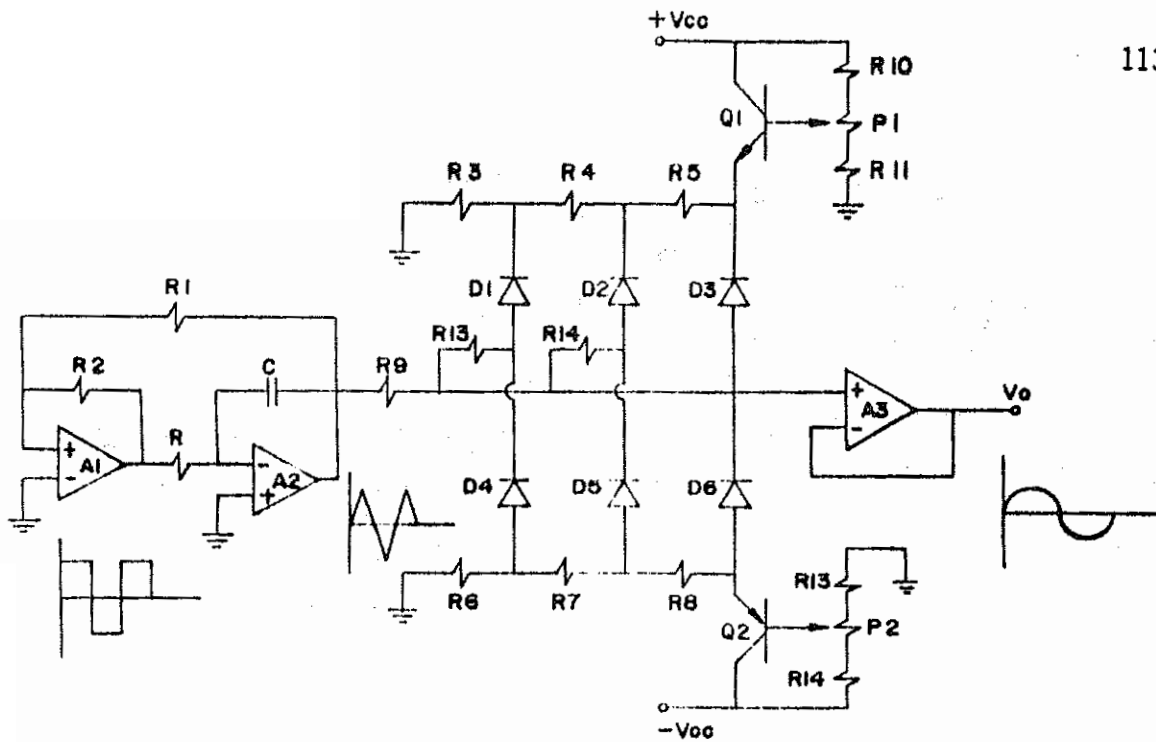


Figura 58. Circuito del Oscilador Senoidal.

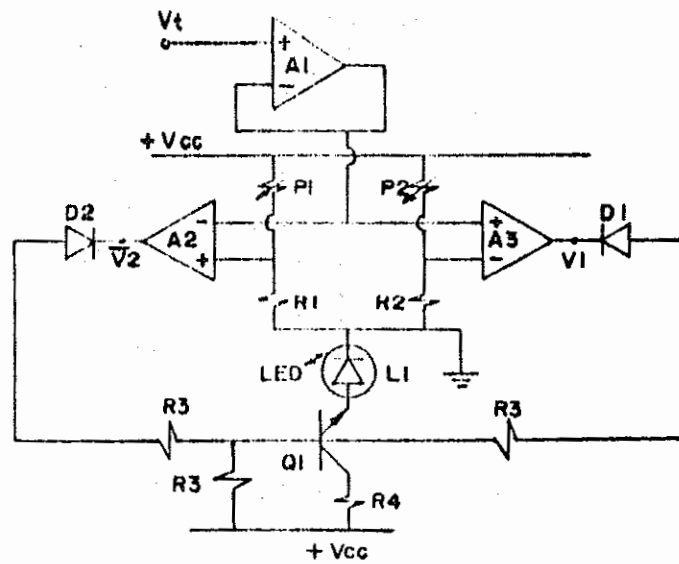


Figura 59. Circuito del indicador de velocidad de turbina.

con LED's cuyo encendido indique cierto rango de velocidad. El más sencillo (y también más barato) es el propuesto en el circuito general (ver plano general) que indica, mediante un solo LED, que la velocidad esta dentro de un rango aceptable, su principio de funcionamiento es digital.[14]

Aprovechando el voltaje (V_t) resultante de sensar la velocidad pueden efectuarse dos comparaciones:

$$V1 = 1 \text{ lógico si } V_t \geq (V_{tn} - \Delta V_t) \quad \text{y}$$

$$V2 = 1 \text{ lógico si } V_t \leq (V_{tn} + \Delta V_t)$$

Con lo que se obtiene:

(V_{tn} , voltaje asociado con la velocidad nominal de la turbina).

V1	V2	LED	Comentario
0	0	0	L5 apagado
0	1	x	No ocurre nunca
1	0	1	L5 encendido
1	1	0	L5 apagado

Con este análisis se determina que $LED = V1 \cdot \overline{V2}$, y el circuito resultante que cumple con esa función booleana es el de la figura 59.

Para obtener el voltaje V2 complemento se ingresa V2 al comparador invertidamente. La compuerta "AND" se realiza con la ayuda de los diodos D1, D2 y del transistor Q1 en seguidor emisor.

3.11.13. Fuentes reguladas de tensión

Todos los circuitos anteriores requieren ser alimentados con voltaje DC. Por la existencia de los amplificadores operacionales (circuitos integrados) aparece la necesidad de disponer de voltaje tanto positivo como negativo, ambos deben ser muy precisos lo que implica regulación. La fuente de alimentación además debe estar protegida contra cortocircuitos y sobrevoltajes. Se introduce también indicadores de voltaje regulado y son los LED's L1 y L2 (ver figura 60). [4][5]

Los diodos D5 y D6 protegen de voltaje inversos a los reguladores integrados (LM ---). Es recomendable que se use dos transformado-

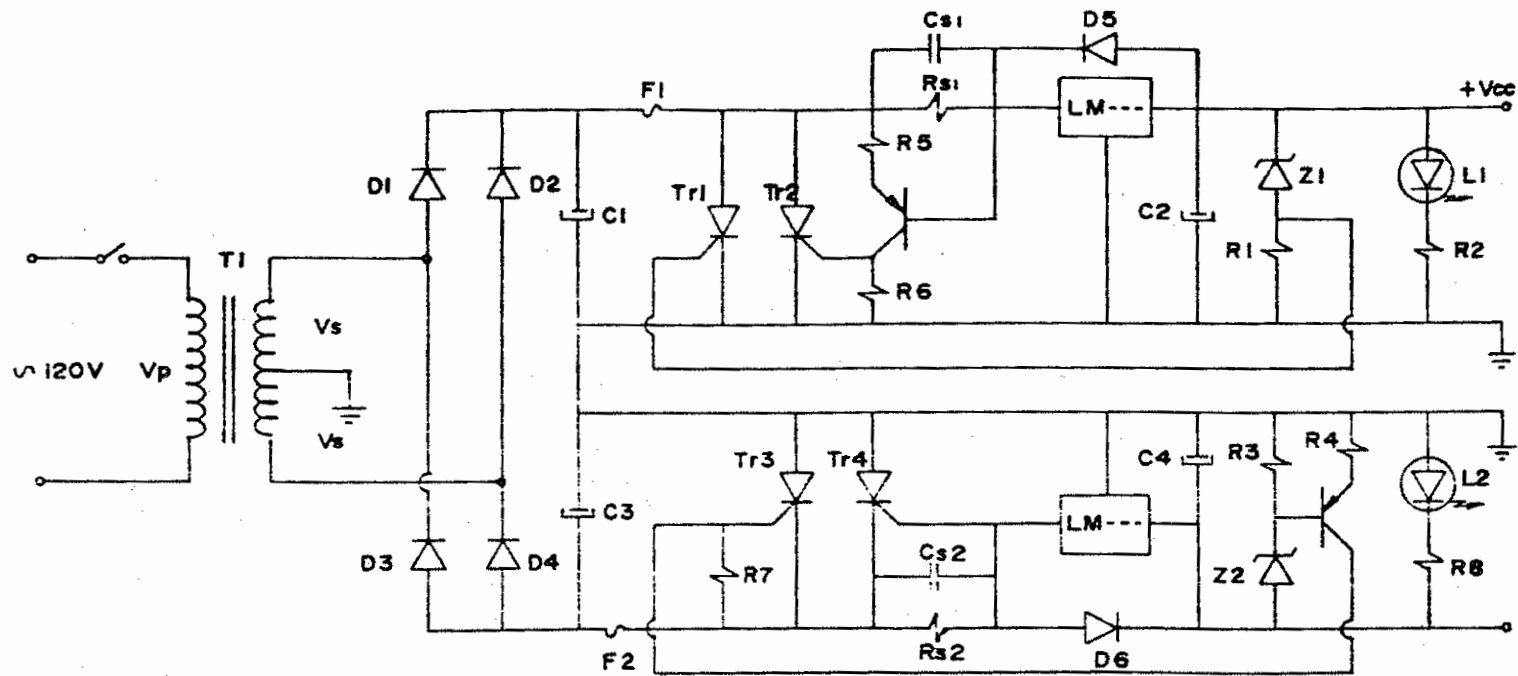


Figura 60. Circuito de las fuente positiva y negativa de tensión.

res, uno para voltaje positivo y otro para negativo, aunque aquí se presente sólo uno por resultar más barato.

De las fuentes anteriores podría tomarse el voltaje para alimentar el servomotor, pero se ha observado que debido al tipo de funcionamiento que éste presenta, es necesario que la alimentación del motor sea independiente del resto de los circuitos que forman el regulador electrónico (incluyendo nuevos transformadores) De esta manera se aísla totalmente al control mismo de todas las bullas - transitorias que se generan al arrancar el servomotor o al invertir de giro mediante una señal escalón. Este fuente puede ser exactamente igual a la anterior, pero para disponer de otra alternativa y, debido a que el trabajo será más riguroso se recomienda el circuito de la figura 61. [11]

Analizando la fuente positiva los transistores Q1 y Q2 forman una etapa rápida de seguridad que hace las veces de un fusible, Q2 se enclava cuando la corriente aumenta hasta un valor escogido sacando de funcionamiento al transistor Q1. Para su reposición se usa el pulsador b1; el resto del circuito es común y similar al anterior.

3.11.14. Circuito general resultante

Una vez que se ha presentado los elementos por cada bloque del sub sistema electrónico conviene reunirlos en un solo circuito general, ubicándolos en forma lógica para una rápida comprensión del funcionamiento; esto resulta muy beneficioso para los cálculos y acoplamiento de las diversas etapas (ver plano general). En el circuito general se puede observar cada una de las etapas anteriormente presentadas.

Para una mayor facilidad de mantenimiento del circuito todos los amplificadores operacionales son LM741, C, E, ó A, ó el cuádruple MCM3302, así como todos los transistores NPN de baja señal se ha escogido el 2N2222A y el PNP, el 2N2907 por sus características muy particulares y ventajosas. Además todas las resistencias son de 1/2 W \leq 10% de tolerancia a menos que se indique lo contrario. [15][16]

3.12. DISEÑO DE DETALLE DE LA PARTE ELECTRONICA

Los cálculos son referentes a cada uno de los elementos del circuito general mostrado en el diagrama y es conveniente realizarlos por etapas teniendo en cuenta las interacciones con las etapas concernientes.

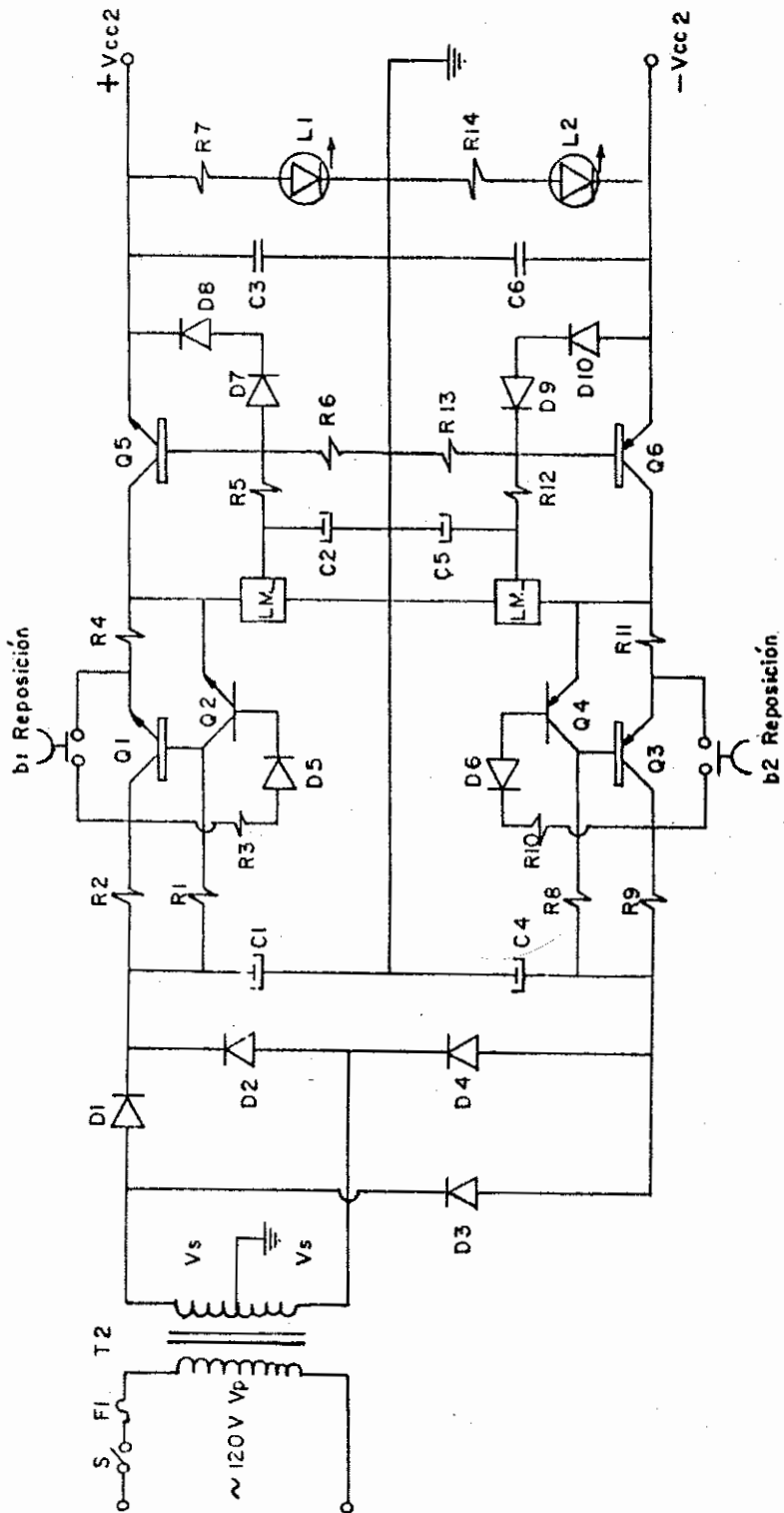


Figura 61. Circuito de la fuente para alimentar al servomotor.

3.12.1. Transductor de velocidad de la turbina

El circuito basa su funcionamiento en el convertidor frecuencia - voltaje, en este caso se usa el circuito integrado LM2907 de la NATIONAL SEMICONDUCTOR para aplicaciones industriales. Podría usarse otros como el TCS9400, TSC9401, TSC9402 de la TELEDYNE SEMICONDUCTOR. La forma de conexión y el método de cálculo son dados por el fabricante. Para el LM2907 se tiene:

$$C1 > 100 \text{ pF}$$

$$Z_{inPin3} \geq R1 \geq \frac{V}{I_{Pin3}} \quad (2.1)$$

$$Z_{inPin3} = 10 \text{ M (aprox.)}$$

$$I_{Pin3} = I_{Pin2} = \frac{V_{max.out}}{R1} \quad (2.2)$$

$$I_{Pin3} = \frac{(V_{cc} - V_{ce})}{R1}$$

$$V_{max.out} = V_t$$

V_{ce} voltaje de transistor interno.

$$V_{ce} = 2V$$

$$f_{max} = \frac{I_{Pin2}}{C1 \cdot V_{cc}} \quad (2.3)$$

$C2$ permite disminuir el rizado del voltaje de salida y puede ser calculado por:

$$V_{riz} = \frac{C1 \cdot V_{cc}}{2 \cdot C2} \left(1 - \frac{V_{cc} \cdot f_{in} \cdot C1}{I_{Pin2}} \right) \text{ pico-pico} \quad (2.4)$$

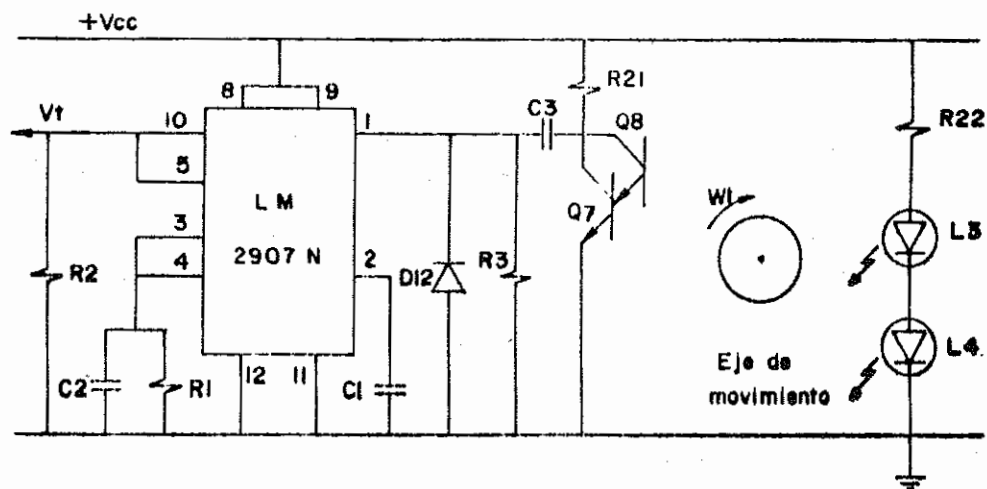


Figura 62. Sensor de Velocidad.

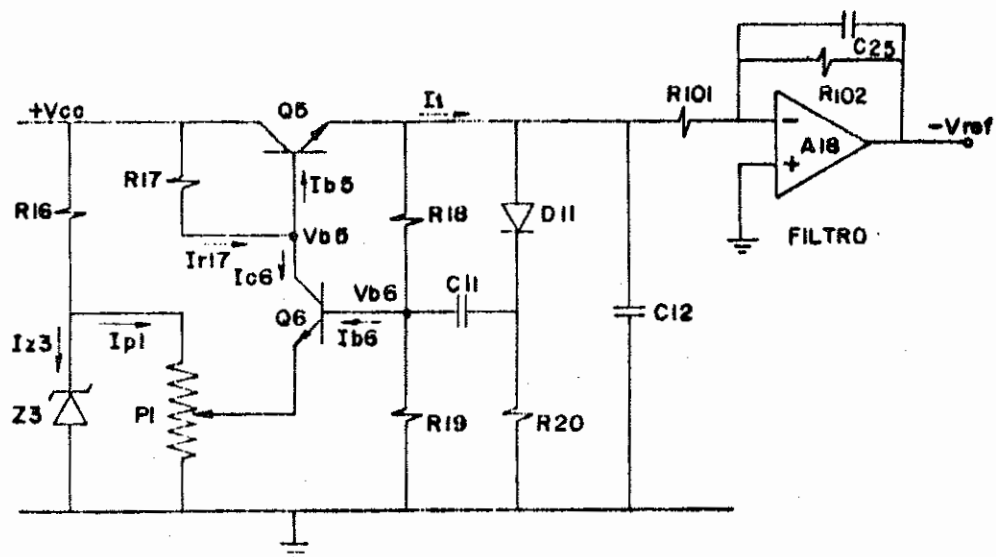


Figura 63. Circuito para la velocidad de referencia.

Donde:

f_{in} , frecuencia de la turbina, de (2.2) se tiene:

$$V_{out} = V_t = V_{cc} \cdot f_{in} \cdot C_1 \cdot R_1 \quad (2.5)$$

R_2 se puede calcular con:

$$R_2 = \frac{V_{cc} - V_{cemin}}{I_{R2}} \quad (2.6)$$

El diodo D12 corta la parte negativa de la señal que entra al Pin1, C3 es condensador de paso y con R3 permite formar a la vez un filtro pasa alto teniéndose que:

$$f_{corte} = \frac{1}{R_3 \cdot C_3} \quad (2.7)$$

y determina el límite inferior del rango de trabajo del CI.LM2907.

Esta frecuencia es aproximadamente de 20 - 60 Hz.

La resistencia R_{21} es la carga del fototransistor Q8 y Q7 en configuración par Darlington (se encuentran los dos transistores en una sola cápsula). El valor de R_{21} es conveniente que sea relativamente alto para permitir la adecuada saturación del fototransistor tr bajando con baja iluminación en su base.

$$100K < R_{21} < \frac{V_{cc}}{I_{co/8}} \quad (2.8)$$

Para que la influencia de portadores minoritarios siga siendo despreciable.

El led L3 sirve de testigo de que el led L4 está encendido y es L4 el que emite luz (visible o infraroja) al disco agujereado, por lo que:

$$R_{22} = \frac{V_{cc} - V_{L3} - V_{L4}}{I_{L4}} \quad (2.9)$$

En cuanto al disco agujerado se refiere, es éste el que cortará el haz de luz al girar. El disco tiene un número determinado de agujeros equidistantes al centro y entre sí. El número de agujeros de pende de la velocidad de la turbina y de las veces por segundo que

quiere "cortarse" el haz de luz.

Teniendo en cuenta la teoría de movimiento angular se puede determinar fácilmente que:

$$N = W_{out}/W_{in} = f_{out}/f_{in} \quad (2.10)$$

Donde: N = número de agujeros

$$N = f_{out}/f_{in} \quad (2.11)$$

Donde: f_{out} , frecuencia que entra el circuito convertidor de frecuencia - voltaje.

Se puede relacionar el número de agujeros con el voltaje de salida del convertidor frecuencia - voltaje aplicando (2.5)

$V_t = V_{cc} \cdot f_{out} \cdot C_1 \cdot R_1$, reemplazando f_{in} , se tiene:

$V_t = V_{cc} \cdot N \cdot f_{in} \cdot C_1 \cdot R_1$, haciendo $K = C_1 \cdot R_1$.

$$V_t = K \cdot V_{cc} \cdot f_{in} \cdot N \text{ o despejando} \quad (2.12)$$

$$N = \frac{V_t}{K \cdot V_{cc} \cdot f_{in}} \quad (2.13)$$

Donde K servirá para ajustar las variaciones del cálculo que se presentan, dependiendo de los valores de V_t , V_{cc} , f_{in} , del material, para que N sea entero.

3.12.2. Velocidad de referencia (V_{ref})

La posición de P1 (ver figura 63) determina el valor de voltaje de referencia (recordar que V_{cc} ya es regulado).

Se puede ver claramente que:

$$V_{ref} = V_{b6} \left(\frac{R_{18} + R_{19}}{R_{19}} \right) \quad (2.14)$$

donde v_{b6} es el voltaje de base del transistor Q6.

Para el voltaje de referencia máximo se tiene:

$$V_{refM} = \frac{V_{b_{max}} (R_{18} + R_{19})}{R_{19}}$$

con P1 en extremo superior.

Además, $V_z = V_{z3} =$ voltaje de zener z_3 .

$V_{b_{max}} = V_z + V_{be6}$ y reemplazando en la ecuación anterior se tiene

$$V_{refM} = \frac{(V_z + V_{be6})(R_{18} + R_{19})}{R_{19}} \quad (2.15)$$

y se tiene también:

$$V_{ref_{max}} = V_z + V_{ce6} - V_{be5} \quad (2.16)$$

$V_{be5} =$ voltaje base emisor de Q5.

Para V_{ref} mínimo se coloca P1 en el extremo inferior, teniéndose:

$$V_{ref_{min}} = V_{b_{min}} \cdot \frac{(R_{19} + R_{18})}{R_{19}}$$

y, $V_{b_{min}} = V_{be6}$ con lo que:

$$V_{ref_{min}} = \frac{V_{be6}(R_{18} + R_{19})}{R_{19}} \quad (2.17)$$

y además:

$$V_{ref_{min}} = V_{ce6} - V_{be5} \quad (2.18)$$

I_1 es la corriente de carga; teniéndose en cuenta la ganancia del transistor Q5 se tiene que $I_1 = \beta_5 \cdot I_{b5}$, además $I_{b5} + I_{c6} = I_{R_{17}}$. I_{c6} es corriente de colector de Q6.

Debido a que V_{ref} se aplicará a entrada de un amplificador operacional, de alta impedancia de entrada, se puede decir que I_1 es constante, esto es, no hay variación de carga. Por lo tanto I_{c6} varía únicamente para corregir las posibles variaciones de voltaje de en

trada al circuito.

R_{17} se calcula de la siguiente manera:

$$R_{17} \leq \frac{V_{cc \text{ max}} - V_{b5 \text{ min}}}{I_{R_{17}}}$$

Donde: $V_{b5 \text{ min}} = V_{ref \text{ m}} + V_{b5}$

$$R_{17} \leq \frac{V_{cc \text{ max}} - V_{ref} - V_{be5}}{I_{b5} + I_{c6}} \quad (2.19)$$

$$\text{Adem\u00e1s: } R_{17} \geq \frac{V_{cc \text{ min}} - V_{b5 \text{ min}}}{I_{R_{17}}}$$

$V_{b5 \text{ max}} = V_{ref \text{ M}} + V_{be5}$; por tanto:

$$R_{17} \geq \frac{V_{cc \text{ min}} - V_{ref \text{ M}} - V_{be5}}{I_{b5} + I_{c6}} \quad (2.20)$$

Para polarizar z_3 se usa R_{16} donde:

$$R_{16} \leq \frac{V_{cc \text{ max}} - V_{z3}}{I_{z3 \text{ min}} + I_{P1}} ; \quad (2.21)$$

V_{z3} = voltaje de zener 3

Adem\u00e1s:

$$R_{16} \geq \frac{V_{cc \text{ min}} - V_{z3}}{I_{z3 \text{ max}} + I_{P1}} \quad (2.22)$$

adem\u00e1s P_1 es constante.

El diodo D11 junto con C11 permite realimentar a la base de Q6 las va

riaciones bruscas que pudieran existir en V_{ref} y para evitar que Q6 (juntura base emisor) se destruya con eventual cortocircuito; al no conducir D11, el capacitor C11 se descarga por R20. Por lo tanto - se tiene que:

$$T = R_{20} \cdot C_{11} \text{ donde } T \text{ es la constante de tiempo de des-} \\ \text{carga de } C_{11}. \quad (2.23)$$

Hay que tomar en cuenta que para una adecuada realimentación, el transistor Q6 debe trabajar en la zona lineal de sus características, para lo cual basta que $V_{ce6} = 3 \text{ Volt}$.

El amplificador operacional A18 sirve en este caso para invertir - la polaridad de V_{ref} antes de ser sumada al voltaje que representa la velocidad de la turbina (V_t); por lo tanto se tiene que $R_{101} = R_{102}$. Además sirve de filtro de V_{ref} .

Como alternativa al elemento "Velocidad de Referencia", en la figura 64 se presenta un circuito alternativo.

La ganancia de salida del amplificador operacional es:

$$K = \frac{V_{erf}}{V_i} = - \frac{R_3}{R_4} \quad (2.24)$$

Como:

$$0 \leq V_i \leq V_z ; \text{ entonces}$$

$$V_{erf \text{ max}} = V_z \frac{R_3}{R_4} \quad (2.25)$$

En el proceso de cálculo se determina K, si se escoge un $R_3 = 10 \text{ K}$ se puede encontrar R_4 de la expresión anterior.

La resistencia R_1 viene dada por la ecuación:

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_z}{I_1} = \frac{V_{Vcc} - V_z}{I_2 + I_2} \quad (2.26)$$

Si $I_2 \ll I_z$

Entonces:

$$R_1 \approx \frac{V_{cc} - V_z}{I_z}$$

La resistencia R_5 viene expresada así:

$$R_5 = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \quad (2.27)$$

3.12.3. Señal de error

Del circuito de la figura 65 se puede obtener el voltaje de error mediante la siguiente fórmula:

$$V_e = - \left(\frac{R_{26}}{R_{23}} V_t - \frac{R_{26}}{R_{24}} V_{ref} \right) \quad (2.28)$$

$$V_e = V_{ref} - V_t \quad (2.29)$$

Cuando $R_{23} = R_{24}$ se obtiene una ganancia unitaria y ésto se desea.

3.12.4. Circuito PID

El cálculo de los diferentes elementos del circuito PID están íntimamente relacionados al análisis del control de todo el sistema. El valor de las constantes K_i , K_p y K_d son determinadas en ese análisis. Estas constantes deben permitir ser fijadas en un valor adecuado a la turbina y sistema en general; para lo cual es de utilidad que sean seleccionados mediante potenciómetros con macro y micro ajuste (se puede usar los potenciómetros de precisión conocidos en simulación analógica si se dispone de ellos).

La ubicación del circuito PID puede observarse en el plano general. A la salida de las acciones de control (modalidades de control) se suman esas señales incluida la realimentación de posición del servomotor eléctrico con signo contrario.

Bajo la condición de $R_{28} = R_{27}$ y $R_{29} = R_{33} = R_{34} = R_{104} = R_{122}$ (ver figura 66) se puede deducir que: [4]

$$V_m = \frac{R_{28}}{R_{33}} \left(\frac{R_{104} + Pp}{R_{27}} + \frac{Jw \cdot C_{24} (Pd + R_{31})}{Jw(C_{24} \cdot R_{30}) + 1} + \frac{1}{Jw C_{13} (Pi + R_{103})} \right) V_e - \frac{R_{28}}{R_{122}} V_p \quad (2.30)$$

Donde:

$$K_p = \frac{R_{104} + Pp}{R_{27}} \quad (2.31)$$

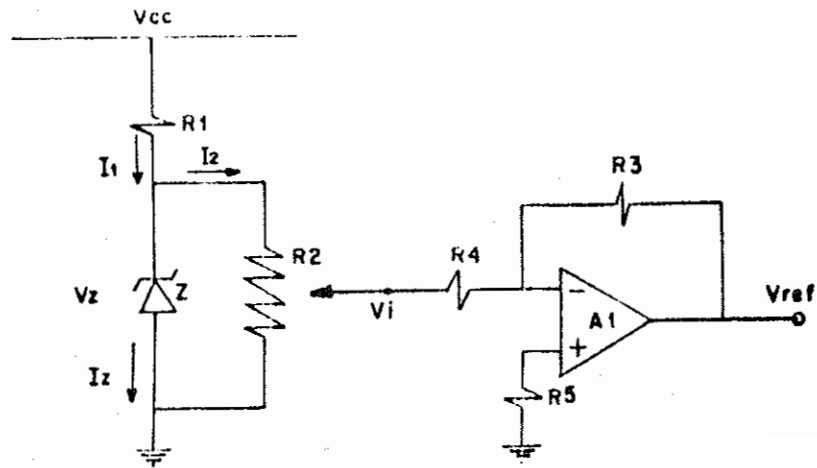


Figura 64. Circuito alternativo para "Velocidad de Referencia"

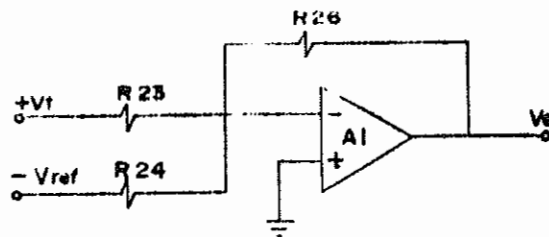


Figura 65. Circuito para obtener el Voltaje de Error.

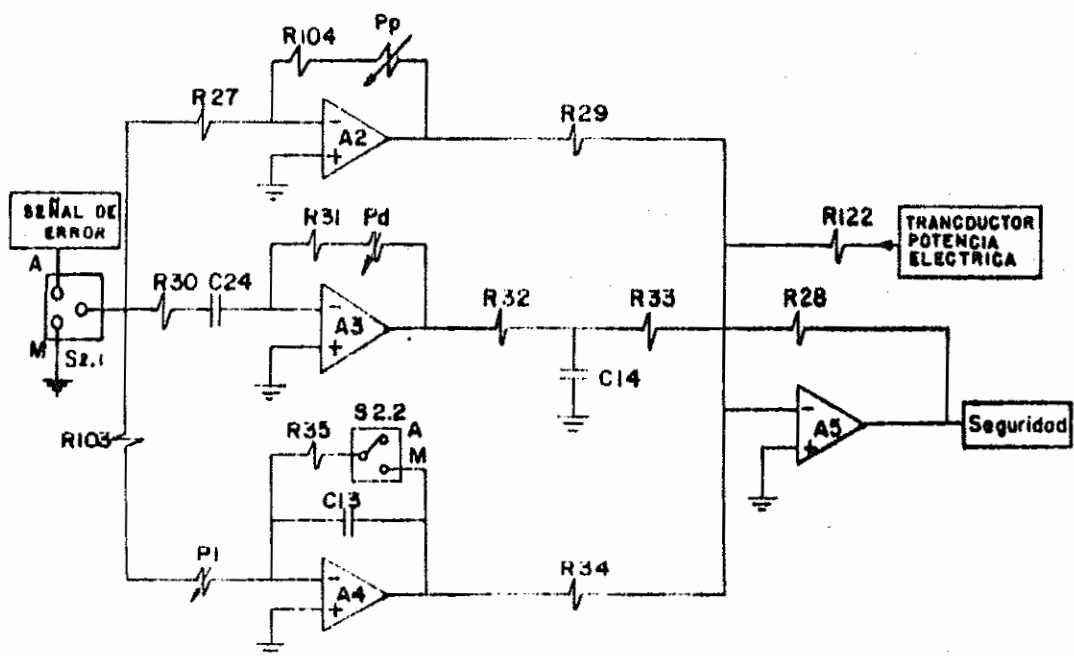


Figura 66. Circuito Proporcional, Integral, Derivativo.

$$K_d = C_{24} (P_d + R_{31}) \quad (2.32)$$

$$K_i = \frac{1}{C_{13}(P_i + R_{103})} \quad (2.33)$$

$$\frac{V_m}{V_e} = K_p + J_w \cdot K_d + \frac{K_i}{J_w} \quad (\text{sin tomar en cuenta } V_p) \quad (2.34)$$

Donde las frecuencias de corte integral y derivativa son:

$$f_i = \frac{1}{2\pi C_{13}(P_i + R_{103})} \quad (2.35)$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi C_{24}(P_d + R_{31})} \quad (2.36)$$

Todo lo anterior permite establecer en forma general, las tres modalidades, ahora es conveniente analizar las modalidades en forma in dependiente.

Para modalidad derivativa:

Esta modalidad es la más crítica de todas debido a que puede generar oscilaciones parásitas que tenderían a desestabilizar el sistema razón por lo cual, es necesario el filtro formado por R_{32} y C_{14} que corta las frecuencias altas (filtro pasa bajo), además la inestabilidad frente a frecuencias altas puede también ser eliminada con R_{30} . [11]

$$VA_3 = - C_{24}(P_d + R_{31}) \cdot \frac{dV_e}{dt} \quad (2.37)$$

para: $f \ll \frac{1}{2\pi C_{24} \cdot R_{30}}$

y

$$f_1 = \sqrt{\frac{f_T}{2\pi\tau}} \quad (2.38)$$

que es la frecuencia de corte del elemento $C_{24}(P_d + R_{31})$ y desde "0 a f_T " es el ancho de banda de ganancia unitaria, es decir:

$$\text{Ganancia} = w_T C_{24}(P_d + R_{31}) = 1 \quad \text{lo cual implica que:} \quad (2.39)$$

$$f_T = \frac{1}{2 \pi C_{24} \cdot R_{30}} \quad y, \quad (2.40)$$

$$\tau = C_{24}(P_d + R_{31}) = K_d \quad (2.41)$$

El filtro pasa bajo en cascada a la salida del "derivador", es un polo adicional al circuito, su frecuencia de corte será ligeramente mayor a la f_T , por lo tanto:

$$f_T = \frac{1}{2 \pi C_{14} \cdot R_{32}} \quad (2.42)$$

Se debe tener en cuenta que $R_{32} \ll R_{33}$ para evitar sumas inadecuadas en la siguiente etapa. Para la secuencia de cálculo se debe de terminar primero la constante derivativa óptima dada por:

$$\omega_d = 2 \pi \cdot f_d = \frac{1}{C_{24}(P_d + R_{31})} = \tau_d \quad (2.43)$$

$$\tau_d = \frac{1}{K_d}$$

Luego determina $f_T \gg f_1$ (podría ser $f_T \approx 10 \cdot f_d$), para luego calcular la frecuencia de resonancia del circuito (sin filtro de $C_{14} \cdot R_{32}$) mediante (2.38).

Para modalidad integral:

A la salida del amplificador operacional (sin considerar R_{103}) se tiene:

$$\frac{V_{A_4}}{V_e} = \frac{1}{j\omega C_{13} \cdot P_i} = \frac{K_i}{j\omega} \quad (2.44)$$

Entonces:

$$K_i = \frac{1}{C_{13} \cdot P_i} \quad (2.45)$$

Si $P_i = 0$ implica $K_i = \text{infinito}$, por lo que es conveniente colocar una resistencia en serie a P_i , de pequeño valor que proporcionaría el valor de $K_i \text{ max}$. Esta pequeña resistencia es R_{103} . $P_i \text{ max}$ deter

mina entonces, K_i min.

Al iniciar el control de velocidad en modo "automático" es necesario que la modalidad integradora esté con condiciones iniciales nulas, razón por la cual existe el interruptor S2.2 que descarga al capacitor C13 a través de R35 cuando se está operando en modo "manual". El valor de resistencia de R35 no es crítico y se escoge de manera que C13 se descargue de 1 - 5 segundos, dependiendo del tiempo que se tarde en llevar a velocidad nominal a la turbina cuando se opera manualmente. Por lo tanto:

$$T_{descarga} = R35 \cdot C13 \text{ aprox.} \quad (2.46)$$

Como se puede observar las modalidades de control tienen un potenciómetro en serie con una resistencia. Esto permite seleccionar puntos máximos y mínimos de ajuste de las constantes K_p , K_i , K_d . Por ejemplo en K_i , cuando $P_i = 0$, R103 fija el valor máximo de K_i . Mientras que $(P_i + R103)$ fija el mínimo valor. Algo similar ocurre con K_p y K_d .

Para cumplir con el requerimiento de macro y micro ajuste de ganancias se puede dividir al potenciómetro involucrado en dos de adecuado valor, entonces se tiene:

$$P_p = P_{pM} + P_{pm} \quad (2.47)$$

$$P_i = P_{iM} + P_{im} \quad (2.48)$$

$$P_d = P_{dM} + P_{dm} \quad (2.49)$$

Donde M quiere decir máximo y m quiere decir mínimo, además la relación de potenciómetros máximo y mínimo se toma de 10, por ejemplo: $P_{pm} = P_{pM}/10$, $P_{im} = P_{iM}/10$ y $P_{dm} = P_{dM}/10$.

Observando la ecuación (2.30) se tiene que la ganancia de realimentación V_p , depende R122; ésta podrá ser igual a $R29 = R33 = R34$, aunque podría haber la necesidad de otro valor.

3.12.5. Señal de desplazamiento

Esta es la realimentación de desplazamiento del servomotor eléctrico. Se la obtiene con un transductor de posición (sensor). Se ha propuesto dos tipos uno en base a un desplazamiento transformador de núcleo variable y otro por método potenciométrico. [4][13]

Se plantea el método de cálculo del transformador teniendo en cuenta

que la forma descrita permitirá construir manualmente un transformador. Da a la no existencia ni referencias comerciales en nuestro medio se lo hará en forma aproximada, teniendo en cuenta que lo que interesa es el tipo de voltaje en el secundario y no en sí la forma de onda.

Cabe recordar que para desplazamiento existen dos formas de sensar. En esta parte se expone la primera forma. Se ha hecho esto, para no repetir.

La figura 67 da una idea de como está constituido el transformador.[17]

Partiendo de las fórmulas básicas de diseño para transformadores se tiene:

$$e = 4,44 F \cdot N \cdot f \cdot \phi_{\max} \quad \text{ó lo que es lo mismo}$$

$$e = 4,44 \cdot F \cdot N \cdot f \cdot B_{\max} \cdot A \text{ voltios} \quad (2.50)$$

Donde:

N, espiras por voltio

F, factor de forma (1,11 para onda senoidal).

f, frecuencia en Hz.

B_{max}, introducción magnética max. del material magnético.

$$\left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right]$$

A, sección del núcleo en m².

e, tensión de terminales de la bobina considerada (volt.).

Se sabe que la sección del núcleo es función de la potencia total del transformador, en este caso la potencia de consumo es muy baja de manera que se puede partir de cualquier sección. Por lo tanto la sección es conocida. [13]

También es conocido el factor de pérdida de transformación que también es función de la potencia del transformador y que a menor potencia mayor es este factor, variando de acuerdo a una curva similar a la presentada en la figura 68.

Tomando por seguridad un factor 1,5, se calcula el número de espiras por voltio del secundario a partir del primario para lo cual;

$$N_{\text{sec}} = f_p \cdot N_{\text{pri}} \quad (2.51)$$

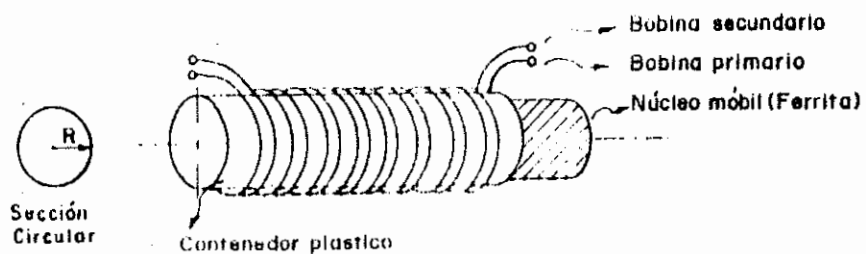


Figura 67. Elementos del transformador de núcleo variable.

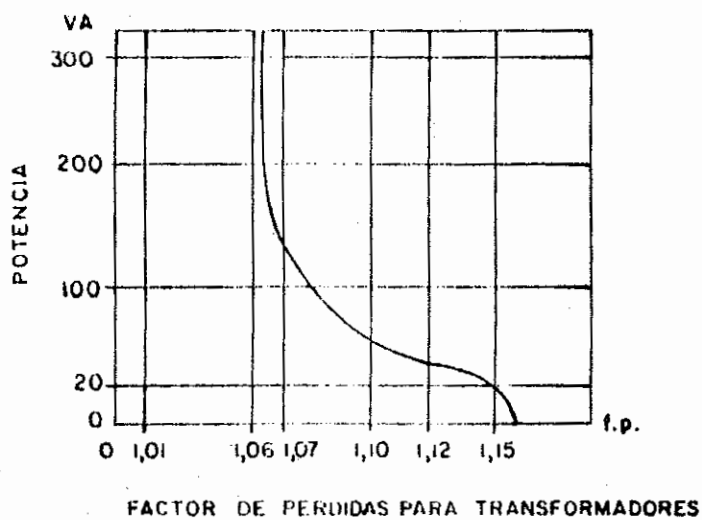


Figura 68. Potencia vs factor de pérdida para transformadores.

Donde:

N_{pri} , número de espiras por voltio del primario. N_{pri} se puede calcular con:

$$N_{pri} = \frac{10^8}{4,44 f \cdot A \cdot B_{max}} \quad (2.52)$$

en sistema (c.g.s.)

Donde:

f en Hz

A en cm^2

B_{max} en gauss.

El número de cable a usarse se recomienda de 30 - 32 AWG. Su cálculo no es necesario debido a que la potencia del transformador es baja.

Se debe tomar en cuenta, además que la frecuencia de alimentación es alrededor de 1.000 Hz.

Teniendo ya el transformador (Tr4) (ver figura 69) se puede calcular el circuito completo para obtener V . Del circuito de esa figura se puede obtener su ecuación básica:

$$V = \frac{(V_p - V_{S1})(R_{74} + P_{15})}{R_{70}} \quad (2.53)$$

Si:

$$R_{70} = R_{72}$$

$$R_{73} = R_{74}$$

$$P_{15} = P_{13}$$

De tal manera que al variar simultáneamente varían la ganancia de A_{17} . Esta ganancia se la obtiene del análisis del lazo de control del sistema total.

Para obtener el voltaje de referencia (igual a V_{S1} del transformador en estado estacionario, se usa el zener Z_5 , R_{71} y P_{12} , teniéndo se que:

$$(54) \quad R_{71} = \frac{V_{CC} - V_{Z5}}{I_{Z5}} \quad (2.54)$$

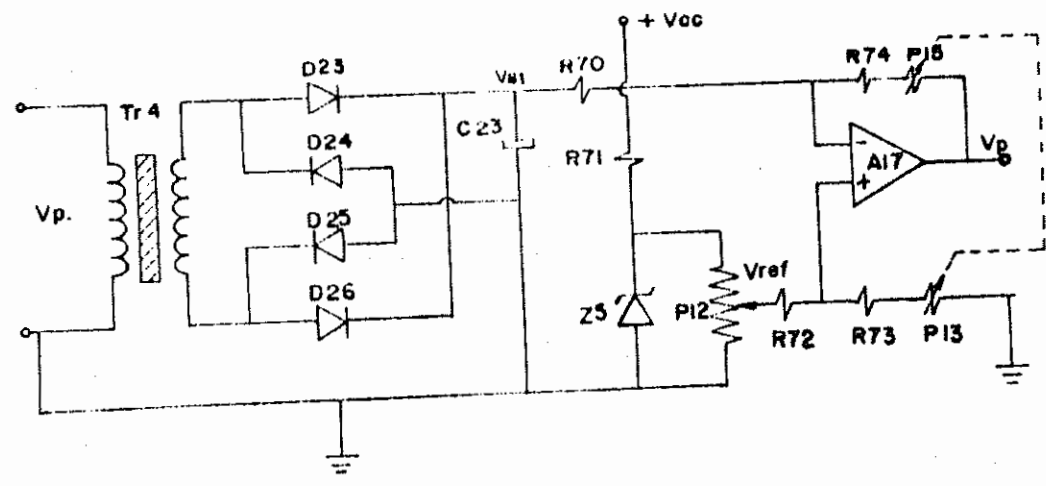


Figura 69. Circuito para el transductor de desplazamiento a base de Transformador de Núcleo Variable, para captar la señal de desplazamiento a la salida del servomotor eléctrico.

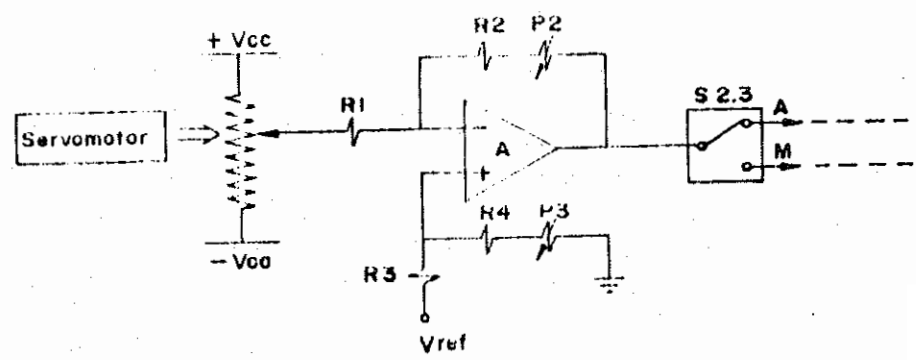


Figura 70. Circuito para el transductor de desplazamiento a base de Potenciómetro.

Donde: I_{z_5} será valor intermedio entre máximo y mínimo que z_5 permite.

$$P_{12} = \frac{V_{z_5}}{I_{p_{12}}} \quad (2.55)$$

Donde:

$$I_{p_{12}} = \frac{I_{R_{71}}}{10}$$

Para obtener un valor medio de V_{s_1} se usa el capacitor C_{23} :

$$C_{23} \approx \frac{i \cdot \text{carga}}{V \cdot t} \quad (2.56)$$

Donde:

V = voltaje pico - pico de rizado, y

$$t = \frac{1}{2f}$$

Ya que es rectificación de onda completa.

Los diodos D23 a D26 deben soportar el voltaje pico inverso ($>V_{cc}$) y una corriente del orden de los mA, por lo que pueden ser pequeños.

En cuanto al voltaje del zener Z_5 se refiere, debe ser mayor o igual a V_{s_1} max, que es capaz de generar el transformador Tr_4 .

Para el caso de la segunda alternativa en el que el desplazamiento - se sensa en base a un potenciómetro, se usa el principio de servo-potenciómetro, que es el desplazamiento de un potenciómetro. El potenciómetro debe variar su resistencia en relación lineal al desplazamiento (potenciómetro lineal) y ésta es alimentada con voltajes $+V_{cc}$ y $-V_{cc}$ en sus extremos. La resistencia es plana y alargada aunque susceptible a dañarse con polvo, aceite, agua, etc. pero resulta de fácil montaje. Se puede usar una resistencia helipot (potenciómetro helicoidal) de 10 vueltas, que minimiza daños, su montaje eléctrico implica la toma de señal de giro del motorcito rotacional.

Para el cálculo se ha escogido la resistencia plana alargada.

El circuito de la figura 70 no aparece en el diagrama general del circuito (plano general), pues en él se ha representado el transformador de núcleo variable.

A la salida del operacional A se tiene:

$$V_A = \frac{(V_{erf} - V_p)(R_2 + R_2)}{R_1} \quad (2.57)$$

Cuando:

$$R_1 = R_3$$

$$R_2 = R_4$$

$$P_2 = P_3$$

El potenciómetro P_{14} podría ser de 10 K.

$$\frac{V_a}{V_p \text{ min}} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (2.58)$$

Y, $(P_2 \text{ max} + R_2)$ daría el máximo valor de la ganancia. La salida de A va al selector S2.3 que bifurca hacia las operaciones manual/automático.

3.12.6. Oscilador senoidal

En el caso de que se use el transformador de núcleo variable, para - transductor de desplazamiento es necesario alimentar las bobinas del primario con una onda sinusoidal estable, como se mencionó anteriormente. La ubicación del circuito correspondiente se puede observar en el diagrama del circuito general, (ver plano general) y es el presentado en la figura 71. [11]

A la salida del A12 se tiene una onda cuadrada y a la salida de A13 una onda triangular, (ver figura 72).

La salida de toda la red será aproximadamente igual a:

$$VA_{14} = VA_{15} = VA_{14}' \cdot \text{sen} \left[\frac{(\pi \cdot VA_{13})}{(2 \cdot A_{13}')} \right] \quad (2.59)$$

Donde el apóstrofe indica valor máximo. Esto es válido dentro del margen, $- VA_{13}' \leq VA_{13} \leq VA_{13}'$.

Para pequeñas tensiones se tiene que:

$$VA_{14} = - \frac{(VA_{14}' \cdot \pi)(VA_{13})}{2 \cdot VA_{13}'} \quad (2.60)$$

Es conveniente elegir para VA_{14}' un valor tal que:

$$VA_{14}' = \frac{2 \cdot VA_{13}}{\pi} \quad (2.61)$$

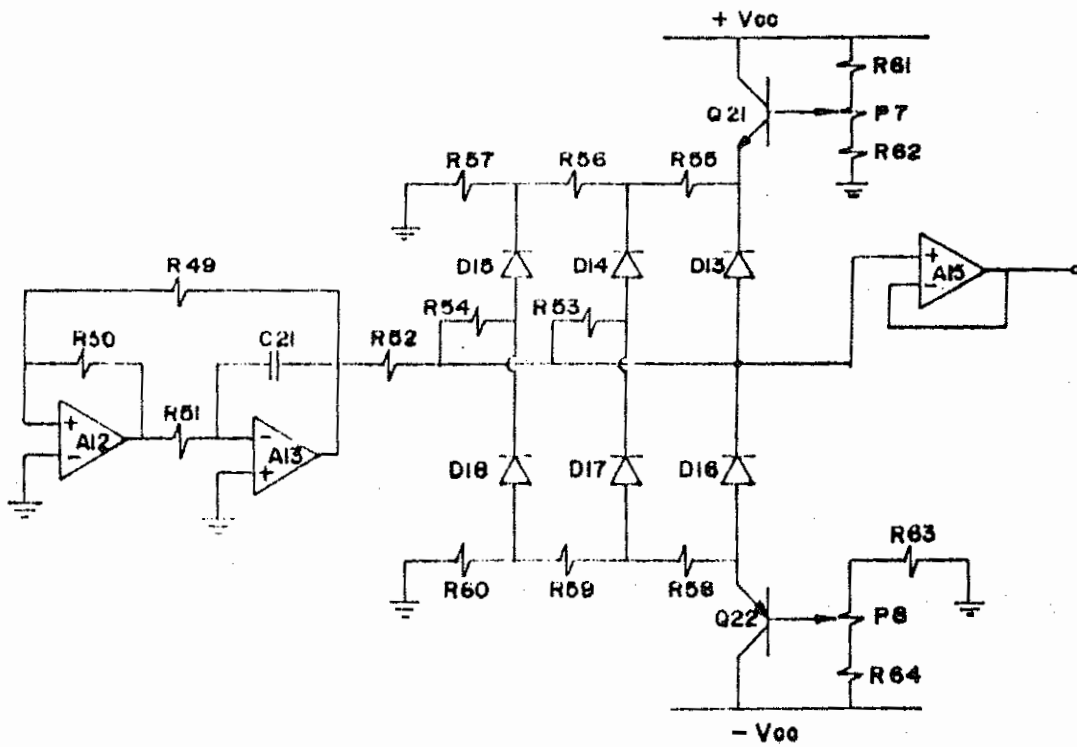


Figura 71. Circuito del Oscilador Senoidal.

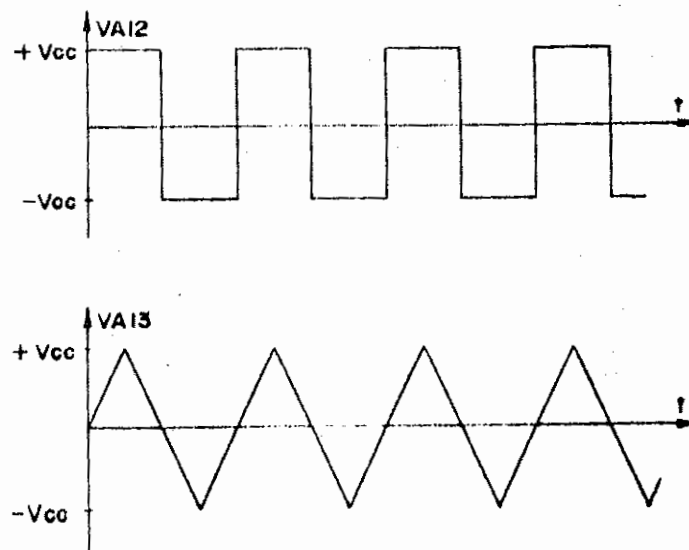


Figura 72. Ondas de salida de los amplificadores operacionales A12 y A13 respectivamente,

La onda de oscilación, de las curvas anteriores, está dada por:

$$T = \frac{4 \cdot R51 \cdot C21 (R50)}{(R49)} \quad (2.62)$$

La onda triangular es la que se aplica a través de R52, al circuito que generará la onda senoidal, que se basa, su funcionamiento en el principio de aproximación por partes.

Con pequeñas tensiones de entrada (VA13), todos los diodos están polarizados inversamente y VA14 = VA15 = VA13, tal como se busca. Cuando VA13 > V1, el diodo D15 conduce. VA14 aumenta entonces lentamente a causa del divisor de tensión R52 y R54. Cuando VA13 > V2, la salida de la red con R53, debido a que D14 conduce, por lo que el aumento de tensión se retarda aún más. El diodo D13 produce finalmente la tangente horizontal en la senoide. Los diodos D16, D17, D18 cumplen cosa similar en la parte negativa de la curva seno. Considerando que los diodos no comienzan a conducir repetidamente, sino que tienen característica exponencial, se puede tener bajo factor de distorsión con el pequeño número de diodos. [11]

Para obtener los parámetros de la red, se comienza a elegir los puntos de codos en que cambia la pendiente de la línea poligonal o curva, aproximada (triangular). Se puede demostrar que los primeros n armónicos impares desaparecen si se asignan $2n$ puntos de codos a los siguientes valores de la tensión de entrada.

$$VA13K = \pm \frac{(2K)}{(2n+1)} \cdot VA13' \quad (2.63)$$

Para $0 < K \leq n$.

K, entero, de acuerdo a las ecuaciones (2.59) y (2.60) las correspondientes tensiones de salida son:

$$VA14oK = \pm \frac{2}{\pi} VA13' \cdot \text{sen} \left(\frac{K\pi}{2n+1} \right) \quad (2.64)$$

Para $0 < K \leq n$

Por lo tanto la pendiente del segmento de línea del K-ésimo punto viene dada por:

$$m_k = \frac{VA14(K+1) - VA14(k)}{VA13(k+1) - VA13(k)} = \frac{(2n+1)}{\pi} \left(\frac{\text{sen} \pi(k+1)}{2n+1} - \frac{\text{sen} \pi k}{2n+1} \right) \quad (2.65)$$

Para $k=n$, codo de pendiente más alto, la pendiente se anula tal como se predijo. La pendiente m_0 debe ser elegida igual a la unidad.

Por razones de simetría no aparecen armónicos pares. Si se eligen $2n=6$ puntos de codo, para los armónicos impares presentes, se llega a una distorsión del 1.8%. Sin embargo, por la característica real del diodo, esta distorsión es considerablemente más baja.

Observando el circuito, los transistores Q21 y Q22 sirven como fuentes de baja impedancia para los voltajes V_3 y $-V_3$ y simultáneamente como compensación de temperatura para las tensiones directas de los diodos.

Mediante (2.61) se calcula $VA_{14'}$ y con (2.64) se obtienen las tensiones de salida. Para diodos reales en que fluye una corriente apreciable, es a polarización directa de 0,5 (V). Por lo que:

$$\begin{aligned} .V_1 &= VA_{14_01} - 0.5 \\ .V_2 &= BA_{14_02} - 0.5 \\ .V_3 &= VA_{14_03} - 0.5 \end{aligned} \quad (2.66)$$

Que definen la cadena de divisores de tensión R55, R56 y R57.

De la ecuación (2.65) se obtiene la pendiente de los tres segmentos : m_1 , m_2 y m_3 . donde $m = 0$. Eligiendo un valor de R52 tal que $1K < R52 < 10K$ se tendría:

$$m_1 = \frac{R54}{R52 + R54} \quad (2.67)$$

teniéndose R54.

La pendiente del segundo segmento es:

$$m_2 = \frac{R53 // R52}{R52 + R53 // R52} \quad (2.68)$$

Donde // representa paralelo, de lo que se obtiene R53.

En cuanto a la polarización de los transistores se procede de la siguiente manera:

Para Q21,

$$V_{cc} = V_1 + V_2 + V_3 + V_{ce} \quad (2.69)$$

$$I_c = \frac{V_3}{R_{eq}} \quad (2.70)$$

Donde V_3 se obtiene con (2.66) y $R_{eq} = R_{55} + R_{56} + R_{57}$.

Entonces:

$$V_1 = \frac{V_2 \cdot R_{57}}{R_{56} + R_{57}} \quad y \quad (2.71)$$

$$V_2 = \frac{V_3(R_{56} + R_{57})}{R_{eq}} \quad (2.72)$$

Si se elige I_c de manera que el transistor está trabajando adecuadamente frente a la temperatura, esto es I_c pequeño ($I_c < 100 \text{ MA}$) entonces se puede escoger R_{eq} y por lo tanto las demás resistencias.

Una vez elegido I_c puede calcularse las resistencias de base.

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad (2.73)$$

Teniendo en cuenta que $10 I_b = I_{R62} \approx I_{R61}$

con lo que:

$$R_{62} = \frac{(V_3 + V_{beQ21})}{10 I_b} \quad (2.74)$$

$$R_{61} = \frac{V_{cc} - V_3 - V_{beQ21}}{10 I_b} \quad (2.75)$$

Eligiendo adecuados valores de R_{61} y R_{62} se escoge el potenciómetro de ajuste (P_7) para el voltaje preciso V_3 . Este potenciómetro se elige mucho menor que R_{61} y es normalmente menor a $1K$.

Usando las ecuaciones anteriores, puede iniciarse el cálculo con el voltaje máximo requerido de la salida (onda sinusoidal) para alimentar a los transformadores, teniéndose que tomar en cuenta que el máximo voltaje de salida está fijado por máximo voltaje triangular, Ec.(2.61), y a la vez éste se fija por la fuente. En caso de requerir menor voltaje se puede aumentar un divisor adecuado a la salida del amplificador operacional A_{13} .

Para generar la parte negativa de la onda sinusoidal, se usa el transistor Q_{22} y los demás elementos involucrados. Coincidiendo por simetría, en todos los valores calculados para la parte positiva, por lo tanto.

$$R_{58} = R_{55}, R_{59} = R_{56}, R_{60} = R_{57}, R_{61} = R_{65} \quad (2.76)$$

$$R62 = R63, \quad P7 = P8$$

Q22 es complementario a Q21 (aunque no es totalmente necesario). Todos los diodos son también iguales. Los amplificadores operacionales también.

Como una alternativa en la figura 73 se presenta un circuito oscilador el cual también hace uso de amplificadores operacionales, es sencillo y genera una onda periódica sinusoidal con un bajo contenido de armónicas y permite desacoplar impedancias.

Para la condición:

$$R55 = R52 \quad \text{y} \quad R57 = R56$$

se puede determinar que:

$$\frac{V2(S)}{V1(S)} = \frac{2}{C52 \cdot R55 \cdot S} \quad (2.77)$$

con relación al amplificador operacional A1 a razón de voltajes de salida o entrada es:

$$\frac{V1(S)}{V2(S)} = \frac{-1}{R51 \cdot C51 \cdot S} \quad (2.78)$$

se puede ver en el dominio del tiempo que:

$$V2 = \frac{2}{R52 \cdot C55} \int V1 \, dt$$

$$V1 = - \frac{1}{R51 \cdot C51} \int V2 \, dt$$

reemplazando la última ecuación en la penúltima:

$$V2 = - \frac{2}{R52 \cdot C55} \cdot \frac{1}{R51 \cdot C51} \iint V2 \, dt$$

o lo que es lo mismo:

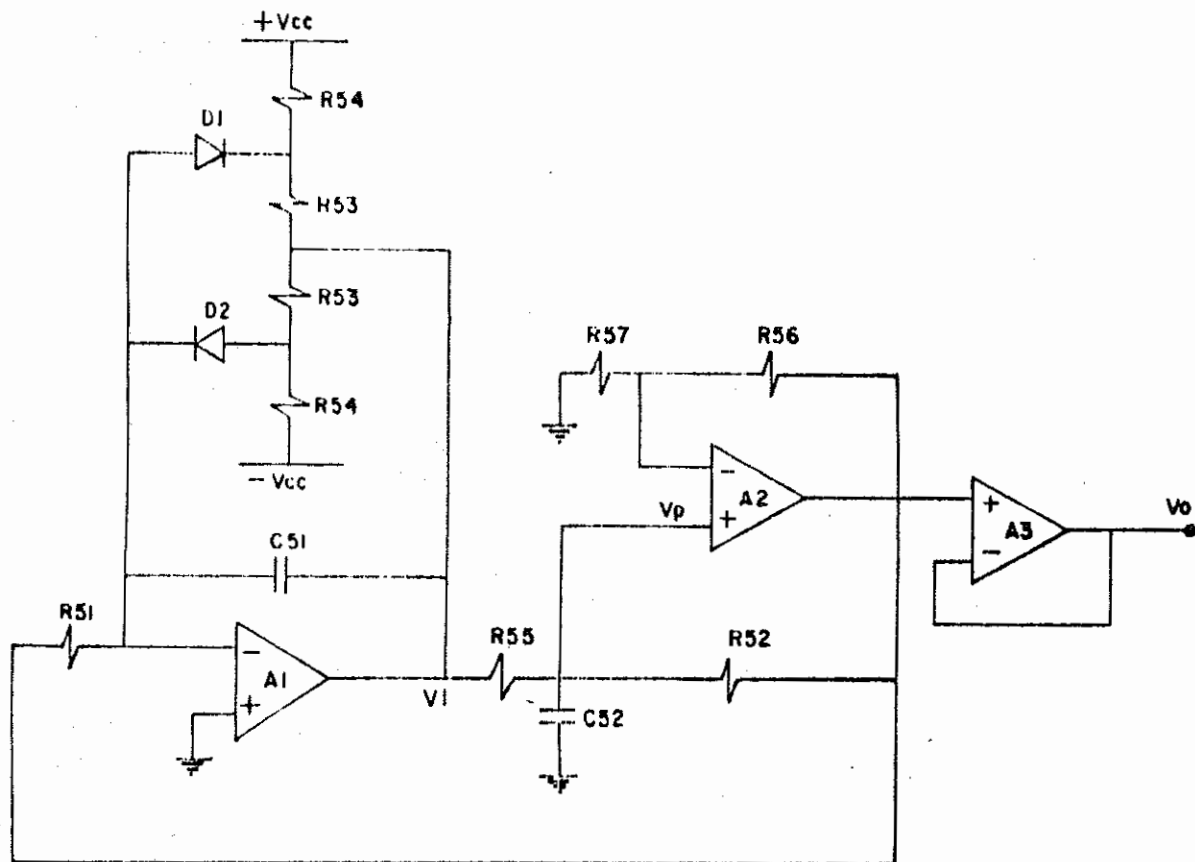


Figura 73. Circuito alternativo para el Oscilador Senoidal.

$$(R52.C55)(R51.C51) \frac{d^2 V_2}{dt^2} + 2V_2 = 0 \quad (2.79)$$

La ecuación diferencial anterior corresponde a sistema oscilador (segundo orden sin amortiguamiento), la frecuencia natural (y de oscilación) es:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2}{(R52 \cdot C55)(R51 \cdot C51)}} \quad (2.80)$$

La expresión anterior relaciona la frecuencia de oscilación con ciertas resistencias y capacidades del circuito.

R54 y R55 se ajustan para el nivel de salida deseado y limitación simétrica.

3.12.7. Transductor de potencia eléctrica consumida en la carga

Como se dijo este bloque es el que determina la característica del sistema. Es necesario realimentar el estado de potencia que se entrega, a la carga eléctrica; para lo cual, en principio se debe sensar el voltaje y corriente de las tres fases del generador eléctrico.

De acuerdo al voltaje y corriente nominal del generador (potencia nominal), puede haber la necesidad de usar transformadores de voltaje y corriente, para efectuar el senso. En este caso los transformadores son los transductores de potencia. [11][15]

Sin embargo se sabe que:

$$P = i \cdot \text{Volt}$$

Donde:

Volt, es constante a velocidad constante y regulación de campo de excitación del generador.

Por lo tanto:

$P = K \cdot i$; esto indica que, la potencia entregada depende de la corriente consumida en determinado momento. La constante K representa el voltaje de generación, de acuerdo a éste análisis el circuito debe cumplir la siguiente ecuación.

$$P = (i_A + i_B + i_C) \cdot K$$

Como se puede ver el circuito puede conseguirse mediante un simple sumador con ganancia ajustable. El circuito a usarse es el de la figura 74.

Donde:

V_A , representa a la corriente de fase A (i_A).

Algo similar acontece con: V_B y V_C .

A la salida del amplificador operacional A14 se tiene,

$$V_{POT} = - \frac{P19}{R116} (V_A + V_B + V_C)$$

Si: $R116 = R117 = R119$

3.12.8. Filtro

El circuito de la figura 75 representa al filtro.

La ecuación del filtro es la siguiente:

$$V_o = - \frac{V_i}{R102 \cdot C25 \cdot S + 1}$$

Donde:

V_i , es voltaje de entrada al amplificador operacional A18.

La frecuencia de corte es:

$$\omega_n = 2\pi \cdot f_n = 1/(C25 \cdot R102) \quad y,$$

$$T = 1/f_n = 2\pi \cdot C25 \cdot R102$$

El filtro sirve para evitar el cierre brusco del mecanismo de distribución de la turbina cuando el sistema de control actúa como seguidor.

3.12.9. Amplificador de potencia

Se ha dado ya la forma de cálculo de todos los bloques involucrados en la obtención del voltaje que comanda el servo eléctrico, ahora

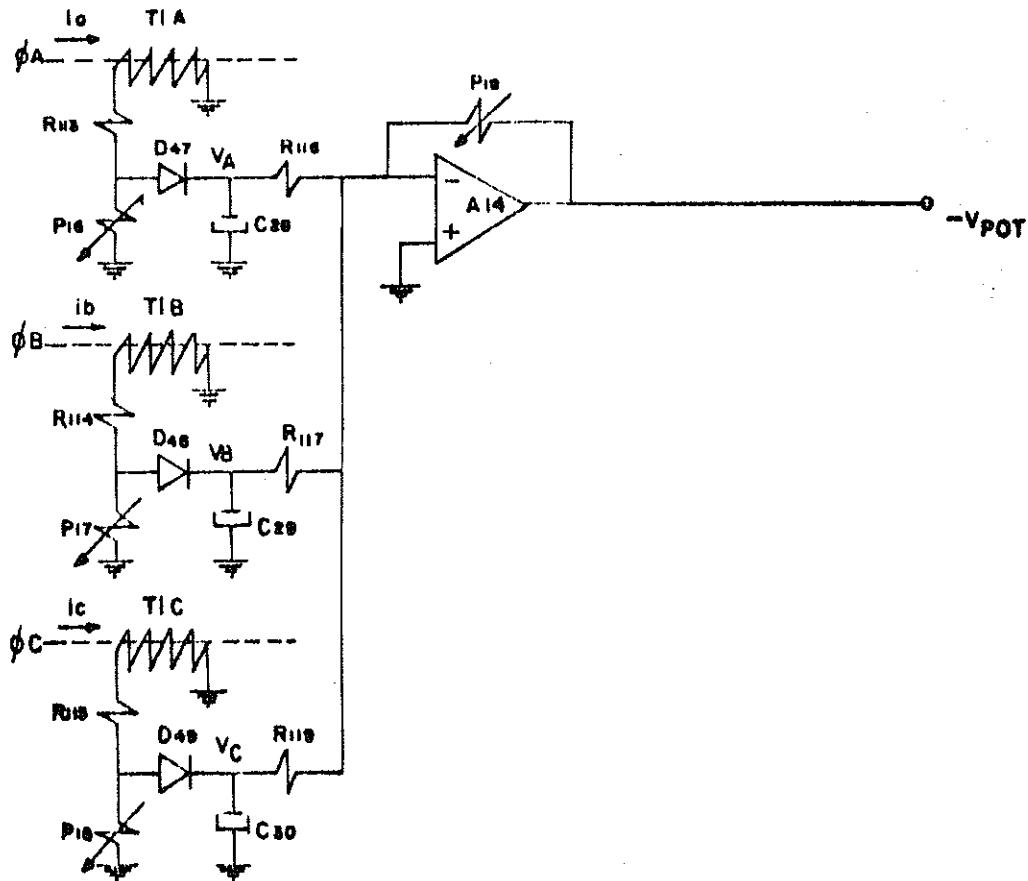


Figura 74. Circuito transductor de potencia eléctrica.

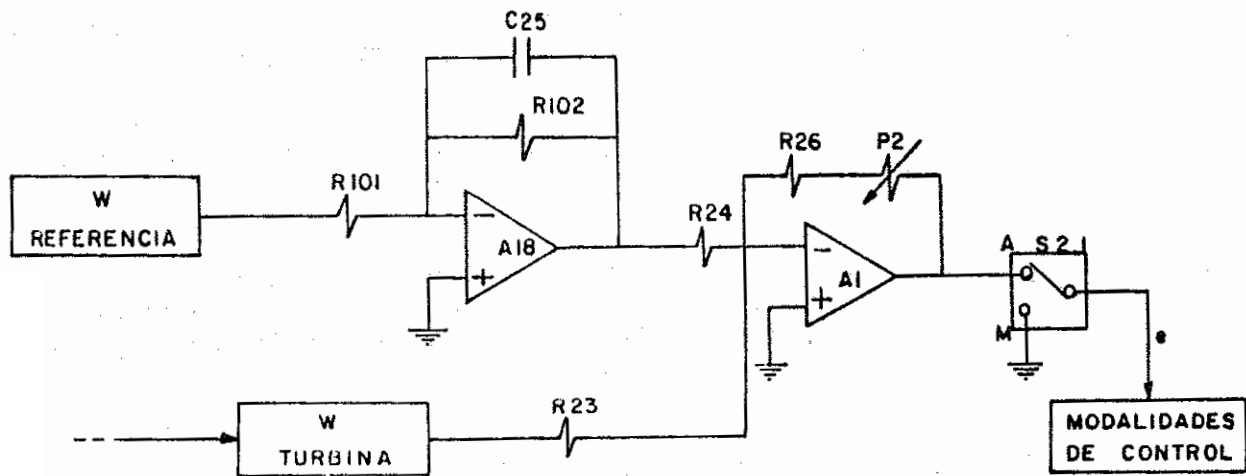


Figura 75. Filtro.

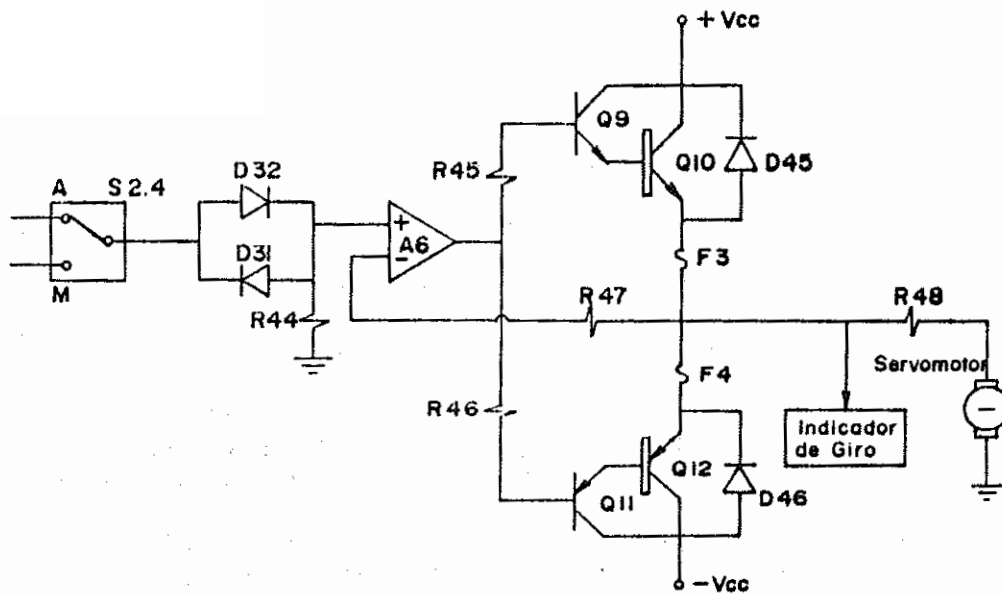


Figura 76. Amplificador de Potencia para el Servomotor Eléctrico.

es conveniente amplificarlo para manejar definitivamente al servo motor, el cual es el primer actuador del lazo de control.

El circuito usado para el efecto ya ha sido discutido y se lo ubica facilmente en el circuito general y es nuevamente presentado en la figura 76.

Esta etapa depende fundamentalmente del tipo de servomotor que se use. Es preferible que éste no requiera más de 24 VDC. La corriente que absorbe el motor (a condiciones normales), es la que fija - los transistores de potencia Q10 y Q12.

$$I_{cQ10} = I_{cQ12} = I_{servo} = K I_a \quad (2.81)$$

Donde:

K = factor de seguridad. Se llamará a su vez de prefijo Q10 o Q12, solamente el número 10 o 12 o el que sea.

El servomotor es, preferentemente, de imán permanente, por lo que el torque es proporcional a la corriente de inducido, $T = K_T \cdot I_a$, y la fuerza contraelectromotriz puede expresarse mediante:

$$E_c = V_a - (I_a R_a + BD)$$

Donde:

V_a , voltaje de inducido.

E_c , fuerza contraelectromotriz.

I_a , corriente de inducido = I_{servo}

R_a , resistencia interna del inducido.

BD, caída de voltaje en escobillas.

I_a puede multiplicarse por un factor de seguridad K lo cual en E_c . (2.81) se ha tomado en cuenta para el escogimiento de los transistores de potencia que se sobredimensiona el servomotor, también.

Haciendo BD despreciable (o compensándolo en $I_a R_a$), y considerando que el servo no alcanzará la velocidad nominal, ya que debe moverse durante corto tiempo, para corregir el error, se desprecia también E_c ; por lo tanto:

$$I_{servo} = \frac{V_a}{R_a} \cdot K \quad (2.82)$$

Entonces la potencia necesaria para los transistores Q10 o Q12 es:

$$P_Q = V_{ce} \cdot I_c = V_{ce} \cdot I_{servo}$$

Esto implica que:

$$P_Q = (V_{cc} - V_{servo}) \cdot I_{servo}$$

Por lo tanto:

$$P_Q = \frac{(V_{cc} - V_a) K \cdot V_a}{R_a}$$

$$P_Q = \frac{K \cdot V_{cc} \cdot V_a}{R_a} - \frac{K \cdot V_a^2}{R_a} \quad (2.83)$$

Derivando la expresión anterior, e igualando a cero se puede obtener la P_{Qmax} y se da para $V_a = V_{cc}/2$.

$$P_{Qmax} = \frac{K \cdot V_{cc}^2}{4 \cdot R_a} \quad (W) \quad (2.84)$$

Para terminar de especificar el transistor necesario bastaría fijar el voltaje colector - emisor, V_{ce} , de trabajo mínimo que es igual a V_{cc} . La ganancia β de corriente del transistor de potencia puede ser cualquiera pues, lo que interesa es el resultado del par Darlington, por lo que en caso de que β de Q10 o Q12 sea pequeño, se compensa con β de Q9 y Q11.

Se debe tomar en cuenta que al menos Q10 y Q12 sean complementarios.

La corriente de base de Q10 (Q12) determina la corriente mínima de colector de Q9 (Q11) y es:

$$I_{c9} = \frac{k \cdot I_a}{\beta} = \frac{I_{servo}}{\beta} \quad (2.85)$$

y a la vez $V_{ce9} = V_{ce10}$.

Además la potencia de Q9 (Q11) es:

$$P = I_{c9} \cdot V_{ce9} \text{ (mínima)}$$

R45 queda determinado por la máxima corriente de salida de A6 y es:

$$R45 = \frac{(VA6_{max} - 2 \cdot V_{be})}{IA6} \quad (2.86)$$

Si se llama β_9 a la ganancia de Q9 y β_{10} a la que Q10 se tiene que:

$$IA6 = \frac{K \cdot Ia}{\beta_{eq.}} = \frac{K \cdot Ia}{\beta_9 \cdot \beta_{10}} \quad (2.87)$$

Lo que determina al escoger un Q10 (β_{10}), la ganancia β_9 tal que:

$$\beta_{eq} = \beta_9 \cdot \beta_{10}$$

Ahora bien R54 = R4

R47 no es necesario, pero puede ser útil para mejorar las características del amplificador (introduce retardo), y podría ser de 10-50K.

Los fusibles F3 y F4 quedan determinados también por I_{servo} , con un pequeño factor de 1,2 a 1,5.

Los diodos D45 y D46 deben manejar corrientes transitorias y basta que nominalmente soporten la corriente del servomotor. Los diodos D31 y D32 no son críticos en corriente, por lo que basta tener en cuenta el $VPI \geq V_{cc}$ (VPI voltaje pico inverso) y la resistencia de polarización R44, podría estar entre 100 - 300 K (en todo caso menor que impedancia de entrada del amplificador operacional).

R48, en serie al servomotor, permite limitar ligeramente la corriente del mismo, por sus continuos arranques. Además mejora (aumenta) el torque de arranque. Su cálculo no es riguroso ya que en este tipo de máquinas eléctricas, por fabricación tienen buenas características de torque en el arranque. Basta que R48 esté entre 0 - 10 Ohm y su potencia sería:

$$PR48 = K1 \cdot R48 \cdot Ia^2_{max} \quad (2.88)$$

Donde:

K1, factor de seguridad, $1 < K1 \leq 2$.

3.12.10. Indicador del sentido de giro (del servomotor)

Esta etapa es opcional. Básicamente es un comparador con lazo de histéresis, pues el motor no gira a muy pequeños voltajes. Este lazo (ver figura 77) (formado por R80 y R81), podría estar entre 1 a 0,5 volt. y - 1 a - 0,5 volt. [14][15][17]

Al punto V- de A7 ingresa la porción de voltaje que mueve al servo. $V_{-max} = V_{cc}/2$, y podría sensar a los voltajes en que el servo empieza a girar.

$R78 = R79$ y podría elegirse un valor mayor o igual a 100 K pero menor a impedancia de entrada del amplificador operacional. (2.89)

Con $V_{A7} = +V_{cc}$ (cuando V_{servo} no es igual a cero), en $V+$ se tendría:

$$V+ = \frac{V_{cc} \cdot R80}{R81 + R80} = 0,5 \text{ volt.} \quad (2.90)$$

y eligiendo $R80$, basta despejar $R81$ para determinarla.

$R82$ limita la corriente del LED's $L6$ y $L7$ y es:

$$\frac{V_{cc}}{I_{A7\max}} \leq R82\min \quad \text{y} \quad R82 = \frac{V_{cc}}{I_{LED}}$$

Donde:

$$I_{LED} = 10 - 15 \text{ mA.}$$

Por lo tanto:

$$\frac{V_{cc}}{I_{A7\max}} \leq R82 \leq \frac{V_{cc}}{I_{LED \min}} \quad (2.91)$$

3.12.11. Control Manual

La localización de este circuito se observa claramente en el diagrama general y es representado en la figura 78.

Los potenciómetros $P3$ y $P4$ son mayores o iguales a 10K.

Los diodos $D27$ y $D28$ tienen como resistencia de polarización a $R38$ cuyo valor es mayor o igual que 100 K; lo mismo sucede con $R39$ para $D29$ y $D30$. El VPI de los diodos es mínimo de V_{cc} y su corriente mayor o igual $V_{cc}/R36$. Se tiene además que $R36 = R37$.

El voltaje de salida del amplificador operacional es:

$$V_{A11} = - \frac{V_{P3} \cdot R42}{R36} - \frac{V_{P4} \cdot R42}{R37} - \frac{V_P \cdot R42}{R40}$$

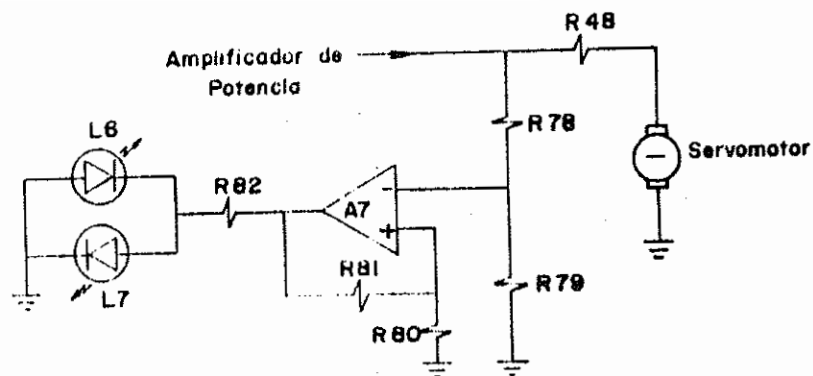


Figura 77. Circuito del Indicador del Sentido de Giro del Servomotor Eléctrico.

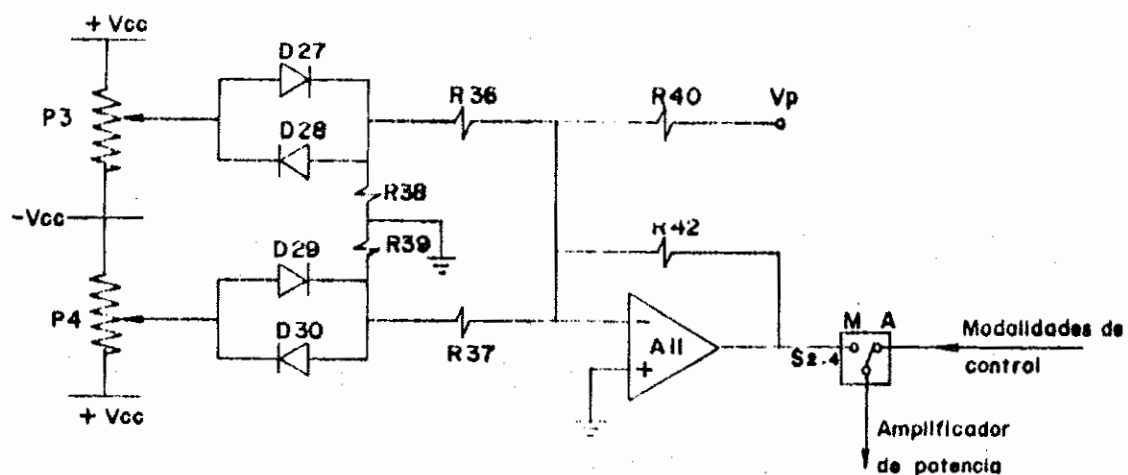


Figura 78. Circuito para el Control Manual del Regulador de Velocidad.

$$VA_{11} = - \frac{(VP_3 + VP_4) \cdot R_{42}}{R_{36}} - \frac{VP \cdot R_{42}}{R_{40}}$$

Por lo que:

$$VA_{11} = - V \cdot K_1 - V_p \cdot K_2 \quad (2.92)$$

Donde:

$$V = V_{p3} + V_{p4}$$

$$K_1 = \frac{R_{42}}{R_{36}}$$

$$K_2 = \frac{R_{42}}{R_{40}}$$

Debe tenerse en cuenta que: $-V_{cc} < V < +V_{cc}$. El peor de los casos se dá cuando V debe contrarrestar \bar{V}_p y que además exista voltaje $-VA_{11}$. Para asegurarlo es necesario que $K_1 = 1$, por lo tanto $R_{42} = R_{36}$.

K_2 depende de los valores máximos de V_p (que pueden ser negativos o positivos, en cualquier momento), pero como P_3 y P_4 pueden generar voltajes desde cero a $+V_{cc}$ o $-V_{cc}$, K_2 (sin importar V_p) puede tomar el valor de $1/2$, es decir:

$$K_2 = \frac{1}{2}, \text{ esto implica que : } R_{40} = 2R_{42}$$

Por lo tanto:

$$VA_{11} = - V - \frac{VP}{2} \quad (2.93)$$

Para valores máximos de voltaje.

Se puede entonces escoger R_{42} y el resto de resistencias quedan definidas.

3.12.12. Indicador de velocidad de la turbina

Esta etapa es realmente importante, como se dijo existen varias alternativas, y se eligió la más económica (ver figura 79).[14]

V_t es siempre positivo y menor a V_{cc} .

A_9 y A_8 están como comparadores, y teniéndose en cuenta que:

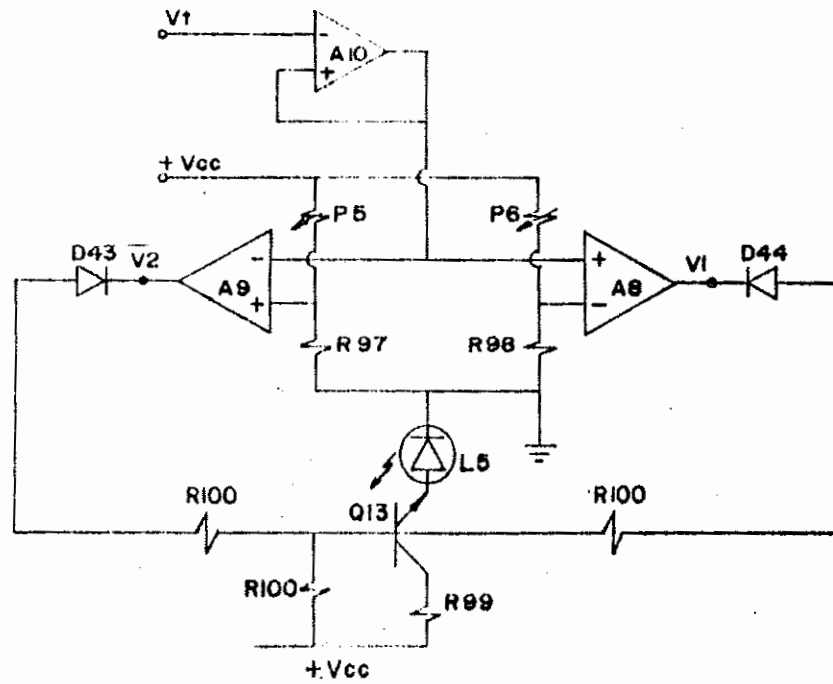


Figura 79. Circuito del Indicador de Velocidad de la Turbina.

$$V1 = 1 \text{ lógico si } Vt \geq (Vt_n - \Delta Vt) \quad \text{y}$$

$$V2 = 1 \text{ lógico si } Vt \geq (Vt_n + \Delta Vt)$$

donde ΔVt es función de Δwt (incremento de velocidad de turbina por mitido), se puede calcular para A8:

$$V- = \frac{Vcc \cdot R98}{R98 + P6} = Vt_n - \Delta Vt \quad (2.94)$$

y para A9:

$$V+ = \frac{Vcc \cdot R97}{R97 + P5} = Vt_n + \Delta Vt \quad (2.95)$$

Nótese que R97 puede ser igual a R98 y P5 puede ser igual a P6, con lo que la variación de los potenciómetros permiten obtener V- y V+ que se necesiten.

Los diodos D43 y D44 no son críticos. El transistor Q13 está polarizado para saturación, la corriente del LED L5 limita la corriente del transistor Q13. Esto implica,

$$R99 = \frac{Vcc}{I_{L5}} \quad (2.96)$$

$$R100 = \frac{Vcc}{(I_{L5}/\beta)} \quad (2.97)$$

Donde β debe tomarse en cuenta para saturación, que es menor para polarización clase A.

El transistor Q13 no es crítico, puede ser cualquiera para bajas señales.

3.12.13. Bloque de seguridad

La selección adecuada de los elementos de este bloque, depende de la potencia del motor de la bomba de aceite, pues los contactos de un relé electromecánico, son los que apagarán al motor. [4]

Básicamente este relé debe tener, bobina de 120 (V) con por lo menos un contacto principal (para el motor el RC2) y adicionalmente dos contactos auxiliares (RC3 y RC1) para la alarma y desactivar el control automático.

"SM1 y SM" son switch's con palanca incluida, con contactos normalmen

te abiertos; deben soportar 120 (V) con una carga alrededor de 1Amp éstos son los que alimentan la bobina del relé RC.

3.12.14. Fuentes de polarización

El circuito de la fuente de polarización se presenta en la figura 80. Siendo I_1 la corriente de carga, se tiene en la base del transistor Q1, la misma corriente pero, dividida para la ganancia. [4][12][17]

$$I_{b1} = \frac{I_1}{\beta Q1} \quad (2.98)$$

I_{b1} es suministrada por el circuito lineal de regulación de voltaje (LM--), donde:

$$R6 = \frac{(V_{LM} - V_{be1} - V_{cc})}{I_{b1}} \quad (2.99)$$

Donde:

V_{LM} = volt. de salida de LM---.

Además:

$$R7 = \frac{V1}{I_{R7}}$$

Pero:

$$I_{R7} + I_{b1} = I_{LM}$$

Es preferible que I_{R7} sea:

$I_{LM \max} > I_{R7} > I_{b1}$, esto implica:

$I_{R7} = 2 I_{b1}$ como mínimo, entonces:

$$\frac{V_{LM}}{I_{LM \max}} < R7 \leq \frac{V1}{2 I_{b1}}$$

C7 y C4 son recomendados por el fabricante, pero normalmente se tiene

$$C7 = 3 \text{ a } 5 \mu\text{F} \quad \text{y} \quad C4 = 10 \text{ a } 22 \mu\text{F}$$

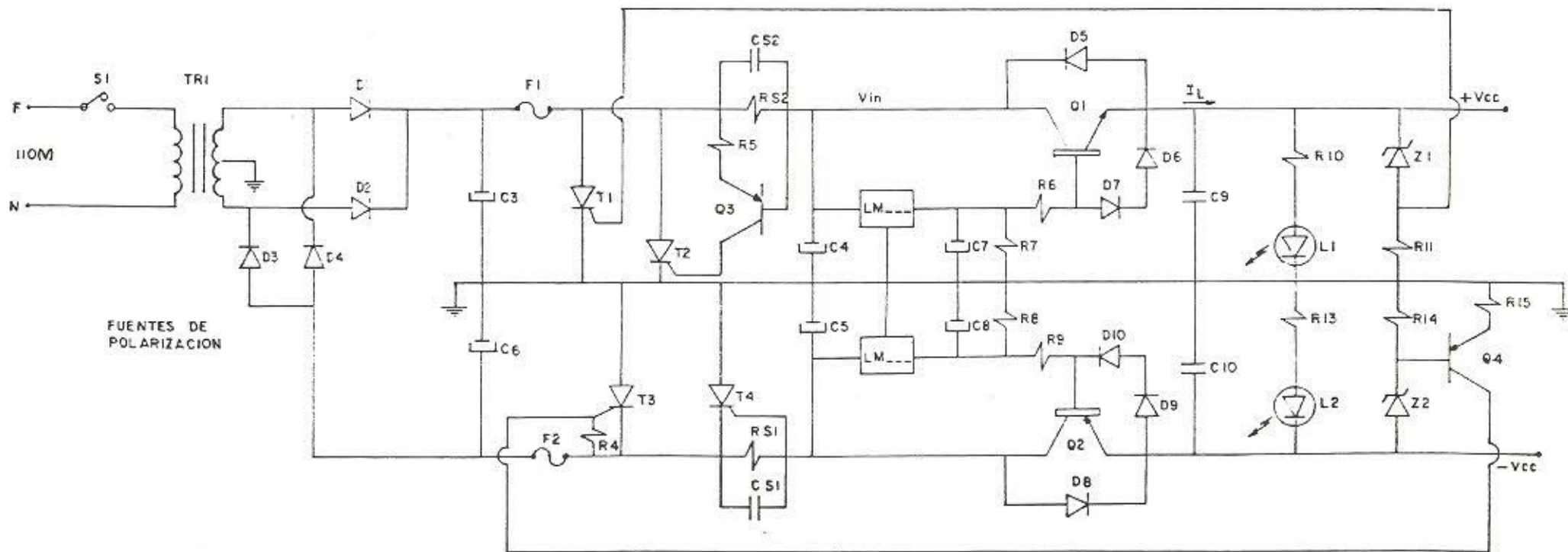


Figura 80. Circuito de la fuente de polarización.

Es posible que Q1 se deba sustituir por un par Darlington, porque puede ser que se necesite un β_1 más alto, pero en general el cálculo no cambia,

La potencia de Q1 es:

$$P1 = K1 \cdot Vce \cdot I1$$

$$P1 = K1 (Vin - Vcc)I1 \quad (2.101)$$

Donde:

$K1 = 1,5$ a 2 de factor de seguridad.

Para protección de sobrevoltaje se tiene Z1, R11 y T1; puede haber necesidad de poner resistencia de puerta - cátodo, en el tiristor T1. Si se hace:

$Vz1 = Vcc + 1$ es decir, el voltaje del zener 1 es un voltio más que Vcc , entonces el tiristor se dispara a un voltaje de $Vcc + 2$, y el fusible F1 se fundirá. (2.102)

$$R11 = 1/Iz1 \quad (2.103)$$

Donde:

$Iz1 > IG_{imin}$ (corriente de gate) y es la mínima corriente de disparo del tiristor T1.

El tiristor T1 trabajará en transitorio y por existir carga en paralelo a él no es necesario su protección (para sobrevoltaje al abrirse F1), por lo tanto su capacidad nominal basta que sea igual a $I1$ y $VPI \geq 120$ (V). Quedando así autoprotegido por sobredimensionado.

El circuito de protección de sobrecorriente está formado por: $Rs2$, $Cs2$, $R5$, $Q3$ y $T2$.

Donde:

$$Rs2 = 1/I1 \quad (2.104)$$

y $Cs2$ permite pasar transiciones de corriente que no son cortocircuito. Por lo tanto, $Cs2 \leq 1$ uF.

$$R5 \approx \frac{Vin}{IG2} \quad (2.105)$$

Donde I_{G2} es corriente de gate del tiristor 2.

Q3 es pequeño, basta un transistor para señales de algunos $I_{G2 \max}$, y $V_{ce} > V_{in}$. Además el tiristor T1 es en características igual al T2.

C9 corta altas frecuencias, de manera que puede ser del orden de pF (100 a 1000 pF).

El indicador luminoso está formado por: R10 y LED L1.

Donde:

$$R10 = \frac{V_{cc}}{I_{L1}} \quad (2.106)$$

El fusible F1 debe soportar I_1 con $k = 1,2$ de factor de seguridad.

El capacitor de filtrado de alterna, C3, es

$$C3 = \frac{q}{v} = \frac{I_1 \cdot t}{V_{iLM}} \quad (2.107)$$

Donde:

$$t = \frac{1}{2f} = \frac{1}{120} \text{ seg}$$

V_{iLM} , rizado permitido más variación de V_{in} .

$$V_{iLM} = V_r + V_{in} \quad (2.108)$$

teniendo en cuenta, para una adecuada elección de V_r , que V_{iLM} es la variación de voltaje a la entrada del circuito LM--.

Podría escogerse $V_r = V_{in}$, (iguales en magnitud) y calcular el capacitor C3.

Los diodos de rectificación D1 y D2, deben soportar la corriente de carga I_1 y tener un $V_{PI} \geq V'_{sec}$ del transformador TR1.

Los diodos D5, D6 y D7 son iguales entre sí y basta que soporten un máximo de 1 Amp. y $V_{PI} \geq 120$ (V), resultando muy común en el mercado.

Para el transformador de alterna (TR1), se tiene:

$$V'_{sec} = V'_{in} \quad \text{implicando que:}$$

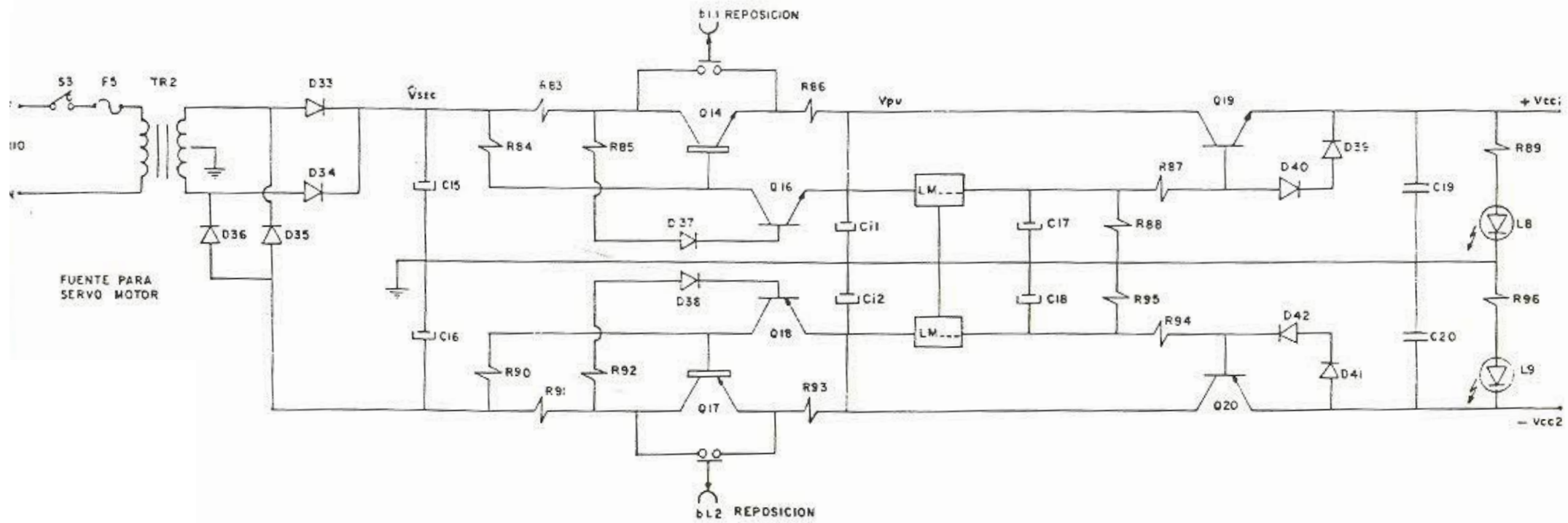


Figura 81. Circuito de la fuente para el servomotor eléctrico.

$$V_{\text{sec rms}} = \frac{V'}{2} = V_{\text{sec}}$$

La relación del transformador es:

$$\frac{V_{\text{pri}}}{V_{\text{sec}}} = n \quad (2.109)$$

Donde:

$$V_{\text{pri}} = 120 \text{ (v)}$$

La potencia del transformador será:

$$P_{\text{tr1}} = (V_{\text{sec}} \cdot I_1) \cos \phi$$

Como se desconoce $\cos \phi$, puede tomarse como la unidad y poner factor de seguridad en la potencia obtenida (por ejemplo 1,3).

$$S_{\text{tr1}} = 1,3 (V_{\text{sec}} \cdot I_1) \quad (\text{VA}) \quad (2.110)$$

siendo ésta la mínima potencia requerida.

$$P_{\text{Rs2}} = I_1^2 \cdot R_2 \quad (2.111)$$

que es la potencia de R_2 .

En forma análoga se procede con la fuente - V_{cc} , donde si todos los transistores, tiristores, son complementarios e iguales, entonces las resistencias y capacitores también son iguales.

3.12.15. Fuente para servomotor

En la figura 81 se presenta el circuito de la fuente para el servomotor eléctrico. [11][17]

Cálculo de + $V_{\text{cc}2}$:

Nótese que todos los elementos correspondientes al circuito de regulación (LM--) y al transistor de potencia Q19, más el indicador luminoso (L8), son iguales a los de la fuente de polarización (sección 3.12.14), por lo tanto el método de cálculo es igual y no se necesita repetirlo.

En esta fuente existe una variante y es el fusible electrónico for

mado por Q14 y Q16.

Potencia de Q14:

$$P14 = I1 (V'_{sec} - V_{in} - 2 I1 \cdot R86) \quad (2.112)$$

teniendo en cuenta que $R83 = R86$.

$$R83 + R86 = \frac{V'_{sec} - V_{in} - V_{ce14}}{1,2 \cdot I1} \quad (2.113)$$

Donde se escoge $1,2 \times I1$, para que Q16 no se cierre con $I1$.

$$R84 = \frac{V'_{sec} - V_{b14}}{I_L / \beta_{14}} \quad (2.114)$$

$$R85 = \frac{V'_{sec} - 2 I_L \cdot R83 - V_{ce14} - V_{in}}{I_L / (\beta_{14} \cdot \beta_{16})} \quad (2.115)$$

con $V_{in} = 0$, peor caso.

C15 y los diodos de rectificación, nuevamente tienen el mismo método de cálculo que en el caso de las fuentes de polarización.

Para la fuente $-V_{cc2}$, la forma de cálculo es análoga que para la $+V_{cc2}$, repitiéndose lo mismo que en la sección 3.12.14.

CAPITULO IV

ESTANDARIZACION

En este capítulo se hace un análisis de las características del sistema (parámetros) en base a las cuales se puede realizar la estandarización de los Reguladores Eléctrico - Electrónicos con Control Positivo de Flujo.

Por Estandarización de los reguladores se entiende el hecho de definir un conjunto de diseños de reguladores que cubran el conjunto de tipos de turbinas de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

Como posibles características del sistema, en base a las cuales se puede realizar la Estandarización, se pueden mencionar las siguientes:

1. Variación Promedio de la carga útil.
2. Exactitud de la regulación deseada.
3. Tipo y potencia del grupo Turbina - Generador.

Con relación al primer punto, conviene realizar el siguiente análisis:

De los criterios espuestos en el Capítulo II de este Manual, se pudo ver que dada una configuración inicial del regulador básica, el hecho de cambiar el esquema de control no representa mayor incremento de precio. De modo que, en este tipo de reguladores siempre y sin mayores cambios en la parte electrónica se puede llegar a definir el regulador óptimo, es decir el que mejor se desempeñe para una condición cualquiera de carga útil. En otras palabras si no se cambia el esquema de control en forma drástica (como podría ser el hecho de adoptar un esquema tipo "Feed - Forward, no el Feed - Forward de ganancia que se considera en este Manual), el esquema dado en este Manual que es, muy semejante al tipo usado para las Centrales Hidroeléctricas da lugar a una cierta calidad de Regulación Óptima y no puede mejorar más de allí. Entonces las características "variación promedio de la carga útil" no sería muy adecuada para tomarla como base en la Estandarización".

Es importante reconocer que los argumentos dados en el análisis son obtenidos en base a la forma de cálculo de reguladores de velocidad, que se basa en pequeñas variaciones de sus variables con relación a sus valores nominales. Esto es muy cercano a la verdad para el caso de las Grandes y Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, donde la variación de carga es muy baja. En las Microcentrales Hidroeléctricas de muy baja potencia esto no es cierto ya que pueden darse grandes variaciones de la carga. Así durante las primeras horas de la noche muchas viviendas y locales comerciales podrían simultáneamente

requerir de energía y esto daría lugar a grandes variaciones de la carga útil, dado el tamaño de la Pequeña Central. Para esos casos el análisis basado en el cálculo de pequeñas variaciones de las variables no sería muy correcto y convendría realizar un estudio teórico experimental de este asunto para tener más luces. En base a este estudio podría a lo mejor concluirse que la "Variación promedio de la carga útil" puede resultar un parámetro que se lo debe tomar en cuenta para realizar la Estandarización del grupo de las pequeñas centrales eléctricas de muy baja potencia. Para este caso, en la estandarización de los reguladores de velocidad, se debe considerar el hecho de dar mayor posibilidad de variación de los parámetros K_p , K_i , etc. (en la parte electrónica), de modo que los reguladores puedan adaptarse a la gran variación de la carga).

En base a los argumentos dados en el análisis anterior se puede apreciar que con el esquema de control planteado aquí, también se puede llegar a una exactitud de regulación óptima, dentro de lo que se podría conseguir sin hacer cambios drásticos en el esquema de control, sin alterar substancialmente los precios. En este sentido la característica "Exactitud de regulación" no convendría considerarla para realizar la estandarización (si se acepta el cálculo basado en pequeñas variaciones de las variables con relación a sus valores nominales).

Con relación a la tercera característica "Tipo y potencia del grupo Turbina - Generador", conviene realizar el siguiente análisis:

Es importante reconocer que un tipo de regulador de velocidad como el tratado en el presente manual, está compuesto de tres partes fundamentales. La primera es la parte puramente electrónica que casi en su totalidad es procesadora de información y no consume potencia, esta parte puede ser común para todos los reguladores de velocidad estandarizados ya que sería independiente del tamaño de la Pequeña Central Hidroeléctrica y con cierta posibilidad de adaptación en lo que se refiere al punto de realimentación de la señal de potencia generada medida, sea con la alternativa que se presenta en el presente manual (realimentación hacia la señal de voltaje a la salida del circuito PID) o sea con la realimentación a la salida del circuito comparador, esta parte electrónica pura, podría servir para los tipos más comunes de turbinas usadas en las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, cuales son: la tipo Pelton, la tipo Michell - Banki o con menos frecuencia la tipo Francis.

La segunda parte del regulador de velocidad que se considera en este Manual, es la parte "Eléctrica" que está constituida por el motorcito Eléctrico. En cierto modo su tamaño depende de la potencia de la Pequeña Central Hidroeléctrica. Pero con un buen criterio de Estandarización, se lo podría sobredimensionar en lo que a capacidad de fuerza se refiere y de esta modo podría servir para la mayoría o tal vez para todo el grupo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. En esta forma la parte Electrónica y Eléctrica podrían ser universales para casi todas o todas las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas del conjunto.

La tercera parte del regulador es la parte de fuerza constituida por los sermotores hidráulicos Piloto y de Fuerza. Esta parte sí es altamente dependiente de la potencia del grupo Turbina - Generador, de modo

que no puede ser único para todo el conjunto de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. La parte de fuerza sí necesitaría ser Estandarizada - tomando como base la característica "Potencia del grupo".

De este análisis se desprende que si se construyen reguladores de velocidad del tipo presentado en el presente Manual y se lo hace considerando que cada regulador está compuesto de tres unidades físicas separadas, la una compuesta de la o las consolas de la parte electrónica; la otra compuesta del motorcito eléctrico con sus conexiones a la consola y acoples a la parte de fuerza y la tercera compuesta de la parte de fuerza, la primera y la segunda parte podrían ser universales para todas las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas y la tercera parte se la podría diseñar y construir en grupos estandarizados dependiendo de la potencia de la Pequeña Central Hidroeléctrica. Si se procede de esta manera los costos de los reguladores bajarían, compensado el sobreprecio pagado en el sobredimensionamiento del motorcito eléctrico. Bajo estas argumentaciones se puede ver fácilmente que la característica principal sobre la cual se podría realizar la estandarización de los reguladores de velocidad sería la "Potencia del grupo Turbina - Generador".

El método para estandarizar la parte de fuerza se lo puede desarrollar tomando como base los criterios dados en el "Manual de Reguladores - Oleo - Mecánicos de Velocidad" (Volumen III, tomo I) del Manual Técnico para Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de la Olade, en su capítulo V (Estandarización y Selección).

CAPITULO V

RECOMENDACIONES PARA LA FABRICACION Y MONTAJE

PARTE MECANICA

FABRICACION DE LA VALVULA PILOTO Y EL SERVOMOTOR PILOTO.-

Esta parte ha sido copiada, con ligeras modificaciones, del "Manual de Reguladores Oleo-Mecánicos de Velocidad" (Volumen III Tomo I) del Manual Técnico para Diseño, Estandarizacion y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de la OLADE.

La válvula piloto y el servomotor piloto deberán ser fabricados como una sola unidad o en dos unidades, utilizando para su producción un proceso de fundición y empleando como material acero.

Tanto la válvula piloto que es una válvula hidráulica de cuatro vías como el servomotor piloto que es un pequeño cilindro hidráulico de doble efecto, una vez fundidos deberán ser mecanizados en máquinas herramientas para darles el acabado, dimensiones finales y las tolerancias de los agujeros que permitan un ensamble a presión de las camisas que se alojarán en ambos cilindros, en las cuales se practicarán agujeros con las roscas adecuadas para la instalación de los accesorios de las tuberías de entrada y salida del aceite.

Las camisas de los cilindros de la válvula piloto y del servomotor piloto se deberán construir en forma de bocinas utilizando como material bronce fosforoso. Su fabricación requerirá así mismo un buen acabado superficial con tolerancias adecuadas y compatibles con las tolerancias de los agujeros de los cilindros correspondientes.

Los pistones de los cilindros del sistema preamplificador se pueden producir en base a barras de acero SAE-1020 considerando el mecanizado posterior de alojamientos de vástagos de los émbolos.

Los planos de fabricación de las válvulas del sistema de preamplificación deberán poseer las siguientes características:

- Se deberá presentar un plano de ensamble general donde se indiquen las dimensiones finales y las tolerancias de las mismas que deberá tener la válvula del sistema de pre-amplificación. En este plano se deberá incluir un listado de elementos de máquinas que intervienen en el montaje, como niples de paso, sellos mecánicos - "oringe's", pernos de sujeción, arandelas, etc.
- En el plano del cuerpo del sistema pre-amplificador se deberá indicar las dimensiones finales de los radios de curvatura de su base, así como la disposición de los agujeros para las conexiones de las tuberías de aceite y los correspondientes a los anclajes. En el listado de materiales se deberá indicar las especificaciones del

material que se utilizará en la fabricación del conjunto pre-amplificador. También será necesario incluir otro plano del modelo que se utilizará para su producción mediante el proceso de fundición.

- El plano de la camiseta del cilindro de la válvula deberá indicar los niveles de acabados y las tolerancias que se requieren para un desplazamiento óptimo del émbolo de la válvula piloto. En el listado de materiales se deberá indicar las especificaciones de los materiales con los que se fabricarán estas piezas.

En el plano del pistón del sistema pre-amplificador se deberán indicar las dimensiones exteriores del émbolo incluyendo las tolerancias de las mismas, las cuales deberán ser compatibles con el agujero del cilindro. En el listado de materiales se indicarán las especificaciones del material con el que se deberá producir cada pieza.

FABRICACION DEL SERVOMOTOR DE FUERZA.-

El sistema de distribución formado por una válvula de control de aceite de cuatro vías que gobierna los desplazamientos de un cilindro hidráulico de doble efecto, denominado servomotor de fuerza, deberá ser fabricado como una sola unidad o en dos unidades, utilizando para su producción un proceso de fundición, pudiendo ser éste, de fundición maleable o acero fundido.

Una vez efectuada la fundición del servomotor y la válvula distribuidora, se deberá realizar un mecanismo interior y exterior del o los conjuntos, utilizando como máquinas - herramientas torno, cepillo y rectificadora de cilindros interiores, a fin de darles al conjunto las dimensiones finales, acabados y las tolerancias adecuadas.

En el cuerpo del servomotor y válvula distribuidora se practicarán - las secciones de paso de aceite, recomendándose efectuar los roscados interiores de éstas, en concordancia con las conexiones comerciales de tubería existentes.

Para producir los pistones de los cilindros del servomotor y válvula distribuidora, se recomienda utilizar un proceso de fundición, utilizando como material acero. Posteriormente se le dará a ambos émbolos un acabado superficial para obtener una superficie completamente lisa a fin de lograr un desplazamiento óptimo de los pistones dentro de los cilindros. Al pistón de fuerza se le practicarán, así mismo, los agujeros correspondientes al alojamiento del vástago, indicando las tolerancias y dimensiones finales. En el pistón del servomotor se efectuarán además un canal con las tolerancias y radios de curvatura adecuados para el alojamiento del sello mecánico "o-ring".

Las tapas del servomotor se pueden producir mediante un proceso de fundición, utilizando como material acero. Bajo ciertas condiciones se pueden construir las tapas también como piezas soldadas. Una vez fundidas las tapas será necesario realizar un mecanismo para darles

las dimensiones finales, así como efectuar el taladro de los agujeros para los pernos de sujeción correspondientes.

Los planos de fabricación del servomotor de fuerza deberán poseer las siguientes características:

- Se deberá presentar un plano de ensamble general donde se indiquen las dimensiones finales y las tolerancias de las mismas que deberá tener pistones y cilindros de servomotor y válvula distribuidora respectivamente. También se incluirán detalles de las uniones vástago - pistón y de las tapas al cilindro del servomotor. En este plano se deberá incluir un listado de elementos de máquinas que intervienen en el montaje, cabe decir: pernos, arandelas, empaquetaduras, etc. También se deberá incluir detalles del montaje.
- En el plano del cuerpo del servomotor se deberá indicar la disposición de los agujeros para los ensamblajes de la tapa del servomotor así mismo se indicarán las dimensiones finales de diámetros y agujeros de anclaje del servomotor. En la lista de materiales de este plano se indicará las especificaciones del material con el que se fabricará esta pieza.
- En el plano de los pistones del servomotor y válvula distribuidora se indicarán las dimensiones y tolerancias de las mismas, de los diámetros exteriores de los émbolos. Se deberá indicar así mismo las dimensiones y acabados del canal a practicar en el cuerpo del émbolo del servomotor en donde se alojará el sello mecánico "o - ringe". Se presentarán también detalles del ensamble de los vástagos a los émbolos. En el listado de materiales además de indicar las especificaciones del material con que se fabricarán los pistones se incluirán características de los sellos mecánicos, tuercas y arandelas de los vástagos de los émbolos.

En el plano de las tapas del servomotor se indicarán las especificaciones de las tolerancias y los niveles de los acabados, principalmente en la zona donde se alojará la prensa-estopa se incluirán en este plano recomendaciones para efectuar el maquinado interior del agujero donde se alojará la prensa-estopa y la base que da al interior del cilindro del servomotor. El listado de materiales contendrá la especificación del material que se utilizará para su producción.

FABRICACION DE LA BOMBA DE ENGRANAJES.-

Los elementos que conforman la bomba de engranajes son: los piñones, cuerpo de la bomba y tapas, para el primero se puede utilizar como material de fabricación acero al cromo-níquel y para los dos últimos fundición gris.

Los piñones iguales y de dientes rectos una vez tallados en fresa madre deberán ser cementados y rectificadas. Se recomienda una profundidad de la capa cementada entre (0.7 y 1) milímetro. Este tratamiento térmico de cementación exige cierta experiencia, toda vez que se trata de piñones cuyos dientes serán construídos con patrones de diseño perfeccionados.

El cuerpo de la bomba producido mediante un proceso de fundición deberá ser maquinado para obtener las dimensiones finales. Los lados que están en contacto con los piñones deberán tener un buen acabado superficial que permitan obtener una superficie lisa que evite puntos cavitantes.

Las tapas del cuerpo de la bomba se producirán en base a un proceso de fundición, utilizando como material hierro fundido; una vez fundidas deberán ser maquinadas para darles el acabado y dimensiones finales. Es necesario agregar que estas tapas servirán así mismo de soportes de los rodamientos de la bomba de engranajes. Los cojinetes de los ejes de rotación de la bomba, son anillos de bronce fosforoso que van montados en el cuerpo de la bomba y su fabricación sólo requiere de un buen acabado superficial con tolerancias adecuadas.

En el plano de montaje general de la bomba de engranajes, se hará referencia a los planos donde se detallan las especificaciones, tolerancias y acabados de cada pieza de la bomba. En este plano se deberá incluir detalles de montaje especificándose las tolerancias requeridas.

En el plano de los piñones se indicarán especificaciones de construcción como: número de dientes, módulos y paso diametral, así como el proceso de fabricación de los dientes y posterior tratamiento térmico. Se indicarán además las tolerancias de las dimensiones que tendrán los agujeros donde se ensamblarán los ejes de accionamiento de ambos piñones como indicación del tipo de canal chavetero. Finalmente se incluirá un listado de materiales con especificaciones del material con el que se producirán los piñones.

En el plano denominado cuerpo de la bomba se indicarán los niveles de acabados, dimensiones y tolerancias de las mismas con que se practicarán los agujeros para el alojamiento de los cojinetes así como los agujeros en donde se ensamblarán los pasadores guías. Se indicará así mismo la posición de la sección de succión y descarga para el ensamblaje de las tuberías de aceite así como el alojamiento de los sellos mecánicos para el ensamblaje hermético del conjunto. En el listado de materiales de este plano se indicarán las especificaciones del material con que se fabricará el cuerpo de la bomba, así como el tipo de sello mecánico a utilizarse en el ensamble cuerpo-tapas de la bomba. En el plano denominado tapas de la bomba se deberá indicar las dimensiones finales después del rectificado por máquinas-herramientas, la disposición de los agujeros para los pernos de sujeción de la bomba y las tolerancias de los agujeros para un montaje a presión con las pistas exteriores de los cojinetes de las bolas del eje principal de la bomba. En el listado de materiales de este plano se indicará el tipo de material a utilizar en la fabricación de estas piezas.

El plano de fabricación de los soportes de cojinetes de la bomba deberá indicar los niveles de acabados y las tolerancias que se requieren para su ensamble con los ejes y cuerpo de la bomba. En el listado de materiales se indicará la especificación del material con que se deberá producir estas piezas.

FABRICACION DEL EJE DE LA BOMBA.-

El eje de la bomba se puede producir a partir de un eje de acero al carbono que tenga una buena resistencia a los esfuerzos de flexión.

Los planos de fabricación de este elemento deberán contener indicaciones relativas a tolerancias en los diámetros, niveles de acabados y radios de curvatura para cada cambio de sección, además indicaciones de donde se montarán los cojinetes axiales de bolas, se recomienda considerar una tolerancia que permita un ajuste a presión en el montaje.

PARTE ELECTRONICA

En esta parte se dan lineamientos acerca de la fabricación de placas y su distribución e instalación en el armario del regulador de velocidad, basándose en normas internacionales.

FABRICACION DE PLACAS

A grandes rasgos la fabricación de las placas puede dividirse en las siguientes etapas:

- a) Recepción de los materiales por parte del fabricante.
- b) Dibujo de detalle de los circuitos impresos (dibujo para fabricación).
- c) Fabricación propiamente dicha.
- d) Pruebas de las placas fabricadas.
- e) Ensamblaje de las placas de cableado impreso.

Los materiales empleados en la construcción de las placas serán fibra de vidrio aglomerado con resinas epoxídicas para el material base y hojas de cobre laminado como revestimiento metálico.

Para la recepción del material base y del revestimiento metálico es necesario proceder de acuerdo a la serie de las normas IEC 249, donde se dan lineamientos acerca de las especificaciones que deben cumplir dichos materiales, así como las pruebas de laboratorio que se deben hacer para la recepción del material por parte del fabricante.

Con relación al dibujo y diseño de detalle de los circuitos impresos se debe tomar en consideración:

- a) Normas respecto a dimensiones y tolerancia de las placas para lo cual se debe seguir los lineamientos dados en la norma BS 5954 : part 3: 1985, en la que se indica el tamaño que deben tener las placas de cableado impreso, tamaño que debe estar de acuerdo con las dimensiones de unidades enchufables y bastidores interiores (subracks).
- b) Normas relativas al diseño de detalle de las placas de cableado impreso para lo cual se pueden utilizar las normas BS 6221: part

3: 1984, la norma IEC 326 - 3, IEC 326 - 3A e IEC 326 - 4.

La fabricación propiamente dicha de los circuitos impresos debe hacerse siguiendo procedimientos de fabricación industrial de producción en serie, utilizando las técnicas de impresión o de fotografía para reproducir el esquema de los conductores (que van en la placa) sobre el recubrimiento resistente a los ácidos que se forma sobre la hoja laminada de cobre.

Una vez terminada la fabricación de las placas, previo al ensamblaje de los componentes en las mismas es necesario realizar ciertas pruebas que aseguran un control de calidad del proceso de fabricación. Para ello se deben seguir los requerimientos y métodos de prueba expuestos en la norma IEC 326 - 2, que sean aplicables al caso.

En ensamblaje de los componentes en las placas de cableado impreso debe hacerse siguiendo las guías de ensamblaje presentados en la norma BS 6221: part 20: 1984.

En las figuras 84, 85, 86, 87, 88 y 89 se presenta una alternativa de como dividir el circuito general en diferentes placas. Se debe aclarar que los esquemas presentados en dichas figuras no son dibujos para fabricación (dibujos de detalle de los circuitos impresos), sino que más bien representan esquemas a partir de los cuales se pueden realizar los "dibujos para fabricación".

Las figuras (84 - 89) fueron hechas tomando en cuenta las siguientes normas:

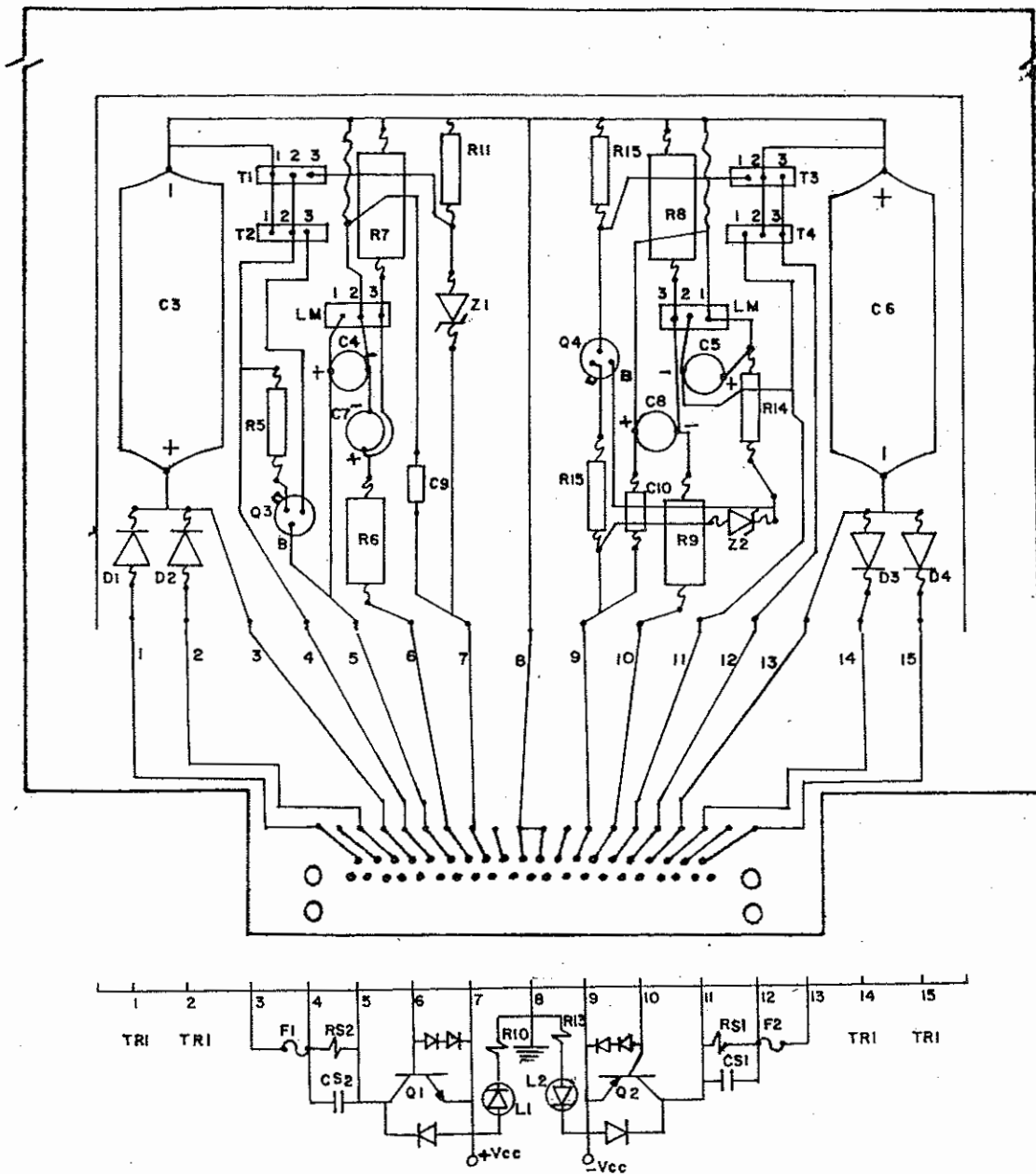
- a) BS 5954 - Part 3 - 1985 para definir el tamaño de las placas y conectores.
- b) 130 - 16 IEC - PM41P4B para especificar la parte macho de los conectores.
- c) 130 - 16 IEC - RF41P5B para especificar la parte hembra de los conectores.

En las figuras antes mencionadas cada una de las placas representa un bloque de control. Esta distribución de circuitos en placas permite minimizar fallas globales, por ejemplo si existe falla de cortocircuito en la etapa de indicación de sentido de giro del servomotor eléctrico o de la turbina bastaría retirar la placa correspondiente para sustituirla.

ARMARIO Y UNIDADES ENCHUFABLES

Todos los componentes electrónicos excepto el sensor de velocidad angular van alojados en un armario estandarizado. El dimensionamiento del armario y bastidor principal así como los paneles deben estar de acuerdo a las normas BS 5954: Part 2: 1975 e IEC 297.

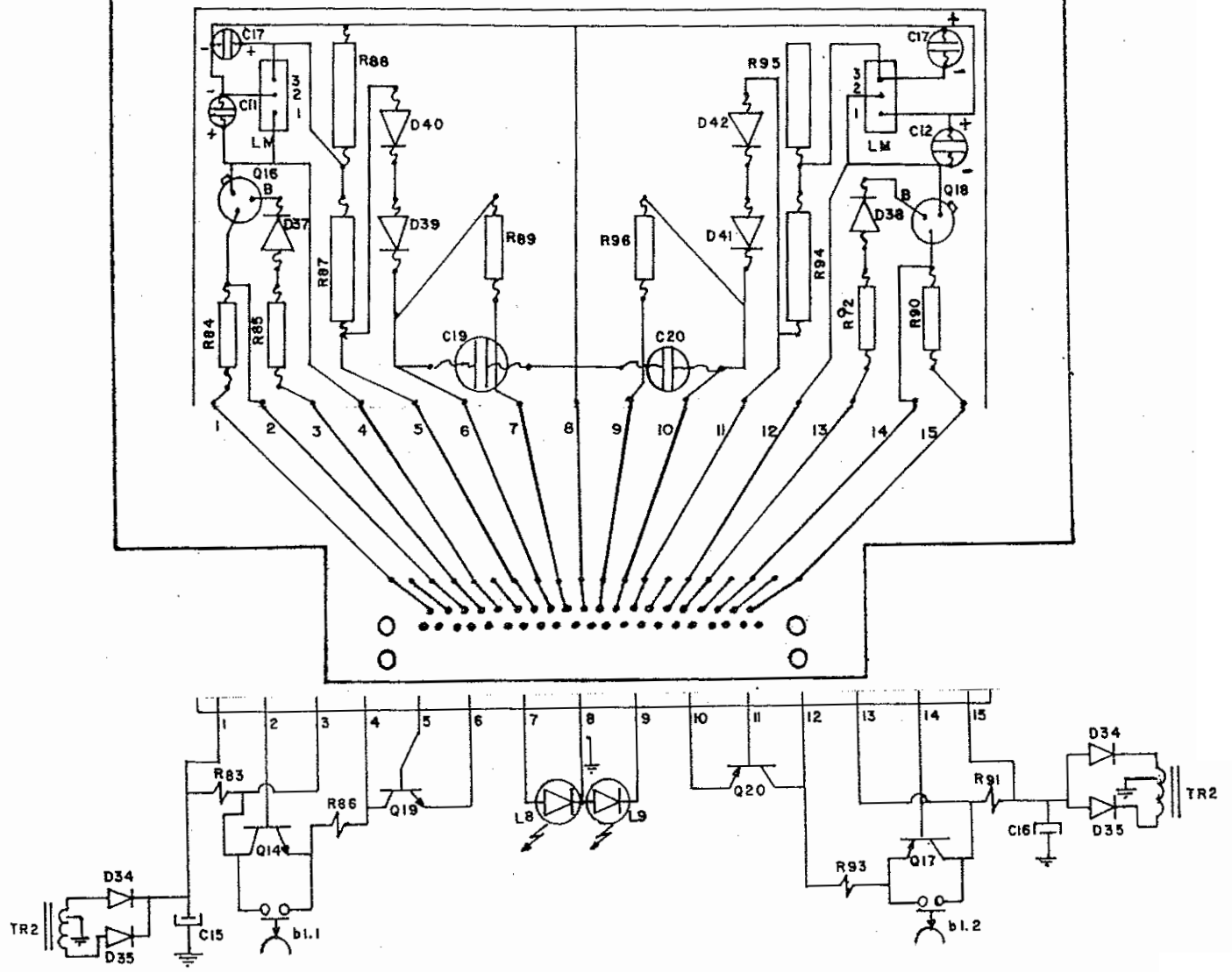
El armario en su interior tiene bastidores internos (subracks) y unidades enchufables asociadas a éstos. La disposición y número de bastidores interiores dentro del armario debe estar acorde con los elementos electrónicos del regulador de velocidad a instalarse y de posi



Se debe tener dos placas, la de polarización ($+V_{cc}$) y la de servomotor ($+V_{cc_2}$). Además los disipadores de potencia y dos transformadores.

T2, T1 pin 3 = Gate
 2 = ánodo
 1 = cátodo

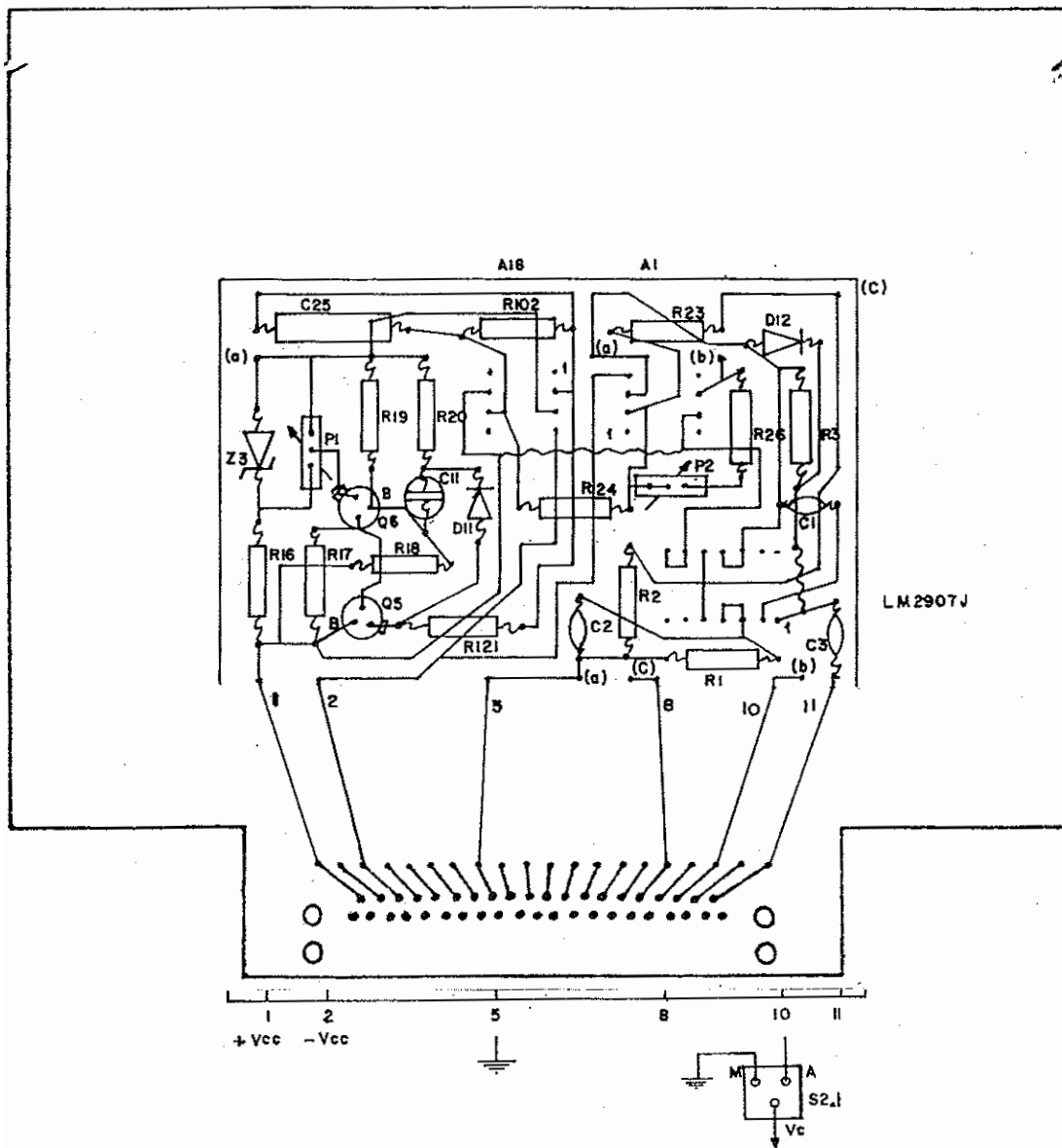
Fig. 84, Placa # 1, Placa de $+V_{cc}$ ($\delta + 15$) V), Polarización.



- Patras:
- P2.1 = Vin (voltaje de entrada), onda completa filtrada + 15 $\sqrt{2}$ (V)
 - P2.2 = salida a base de Q14.
 - P2.3 = entrada a Q16, viene de colector de Q14.
 - P2.4 = salida a colector Q19 de potencia.
 - P2.5 = salida a base de Q19.
 - P2.6 = entrada/salida de + 15 VDC regulado, va a emisor de Q19.
 - P2.7 = salida a L8 indicador de + 15 VDC.
 - P2.8 = tierra.
 - P2.9 = salida a L9 indicador de - 15 VDC regulado.
 - P2.10 = entrada/salida de - 15 VDC regulado, va emisor de Q20.
 - P2.11 = salida a base de Q20.
 - P2.12 = salida a colector de Q20 de potencia.
 - P2.13 = entrada a Q18.
 - P2.14 = salida a base de Q17.
 - P2.15 = Vin, onda completa filtrada de - 15 $\sqrt{2}$ (V)

* Q20 y Q17 se montan en disipador.
 Q19 y Q14 se montan en disipador.
 Q16 y Q18 deben ser montados con disipadores de 4 - 6 cm²

Fig. 85., Placa # 2, Placa de + Vcc2 (servomotor eléctrico)



-Patas:

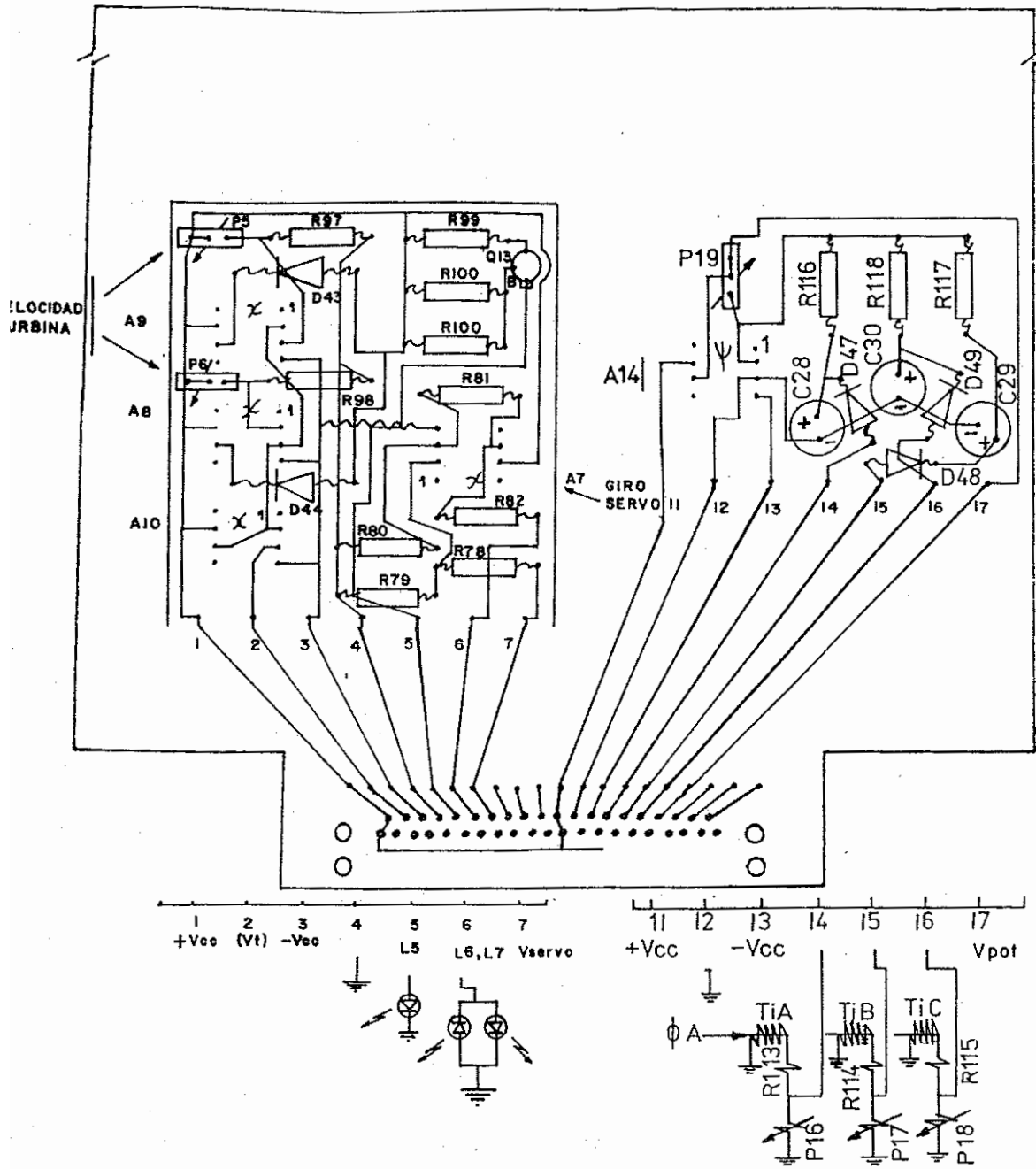
- P3.1 = + Vcc
- P3.2 = - Vcc
- P3.5 = tierra
- P3.10 = OUT (salida de error hacia llaves S2.1 de selección manual auto mático.
- P3.11 = IN (entrada) del sensor de velocidad.
- P3.8 = Vt (voltaje de estado de velocidad de turbina).

Nomeclatura:

~~~~~ puente con alambre aislado o no, por el lado donde se colocan los elementos.

- \*(a) puente con alambre aislado, uniendo todos los puntos que se indiq ue con la letra entre paréntesis.
- \*(b)

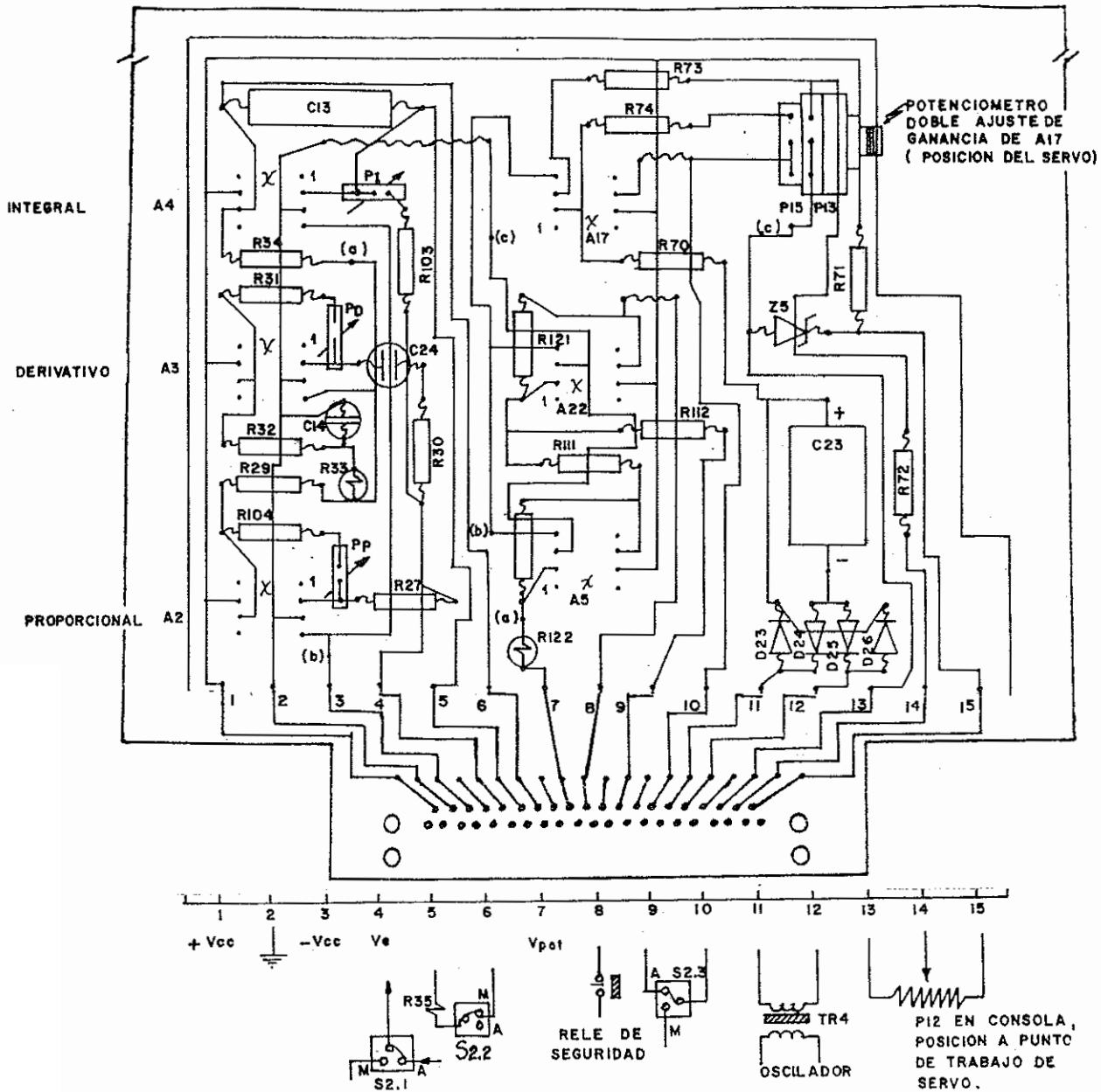
Fig. 86. Placa # 3, Placa del sensor de velocidad de la turbina, señal de referencia y error.



Patas:

- P4.1 = + 15 VDC
- P4.2 = viene de placa # 3, P3.8
- P4.3 = - 15 VDC
- P4.4 = tierra
- P4.5 = indicador LED, L5; de velocidad de turbina.
- P4.6 = indicador LED L6, L7; de sentido de giro de servo.
- P4.7 = voltaje sobre el servo motor.
- P4.14 = a transductor de corriente de ØA.
- P4.15 = a transductor de corriente de ØB.
- P4.16 = a transductor de corriente de ØC
- P4.17 = salida a pata P5.7.

Fig. 87, Placa # 4, Indicador de velocidad de la turbina e indicador de sentido de giro del servo y sensor de potencia eléctrica.



P5.4 = Ve (voltaje de error)  
 P5.8 = salida total.

\*RPE = realimentación de potencia eléctrica.


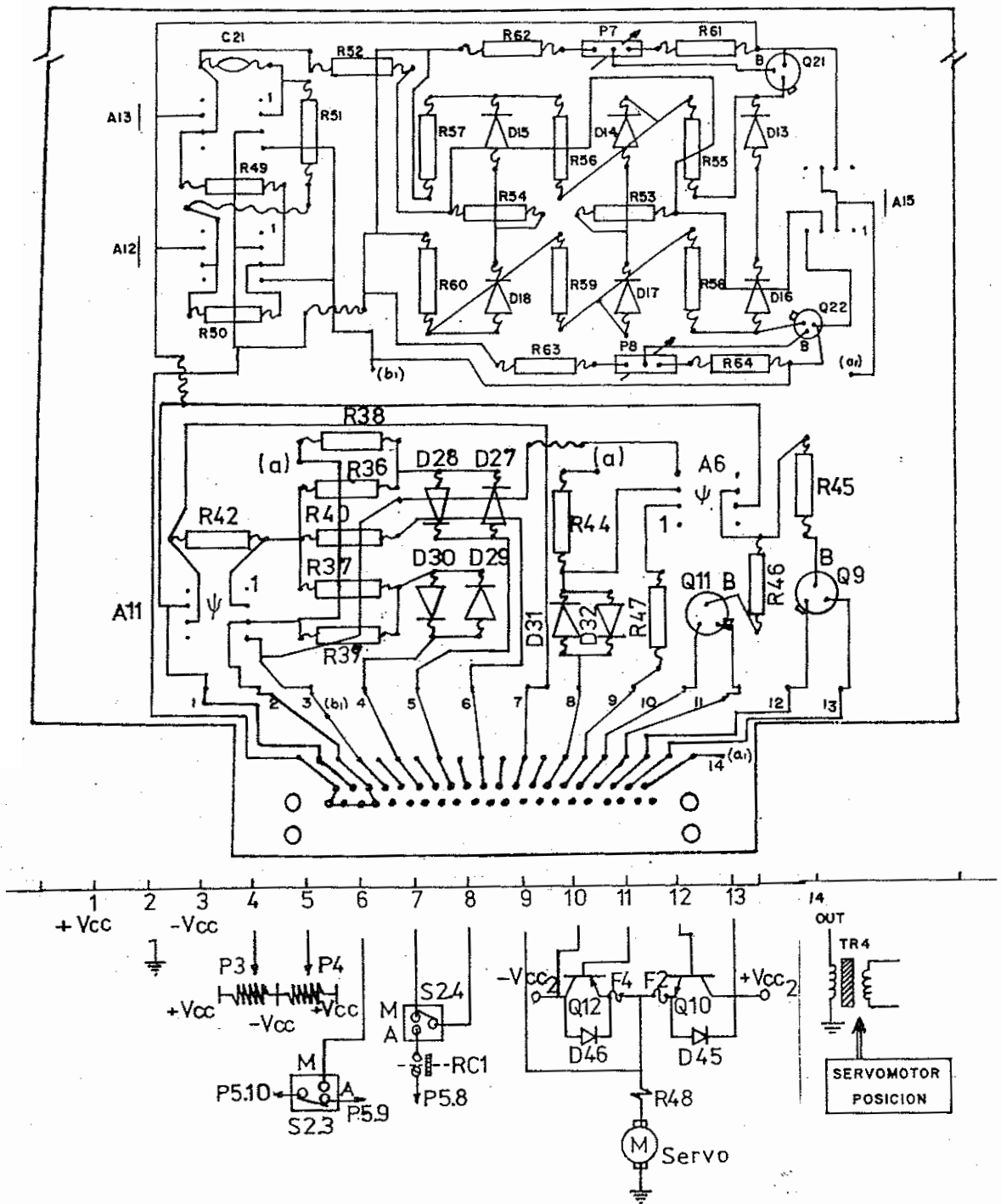
\*  = resistencia parada.

Fig. 88, Placa # 5, Acciones de control PID y realimentación de posición del servo.



P814 = salida sinusoidal, se conecta a transformador de núcleo variable.

\*Q12 y Q10 van montados en disipadores = 100cm<sup>2</sup>  
 Q9 y Q11 van montados en disipadores = 4 - 6 cm<sup>2</sup>

Fig. 89. Placa # 6, Oscilador, control manual y amplificador de potencia.



bles elementos electrónicos que puedan adoptarse en el futuro, por ejemplo un posible controlador Feedforward; o elementos electrónicos asociados a partes auxiliares del regulador de velocidad. Las dimensiones de bastidores internos (subracks) y de unidades enchufables asociadas a éstos deben estar de acuerdo en la norma BS 5954; part 3: 1985 e IEC 297 - 3: 1984.

Los tipos de conectores a usarse en los circuitos de cableado impreso, en los bastidores internos (subracks) y unidades enchufables deben estar de acuerdo con la norma IEC 603 - 2. La forma de montaje de los conectores también está especificada en la norma IEC 603 - 2.

La especificación de la posición de los conectores en las unidades enchufables se la puede encontrar en el Apéndice de la norma BS 5954: part 3: 1985.

En las figuras 90 y 91 se presenta un esquema que representa una posible distribución de los elementos electrónicos en los bastidores internos o módulos (subracks).

En la figura 92 se presenta la parte física del transductor de velocidad angular. Se muestran además dos fotos (1 y 2), la una relativa al montaje de un transductor de velocidad en una Turbina Pelton de laboratorio (Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador). La otra fotografía presenta el detalle del acople entre la varilla de realimentación con la prolongación del vástago del servomotor hidráulico. Las fotos corresponden al diseño y construcción de un regulador de velocidad electro-hidráulico, realizado como tesis de grado conjunta entre las facultades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional (Quito - Ecuador).

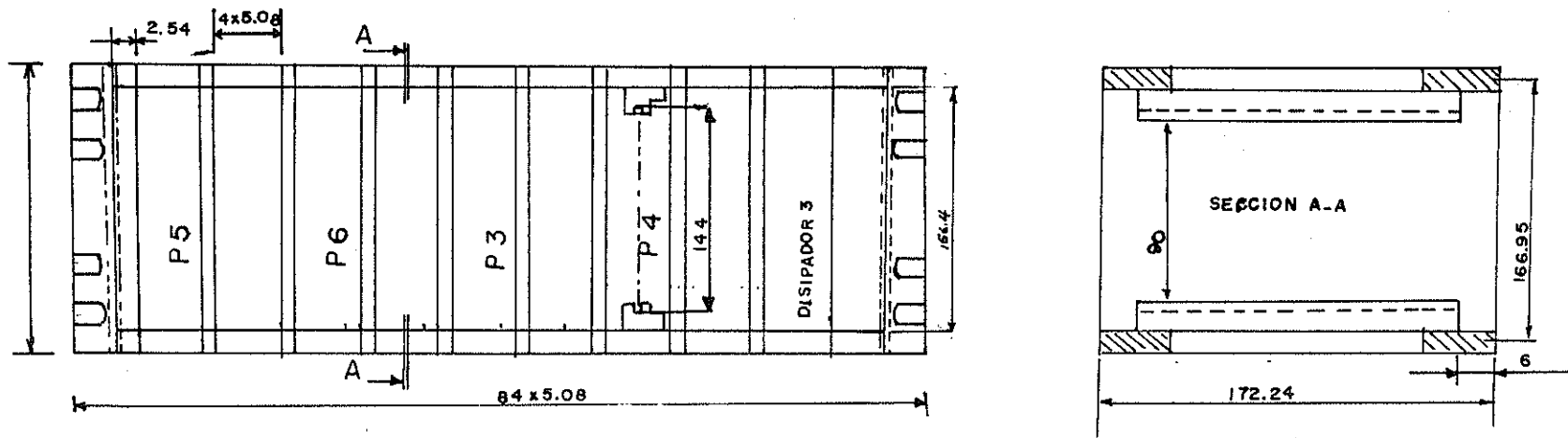


Fig. 90. Módulo de control. Vista frontal y lateral en corte.

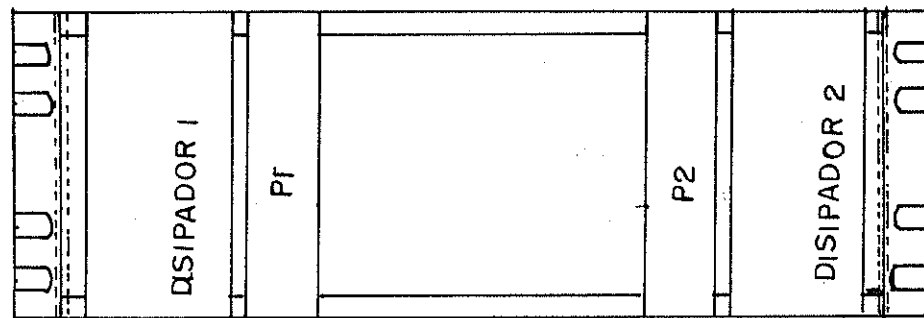


Fig. 91. Módulo de fuentes. Vista frontal.

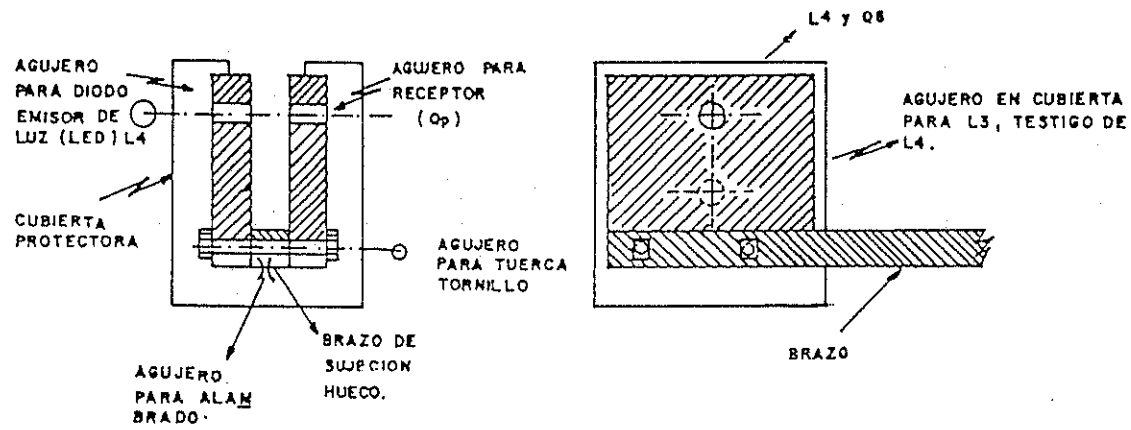


Fig. 92. Transductor de velocidad angular.

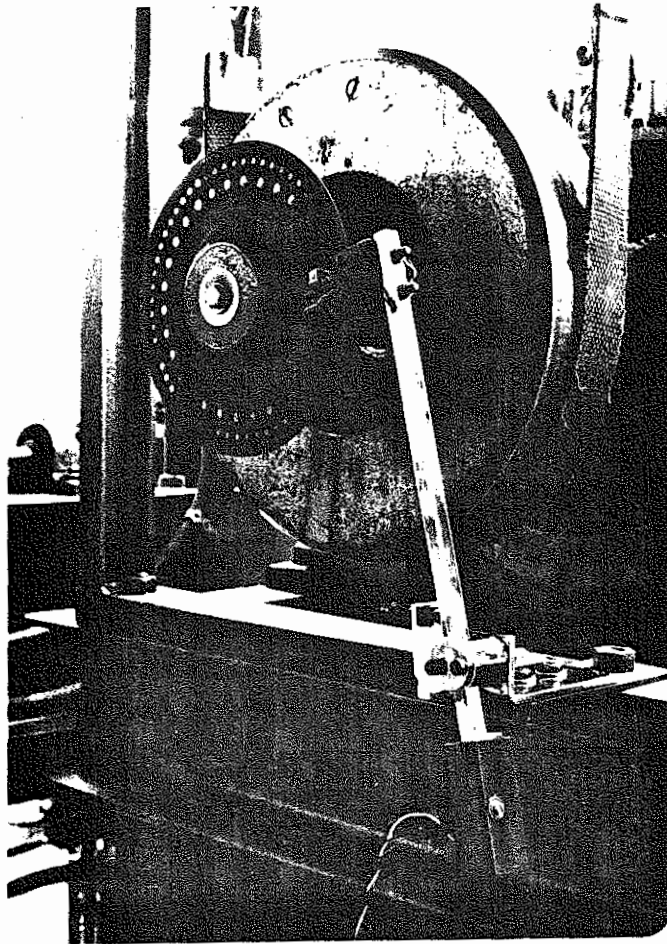


Foto 1. Transductor de velocidad montado en una Turbina Pelton de Laboratorio.

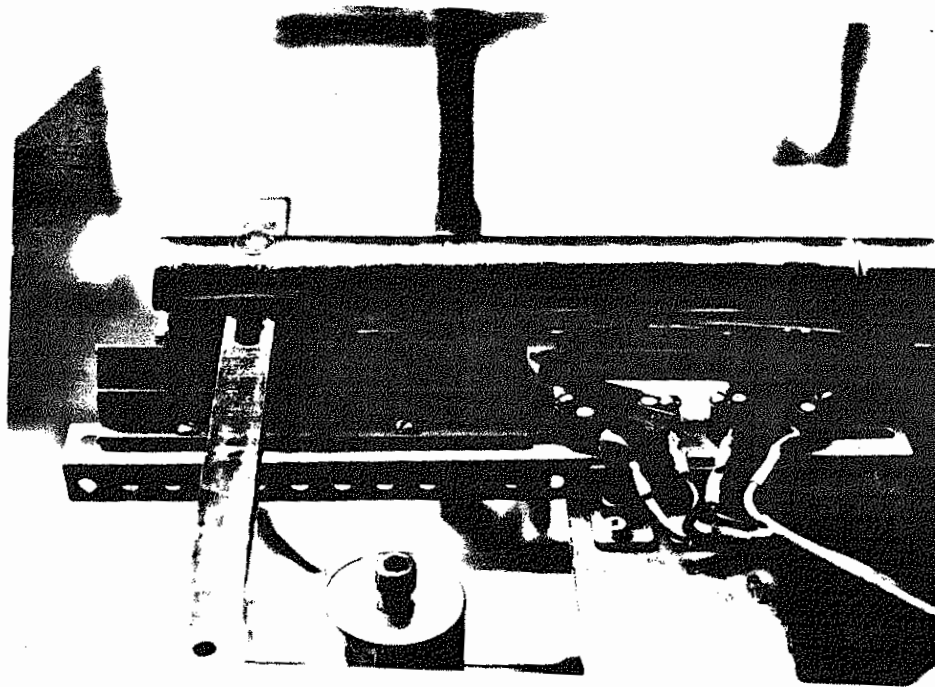


Foto 2. Detalle de la unión de la varilla de realimentación con la prolongación del vástago del Servomotor hidráulico, así como los interruptores de fin de carrera del inyector de la turbina.

## A N E X O

## EJEMPLO PRACTICO

## I. CALCULOS DE LA PARTE DE CONTROL Y MECANICA

En esta parte se presenta un ejemplo del calculo de un regulador de velocidad eléctrico electrónico con control positivo de flujo. Para el ejemplo se considera una pequeña central hidroeléctrica que está equipada con un grupo: turbina Michell - Banki Generador.

Se considera que para la regulación de caudal de la turbina dispone de un tipo de alabe perfilado. Este detalle ayuda a determinar la capacidad de trabajo del regulador de velocidad.

## A1.1. DATOS INICIALES PARA EL CALCULO

Se parte de ciertos datos básicos para el cálculo, datos que tienen que ver con:

- a) Características de la instalación hidráulica.
- b) Características de la tubería de presión.
- c) Características del grupo.

Un dato inicial extra que se necesita es la fuerza requerida para accionar mecanismo de control de caudal de la turbina.

## a) Características de la Instalación Hidráulica:

Caída Neta:  $H_0 = 90$  (m)

Caudal :  $Q_0 = 1.5$  (m<sup>3</sup>/seg)

## b) Características de la Tubería de Presión:

Material: Acero

Longitud: 270 m

Diámetro interior:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_0}{\pi \cdot V_{op}}}$$

la velocidad óptima  $V_{op} = 3$  m/seg.

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,5}{\pi \cdot 3}} = 0,8 \text{ m}$$

Espesor de la tubería de presión:

$$t_p = \frac{1,25 \cdot H_m \cdot D_p}{2 \cdot \sigma} + C_0$$

$H_m$  , salto brusco que incluye sobrepresión por el golpe de ariete.

La sobrepresión está comprendida entre un 30 - 60% de la caída neta.

$$H_m = 1,4 \times 90 = 126$$

$\sigma$  , resistencia del acero. Si el tubo es hecho de una plancha de acero cuyo esfuerzo de rotura sea de 35 a 65 Kg/mm , y se lo confecciona mediante suelda eléctrica, toma el siguiente valor.

$$\sigma = 12 \text{ Kg/mm}^2$$

$C_0$  , incremento del espesor debido a rugosidades (3 - 5 mm).

$$t_p = \frac{1,25 \times 126 \times 0,8}{2 \times 12} + 3 \text{ mm}$$

$$t_p = 8,25 \text{ (mm)}$$

c) Características del grupo:

Tipo de turbina: Michell - Banki

Potencia del grupo:

$$W_0 = 9,807 \cdot Q_0 \cdot N_0 \cdot \eta$$

$$W_0 = 9,807 \times 1,5 \times 90 \times 0,642 = 850 \text{ Kw}$$

$$W_0 = 850 \text{ (Kw)}$$

Número óptimo de revoluciones:

$$N_0 = \frac{39,85 \cdot H^{1/2}}{D_e}$$

Según el capítulo de estandarización del volumen I, para el caso presente,  $D_e = 0,4$  m correspondiente al tipo de turbina 42 B.

$$N_0 = \frac{39,85 \times 90^{1/2}}{0,4} = 945 \quad (\text{RPM})$$

$$N_0 = 945 \quad \text{RPM}$$

Número específico de revoluciones  $N_q$

$$N_q = \frac{N \cdot Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

$$N_q = \frac{945 \times 1,5^{1/2}}{90^{3/4}} \approx 40$$

Este número específico de revoluciones permite establecer que la turbina cae dentro del rango de aplicación de las turbinas Michell - Banki.

- d) Fuerza requerida para accionar el Mecanismo de Regulación de Caudal:

Se considera que el alabe directriz es del tipo mostrado en la figura A.1. (alabe directriz perfilado).

Según el volumen I, la variación porcentual momento torsor del alabe directriz tipo perfilado, con la carga; de la turbina OLADE de flujo cruzado es como la mostrada en la figura A.2.

A plena carga (posición del alabe directriz completamente abierto) se da el torque máximo sobre el eje del alabe directriz y se lo calcula así:

$$T = 31 \cdot D_e \cdot Q \cdot \sqrt{H}$$

$$T = 31 \times 0,4 \times 1,5 \times \sqrt{90} = 176,5 \quad (\text{Kg-m})$$

$$T = 176,5 \quad (\text{Kg-m})$$



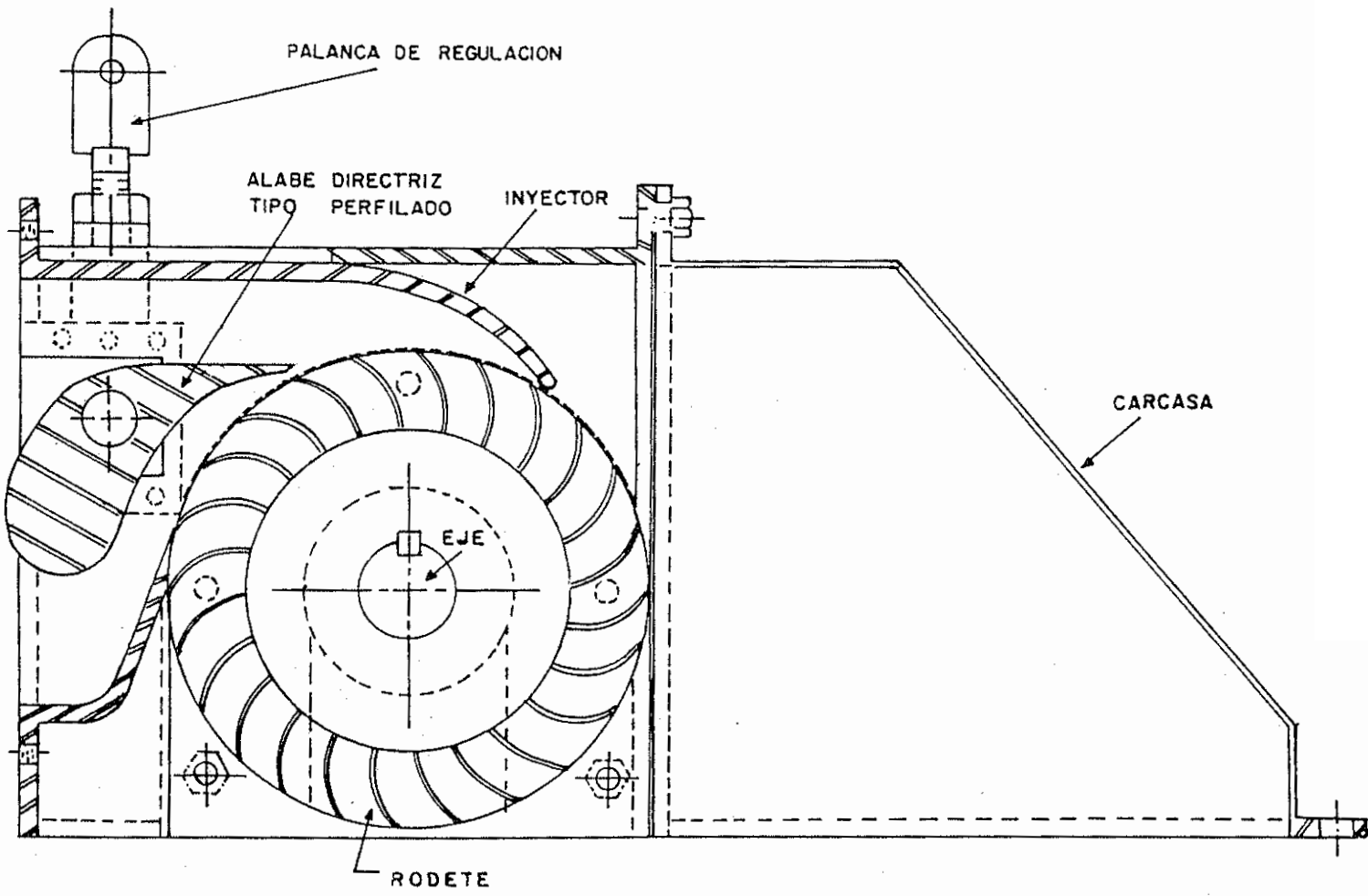


Figura A.1. Alabe directriz de tipo perfilado en turbinas Michell - Banki estandarizadas.

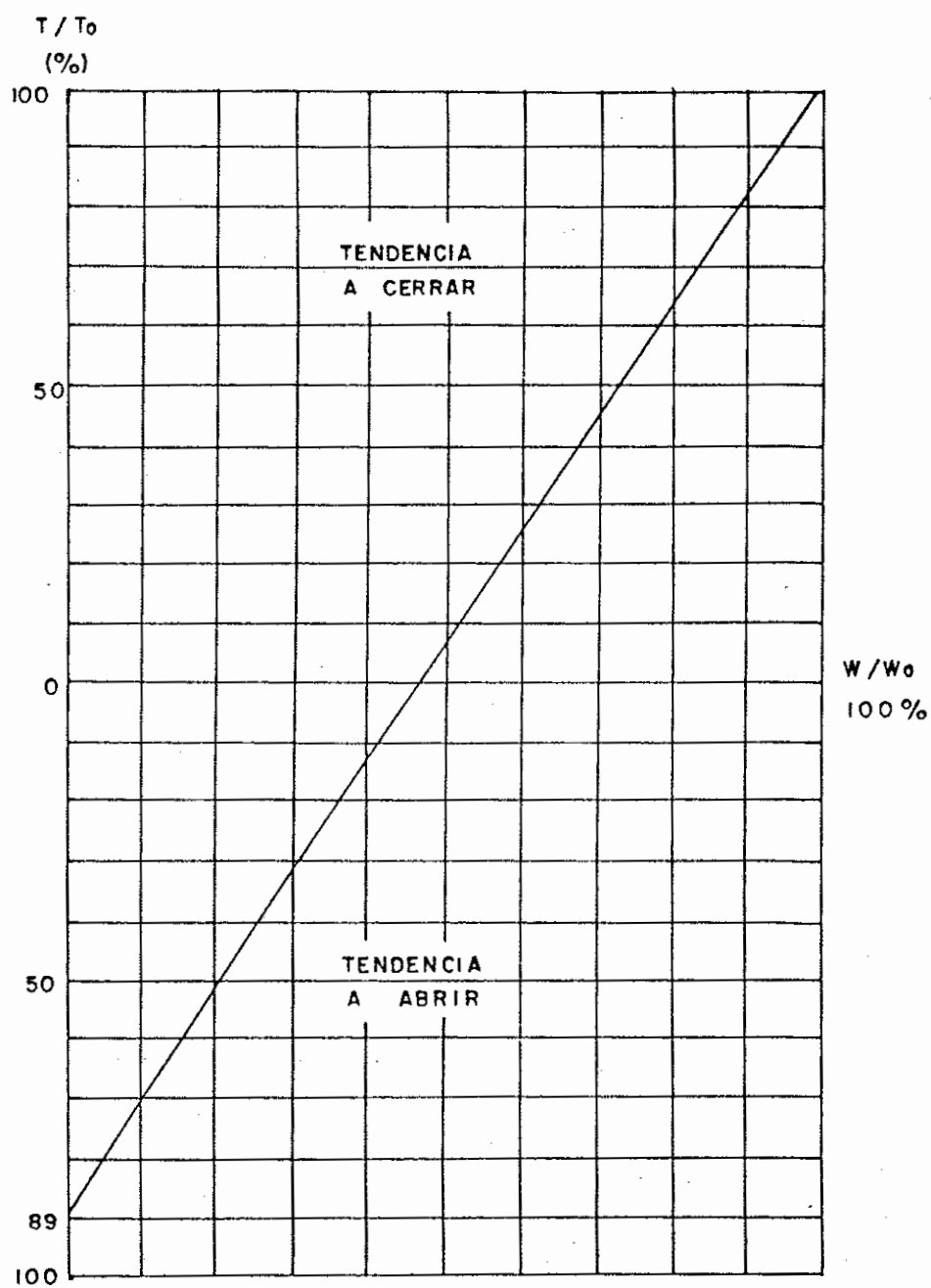


Fig. A.2. Variación porcentual del momento en el torsor de alata directriz perfilado

## A1.2. CALCULO DE LA SEGURIDAD DE LA INSTALACION

Velocidad de propagación de la onda de presión:

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{E \cdot D_p}{E_p \cdot t_p}}} \quad (\text{m/seg})$$

$$\frac{E}{E_p} = 0,01$$

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + 0,01 \times \frac{0,8}{0,00825}}}$$

$$a = 1012 \quad (\text{m/seg})$$

. Tiempo elástico  $T_e$ :

$$T_e = \frac{2 \cdot L_p}{a} = \frac{2 \times 270}{1012} = 0,534 \quad (\text{seg})$$

. Cifra característica de la tubería ( $\rho$ )

$$\rho = \frac{T_w}{T_e}$$

Donde:

$$T_w = \frac{L_p \cdot V_{op}}{g \cdot H_0} = \frac{270 \times 3}{9,8 \times 90} = 0,92 \quad (\text{seg})$$

$$\rho = \frac{0,92}{0,534} = 1,723$$

. Tiempo de cierre relativo ( $\theta$ )

Considerando un tiempo de cierre de 3,6 segundos:

$$\theta = \frac{3,6}{0,534} = 6,74$$

- Aumento máximo de presión en la tubería ( $\Delta h_m$ ); se considera "golpe de ariete con cierre lento ( $\theta > 1$ ).

En esta condición:

$$\Delta h_m = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{\theta} \right) \cdot \left( \frac{\rho}{\theta} + \sqrt{\left( \frac{\rho}{\theta} \right)^2 + 4} \right) K$$

$$k = 1,2$$

$$\Delta h_m = \frac{1}{2} \left( \frac{1,723}{6,74} \right) \left( \frac{1,723}{6,74} + \sqrt{\left( \frac{1,723}{6,74} \right)^2 + 4} \right) 1,2$$

$$\Delta h_m = 0,348 \quad (34,8 \%)$$

Entonces para este caso la sobrepresión será del 34.8%, que es menor que el 40%.

$P_D^2$  requerido:

$$P_D^2 = 730320 \cdot K_A \cdot \frac{W_0 \cdot T_s}{N_0^2 [ (\Delta h_m + 1)^2 - 1 ]}$$

Donde:

$K_A$  para el caso de "golpe de ariete con cierre lento" ( $\theta > 1$ ) es:

$$K_A = 0,5 + 0,75 \left( \frac{\rho}{\theta} \right) - 0,175 \left( \frac{\rho}{\theta} \right)^2$$

$$K_A = 0,5 + 0,75 \left( \frac{1,723}{6,74} \right) - 0,175 \left( \frac{1,723}{6,74} \right)^2$$

$$K_A = 0,68$$

$$P_D^2 = 730320 \times 0,68 \times \frac{850 \times 3,6}{945^2 [ 1,3^2 - 1 ]}$$

$$P_D^2 = 2466 \quad (\text{Kg-m}^2)$$

(Para una sobrevelocidad del grupo de 0,3).

### A1.3. DATOS NECESARIOS PARA LA SIMULACION

#### . Constantes estáticas de la turbina:

Se consideran los siguientes valores (constantes ideales), a falta de datos de una central construída, que este equipada con una turbina igual a la del presente ejemplo. (Sin embargo si se es ta ante el caso de una turbina ya instalada es preferible medir las constantes de la misma es especial la  $a_{23}$ ).

$$a_{11} = 0,5$$

$$a_{13} = 1,0$$

$$a_{21} = 1,5$$

$$a_{22} = 0$$

$$a_{23} = 1,0$$

La constante  $a_{22}$ , corresponde al caso de "una turbina en general" con carga resistiva y regulador de voltaje.

#### . Tiempo de arranque del Agua y Mecánico:

El tiempo de arranque del agua  $T_w$  ya se la determinó y tiene un valor de:

$$T_w = 0,92 \text{ seg.}$$

#### Tiempo de arranque mecánico:

$$T_m = \frac{1 \cdot P_D^2 \cdot N_0^2}{37205 \cdot g \cdot W_0}$$

$$T_m = \frac{1}{37205} \times \frac{2466 \times 945^2}{9,8 \times 850}$$

$$T_m = 7,11 \text{ (seg)}$$

#### . Constantes de Tiempo del Servomotor de Fuerza y del Filtro.

Para el servomotor de fuerza:

$$\tau_2 = \frac{As_2}{Cv_2 \left(1 - \frac{Lo_2}{L_2}\right)}$$

Donde:

$$Cv_2 = \frac{Qs_2}{X_2} = \frac{As_2 \cdot Y_0}{Ts \cdot X_2}$$

Para  $Ts = 3,6$  seg,  $X_2 = 0,79$  cm,  $As_2 = 266,4$  cm,  $Y_0 = 23$  cm (valores obtenidos de la sección "CALCULOS RELATIVOS AL SERVOMOTOR DE FUERZA") y considerando que el punto de aplicación de la acción del servopiloto es en la mitad de la palanca de realimentación, se tiene:

$$\tau_2 = \frac{Ts \cdot X_2}{Y_0 \left(1 - \frac{Lo_2}{L_2}\right)}$$

$$\tau_2 = \frac{3,6 \times 0,79 \times 2}{23} = 0,25 \quad (\text{seg})$$

Con relación a la constante de tiempo del filtro, esta se la obtiene luego de realizada la simulación, bajo el criterio de que el mecanismo de control de flujo no cierre bruscamente la válvula, es decir considerando que durante el funcionamiento del lazo de control el tiempo de cierre de la válvula sea mayor que 5 segundos o si es posible más grande que ese valor (para este caso de turbina Michell - Banki).

. Constantes del Transductor de Potencia y del Servomotor Eléctrico

Para el transductor de potencia:

$$\sigma = \frac{1}{Km \cdot a_{23}}$$

Asumiendo un valor de  $Km = 1$ , se tiene:

$$\sigma = \frac{1}{1 \times 1} = 1$$

Para comprobar que  $K_m$  tiene valor unitario se hace el siguiente análisis:

$$K_m = \frac{1}{K_r} \cdot \frac{V_o'}{Z_o} *$$

Donde:

$$K_r = \frac{\Delta V'}{\Delta D'} \cdot K_g$$

Para el caso que el transductor sea de tipo potenciométrico:

$$K_g = \frac{P_2 + R_2}{R_1} \quad (\text{ver sección 3.12.5})$$

Considerando que para variables, no incrementables ni en por unidad, la relación entre el desplazamiento del pivote de la varilla de realimentación del servopiloto y el voltaje de entrada al conjunto ser voeléctrico tuerca tornillo transductor de posición es una relación lineal de la forma:

$$Z_o = \frac{1}{K_r} V_o'$$

Reemplazando esta última expresión en la de  $K_m$  se llega a determinar que:

$$K_m = 1$$

En estas condiciones el valor de  $K_m$  es igual a la unidad, independientemente del valor que tenga  $K_r$ .

De acuerdo, a la expresión de  $\sigma$  presentada en la parte inicial de éste cálculo se determina que  $\sigma$  debe tener un valor unitario. Para que esto suceda es necesario que los parametros eléctricos de los que depende  $\sigma$  deben ser de cierta magnitud para así:

$$\sigma = K_c \cdot \frac{P_{go}}{V_o'}$$

---

\*Nota: Para facilidad de nomenclatura se ha reemplazado  $V_o'$  por  $V_o$  en la ecuación 1.21.

Donde:

$$K_c = \frac{\Delta V_T}{\Delta P_G}$$

$\Delta V_T$  , cambio de voltaje a la salida del transductor de potencia.

$\Delta P_G$  , cambio de potencia media.

$$\Delta i = \frac{\Delta V_T}{3 \cdot \frac{P_{19}}{R_{116}} \cdot K_1}$$

(Para la ubicación de P19 y R116, ver circuito general).

$K_1$  , sensibilidad de los captadores de intensidad de corriente del sensor de potencia si se asume que estos son lineales.

$\Delta i$  , intensidad promedio de las tres fases.

El  $\Delta V_T$  puede relacionarse con el cambio de potencia generada y medida así:

$$\Delta P_G = V \Delta i = V \cdot \frac{\Delta V_T}{3 \cdot \frac{P_{19}}{R_{116}} \cdot K_1}$$

Reemplazando esta última expresión en la de  $K_c$  y a su vez esta en la de  $\sigma$  se tiene:

$$\sigma = 3 \cdot \frac{P_{19}}{R_{116}} \cdot \frac{K_1}{V} \cdot \frac{P_{Go}}{V_o^2}$$

Si  $\sigma = 1$  (caso que es el que se quiere)

$$\frac{P_{19}}{R_{116}} = \frac{V \cdot V_o^2}{3 K_1 P_{Go}}$$

Puede darse el caso en que  $\sigma = 0$  en este caso el potenciómetro P19 debe estar ajustado para que su resistencia en el circuito valga -cero.



#### A1.4. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL REGULADOR

( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_F$ )

Los parámetros de ajuste  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , del regulador de velocidad y la constante de tiempo del arreglo servoeléctrico, transductor de desplazamiento etc., así como la constante de tiempo del filtro se los determina mediante un proceso de simulación del desempeño dinámico del lazo de control, para lo cual se hace uso del programa de computación dado en el apéndice A.

Se determina además si el sistema es o no estable sacando las raíces de la ecuación característica.

Para sistematizar el proceso de búsqueda de los parámetros anteriores, se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

1. Asumir un valor de  $\tau_1$ .
2. Para ese valor de  $\tau_1$  y forzando a que  $K_i = 0$  y  $K_d = 0$ , mediante el uso del programa del apéndice A se determina el valor de  $K_p$  que coloque en el límite de estabilidad al sistema. A ese valor de  $K_p$  se le llama  $K_u$ .

El programa se lo corre para la condición de un cambio de carga del 10 % y sin cambio en la velocidad de referencia.

3. Como ayuda para el proceso descrito en el punto 2. Mediante los programas del apéndice B y del C se obtienen las raíces de la ecuación característica. El programa presentado en el apéndice C permite determinar los coeficientes de la ecuación característica  $C_4$ ,  $C_3$ ,  $C_2$ ,  $C_1$ ,  $C_0$ , a partir de los parámetros del sistema  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ,  $a_{11}$ , etc.
4. Del paso 2, se obtiene una curva de respuesta como la dada en la figura A.3. y de allí se determina el "período último  $P_u$ " como se indica en la figura. Si no se quiere graficar los valores de salida del programa  $\Delta w(t)$  V.S.t Para obtener  $P_u$ , este puede ser obtenido directamente de los datos de salida del programa (en forma de tablas).
5. Mediante  $K_u$  y  $P_u$  se determinan los valores aproximados de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  mediante las siguientes expresiones:

$$K_p = 0,588 K_u$$

$$K_i = \frac{2}{P_u} \times 0,588 K_u = \frac{2}{P_u} \cdot K_p$$

$$K_d = \frac{P_u}{8} \times 0,588 K_u = \frac{P_u}{8} \cdot K_p$$

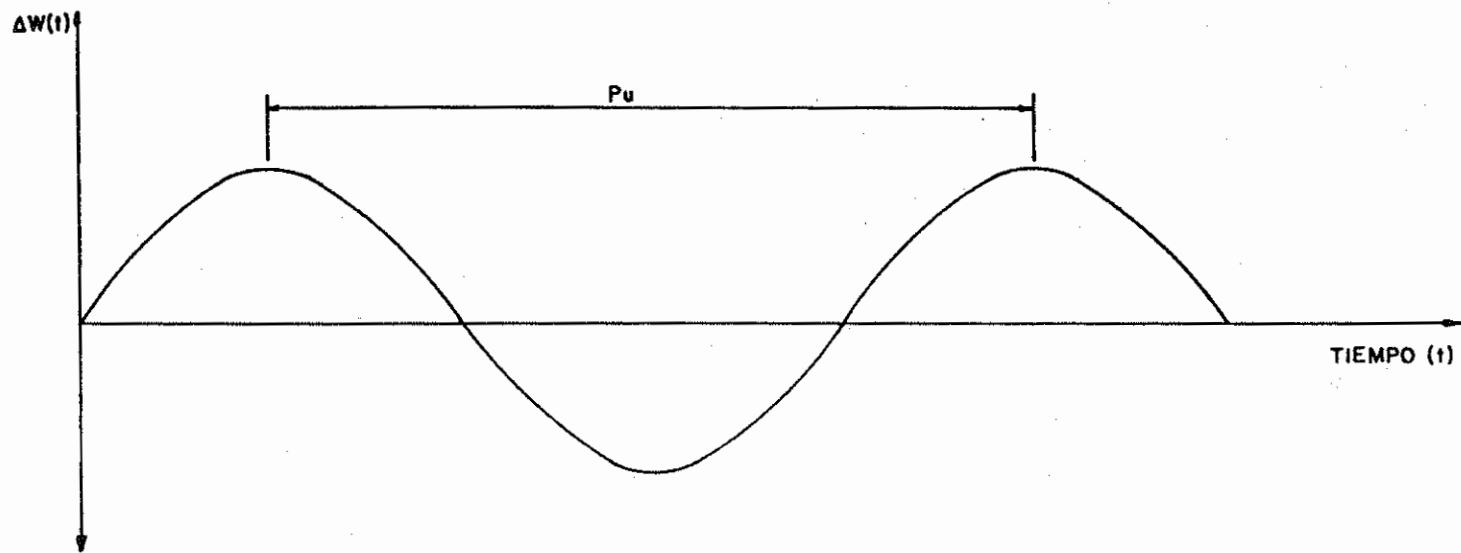


Fig. A.3. Curva de respuesta del lazo de control,  $K_d = 0 \text{ seg}$ ,  $K_i = 0 \text{ seg}^{-1}$ ,  $K_p = K_u$ ; de ella se obtiene  $P_u$ .

6. Con los valores de  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  obtenidos en el paso 5. y con el de  $\tau_1$  obtenido en el paso 1. se corre nuevamente el programa dado en el apéndice A solo para cambio de carga. Luego se che-quea estabilidad del sistema obteniendo las raíces de la ecuación característica.

De los datos de salida del programa A se determina si la cali-dad del transitorio es buena basandose para ello en que el cam-bio de velocidad angular se estabilice rápido y que el sobre-tiro inicial y los otros sean bajos.

7. Se cambian un poco los parámetros de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  obtenidos en paso 5. y se vuelve a correr el programa del apéndice A para cambio de carga del 10% solamente hasta demostrar si se ha obte-nido las mejores características del transitorio. Es importan-te también chequear en la salida del programa que el mecanismo de control de flujo de la válvula no cierre o abra demasiado rá-pido, es decir chequear que el tiempo de cierre sea el apropia-do. Se debe chequear también estabilidad, obteniendo las raí-ces de la ecuación característica.
8. Una vez obtenidos los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  que optimizan la ca-lidad del transitorio y que permitan un cierre apropiado de la válvula, se corre nuevamente el programa con esos valores de  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  para la condición de cambio de la velocidad de referencia  $\Delta W_R$  (10%) sin cambio de carga.

Esta última corrida del programa se lo hace para determinar si hay un cierre brusco o apertura brusca del mecanismo de control de flujo de la turbina, en el caso que el sistema actúe como se-guidor.

A continuación se presentan los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en los ocho pasos anteriores aplicados a las condiciones del ejemplo de este anexo.

1. Se asume que la constante del filtro es de 1 seg.
2. y 3. Para  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$  y  $\tau_1 = 1$  seg. Se determina el valor de  $K_p$  que haga ubicar al sistema en el límite de la estabilidad

La tabla A.1. resume los valores de las raíces de la ecuación -característica.

Según esa tabla con un valor de  $K_p = 5,0$  el sistema llega al borde de la inestabilidad de modo que  $K_u = 5.0$ . Para esas condi-ciones los coeficientes de la ecuación característica obtenidos haciendo uso del programa presentado en el apéndice C son:

$$C_4 = 7,17391305$$

$$C_3 = 14,8695652$$

| $k_p$ | $\lambda_1$    | $\lambda_2$    | $\lambda_3$ | $\lambda_4$    | $\lambda_5$    |
|-------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| 4     | $-0,062+0,6 j$ | $-0,062-0,6 j$ | 0           | $-3,53+2,2 j$  | $-3,53-2,2 j$  |
| 5     | $-0,001+0,65j$ | $-0,001-0,65j$ | 0           | $-3,59+2,5 j$  | $-3,59-2,5 j$  |
| 5,1   | $0,005+0,655j$ | $0,005-0,655j$ | 0           | $-3,592+2,53j$ | $-3,592-2,53j$ |
| 5,5   | $0,026+0,675j$ | $0,026-0,675j$ | 0           | $-3,6 +2,64j$  | $-3,6- 2,64j$  |

Tabla A.1.

$$C2 = 3,06977313$$

$$C1 = 6,11508592$$

$$C0 = 0$$

Para  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ ,  $K_p = 5.0$  y  $\tau_1 = 1$  se corre el programa del apéndice A (condición 10% de cambio de carga) y se obtienen los resultados presentados en la tabla A.2. Esos resultados se han graficado como se muestran en la figura A.4.

4. De la tabla A.2. o de la figura A.4. se determina

$$P_u = 9,6 \text{ seg.}$$

5. Determinación de los parámetros aproximados  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ .

$$K_p = 0,588 \times 5,0 = 2,94$$

$$K_p = 2,94$$

$$K_i = \frac{2}{9,6} \times 2,94 = 0,61 \quad (1/\text{seg})$$

$$K_i = 0,61 \quad (1/\text{seg})$$

$$K_d = \frac{9,6}{8} \times 2,94 = 3,53 \quad (\text{seg})$$

$$K_d = 3,53 \quad (\text{seg})$$

INTERVALO DE TIEMPO = .1  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO= 4  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA= .25  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO= 1  
 COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO= 1  
 TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO= 7.11  
 TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA= .92  
 COEFICIENTE SIGMA= 1  
 TORQUE DE CARGA=-.1  
 VELOCIDAD DE REFERENCIA 0  
 GANANCIA PROPORCIONAL= 5  
 GANANCIA INTEGRAL= 0  
 GANANCIA DERIVATIVA= 0  
 A11= .5  
 A13= 1  
 A21= 1.5  
 A22= 0  
 A23= 1

| TIEMPO<br>[SEG] | VELOCIDAD<br>ANGULAR<br>[P. U.] | DESPLAZAMIENTO<br>DEL MECANISMO DE<br>CONTROL DE FLUJO<br>[P. U.] |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0               | 0                               | 0                                                                 |
| .2              | 2.91591302E-03                  | -6.11555735E-03                                                   |
| .4              | 6.20197501E-03                  | -.0193357274                                                      |
| .6              | 9.80665341E-03                  | -.0355025245                                                      |
| .8              | .0135455083                     | -.0529402069                                                      |
| 1               | .0172375905                     | -.0709648854                                                      |
| 1.2             | .0207385795                     | -.089237864                                                       |
| 1.4             | .0239399157                     | -.107510703                                                       |
| 1.6             | .0267603402                     | -.12553973                                                        |
| 1.8             | .0291383197                     | -.143067432                                                       |
| 2               | .0310270755                     | -.159826696                                                       |
| 2.2             | .0323910196                     | -.175550623                                                       |
| 2.4             | .0332084139                     | -.189982081                                                       |
| 2.6             | .0334627974                     | -.202881549                                                       |
| 2.8             | .0331507569                     | -.214033281                                                       |
| 3               | .0322777875                     | -.223250106                                                       |
| 3.2             | .0308589109                     | -.230377182                                                       |
| 3.4             | .0289183866                     | -.235294885                                                       |
| 3.6             | .0264892879                     | -.237920956                                                       |
| 3.79999999      | .0236129379                     | -.238211923                                                       |
| 3.99999999      | .0203382074                     | -.236163846                                                       |
| 4.19999999      | .0167206857                     | -.231812371                                                       |
| 4.39999999      | .0128217386                     | -.225232112                                                       |
| 4.59999999      | 8.70746736E-03                  | -.216535368                                                       |
| 4.79999999      | 4.44758898E-03                  | -.205870211                                                       |
| 4.99999999      | 1.14254626E-04                  | -.193417962                                                       |
| 5.19999999      | -4.21917215E-03                 | -.179390107                                                       |
| 5.39999999      | -8.47935742E-03                 | -.164024706                                                       |
| 5.59999999      | -.0125942379                    | -.147502353                                                       |
| 5.79999999      | -.0164942398                    | -.130341758                                                       |
| 5.99999999      | -.0201134554                    | -.112595019                                                       |
| 6.19999999      | -.0233907565                    | -.0946426765                                                      |
| 6.39999999      | -.0262708273                    | -.0767086225                                                      |

|             |                 |                 |
|-------------|-----------------|-----------------|
| 6.59999999  | -.0287050974    | -.0594349566    |
| 6.79999999  | -.0306525616    | -.0425768742    |
| 6.99999998  | -.0320904701    | -.0267976739    |
| 7.19999998  | -.0329640792    | -.0122639698    |
| 7.39999998  | -.0332910533    | 7.78818719E-04  |
| 7.59999998  | -.0330537097    | .0121106012     |
| 7.79999998  | -.0322571044    | .0215403396     |
| 7.99999998  | -.0309149558    | .0289092641     |
| 8.19999999  | -.0290502006    | .0340935472     |
| 8.39999998  | -.0266946417    | .0379063843     |
| 8.59999999  | -.0238883265    | .037599447      |
| 8.8         | -.0206789454    | .0350636845     |
| 9           | -.0171209814    | .0318294604     |
| 9.2         | -.0132747934    | .0255660217     |
| 9.4         | -9.2055924E-03  | .0171803107     |
| 9.6         | -4.98233551E-03 | 6.81513904E-03  |
| 9.80000001  | -6.76557689E-04 | -5.35324405E-03 |
| 10          | 3.63984003E-03  | -.0191181489    |
| 10.2        | 7.09082477E-03  | -.034245956     |
| 10.4        | .0120074678     | -.0504800808    |
| 10.6        | .0159191614     | -.0675453258    |
| 10.8        | .0195597957     | -.0851525455    |
| 11          | .0228670759     | -.103003546     |
| 11.2        | .0257875613     | -.120796133     |
| 11.4        | .0282696074     | -.138229231     |
| 11.6        | .030272197      | -.155007975     |
| 11.8        | .0317616444     | -.1708487       |
| 12          | .0327129617     | -.185483733     |
| 12.2        | .0331102797     | -.198665921     |
| 12.4        | .032947107      | -.210172801     |
| 12.60000001 | .032226446      | -.219810355     |
| 12.80000001 | .0309607294     | -.227416284     |
| 13.00000001 | .0291716051     | -.232862736     |
| 13.20000001 | .0268895756     | -.236058459     |
| 13.40000001 | .0241534677     | -.236950329     |
| 13.60000001 | .0210097771     | -.235524232     |
| 13.80000001 | .0175118771     | -.231805287     |
| 14.00000001 | .0137191126     | -.225857402     |
| 14.20000001 | 9.69579313E-03  | -.217782179     |
| 14.40000001 | 5.51010275E-03  | -.207717179     |
| 14.60000001 | 1.23294416E-03  | -.195833575     |
| 14.80000001 | -3.06326213E-03 | -.182333243     |
| 15.00000001 | -7.30580401E-03 | -.167445336     |

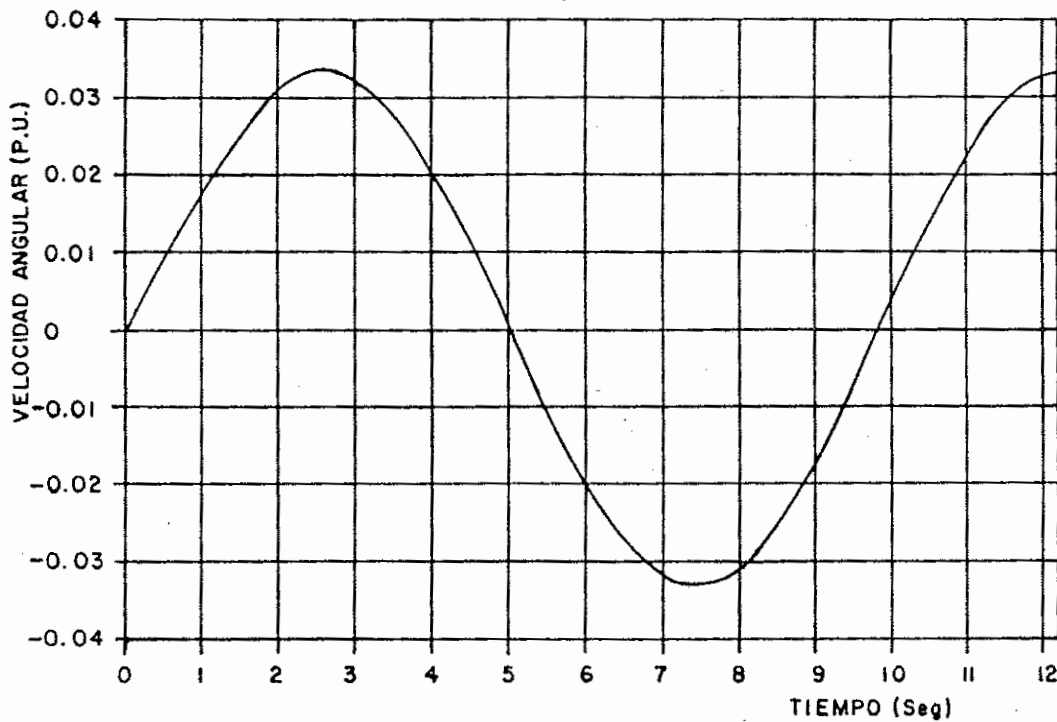


Fig. A.4.a. Cambio en por unidad de la velocidad angular para condiciones de estabilidad en el límite ( $K_p = 5,0$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ ).

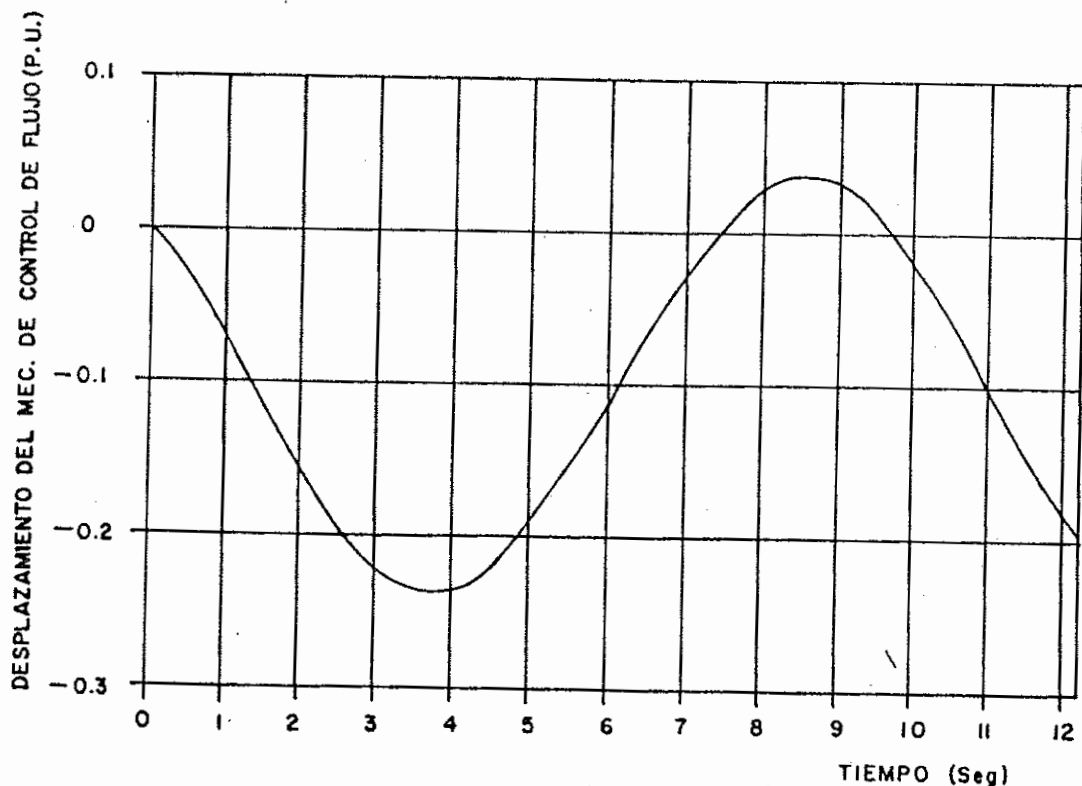


Fig. A.4.b. Cambio en por unidad del desplazamiento del mecanismo de control de flujo de la turbina, para condiciones de estabilidad en el límite ( $K_p = 5,0$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ ).

6. Con los datos del paso 5. se corre nuevamente el programa del apéndice A para un cambio de carga del 10% y se obtienen los resultados de la tabla A.3. Graficando esos resultados que se obtienen en las curvas de las figuras A.5 y A.6.

Las raíces de la ecuación característica para este caso son:

$$\lambda_1 = -0,15 + 0,31j$$

$$\lambda_2 = -0,15 - 0,31j$$

$$\lambda_3 = -5,496$$

$$\lambda_4 = -0,69 + 1,63j$$

$$\lambda_5 = -0,69 - 1,63j$$

Se puede apreciar que el sistema es estable y la calidad del transitorio no es tan buena. En efecto el tiempo de estabilización considerando una banda  $\pm 0,08$  es de 12,4 seg.

En la tabla A.4. y figuras A.7. y A.8. se presentan resultados análogos a los de la tabla A.3. y figuras A.5. y A.6. pero para  $\sigma = 0$  es decir el caso sin feedforward de ganancia. La calidad de transitorio mejora en este caso en lo que se refiere al tiempo de estabilización aunque el sobretiro inicial sube algo.

7. Cambiando un poco el valor parámetro  $K_d$  ( $K_d = 6,0$ ) para  $\sigma = 1$ , se obtienen los resultados de la tabla A.5. y graficando esos resultados se obtienen los gráficos de las figuras A.9. y A.10. La tabla A.6. y las figuras A.11. y A.12. presentan resultados análogos a los de la tabla A.5. y figuras A.9. y A.10. pero para el caso  $\sigma = 0$ .

De esta última tabla y última figura se observa una buena calidad del transitorio y no hay cierre brusco del mecanismo de control de filtro de la turbina. Para el caso presente las raíces de ecuación característica son:

$$\lambda_1 = -0,38 + 1,26j$$

$$\lambda_2 = -0,38 - 1,26j$$

$$\lambda_3 = -6,182$$

$$\lambda_4 = -0,11 + 6,31j$$

$$\lambda_5 = -0,11 - 6,31j$$

Se ve que el sistema es estable.

8. Para:



INTERVALO DE TIEMPO .1  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO= 4  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA= .25  
 CONTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO= 1  
 COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO= 1  
 TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO= 7.11  
 TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA= .92  
 COEFICIENTE SIGMA= 1  
 TORQUE DE CARGA=-.1  
 VELOCIDAD DE REFERENCIA 0  
 GANANCIA PROPORCIONAL= 2.94  
 GANANCIA INTEGRAL= .61  
 GANANCIA DERIVATIVA= 3.53  
 R11= .5  
 R13= 1  
 R21= 1.5  
 R22= 0  
 R23= 1

| TIEMPO<br>[SEG] | VELOCIDAD<br>ANGULAR<br>[P. U.] | DESPLAZAMIENTO<br>DEL MECANISMO DE<br>CONTROL DE FLUJO<br>[P. U.] |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0               | 0                               | 0                                                                 |
| .2              | 2.96457615E-03                  | -8.98047611E-03                                                   |
| .4              | 6.46675212E-03                  | -.029108725                                                       |
| .6              | .0104184057                     | -.0510728987                                                      |
| .8              | .0145302733                     | -.0749270099                                                      |
| 1               | .0185084651                     | -.0980582566                                                      |
| 1.2             | .0221131903                     | -.119484088                                                       |
| 1.4             | .0251709213                     | -.138591467                                                       |
| 1.6             | .0275708715                     | -.155023622                                                       |
| 1.8             | .029256425                      | -.168617015                                                       |
| 2               | .0302153177                     | -.179356846                                                       |
| 2.2             | .0304700097                     | -.187341013                                                       |
| 2.4             | .0300688355                     | -.192749472                                                       |
| 2.6             | .029078181                      | -.19581809                                                        |
| 2.8             | .0275757797                     | -.196816668                                                       |
| 3               | .0256451342                     | -.196030918                                                       |
| 3.2             | .0233710192                     | -.193748119                                                       |
| 3.4             | .0208359849                     | -.190246131                                                       |
| 3.6             | .0181177609                     | -.185785382                                                       |
| 3.79999999      | .0152874474                     | -.180603439                                                       |
| 3.99999999      | .0124083776                     | -.174911746                                                       |
| 4.19999999      | 9.53553604E-03                  | -.168894133                                                       |
| 4.39999999      | 6.71542269E-03                  | -.162706747                                                       |
| 4.59999999      | 3.9862623E-03                   | -.156479036                                                       |
| 4.79999999      | 1.37846907E-03                  | -.150315525                                                       |
| 4.99999999      | -1.08471244E-03                 | -.144298091                                                       |
| 5.19999999      | -3.38645651E-03                 | -.138488557                                                       |
| 5.39999999      | -5.51555068E-03                 | -.132931401                                                       |
| 5.59999999      | -7.46557906E-03                 | -.127656461                                                       |
| 5.79999999      | -9.23412843E-03                 | -.122681526                                                       |
| 5.99999999      | -.0108220417                    | -.118014734                                                       |
| 6.19999999      | -.0122327356                    | -.113656739                                                       |

|            |                 |              |
|------------|-----------------|--------------|
| 6.59999999 | -.0145454338    | -.105843454  |
| 6.79999999 | -.0154620678    | -.102367775  |
| 6.99999998 | -.0162299217    | -.0991625676 |
| 7.19999998 | -.0168577406    | -.0962141753 |
| 7.39999998 | -.0173543533    | -.0935089402 |
| 7.59999998 | -.0177284965    | -.0910336635 |
| 7.79999998 | -.0179886873    | -.0887759116 |
| 7.99999998 | -.0181431385    | -.0867241926 |
| 8.19999999 | -.0181997072    | -.0848680302 |
| 8.39999998 | -.01816587      | -.0831979587 |
| 8.59999999 | -.0180487187    | -.08170546   |
| 8.8        | -.0178549715    | -.080382862  |
| 9          | -.0175909925    | -.0792232126 |
| 9.2        | -.0172628187    | -.0782201424 |
| 9.4        | -.0168761988    | -.0773677273 |
| 9.6        | -.0164365725    | -.0766603563 |
| 9.80000001 | -.0159491988    | -.0760926117 |
| 10         | -.0154190904    | -.075659165  |
| 10.2       | -.0148510355    | -.0753546897 |
| 10.4       | -.014249705     | -.0751737924 |
| 10.6       | -.0136195659    | -.0751109628 |
| 10.8       | -.0129649406    | -.0751605393 |
| 11         | -.0122900023    | -.0753166913 |
| 11.2       | -.0115987781    | -.0755734148 |
| 11.4       | -.0108951482    | -.0759245399 |
| 11.6       | -.0101828437    | -.0763637476 |
| 11.8       | -9.46544312E-03 | -.0768845946 |
| 12         | -8.74636668E-03 | -.0774805435 |
| 12.2       | -8.02887109E-03 | -.0781449973 |
| 12.4       | -7.3160435E-03  | -.0788713353 |
| 12.6000001 | -6.61079583E-03 | -.079652951  |
| 12.8000001 | -5.91585953E-03 | -.0804832889 |
| 13.0000001 | -5.233781E-03   | -.0813558812 |
| 13.2000001 | -4.56691796E-03 | -.0822643807 |
| 13.4000001 | -3.91743677E-03 | -.0832025938 |
| 13.6000001 | -3.28731085E-03 | -.0841645083 |
| 13.8000001 | -2.67832026E-03 | -.0851443195 |
| 14.0000001 | -2.09205237E-03 | -.0861364524 |
| 14.2000001 | -1.52990364E-03 | -.087135581  |
| 14.4000001 | -9.93082447E-04 | -.0881366443 |
| 14.6000001 | -4.82612936E-04 | -.0891348588 |
| 14.8000001 | 6.600314005E-07 | -.0901257288 |
| 15.0000001 | 4.56066745E-04  | -.0911050532 |
| 15.2000001 | 8.83103588E-04  | -.0920689304 |
| 15.4000001 | 1.28142901E-03  | -.093001376  |
| 15.6000001 | 1.65085475E-03  | -.0939362439 |
| 15.8000001 | 1.99133829E-03  | -.0948333836 |
| 16.0000001 | 2.30297472E-03  | -.0957024774 |
| 16.2000001 | 2.58598835E-03  | -.0965411156 |
| 16.4000001 | 2.84072412E-03  | -.0973471739 |
| 16.6000001 | 3.06763886E-03  | -.0981188066 |
| 16.8000001 | 3.2672926E-03   | -.0988544381 |
| 17.0000001 | 3.44033983E-03  | -.0995527544 |
| 17.2000001 | 3.58752081E-03  | -.100212692  |
| 17.4000001 | 3.709653E-03    | -.10083343   |
| 17.6000001 | 3.80762271E-03  | -.101414377  |
| 17.8000001 | 3.8823768E-03   | -.101955161  |
| 18.0000001 | 3.9349147E-03   | -.102455617  |
| 18.2000001 | 3.96628063E-03  | -.102915777  |
| 18.4000001 | 3.97755609E-03  | -.103335858  |

|            |                |             |
|------------|----------------|-------------|
| 18.6000001 | 3.96985265E-03 | -.103716248 |
| 18.8000001 | 3.94430499E-03 | -.104057495 |
| 19.0000001 | 3.9020643E-03  | -.104360297 |
| 19.2000001 | 3.84429196E-03 | -.104625486 |
| 19.4000001 | 3.77215361E-03 | -.104854022 |
| 19.6000001 | 3.6868135E-03  | -.105046974 |
| 19.8000002 | 3.58942917E-03 | -.105205516 |
| 20.0000002 | 3.48114657E-03 | -.10533091  |

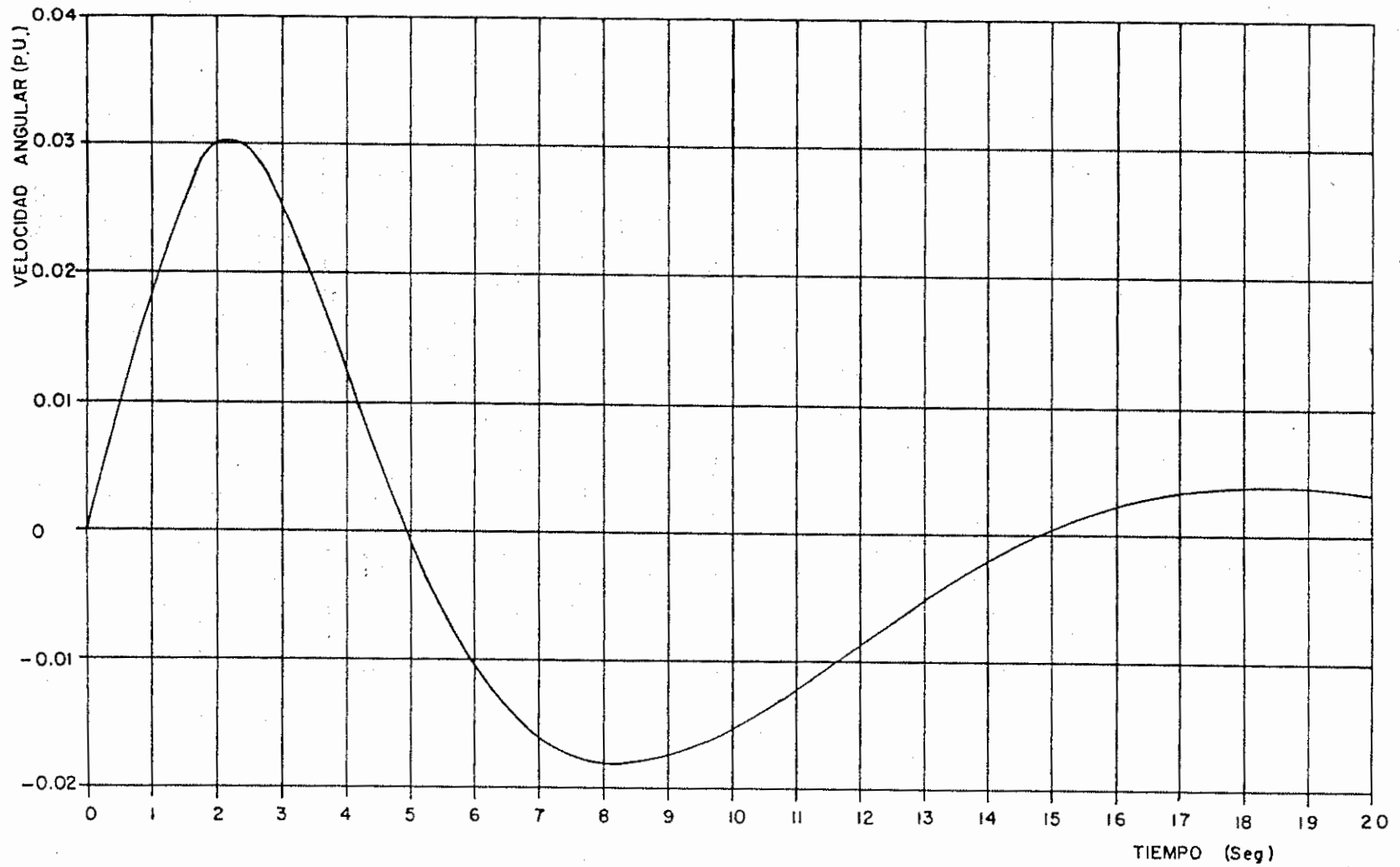


Fig. A.5. Cambio en por unidad de la velocidad angular para los siguientes parámetros:  $K_p = 2,94$  ,  
 $K_i = 0,61 \text{ seg}^{-1}$ ,  $K_d = 3,53 \text{ seg}$   $\sigma = 1$  (para cambio de carga 10%).

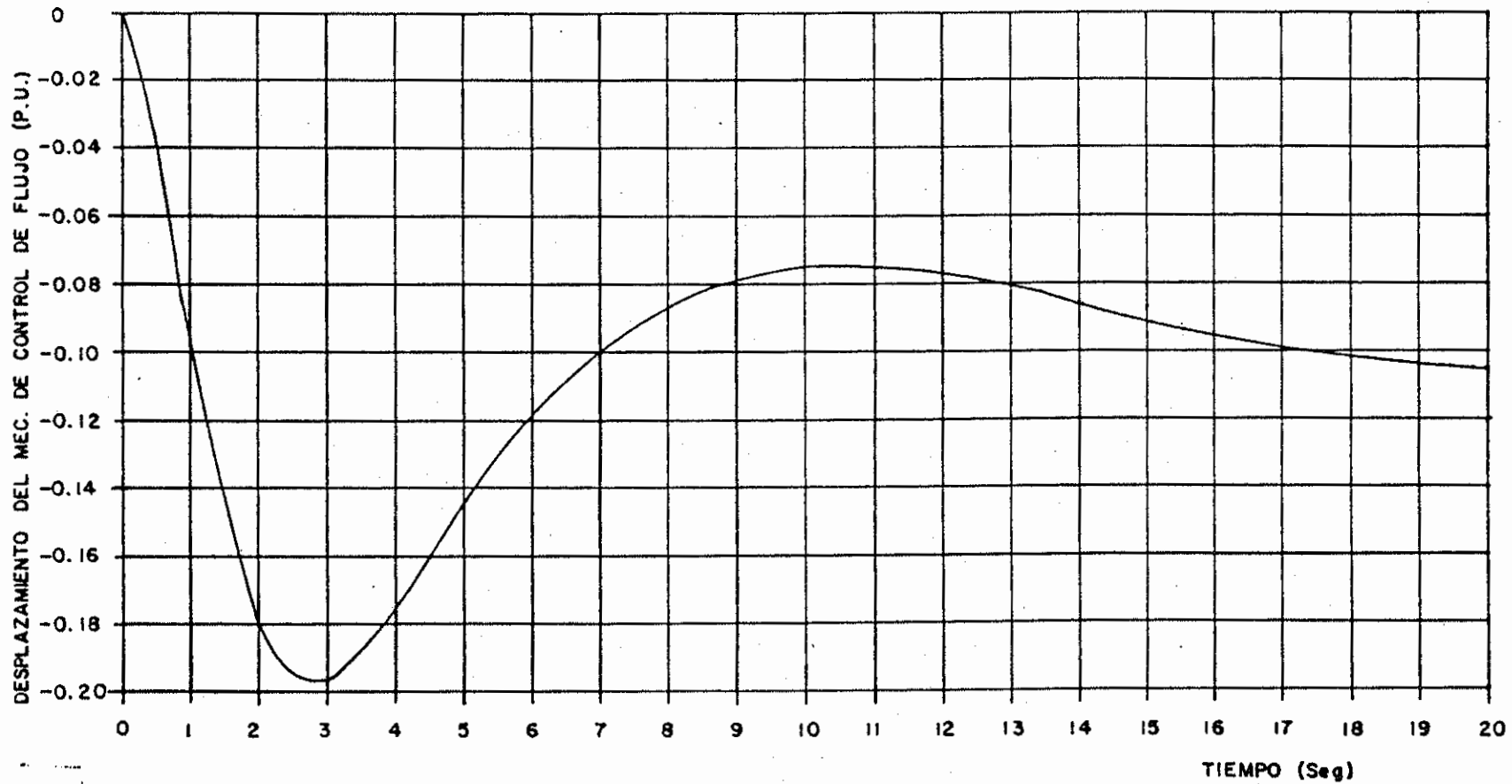


Fig. A.6. Cambio en por unidad del desplazamiento del mecanismo de control de flujo de la turbina, para los siguientes parámetros:  $K_p = 2,94$  ,  $K_i = 0,61 \text{ seg}^{-1}$  ,  $K_d = 3,53 \text{ seg}$  ,  $\sigma = 1$  (para cambio de carga 10%).

INTERVALO DE TIEMPO .1  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO= 4  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA= .25  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO= 1  
 COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO= 1  
 TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO= 7.11  
 TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA= .92  
 COEFICIENTE SIGMA= 0  
 TORQUE DE CARGA=-.1  
 VELOCIDAD DE REFERENCIA 0  
 GANANCIA PROPORCIONAL= 2.94  
 GANANCIA INTEGRAL= .61  
 GANANCIA DERIVATIVA= 3.53  
 A11= .5  
 A13= 1  
 A21= 1.5  
 A22= 0  
 A23= 1

| TIEMPO<br>[SEG] | VELOCIDAD<br>ANGULAR<br>[P. U.] | DESPLAZAMIENTO<br>DEL MECANISMO DE<br>CONTROL DE FLUJO<br>[P. U.] |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0               | 0                               | 0                                                                 |
| .2              | 2.86478468E-03                  | -3.09720339E-03                                                   |
| .4              | 5.92288822E-03                  | -.0101037095                                                      |
| .6              | 9.16413611E-03                  | -.0191569138                                                      |
| .8              | .0125033779                     | -.0293469608                                                      |
| 1               | .0158427026                     | -.0401239715                                                      |
| 1.2             | .0190922191                     | -.0510997957                                                      |
| 1.4             | .0221765337                     | -.0619798941                                                      |
| 1.6             | .0250361068                     | -.0725375807                                                      |
| 1.8             | .0276266671                     | -.0826017158                                                      |
| 2               | .0299178397                     | -.0920485158                                                      |
| 2.2             | .0318914524                     | -.100794614                                                       |
| 2.4             | .0335397365                     | -.108790614                                                       |
| 2.6             | .0348635427                     | -.116015016                                                       |
| 2.8             | .035870644                      | -.122468599                                                       |
| 3               | .0365741742                     | -.128169326                                                       |
| 3.2             | .0369912294                     | -.133147838                                                       |
| 3.4             | .0371416478                     | -.137443579                                                       |
| 3.6             | .037046971                      | -.141101532                                                       |
| 3.79999999      | .0367295835                     | -.144169558                                                       |
| 3.99999999      | .0362120198                     | -.146696288                                                       |
| 4.19999999      | .0355164244                     | -.148729514                                                       |
| 4.39999999      | .0346641483                     | -.150315024                                                       |
| 4.59999999      | .0336754644                     | -.151495811                                                       |
| 4.79999999      | .0325693823                     | -.152311597                                                       |
| 4.99999999      | .0313635456                     | -.152798613                                                       |
| 5.19999999      | .0300741952                     | -.152989575                                                       |
| 5.39999999      | .0287161825                     | -.152913808                                                       |
| 5.59999999      | .0273030203                     | -.15259748                                                        |
| 5.79999999      | .0258469588                     | -.152063894                                                       |
| 5.99999999      | .0243590781                     | -.151333829                                                       |
| 6.19999999      | .0228493883                     | -.15042588                                                        |
| 6.39999999      | .0213269319                     | -.149356888                                                       |

|             |                 |              |
|-------------|-----------------|--------------|
| 6.599999999 | .0197998826     | -.148141849  |
| 6.799999999 | .0182756392     | -.146795014  |
| 6.999999998 | .01676091       | -.145329336  |
| 7.199999998 | .0152617882     | -.143757086  |
| 7.399999998 | .0137838165     | -.14208995   |
| 7.599999998 | .0123320426     | -.140339167  |
| 7.799999998 | .0109110642     | -.138515625  |
| 7.999999998 | 9.52506576E-03  | -.136629938  |
| 8.199999999 | 8.17784738E-03  | -.134692484  |
| 8.399999998 | 6.87284748E-03  | -.132713424  |
| 8.599999999 | 5.6131597E-03   | -.130702707  |
| 8.8         | 4.40154583E-03  | -.128670048  |
| 9           | 3.24044549E-03  | -.126624911  |
| 9.2         | 2.1319936E-03   | -.124576472  |
| 9.4         | 1.07797651E-03  | -.122533583  |
| 9.6         | 7.99375191E-05  | -.120504737  |
| 9.800000001 | -8.6091774E-04  | -.118498027  |
| 10          | -1.74366546E-03 | -.116521116  |
| 10.2        | -2.56766709E-03 | -.114581199  |
| 10.4        | -3.33256182E-03 | -.112684983  |
| 10.6        | -4.0382579E-03  | -.11083866   |
| 10.8        | -4.68492289E-03 | -.109047892  |
| 11          | -5.27297259E-03 | -.1073178    |
| 11.2        | -5.80305903E-03 | -.105652959  |
| 11.4        | -6.27605728E-03 | -.104057395  |
| 11.6        | -6.69305155E-03 | -.102534589  |
| 11.8        | -7.05532039E-03 | -.101087487  |
| 12          | -7.36432143E-03 | -.0997185099 |
| 12.2        | -7.62167562E-03 | -.0984295688 |
| 12.4        | -7.8291513E-03  | -.0972220836 |
| 12.60000001 | -7.98864803E-03 | -.0960970033 |
| 12.80000001 | -8.10218059E-03 | -.0950548278 |
| 13.00000001 | -8.17186307E-03 | -.0940956317 |
| 13.20000001 | -8.19989323E-03 | -.0932190895 |
| 13.40000001 | -8.18853734E-03 | -.0924245013 |
| 13.60000001 | -8.14011538E-03 | -.0917108186 |
| 13.80000001 | -8.05698688E-03 | -.0910766709 |
| 14.00000001 | -7.94153731E-03 | -.0905203926 |
| 14.20000001 | -7.79616518E-03 | -.0900400482 |
| 14.40000001 | -7.62326984E-03 | -.0896334593 |
| 14.60000001 | -7.42524002E-03 | -.0892982292 |
| 14.80000001 | -7.20444302E-03 | -.0890317682 |
| 15.00000001 | -6.96321482E-03 | -.0888313173 |
| 15.20000001 | -6.70385084E-03 | -.0886939719 |
| 15.40000001 | -6.42859749E-03 | -.088616704  |
| 15.60000001 | -6.1396445E-03  | -.088596384  |
| 15.80000001 | -5.839118E-03   | -.0886298014 |
| 16.00000001 | -5.52907423E-03 | -.0887136847 |
| 16.20000001 | -5.21149414E-03 | -.0888447197 |
| 16.40000001 | -4.88827849E-03 | -.0890195681 |
| 16.60000001 | -4.56124378E-03 | -.0892348837 |
| 16.80000001 | -4.2321187E-03  | -.0894873288 |
| 17.00000001 | -3.90254127E-03 | -.0897735884 |
| 17.20000001 | -3.57405658E-03 | -.0900903848 |
| 17.40000001 | -3.24811506E-03 | -.0904344899 |
| 17.60000001 | -2.92687128E-03 | -.0908027374 |
| 17.80000001 | -2.60918331E-03 | -.0911920335 |
| 18.00000001 | -2.29861255E-03 | -.0915993672 |
| 18.20000001 | -1.99542399E-03 | -.0920218186 |
| 18.40000001 | -1.70058689E-03 | -.0924565678 |
| 18.60000001 | -1.4149759E-03  | -.0929009016 |
| 18.80000001 | -1.13937253E-03 | -.0933522196 |
| 19.00000001 | -8.74466969E-04 | -.0938080398 |
| 19.20000001 | -6.20860162E-04 | -.0942660033 |





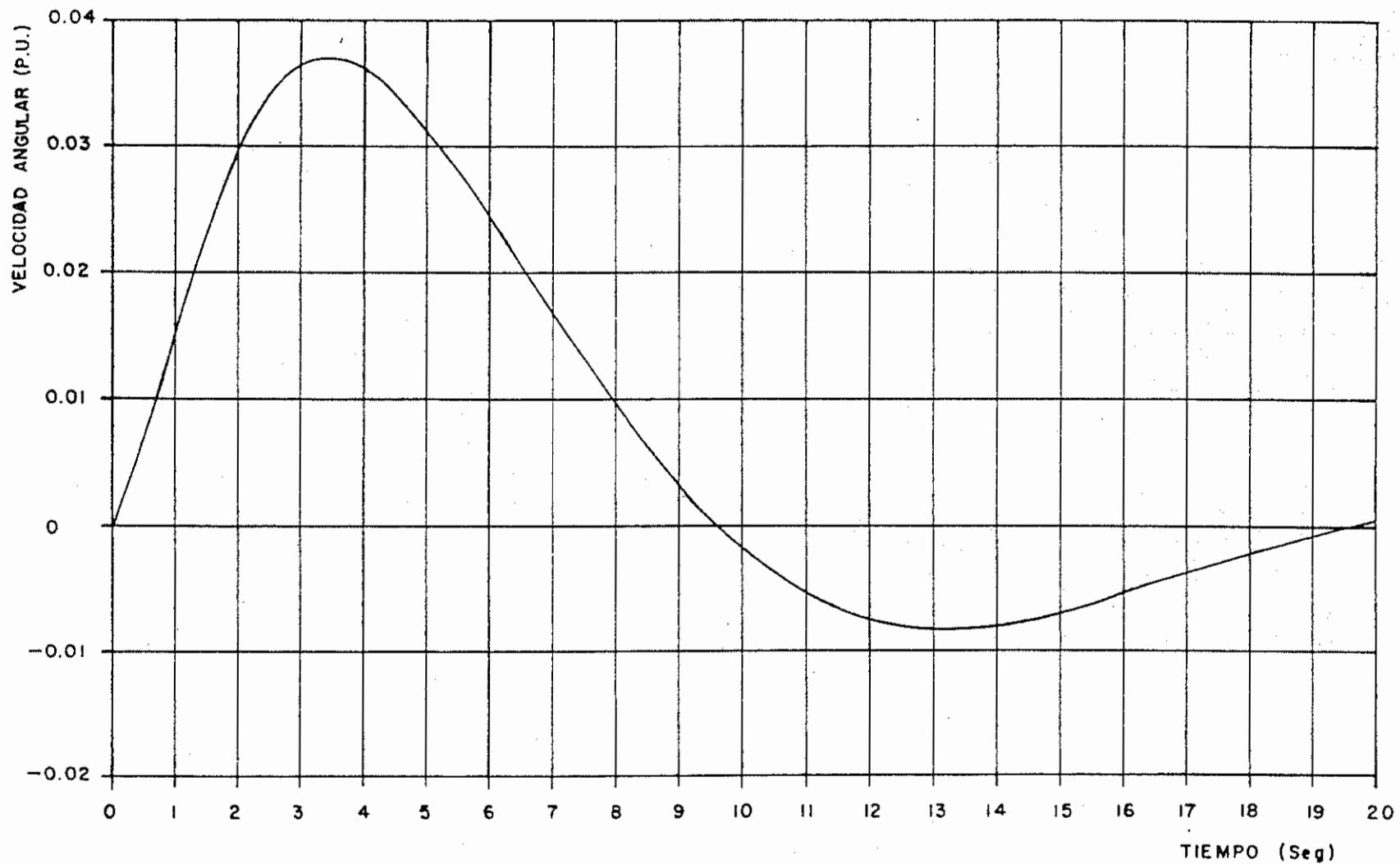


Fig. A.7. Cambio en por unidad de la velocidad angular para los siguientes parámetros:  $K_p = 2,94$  ,  $K_i = 0,61$   $\text{seg}^{-1}$  ,  $K_d = 3,53$   $\text{seg}$  ,  $\sigma = 0$  (cambio de carga del 10%).

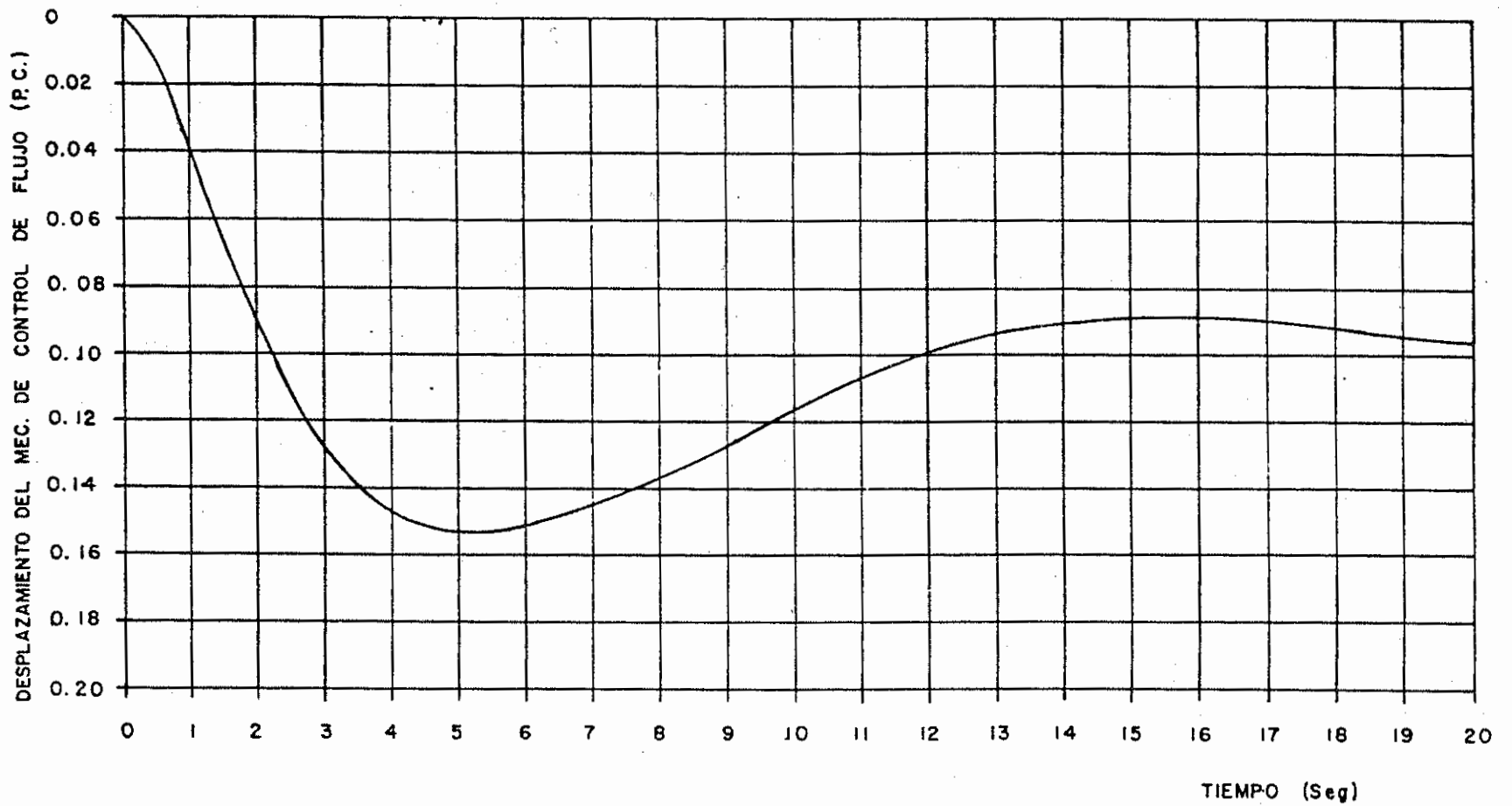


Fig. A.8. Cambio en por unidad del desplazamiento del mecanismo de control de flujo de la turbina, para los siguientes parámetros:  $K_p = 2,94$  ,  $K_i = 0,61 \text{ seg}^{-1}$  ,  $K_d = 3,53 \text{ seg}$  ,  $\sigma = 0$  (cambio de carga del 10%).

INTERVALO DE TIEMPO .1  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO= 4  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA= .25  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO= 1  
 COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO= 1  
 TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO= 7.11  
 TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA= .92  
 COEFICIENTE SIGMA= 1  
 TORQUE DE CARGA=-.1  
 VELOCIDAD DE REFERENCIA 0  
 GANANCIA PROPORCIONAL= 2.94  
 GANANCIA INTEGRAL= .61  
 GANANCIA DERIVATIVA= 6  
 A11= .5  
 A13= 1  
 A21= 1.5  
 A22= 0  
 A23= 1

| TIEMPO<br>[SEG] | VELOCIDAD<br>ANGULAR<br>[P. U.] | DESPLAZAMIENTO<br>DEL MECANISMO DE<br>CONTROL DE FLUJO<br>[P. U.] |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0               | 0                               | 0                                                                 |
| .2              | 3.00015018E-03                  | -.0111081722                                                      |
| .4              | 6.67277409E-03                  | -.0351781797                                                      |
| .6              | .0109309169                     | -.0647480624                                                      |
| .8              | .0154250293                     | -.0959215532                                                      |
| 1               | .0197707135                     | -.126080066                                                       |
| 1.2             | .0236274775                     | -.153278213                                                       |
| 1.4             | .0267288648                     | -.176101425                                                       |
| 1.6             | .0288934636                     | -.193631858                                                       |
| 1.8             | .0300259454                     | -.205422799                                                       |
| 2               | .0301115595                     | -.21145679                                                        |
| 2.2             | .0292059705                     | -.21208512                                                        |
| 2.4             | .0274219267                     | -.207953068                                                       |
| 2.6             | .0249141168                     | -.199917096                                                       |
| 2.8             | .0218634580                     | -.188960264                                                       |
| 3               | .0184619148                     | -.176111513                                                       |
| 3.2             | .0148987354                     | -.162373417                                                       |
| 3.4             | .0113488141                     | -.148661859                                                       |
| 3.6             | 7.96360154E-03                  | -.135759805                                                       |
| 3.79999999      | 4.86480151E-03                  | -.124206151                                                       |
| 3.99999999      | 2.1408596E-03                   | -.114679514                                                       |
| 4.19999999      | -1.53925202E-04                 | -.107195881                                                       |
| 4.39999999      | -1.99798004E-03                 | -.101918316                                                       |
| 4.59999999      | -3.39914662E-03                 | -.0987763981                                                      |
| 4.79999999      | -4.38995894E-03                 | -.0975726948                                                      |
| 4.99999999      | -5.02201307E-03                 | -.0980137733                                                      |
| 5.19999999      | -5.35991899E-03                 | -.0997427943                                                      |
| 5.39999999      | -5.47528172E-03                 | -.102371683                                                       |
| 5.59999999      | -5.44109412E-03                 | -.105510685                                                       |
| 5.79999999      | -5.3268427E-03                  | -.108793845                                                       |
| 5.99999999      | -5.19453971E-03                 | -.111899329                                                       |

|             |                 |               |
|-------------|-----------------|---------------|
| 6.79999999  | -5.330137E-03   | -.118308419   |
| 6.99999998  | -5.63129037E-03 | -.117946647   |
| 7.19999998  | -6.03855513E-03 | -.116834047   |
| 7.39999998  | -6.53520255E-03 | -.115073049   |
| 7.59999998  | -7.09858887E-03 | -.112795851   |
| 7.79999998  | -7.70250182E-03 | -.110151796   |
| 7.99999998  | -8.31940820E-03 | -.107295414   |
| 8.19999999  | -8.92247261E-03 | -.104375822   |
| 8.39999998  | -9.48724779E-03 | -.101527958   |
| 8.59999999  | -9.99297714E-03 | -.0988659628  |
| 8.8         | -.0104234774    | -.0964788155  |
| 9           | -.0107676856    | -.0944282043  |
| 9.2         | -.0110193387    | -.0927484368  |
| 9.4         | -.0111775143    | -.0914481162  |
| 9.6         | -.0112452983    | -.0905132216  |
| 9.80000001  | -.0112294508    | -.0899111986  |
| 10          | -.011139466     | -.0895956538  |
| 10.2        | -.01098666      | -.0895112659  |
| 10.4        | -.0107832703    | -.089598569   |
| 10.6        | -.010541624     | -.0897983182  |
| 10.8        | -.0102734193    | -.0900552169  |
| 11          | -9.98914694E-03 | -.0903208575  |
| 11.2        | -9.69767287E-03 | -.0905557981  |
| 11.4        | -9.40598216E-03 | -.0907307642  |
| 11.6        | -9.11908005E-03 | -.0908270229  |
| 11.8        | -8.84003292E-03 | -.0908368236  |
| 12          | -8.57012686E-03 | -.0907584309  |
| 12.2        | -8.30911683E-03 | -.0906027002  |
| 12.4        | -8.05553738E-03 | -.0903833511  |
| 12.60000001 | -7.80704612E-03 | -.0901190938  |
| 12.80000001 | -7.56077313E-03 | -.0898309488  |
| 13.00000001 | -7.31365289E-03 | -.089540483   |
| 13.20000001 | -7.0627197E-03  | -.0892682593  |
| 13.40000001 | -6.80535279E-03 | -.0890325682  |
| 13.60000001 | -6.53946238E-03 | -.0888484846  |
| 13.80000001 | -6.26361294E-03 | -.0887272641  |
| 14.00000001 | -5.97708461E-03 | -.0886760695  |
| 14.20000001 | -5.67987762E-03 | -.0886979994  |
| 14.40000001 | -5.37266724E-03 | -.0887923732  |
| 14.60000001 | -5.05671926E-03 | -.0889552193  |
| 14.80000001 | -4.73377703E-03 | -.0891799067  |
| 15.00000001 | -4.40593112E-03 | -.0894578576  |
| 15.20000001 | -4.07548262E-03 | -.0897792866  |
| 15.40000001 | -3.74480964E-03 | -.090133913   |
| 15.60000001 | -3.41624513E-03 | -.0905116058  |
| 15.80000001 | -3.09197236E-03 | -.0909029298  |
| 16.00000001 | -2.77394217E-03 | -.0912995702  |
| 16.20000001 | -2.46381426E-03 | -.0916946285  |
| 16.40000001 | -2.16292308E-03 | -.09208827866 |
| 16.60000001 | -1.87226671E-03 | -.0924603482  |
| 16.80000001 | -1.59251664E-03 | -.0928251728  |
| 17.00000001 | -1.32404457E-03 | -.0931765218  |
| 17.20000001 | -1.06696229E-03 | -.0935148374  |
| 17.40000001 | -8.2117029E-04  | -.0938414815  |
| 17.60000001 | -5.86410744E-04 | -.0941584528  |
| 17.80000001 | -3.62320894E-04 | -.0944681079  |
| 18.00000001 | -1.48483463E-04 | -.0947729001  |
| 18.20000001 | 5.55286897E-05  | -.0950751518  |
| 18.40000001 | 2.5011566E-04   | -.0953768715  |
| 18.60000001 | 4.35622531E-04  | -.095679618   |
| 18.80000001 | 6.12320809E-04  | -.095984417   |
| 19.00000001 | 7.80399044E-04  | -.0962917254  |
| 19.20000001 | 9.39961873E-04  | -.0966014406  |
| 19.40000001 | 1.09103626E-03  | -.0969129473  |
| 19.60000001 | 1.23359345E-03  | -.0972251929  |

19.8000002  
20.0000002

1.367515E-03  
1.49271112E-03

-.0975367832  
-.0978460897

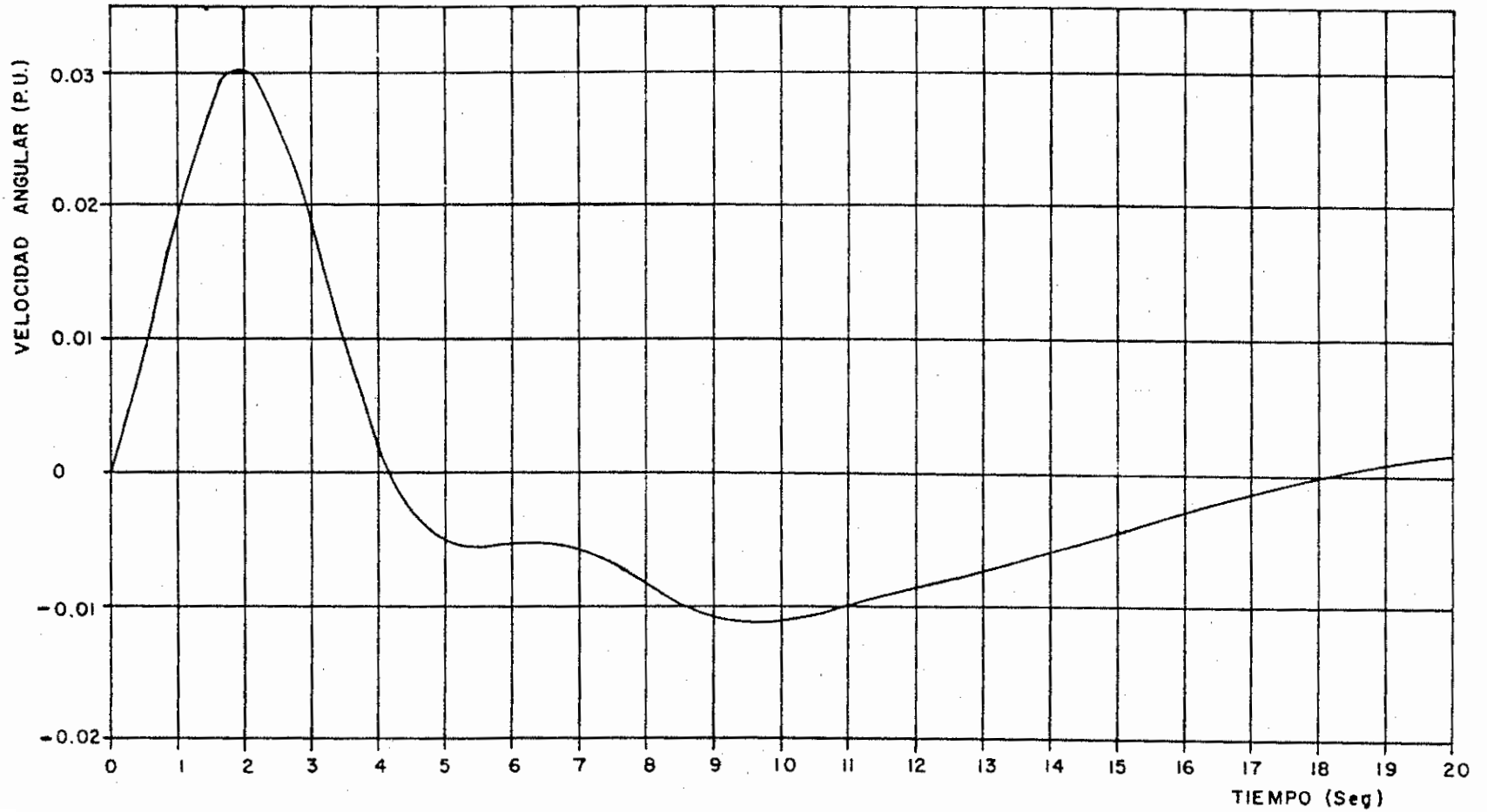


Fig. A.9. Cambio en por unidad de la velocidad angular para los siguientes parámetros  $K_p = 2,94$ ,  $K_i = 0,61 \text{ seg}^{-1}$ ,  $K_d = 6,0 \text{ seg}$   $\sigma = 1$ .

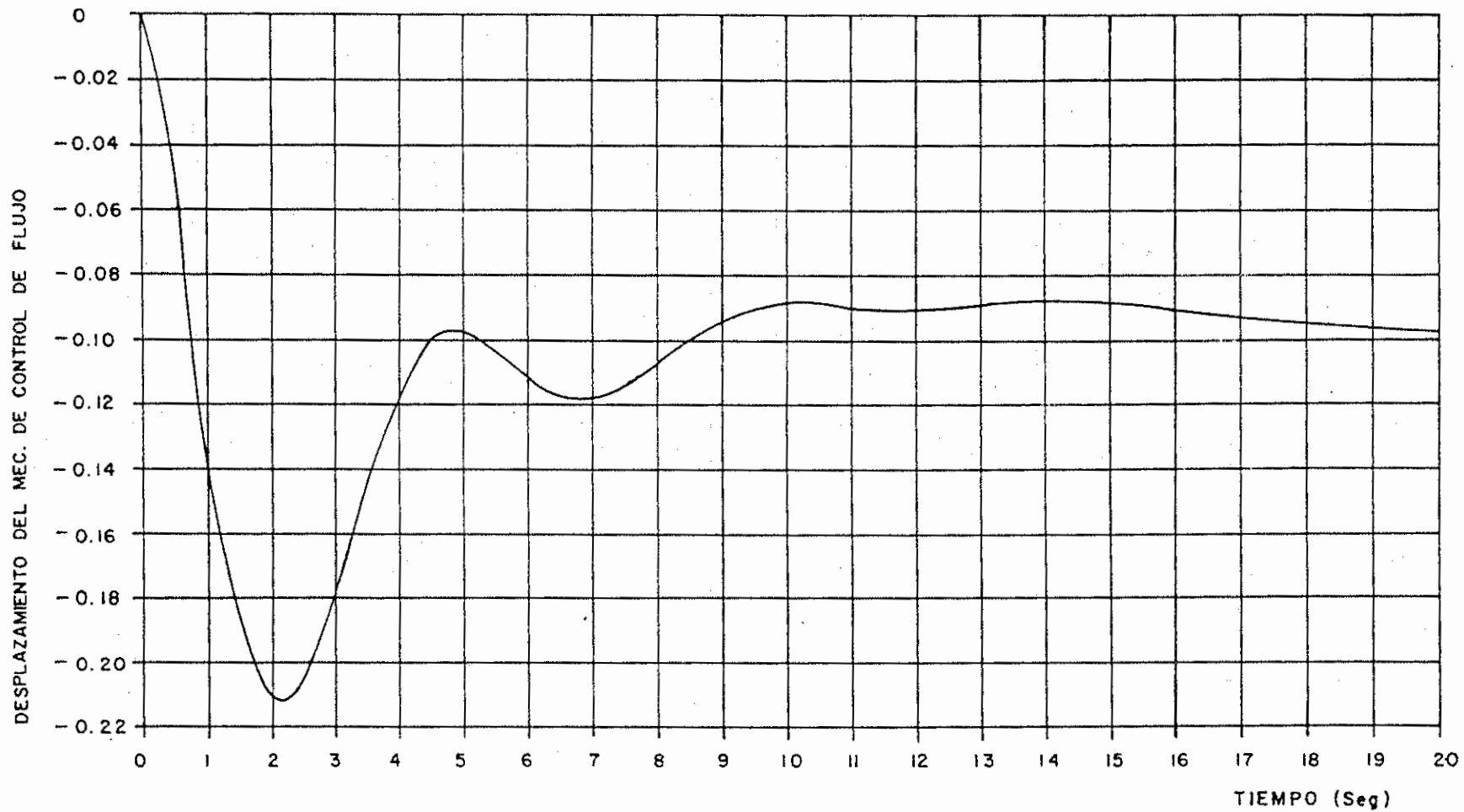


Fig. A.10. Cambio en por unidad del desplazamiento del mecanismo de control de flujo de la turbina para los siguientes parámetros:  $K_p = 2,94$  ,  $K_i = 0,61 \text{ seg}^{-1}$  ,  $K_d = 6,0 \text{ seg}$  ,  $\sigma = 1$ .

INTERVALO DE TIEMPO .1  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO= 4  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA= .25  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO= 1  
 COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO= 1  
 TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO= 7.11  
 TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA= .92  
 COEFICIENTE SIGMA= 0  
 TORQUE DE CARGA=-.1  
 VELOCIDAD DE REFERENCIA 0  
 GANANCIA PROPORCIONAL= 2.94  
 GANANCIA INTEGRAL= .61  
 GANANCIA DERIVATIVA= 6  
 A11= .5  
 A13= 1  
 A21= 1.5  
 A22= 0  
 A23= 1

| TIEMPO<br>[SEG] | VELOCIDAD<br>ANGULAR<br>[P. U.] | DESPLAZAMIENTO<br>DEL MECANISMO DE<br>CONTROL DE FLUJO<br>[P. U.] |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0               | 0                               | 0                                                                 |
| .2              | 2.89987047E-03                  | -5.17985316E-03                                                   |
| .4              | 6.11980641E-03                  | -.0167407952                                                      |
| .6              | 9.63619754E-03                  | -.0314773219                                                      |
| .8              | .0132990892                     | -.0476843457                                                      |
| 1               | .0169333194                     | -.06416325                                                        |
| 1.2             | .020374864                      | -.0799675543                                                      |
| 1.4             | .0234861608                     | -.0943522654                                                      |
| 1.6             | .0261631585                     | -.106771015                                                       |
| 1.8             | .0283379396                     | -.116876455                                                       |
| 2               | .029978286                      | -.124512384                                                       |
| 2.2             | .0310849132                     | -.129696049                                                       |
| 2.4             | .0316869569                     | -.132592229                                                       |
| 2.6             | .0318362714                     | -.133481644                                                       |
| 2.8             | .0316010797                     | -.132726448                                                       |
| 3               | .0310594765                     | -.130735409                                                       |
| 3.2             | .0302932213                     | -.127931049                                                       |
| 3.4             | .0293821793                     | -.124728579                                                       |
| 3.6             | .0283996752                     | -.121471949                                                       |
| 3.79999999      | .02740889265                    | -.11849583                                                        |
| 3.99999999      | .0264686341                     | -.116033852                                                       |
| 4.19999999      | .0255917187                     | -.114252953                                                       |
| 4.39999999      | .0248251227                     | -.113245342                                                       |
| 4.59999999      | .0241705373                     | -.113033288                                                       |
| 4.79999999      | .0236258776                     | -.11357773                                                        |
| 4.99999999      | .0231793041                     | -.11478963                                                        |
| 5.19999999      | .022811583                      | -.116542927                                                       |
| 5.39999999      | .0224985843                     | -.118688063                                                       |
| 5.59999999      | .022213739                      | -.121065098                                                       |
| 5.79999999      | .0219383011                     | -.12351565                                                        |
| 5.99999999      | .0216232969                     | -.125893054                                                       |
| 6.19999999      | .0212710812                     | -.128078333                                                       |
| 6.39999999      | .0208564541                     | -.129945783                                                       |



|             |                 |              |
|-------------|-----------------|--------------|
| 6.599999999 | .0203673299     | -.131446153  |
| 6.799999999 | .0197969775     | -.132527543  |
| 6.999999998 | .0191438776     | -.133174301  |
| 7.199999998 | .0184112594     | -.133396261  |
| 7.399999998 | .0176963925     | -.133224739  |
| 7.599999998 | .0167397136     | -.13270771   |
| 7.799999998 | .0158238662     | -.131904616  |
| 7.999999998 | .0148727298     | -.130881151  |
| 8.199999999 | .0139004992     | -.129704397  |
| 8.399999998 | .0129208682     | -.128438554  |
| 8.599999999 | .011946354      | -.127141457  |
| 8.8         | .0109877866     | -.125861996  |
| 9           | .0100539714     | -.124638467  |
| 9.2         | 9.15152336E-03  | -.123497842  |
| 9.4         | 8.28485859E-03  | -.122455857  |
| 9.6         | 7.45632117E-03  | -.121517814  |
| 9.80000001  | 6.6664187E-03   | -.120679928  |
| 10          | 5.91413574E-03  | -.119931065  |
| 10.2        | 5.19729393E-03  | -.119254701  |
| 10.4        | 4.51292943E-03  | -.118630943  |
| 10.6        | 3.85766078E-03  | -.118038473  |
| 10.8        | 3.2280252E-03   | -.117456309  |
| 11          | 2.62076634E-03  | -.116865276  |
| 11.2        | 2.0330618E-03   | -.11624916   |
| 11.4        | 1.46268469E-03  | -.115595491  |
| 11.6        | 9.08098248E-04  | -.114895974  |
| 11.8        | 3.68487091E-04  | -.114146579  |
| 12          | -1.56267778E-04 | -.113347343  |
| 12.2        | -6.6566043E-04  | -.112501924  |
| 12.4        | -1.15866559E-03 | -.111616987  |
| 12.6000001  | -1.63387338E-03 | -.110701467  |
| 12.8000001  | -2.0896203E-03  | -.109765793  |
| 13.0000001  | -2.52414074E-03 | -.10882111   |
| 13.2000001  | -2.93569458E-03 | -.107878566  |
| 13.4000001  | -3.32268439E-03 | -.106948682  |
| 13.6000001  | -3.68374994E-03 | -.106040858  |
| 13.8000001  | -4.01783783E-03 | -.105163002  |
| 14.0000001  | -4.32424499E-03 | -.104321306  |
| 14.2000001  | -4.60263681E-03 | -.103520158  |
| 14.4000001  | -4.85304216E-03 | -.102762171  |
| 14.6000001  | -5.07582856E-03 | -.102048321  |
| 14.8000001  | -5.27166187E-03 | -.101378161  |
| 15.0000001  | -5.44145488E-03 | -.100750889  |
| 15.2000001  | -5.58630968E-03 | -.10016165   |
| 15.4000001  | -5.707458E-03   | -.0996098384 |
| 15.6000001  | -5.80620365E-03 | -.099091394  |
| 15.8000001  | -5.88387E-03    | -.0986030618 |
| 16.0000001  | -5.94175529E-03 | -.0981418117 |
| 16.2000001  | -5.98109709E-03 | -.0977050065 |
| 16.4000001  | -6.00304685E-03 | -.0972905173 |
| 16.6000001  | -6.00865452E-03 | -.0968967838 |
| 16.8000001  | -5.99886267E-03 | -.0965228261 |
| 17.0000001  | -5.97450899E-03 | -.096168213  |
| 17.2000001  | -5.93633556E-03 | -.0958329954 |
| 17.4000001  | -5.88500334E-03 | -.0955176146 |
| 17.6000001  | -5.82110995E-03 | -.0952227952 |
| 17.8000001  | -5.74520902E-03 | -.0949494307 |
| 18.0000001  | -5.65782959E-03 | -.0946984727 |
| 18.2000001  | -5.55949398E-03 | -.0944708278 |
| 18.4000001  | -5.45073334E-03 | -.0942672705 |
| 18.6000001  | -5.33209991E-03 | -.0940883739 |
| 18.8000001  | -5.20417558E-03 | -.0939344606 |
| 19.0000001  | -5.0675767E-03  | -.0938055754 |

15.0000002  
20.0000002

-4.4473439E-03  
-4.27833324E-03

1.833313213  
-.0935198862

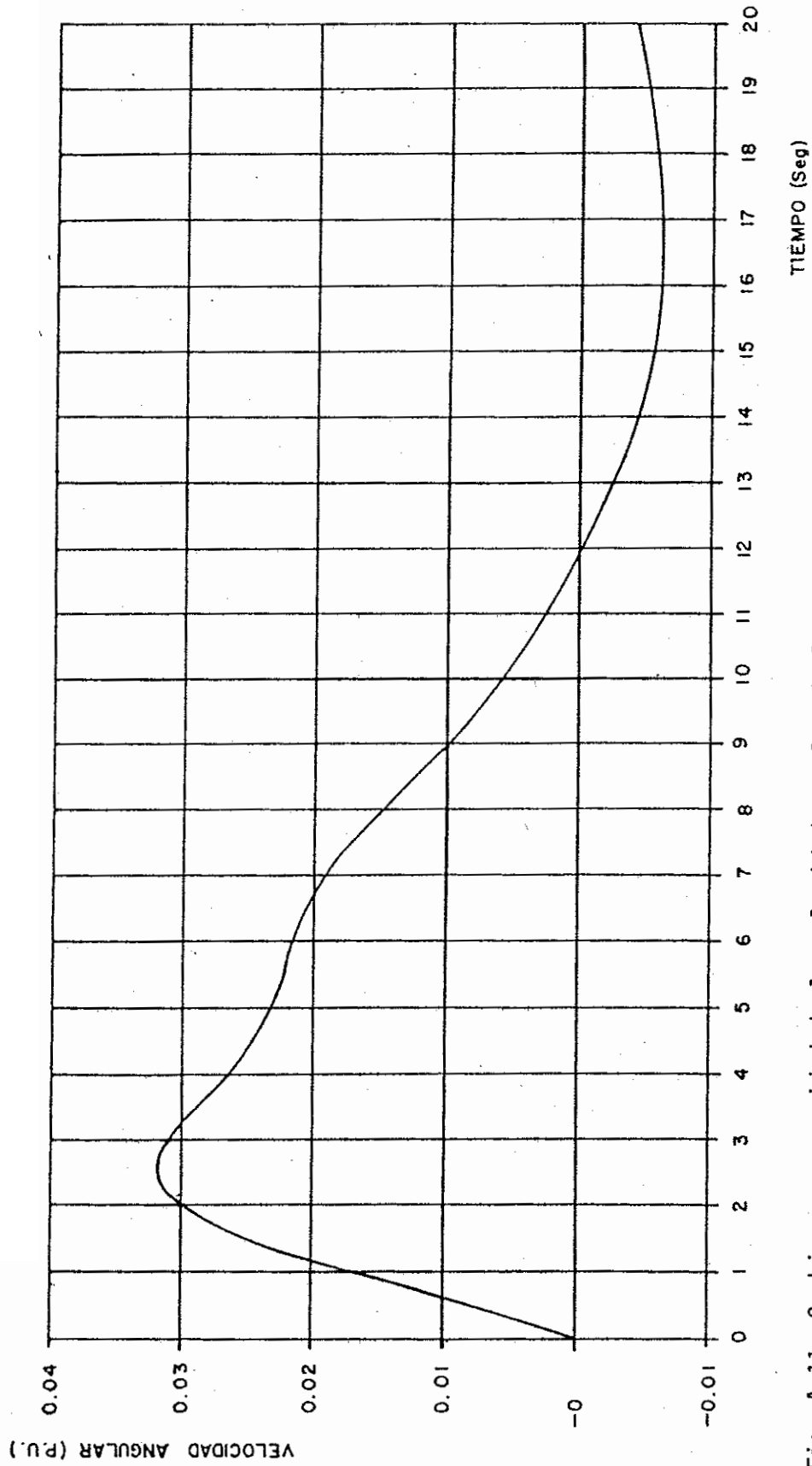


Fig. A.11. Cambio en por unidad de la velocidad angular de la turbina para los siguientes parámetros:  $K_p = 2,94$ ,  $K_i = 0,61 \text{ seg}^{-1}$ ,  $K_d = 6,0 \text{ seg}$ ,  $\sigma = 0$

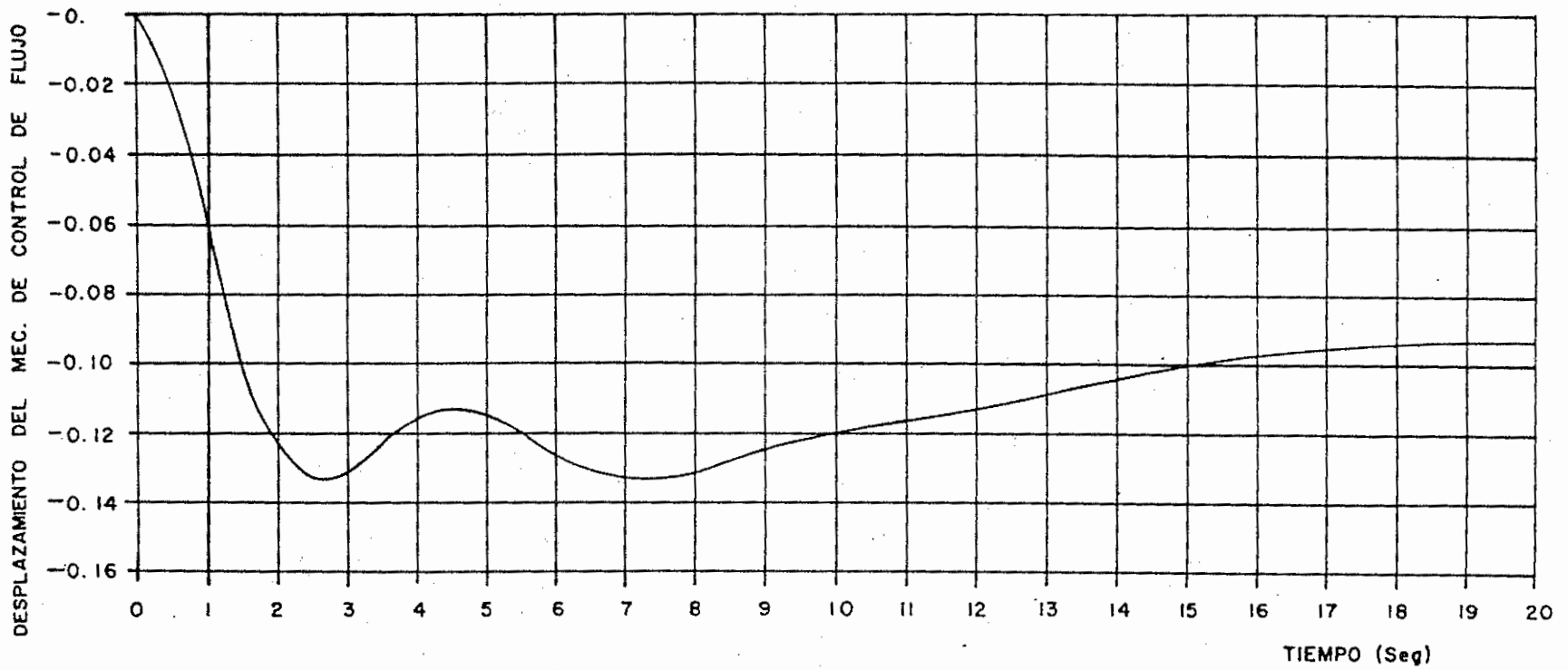


Fig. A.12. Cambio en por unidad del desplazamiento del mecanismo de control flujo de la turbina para los siguientes parámetros:  $K_p = 2,94$  ,  $K_i = 0,61 \text{ seg}^{-1}$  ,  $K_d = 6,0 \text{ seg}$  ,  $\sigma = 0$ .

$$K_p = 2,94$$

$$K_i = 0,61$$

$$K_d = 6$$

$$\tau_1 = 1 \text{ seg}$$

$$\sigma = 1$$

$$\tau_F = 4$$

Se corre nuevamente el programa del apéndice A, para cambio escalón de la velocidad de referencia  $\Delta W_R$  (10%) para chequeo de cierre brusco del mecanismo de control de flujo de la turbina. Los resultados se presentan en la tabla A.7. Se ve que no hay posibilidad de cierre brusco del mecanismo de control de flujo de la turbina.

Con relación al valor de  $\sigma = 0$  se debe mencionar que para este caso no fue necesario el modo "feedforward de ganancia", pero esto no es general. El valor de  $\sigma = 1$  hace bajar el sobretiro máximo de la respuesta aunque parece afectar el tiempo de estabilización.

Además a partir del arreglo con "feedforward de ganancia" es factible en forma fácil, con poco cambio de la construcción electrónica llegar al modo "feedforward" y obtener la calidad del transitorio óptimo.

#### A1.5. CALCULOS RELATIVOS AL SERVO MOTOR DE FUERZA

. Capacidad de trabajo  $A_2$ :

De acuerdo al volumen III (Manual del Regulador Oleo-Mecánico de Velocidad), para las turbinas Banki, estandarizadas la capacidad de trabajo está dado por:

$$A_2 = 155 D_e \cdot Q \cdot \sqrt{H} \quad (\text{kg-m})$$

$$A_2 = 155 \times 0,4 \times 1,5 \times \sqrt{90} = 882,3 \quad (\text{Kg-m})$$

$$A_2 = 88227,5 \quad (\text{Kg-cm})$$

. Volumen del servomotor  $V_2$ :

$$V_2 = K_v \cdot \frac{A_2}{P_2}$$

con  $K_v = 1,25$  y  $P_2 = 18 \text{ Kg-cm}^2$

INTERVALO DE TIEMPO .1  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO= 4  
 CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA= .25  
 CONTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO= 1  
 COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO= 1  
 TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO= 7.11  
 TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA= .92  
 COEFICIENTE SIGMA= 1  
 TORQUE DE CARGA= 0  
 VELOCIDAD DE REFERENCIA .1  
 GANANCIA PROPORCIONAL= 2.94  
 GANANCIA INTEGRAL= .61  
 GANANCIA DERIVATIVA= 6  
 A11= .5  
 A13= 1  
 A21= 1.5  
 A22= 0  
 A23= 1

| TIEMPO<br>[SEG] | VELOCIDAD<br>ANGULAR<br>[P. U.] | DESPLAZAMIENTO<br>DEL MECANISMO DE<br>CONTROL DE FLUJO<br>[P. U.] |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0               | 0                               | 0                                                                 |
| .2              | -1.52423542E-04                 | 9.04636396E-03                                                    |
| .4              | -8.53131087E-04                 | .0286809422                                                       |
| .6              | -2.0328312E-03                  | .0528480909                                                       |
| .8              | -3.40775597E-03                 | .0703762009                                                       |
| 1               | -4.66467955E-03                 | .103123052                                                        |
| 1.2             | -5.52512323E-03                 | .125487271                                                        |
| 1.4             | -5.77014269E-03                 | .144294825                                                        |
| 1.6             | -5.24960507E-03                 | .158773326                                                        |
| 1.8             | -3.88335482E-03                 | .168533101                                                        |
| 2               | -1.65702879E-03                 | .173534708                                                        |
| 2.2             | 1.38596266E-03                  | .174041514                                                        |
| 2.4             | 5.15508905E-03                  | .170559152                                                        |
| 2.6             | 9.52489001E-03                  | .163769677                                                        |
| 2.8             | .014347691                      | .15446274                                                         |
| 3               | .0194659507                     | .143470053                                                        |
| 3.2             | .0247234999                     | .131606387                                                        |
| 3.4             | .0299751071                     | .119620034                                                        |
| 3.6             | .0350939942                     | .108154569                                                        |
| 3.79999999      | .0399771108                     | .0977227665                                                       |
| 3.99999999      | .0445481472                     | .0886926232                                                       |
| 4.19999999      | .0487584123                     | .0812846676                                                       |
| 4.39999999      | .0525858231                     | .0755791296                                                       |
| 4.59999999      | .0560323405                     | .0715311111                                                       |
| 4.79999999      | .059120234                      | .0689916477                                                       |
| 4.99999999      | .0618875831                     | .0677324735                                                       |
| 5.19999999      | .0643834133                     | .0674723707                                                       |
| 5.39999999      | .066662829                      | .0679031865                                                       |
| 5.59999999      | .0687824594                     | .0687138911                                                       |
| 5.79999999      | .0707964632                     | .0696114077                                                       |
| 5.99999999      | .072753272                      | .0703373309                                                       |
| 6.19999999      | .0746931751                     | .0706800434                                                       |
| 6.39999999      | .0766467828                     | .0704820996                                                       |

|            |             |                 |
|------------|-------------|-----------------|
| 5.99999999 | .0786343425 | .0696430738     |
| 6.79999999 | .0806658301 | .0681183303     |
| 6.99999999 | .0827417012 | .0659143707     |
| 7.19999999 | .0848541602 | .0630815418     |
| 7.39999999 | .0869887923 | .0597049455     |
| 7.59999999 | .0891264022 | .0558943887     |
| 7.79999999 | .0912449104 | .0517741537     |
| 7.99999999 | .0933211791 | .0474732723     |
| 8.19999999 | .0953326584 | .0431168554     |
| 8.39999999 | .0972587721 | .0388188863     |
| 8.59999999 | .0990819916 | .0346767326     |
| 8.8        | .100788572  | .0307674864     |
| 9          | .102368951  | .0271461078     |
| 9.2        | .103817829  | .0238452368     |
| 9.4        | .10513398   | .0208764485     |
| 9.6        | .106319826  | .0182326669     |
| 9.80000001 | .107380856  | .0158914191     |
| 10         | .108324926  | .0138186004     |
| 10.2       | .109161524  | .0119724382     |
| 10.4       | .109901036  | .0103073704     |
| 10.6       | .11055406   | 8.77760289E-03  |
| 10.8       | .111130818  | 7.34016271E-03  |
| 11         | .111640672  | 5.95732261E-03  |
| 11.2       | .112091776  | 4.59833085E-03  |
| 11.4       | .112490851  | 3.24043375E-03  |
| 11.6       | .112843093  | 1.86922592E-03  |
| 11.8       | .113152196  | 4.78401463E-04  |
| 12         | .113420464  | -9.30992764E-04 |
| 12.2       | .113649008  | -2.35168263E-03 |
| 12.4       | .113837986  | -3.77154466E-03 |
| 12.6000001 | .113986876  | -5.17511158E-03 |
| 12.8000001 | .114094752  | -6.54509011E-03 |
| 13.0000001 | .114160552  | -7.86379128E-03 |
| 13.2000001 | .114183312  | -9.11439317E-03 |
| 13.4000001 | .114162361  | -.0102819782    |
| 13.6000001 | .114097477  | -.0113543097    |
| 13.8000001 | .113988976  | -.0123223339    |
| 14.0000001 | .113837771  | -.0131804144    |
| 14.2000001 | .113645366  | -.0139263198    |
| 14.4000001 | .113413824  | -.0145610011    |
| 14.6000001 | .113145692  | -.0150882021    |
| 14.8000001 | .112843912  | -.01551395      |
| 15.0000001 | .112511709  | -.0158459766    |

$$V_2 = 1,25 \times \frac{88227,5}{18} = 6126,9 \quad (\text{cm}^3)$$

- Fuerza máxima del servomotor para accionar el mecanismo de control de flujo.

$$F_{\text{máx}} = \frac{A_2}{1,1 Y_{O_2}}$$

Asumiendo que la carrera del mecanismo de control de flujo en el punto donde acciona el servomotor de fuerza es de 23 cm ( $Y_{O_2}$ )

$$F_{\text{máx}} = \frac{88227,5}{1,1 \times 23} = 3487,3 \quad (\text{kg})$$

- Sección del vástago del servomotor de fuerza ( $Av_{S_2}$ )

$$Av_{S_2} = \frac{1,2 F_{\text{máx}}}{\sigma_{VS}}$$

Si para acero,  $\sigma_{VS} = 300 \text{ Kg/cm}^2$

$$Av_{S_2} = \frac{1,2 \times 3487,3}{300} = 13,95 \text{ cm}^2$$

$$Av_{S_2} = 13,95 \text{ cm}^2$$

- Diámetro del vástago del servomotor de fuerza

$$d_{VS_2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot Av_{S_2}}$$

$$d_{VS_2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times 13,95} = 4,2 \text{ cm}$$

- Area útil de la sección de aceite del servomotor de fuerza:

$$As_2 = \frac{V_2}{Y_{O_2}}$$

$$As_2 = \frac{6126,9}{23} = 266,4 \text{ cm}^2$$

$$As_2 = 266,4 \text{ cm}^2$$



. Diámetro de cilindro del servomotor de fuerza

$$D_{s_2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot (A_{s_2} + A_{v_{s_2}})}$$

$$D_{s_2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} (266,4 + 13,95)}$$

$$D_{s_2} = 18,4 \quad (\text{cm})$$

. Diámetro de la válvula distribuidora

$$D_2 = K \cdot V_2$$

K, constante estimada a partir de la relación  $D_2/V_2$  de reguladores existentes. De reguladores "Woodward Governier Company" se tiene que:

$$K = 2,358 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$$

(valor que coincide con el del regulador construido y probado en la Escuela Politécnica Nacional).

con lo que:

$$D_2 = 2,358 \times 10^{-3} \times 6126,9$$

$$D_2 = 14.45 \text{ cm}$$

. Sección de paso de aceite al servomotor de fuerza

$$S_2 = \frac{A_{s_2} \cdot Y_{o_2}}{C_{d_2} \cdot T_s \cdot \left(\frac{2g}{\gamma} \cdot \frac{A_2}{V_2}\right)^{1/2}}$$

con:

$$T_s = 3,6 \text{ seg} ; \gamma = 0,853 \times 10^{-3} \text{ (Kg/cm}^3\text{)} \text{ y } C_{d_2} = 0,6$$

$$S_2 = \frac{266,4 \times 23}{0,6 \times 3,6 \times \left(0,853 \times 10^{-3} \times \frac{88227,5}{6126,9}\right)^{1/2}}$$

$$S_2 = 0,493 \quad (\text{cm}^2)$$

Que corresponde a un orificio cuyo diámetro es de: 0,79 cm.

. Fuerza de reacción hidráulica en la válvula de carrete

$$Ft_2 = 2 \cdot Qs_2 \cdot \sqrt{\rho \cdot Pv_2} \cos \theta'$$

$$\text{Asumiendo } Pv_2 = 2 \times 35 = 70 \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

$$\text{y para } \rho = 0,853 \times 10^{-3} \quad \text{Kg/cm}^3$$

$$Qs_2 = \frac{As_2 \cdot Yo_2}{Ts} = \frac{266,4 \times 23}{3,6} = 1702 \quad \text{cm}^3/\text{seg}$$

$$Qs_2 = 1702 \quad (\text{cm}^3/\text{seg})$$

$$Ft_2 = 2 \times 1702 \sqrt{\frac{0,853 \times 10^{-3} \times 70}{980}}$$

$$Ft_2 = 26,6 \quad (\text{kg})$$

(asumiendo  $\theta' = 0^\circ$ )

#### A1.6. CALCULOS RELATIVOS AL SERVOMOTOR PILOTO

. Fuerza que debe hacer el servo

$$Fp = Ft_2 \cdot \frac{L_2}{L_{O_2}}$$

Considerando la aplicación de la fuerza es en el centro de la palanca de realimentación del servomotor de fuerza:

$$\frac{L_2}{L_{O_2}} = 2$$

$$Fp = 26,6 \times 2 = 53,2 \quad (\text{Kg})$$

. Capacidad de trabajo

$$A = 1,1 (Fp) \times Y_0$$

Si se considera un valor de  $Y_0$  de 0,8 cm (aproximadamente igual - al diámetro del orificio de paso de aceite al cilindro del servomotor de fuerza).

$$A = 1,1 \times 53,2 \times 0,8 = 46,82 \quad (\text{Kg-cm})$$

Volumen del cilindro:

$$V = K_v \cdot \frac{A}{P}$$

Para  $K_v = 1,5$  y  $P = 10 \text{ Kg/c}$

$$V = \frac{1,5 \times 46,82}{10} = 7,02 \text{ cm}^3$$

Sección del vástago:

$$A_{vs} = \frac{1,2 \times Fp}{\sigma_{vs}}$$

$$A_{vs} = \frac{1,2 \times 53,2}{300} = 0,213 \quad (\text{cm}^2)$$

Diámetro del vástago:

$$d_{vs} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_{vs}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times 0,213} = 0,52 \quad (\text{cm})$$

Para más robustez de conjunto, se puede considerar que el diámetro sea de 1 cm.

$d_{vs} = 1 \text{ cm}$ , cuya área corresponde a:

$$A_{vs} = 0,785 \quad (\text{cm}^2)$$

. Área útil del servopiloto

$$A_s = \frac{V}{Y_0}$$

$$A_s = \frac{7,02}{0,8} = 8,78 \text{ cm}^2$$

. Diámetro del cilindro:

$$D_s = \sqrt{\frac{4}{\pi} (A_s + A_{vs})}$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4}{\pi} (8,78 + 0,785)}$$

$$D_s = 3,5 \text{ cm}$$

Sección de paso de aceite:

$$S = \frac{Q_s}{C_d \left( \frac{2g}{\gamma} \cdot \frac{A}{v} \right)^{1/2}}$$

Considerando un circuito de alimentación de aceite al servomotor de fuerza y al servomotor piloto como el mostrado en la figura A.13. se puede asumir que, como la resistencia al movimiento de la carga del servopiloto es menor que la del servo de fuerza, toda la capacidad de caudal de aceite  $Q_s$  de la bomba de aceite se volcará hacia el cilindro del servopiloto cuando el conjunto hidráulico empieza su funcionamiento y luego el mismo caudal servirá para accionar el servomotor de fuerza.

En esta circunstancia,  $Q_s$  será igual a  $Q_{s2}$ .

$$Q_s = 1702 \text{ cm}^3/\text{seg}, \text{ y}$$

$$S = \frac{1702}{0,6 \left( \frac{2 \times 980}{0,853 \times 10^{-3}} \times \frac{46,82}{7,02} \right)^{1/2}} = 0,725 \text{ cm}^2$$

$$S = 0,725 \text{ cm}^2$$

Que corresponde a un orificio de diámetro:

$$d = 0,96 \text{ cm}$$

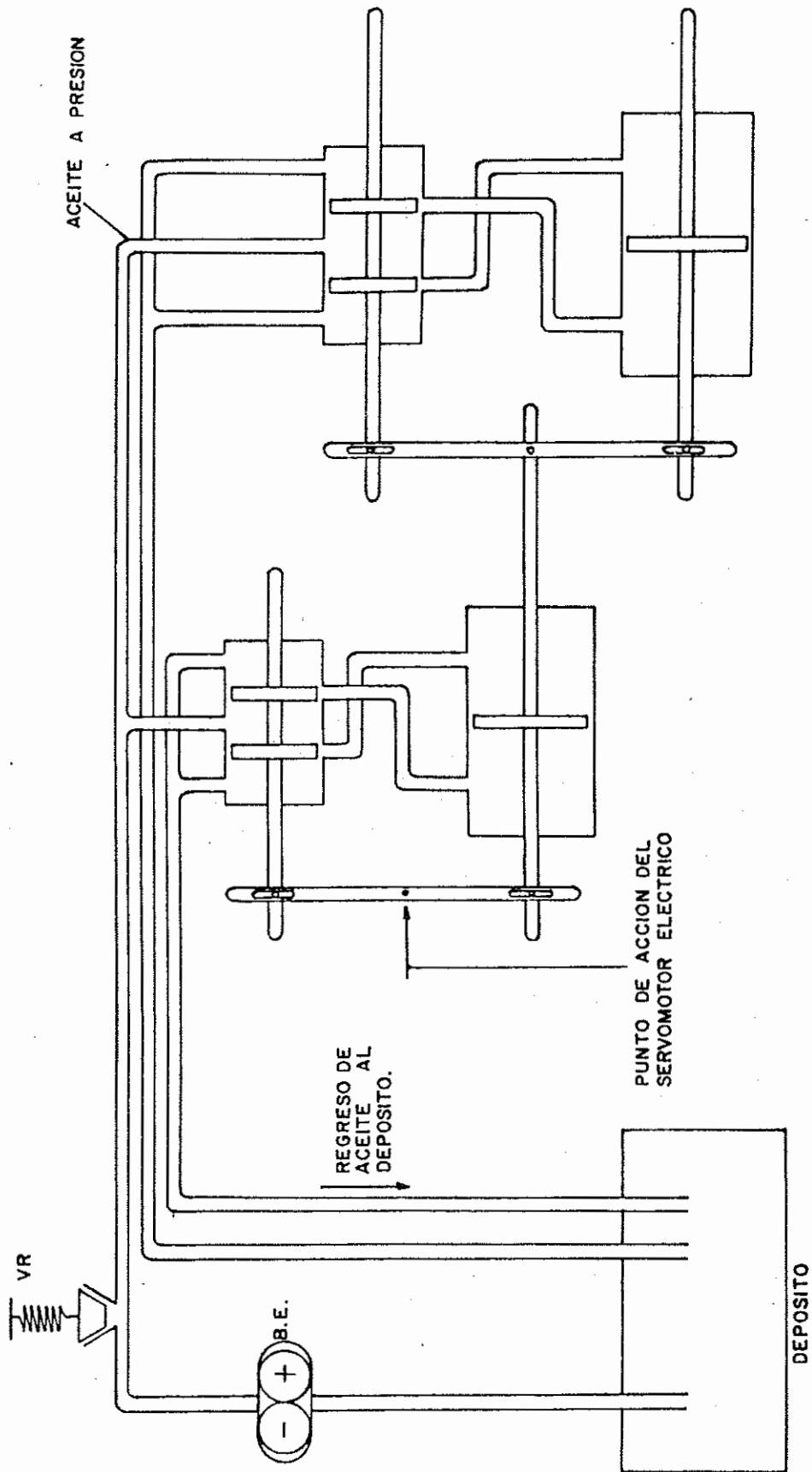


Fig. A.13. Circuitos de aceite de los servomotores hidráulicos, piloto y de fuerza.

. Fuerza sobre el carrete de la válvula de carrete:

$$F_t = 2 Q_s \sqrt{\rho P_v} \cos \theta'$$

Asumiendo:

$$P_v = 2 \times 10$$

$$P_v = 20 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_t = 2 \times 1702 \sqrt{\frac{0,853 \times 10^{-3}}{980} \times 20}$$

$$F_t = 14,2 \text{ Kg}$$

. Diámetro del carrete de la válvula:

$$D = K \cdot V ; \quad K = 2,358 \cdot 10^{-3} ; \quad V = 7,02 \text{ cm}^3$$

$D = 1,6 \text{ mm.}$ , valor muy bajo desde punto de vista práctico y por tanto se asume:

$$D = 2 \text{ cm.}$$

. Constante de tiempo del servopiloto:

$$\tau = \frac{A_s}{C_{v0} \left(1 - \frac{L_0}{L}\right)}$$

Donde:

$$C_{v0} = \frac{Q_s}{x}$$

Para la condición, que la acción del servomotor eléctrico esté dada en el punto medio de la palanca de realimentación del servo motor piloto y que:

$$x = 0,96 \quad , \quad \text{se tiene que:}$$

$$\tau = \frac{8,78 \times 2 \times 0,96}{1702}$$

$$\tau = 0,0099 \text{ seg.}$$

Dado el bajo valor de la constante de tiempo del servopiloto, se pueden justificar dos cosas:

1. Que en la simulación, realizada para la determinación de los parámetros del regulador, se haya despreciado esa constante de tiempo.
2. Que en el instante inicial del funcionamiento del sistema hidráulico total (servo de fuerza, servo piloto y accesorios) el caudal de la bomba se vuelque hacia el servopiloto).

#### A1.7. CALCULOS RELATIVOS AL SERVOMOTOR ELECTRICO

Fuerza en el tornillo:

Considerando que la acción del servoelectrico en el presente caso se ejerce en la mitad de la varilla de realimentación del servopiloto, la fuerza que la tuerca ejerce sobre el tornillo es:

$$F_p = \frac{L}{L_0} F_t$$

$$F_p = 2 \times 14,2 = 28,4 \text{ Kg}$$

Entonces el mínimo torque que debe vencer el motorcito eléctrico es

$$T_p = \frac{F_p D_m}{2} \times \frac{\cos \phi \tan \lambda + u}{\cos \phi - u \tan \lambda}$$

Considerando un ángulo de hélice de 2,5, un ángulo de rosca de 30, un coeficiente de razonamiento  $u = 0,2$  y un diámetro medio del tornillo de 7,03 mm se tiene:

$$T_p = \frac{28,4 \times 7,03 \times 10^{-3}}{2} \times \left( \frac{\cos 30^\circ \tan 2,5^\circ + 0,2}{\cos 30^\circ - 0,2 \tan 25^\circ} \right)$$

$$T_p = 2,77 \times 10^{-2} \text{ Kg-m}$$

. Inercia del conjunto reflejado al eje del motor:

$$J = J_r + J_v \left( \frac{K_\theta}{L_0} \right)^2 + K_\theta^2 \frac{L^2}{L_0^2} \times M_{vv}$$

Se asume que la relación de transmisión de conjunto tuerca tornillo es:

$$K_\theta = 1,07 \text{ (mm/vuelta)} = \frac{1,07}{2\pi} \text{ (mm/rad)}$$

Considerando una varilla de realimentación del servopiloto de una longitud de 35 cm; un ancho de 1,9 cm y un espesor de 0,32 cm, su masa tendrá el siguiente valor:

$$m_v = 35 \times 1,9 \times 0,32 \times 7,8 \times 10^{-3}$$

$$m_v = 0,166 \text{ (Kg)}$$

Inercia de la varilla:

$$J_v = \frac{1}{3} m_v L^2$$

$$J_v = \frac{1}{3} \times 0,166 \times 35^2$$

$$J_v = 67,78 \text{ (Kg-cm}^2\text{)}$$

. Masa del carrete de la válvula de carrete:

Considerando un carrete de 20 cm con un diámetro promedio de 2 cm su masa sería:

$$m_{vv} = 20 \times \frac{\pi \times 2^2}{4} \times 7,8 \times 10^{-3}$$

$$m_{vv} = 0,49 \text{ Kg}$$

. El valor de la inercia reflejada al eje del motor es:

$$J = J_r + 67,78 \left( \frac{1,07}{2\pi \times 170} \right)^2 + \left( \frac{1,07 \times 0,1}{2\pi} \right)^2 \times 2^2 \times 0,49$$



$$J = (J_r + 6,8 \times 10^{-5} + 5,684 \times 10^{-4}) \quad (\text{Kg-cm}^2)$$

. Selección del motor eléctrico:

Se selecciona un motorcito eléctrico de imán permanente del catálogo de la "ELECTRO CRAFT CORPORATION", Modelo E-660 (con un número de embobinado "-02") cuyas características son las siguientes: [18]

Torque máximo (continuo): 0,8474 New-m (120 Oz-pulg)

Inercia de la armadura :  $2,118 \times 10^{-4} \text{ Kg-m}^2$  (0,03 Oz-pulg-sec<sup>2</sup>)

Pérdidas rotacionales :  $4,58551 \times 10^{-5} \frac{\text{New-m}}{\text{rad/seg}}$  (0,68 Oz-pulg/RPM)

Constante de tiempo eléctrica: 2,9 mseg

Constante de tiempo mecánica : 6,5 mseg

Máximo torque de fricción:  $3,53083 \times 10^{-3} \text{ New-m}$  (5 Oz-pulg)

Resistencia térmica (armadura - ambiente) 2,8 °C/watt

Máxima temperatura de la armadura: 155 °C

Constante de torque  $K_T$ :  $0,195 \frac{\text{New-m}}{\text{Amp}}$  (27,6  $\frac{\text{Oz-pulg}}{\text{Amp}}$ )

Constante de voltaje  $K_E$ :  $0,19481 \frac{\text{Volt}}{\text{rad/seg}}$  (20,4  $\frac{\text{Volt}}{\text{RPM}}$ )

Resistencia terminal  $R_a$ : 1,28 Ohmios

Inductancia de armadura  $L_a$ : 3,4 mhy

Máxima corriente de pulso  $I_{\text{max}}$ : 26 Amp.

De acuerdo con la simulación la constante de tiempo del arreglo -

formado por el motorcito eléctrico, el tornillo - tuerca, transductor de posición, etc, debe ser de 1 seg, para conseguir buena calidad del transitorio.

Cuando el coeficiente  $(1/w_n^2)$  es bajo puede definirse la constante de tiempo así:

$$\tau_1 = \frac{2 \xi}{w_n} = \frac{Ra B + Kb K_T}{K_e \cdot K_T \times K_r}$$

Si  $\tau_1 = 1$  seg

$$K_r = \frac{Ra B + Kb K_T}{k_\theta \cdot K_T}$$

Entonces:

$$K_r = \frac{[1,28 \times 4,58551 \times 10^{-5} + (0,195)^2] 2\pi}{0,00107 \times 0,195}$$

$$K_r = 1146,8 \left( \frac{\text{Volt.}}{\text{m}} \right) = 11,468 \frac{\text{Volt.}}{\text{cm}}$$

En base a este valor se calcula el coeficiente  $(1/w_n^2)$

$$\frac{1}{w_n^2} = \frac{Ra \cdot J}{K_r K_T K_\theta} = \frac{1,28 \times 2,118 \times 10^{-4} \times 2\pi}{1148,8 \times 0,195 \times 0,00107}$$

$$\frac{1}{w_n^2} = 7,12 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

Que puede considerarse despreciable.

. Calculo del torque máximo:

$$T_{\max} = J a_M = 1,25 B \times v_n + T_p$$

Donde:

$a_M$  , aceleración máxima

$\theta_M$  , velocidad máxima

$$a_M = \frac{v_p}{K_\theta K_R \tau_1^2}$$

$v_p$ , voltaje de polarización (15 voltios); este voltaje es diferente al voltaje máximo de alimentación al circuito de armadura el cual es 24 voltios.

$$a_M = \frac{15 \times 2\pi}{0,00107 \times 1146,8}$$

$$a_M = 76,8 \text{ (rad/seg)}$$

$$\theta_M^\circ = \frac{v_p}{K_\theta K_R \tau_1}$$

$$\theta_M^\circ = 76,8 \text{ rad/seg}$$

$$T_{\max} = 2,118 \times 10^{-4} \times 76,8 + 1,25 \times 4,58551 \times 10^{-5} \times 76,8 + 2,77 \times 9,8 \times 10^{-2}$$

$$T_{\max} = 0,292 \text{ New-m}$$

Se ve que esta bien abajo de la capacidad de torque del motor escogido, ya que:

Corriente máxima:

$$I_{\max} = \frac{T_{\max}}{K_T}$$

$$I_{\max} = \frac{0,292}{0,195} = 1,49 \text{ Amp}$$

$$I_{\max} = 1,49 \text{ Amp}$$

El voltaje máximo que para estas condiciones necesitaría el servomotor eléctrico, para su circuito de armadura viene dado por:

$$V_{\max} = \frac{T_{\max}}{K_T} \times R_a + K_b \times \dot{\theta}_M$$

$$V_{\max} = \frac{0,292}{0,195} \times 1,23 + 0,195 \times 76,8$$

$$V_{\max} = 16,89 \text{ voltios}$$

El cual es menor que el voltaje de alimentación de la fuente (24 voltios).

Aparentemente el motor eléctrico está sobre sobredimensionado ya que el torque máximo continuo que el motor puede generar sin daño es de 0,8474 New-m y el torque máximo que generaría en este caso es de 0,292 New-m. Sin embargo como se analiza en el capítulo relativo a la "ESTANDARIZACION", desde el punto de vista de costos de fabricación es deseable que tanto los circuitos electrónicos como el motor eléctrico y su circuito de alimentación sea universales para todos los reguladores de velocidad (eléctrico electrónicos con control positivo de flujo). En este sentido el motor eléctrico escogido con ese sobredimensionamiento sería adaptable a un buen grupo de reguladores de velocidad para pequeñas centrales hidroeléctricas.

#### A1.8. CALCULOS RELATIVOS A LA BOMBA DE ENGRANAJES

Haciendo uso de las ecuaciones presentadas en el capítulo III del presente manual, en el "Manual de Reguladores Oleo Mecánicos de Velocidad" (volumen III, tomo I), del Manual Técnico para Diseño Estándarización y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de la OLADE, se presenta un ejemplo de calculo de la bomba de engranajes. Por esta razón aquí no se repiten esos cálculos.

### II. CALCULOS DE LA PARTE ELECTRONICA

#### A2.1. SEÑAL DE VELOCIDAD DE LA TURBINA

El voltaje de polarización que se usa es de + 15 VDC. La velocidad nominal de la turbina es de 945 RPM.

$$\omega_t = 945 \text{ RPM} = 15,75 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} = 15,75 \text{ Hz}$$

Usando la ecuación (2.13) de la página 121 se tiene: (con LM2907)

$$N = \frac{V_t}{K \cdot V_{cc} \cdot F_t}$$

$V_t$  = voltaje de salida que representa la velocidad de la turbina.

$V_t = 8$  (v) se asume.

$V_{cc} = 15$  (V)

$F_t = 15,75$  Hz

$N = 60$  agujeros del disco.

$K = R_1 C_1$

Despejando  $K = R_1 C_1$  se tiene:

$$R_1 \cdot C_1 = \frac{V_t}{N \cdot V_{cc} \cdot F_t} = \frac{8}{60 \times 15 \times 15,75} = 5.644 \times 10^{-4} \text{ seg}$$

Usando (2.11) se puede determinar la frecuencia que entra al circuito convertidor frecuencia - voltaje:

$$N = \frac{f_{out}}{f_t} \quad ; \quad f_{out} = N \cdot f_t$$

$$f_{out} = 60 \times 15,75 = 945 \text{ Hz}$$

Se sabe que  $C_1 > 100$  pF, si  $C_1$  se elige 0,1 uF

$$R_1 = \frac{5,644 \times 10^{-4}}{0,1 \times 10^{-6}} = 5644 \text{ } (\Omega)$$

Este valor se puede obtener con una resistencia y un potenciómetro en serie (o un solo potenciómetro).

Pero por (2.1):

$$10 \text{ M}\Omega \geq R1 \geq \frac{V_o}{I_{pin3}}$$

$$10 \text{ M}\Omega \geq R1 \geq \frac{Vt \text{ nominal}}{\left(\frac{Vt \text{ max}}{R1}\right)} ; I_{pin2} = I_{pin3} = \frac{Vt \text{ max}}{R1}$$

$$R1 \geq \frac{8 \times 5644}{15}$$

$$R1 \geq 3010$$

Lo que se cumple. Por tanto R1 es adecuado.

Es necesario que el rizado de salida sea bajo para que generen errores que puedan ser manipulados, para ello se elige:

$V_{riz} = 0,01$  (V) pico-pico, usando (2.4) se calcula C2.

$$C2 = \frac{C1 \cdot V_{cc}}{2 \cdot V_{riz}} \left(1 - \frac{V_{cc} \cdot f_{in} \cdot C1}{I_{pin2}}\right)_{\text{pico-pico}} = \frac{0,1 \times 10^{-6} \times 15}{2 \times 0,01} \left(1 - \frac{15 \times 945 \times 0,1 \times 10^{-6}}{2,66 \times 10^{-3}}\right)$$

$C2 = 3,50 \times 10^{-5} = 0,35 \text{ uF}$  y puede ser mayor a este valor, por lo que C2 se elige:

$C2 = 1 \text{ uF}$  y el rizado disminuye más aún.

Si la corriente  $I_{R2}$  que circula por R2 se toma:  $I_{R2} = 1 \text{ mA}$

$$\text{Por (2.6)} \quad R2 = \frac{V_{cc} - V_{ce \text{ min}}}{I_{R2}} = \frac{15 - 0,2}{1 \times 10^{-3}} = 1,48 \times 10^4 \quad (\Omega)$$

$$R2 = 15 \text{ K}\Omega$$

La frecuencia de corte viene dada por (2.7)

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{R3 \cdot C3} = 20 \text{ Hz} \quad ; \quad \text{si } C3 = 0,1 \text{ uF}$$

$$R3 = \frac{1}{20 \times 0,1 \times 10^{-6}} = 5 \times 10^5 \quad \Omega$$

$$R3 = 470 \quad (\text{K}\Omega)$$

Para Q7 y Q8 se escoge el ECG 3035 que es par Darlington con:

$$h_{fe} = 2000$$

$$I_c = 250 \quad (\text{mA})$$

$$P = 250 \quad (\text{mW})$$

$$I_L = 2 \quad (\text{mA min})$$

$$I_D = 50 \times 10^{-9} \quad (\text{A})$$

$$(2.8) \quad 100 \text{ K}\Omega \leq R21 \leq \frac{V_{cc}}{I_{co} \beta}$$

$$100 \text{ K}\Omega \leq R21 \leq \frac{15}{2000 \times 50 \times 10^{-9}} = 150 \times 10^3 \Omega$$

$$R21 = 150 \quad (\text{K}\Omega)$$

Para el led L4 se escoge el ECG 3025 (o similar) con:

color rojo

$$V_F = 1,8 \quad (\text{V})$$

$$I_F = 100 \quad \text{mA}$$

$$P = 180 \quad \text{mW}$$

$$\theta = 40^\circ$$

L3 (igual para todos los iniciadores) se escoge:

ECG 3000 con:  $V_F = 1,7 \text{ (V)}$  ;  $I_F = 40 \text{ mA}$  rojo

ECG 3002 Con  $V_F = 2,1$  (V) ;  $I_F = 35$  mA verde

ECG 3003 Con  $V_F = 2,2$  (V) ;  $I_F = 35$  mA amarillo

$$(2.9) \quad R_{22} = \frac{V_{CC} - V_{L3} - V_{L4}}{I_{L4}}$$

Pero  $I_{L4} > I_{L3}$  , por lo que en este caso se escoge  $L4 = L3$ .

$$R_{22} = \frac{15 - 1,8 - 1,8}{60 \text{ mA}} = 190 \Omega$$

$$R_{22} = 180 \Omega$$

Resumiendo se tiene:

$$R_1 = 5,664 \text{ K}\Omega = 47 \text{ K}\Omega + 0,94 \text{ K}\Omega$$

4,7 K $\Omega$  en resistencia , 0,94 K $\Omega$  en potenciómetro.

$$R_2 = 15 \text{ (K}\Omega)$$

$$R_3 = 470 \text{ (K}\Omega)$$

$$R_{21} = 150 \text{ (K}\Omega)$$

$$R_{22} = 180 \text{ (}\Omega)$$

$$C_1 = 0,1 \text{ (}\mu\text{F)} \text{ a } 25 \text{ (V) electrolítico}$$

$$C_2 = 1 \text{ }\mu\text{F, para más que } 25 \text{ (V) electrolítico}$$

$$C_3 = 0,1 \text{ }\mu\text{F, para más que } 25 \text{ (V)}$$

D12 = ECG 552 todos los diodos, a menos que se especifique lo contra



rio.

$$Q8, Q7 = \text{ECG } 3035$$

$$L4=L3 = \text{ECG } 3025$$

## A2.2. VOLTAJE DE REFERENCIA ( $V_{\text{ref}}$ )

El voltaje de referencia debe ser igual al voltaje de velocidad de la turbina en condición nominal.

$$V_{\text{ref}} = V_t \text{ nominal} = 8 \text{ (V)}$$

Se puede tener que:  $V_{\text{refm}} \leq V_{\text{ref}} \leq 13 \text{ (V)}$

Hay que determinar  $V_{\text{refM}}$  por:

$$(2.15) \quad V_{\text{refM}} = (V_z + V_{\text{be6}}) \left( \frac{R18 + R19}{R19} \right)$$

Para lo cual se escoge zener: ECG 5010A.

$$V_z = 5,1 \text{ (V)}$$

$$P_z = \frac{1}{2} \text{ W}$$

Se elige este porque la característica de temperatura del zener es favorable (coeficiente de temperatura es nulo para  $5(\text{V}) < V_z < 6(\text{V})$ ).

$$V_{\text{be}} = 0,6 \text{ (V)}$$

$$13 = (5,1 + 0,6) \frac{R18+R19}{R19} ; \quad \frac{R18+R19}{R19} = 2,28$$

De (2.17)

$$V_{\text{refm}} = V_{\text{be6}} \frac{(R18 + R19)}{R19}$$

$$V_{refm} = 0,6 \times 2,28 = 1,37 \text{ (V)}$$

$$I_L = 10 \text{ mA}$$

$$I_{C6} = 5 \text{ mA}$$

Se dijo que todos los transistores de baja potencia serían: para el NPN el 2N2222A, equivalente al ECG 123 A que tiene las siguientes características:

$$I_c = 0,8 \text{ A}$$

$$h_{fe} = 200$$

$$P = 0,5 \text{ W}$$

entonces:

$$I_{B6} = \frac{I_{C6}}{\beta_6} = \frac{5}{200} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ mA}$$

$$I_{R18} = \frac{1}{10} \cdot I_L = 1 \text{ mA para buena realimentación.}$$

$$\text{Con } V_{refm} ; \frac{V_{be}}{R19} \approx I_{R18}$$

$$R19 = \frac{0,6}{0,001} = 600 \text{ } (\Omega)$$

$$R19 = 560 \text{ } (\Omega)$$

$$\text{como; } \frac{R18 + R19}{R19} = 2,28$$

Despejando R18 de la ecuación anterior, con R19 = 560, se obtiene:

$$R18 = 717 \text{ } (\Omega)$$

Si se elige:  $R_{18} = 750 \text{ } (\Omega)$

$$\frac{R_{18} + R_{19}}{R_{19}} = \frac{750 + 560}{560} = 2,34$$

Con lo que no se mantiene lo anterior y existencorrimientos.

Y son:  $V_{refM} = 13,3 \text{ (V)}$  y  $V_{refm} = 1,4 \text{ (V)}$

Por (2.19)

$$R_{17} \leq \frac{V_{cc \text{ max}} - V_{b5 \text{ min}}}{I_{R17}}$$

$$I_{R17} = I_{b5} + I_{c6} = 5 \text{ mA} + I_{c6} \approx 6 \text{ mA}$$

$$V_{b5 \text{ min}} = V_{refm} + V_{bes}$$

$$R_{17} \leq \frac{15,5 - 2 + 0,6}{0,006} ; \text{ cuando } V_{cc} \text{ aumenta en } 0,5 \text{ (V)}$$

$$R_{17} \leq 2,15 \text{ K}\Omega$$

Y por (2.20)

$$R_{17} \geq \frac{V_{cc \text{ min}} - V_{refM} - V_{bes}}{I_{R17}} = \frac{14,5 - 13,3 - 0,6}{0,006}$$

$$R_{17} \geq 100 \text{ } (\Omega)$$

Se elige  $R_{17} = 1,5 \text{ K}\Omega$

Con (2.22)

$$R_{16} \geq \frac{V_{cc \text{ min}} - V_{z3}}{I_{z3 \text{ max}} + I_{p1}} = \frac{14,5 - 5,1}{0,02 + 0,005} = 3,76 \text{ } \Omega$$

Con (2.21)

$$R16 \leq \frac{(Vc \max - Vz_3)}{(Iz_{3min} + Ip_1)} = \frac{15,5 - 5,1}{0,005 + 0,005} = 1,04 \text{ K}\Omega$$

Se elige  $R16 = 1 \text{ K}\Omega$

Con (2.23)

$$T = R20 \cdot C11$$

$$0,1 \text{ seg} = R20 \cdot C11$$

Con  $R20 = 22 \text{ K}\Omega$

$$C11 = \frac{0,1}{22000} = 4,55 \text{ uF}$$

Se escoge  $C11 = 1 \text{ uF}$  y se tiene  $T = 0,022 \text{ seg}$  de carga.

$$Ip_1 = 5 \text{ mA} ; P1 = \frac{Vz}{Ip_1} = \frac{5,1}{0,005} = 1,02 \text{ (K}\Omega)$$

$Q1$  puede estar  $1\text{K}\Omega < P1 < 5\text{K}\Omega$  pues  $Ip_1$  se ha tomado alto. El resto de cálculos no se ven afectados.

$C12$  elimina alta frecuencia, se puede instalarlo al construir el sistema, para ajustar el diseño, sin embargo un buen valor es:

$$C12 = 220 \text{ F}$$

$D11$  es el ECG 552

$$R101 = R102 ; R101 \geq \frac{VrefM}{I_L} = \frac{13,3}{0,01} = 1,33 \text{ K}\Omega$$

$$R101 \geq 1,33 \text{ K}\Omega$$

Se escoge  $R101 = 10 \text{ K}\Omega = R102$

Resumiendo:

$$R16 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$R17 = 1,5 \text{ K}\Omega$$

$$R18 = 750 \Omega$$

$$R19 = 560 \Omega$$

$$R20 = 22 \text{ K}\Omega$$

$$R101 = R102 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$Z3 = \text{ECG 5010A}$$

$$Q5 = Q6 = \text{ECG 123A o 2N2222A con las características:}$$

$$P = 0,5 \text{ (W)}$$

$$I_c = 0,8 \text{ Amp}$$

$$\beta = 200$$

$$C11 = 1 \text{ uF electrolítico - 25 (V)}$$

$$C12 = 220 \text{ pF (cualquiera)}$$

$$D11 = \text{ECG 552}$$

$$A18 = \text{Amp. op} = \text{LM741CN o ECG941IM.}$$

### A2.3. SEÑAL DE ERROR

(2.28) modificada es:

$$V_e = - \frac{(V_t - V_{ref})(P2 + R26)}{R23}$$

R26 puede ser = 0 ( $\Omega$ ) y P2 max = R23

$$V_e \text{ max} = \frac{V_{ref} \cdot P2}{R23} = V_{ref} = 8 \text{ (V)}$$

$$V_e \text{ max} = 8 \text{ (V)}$$

Para que existe mínima potencia consumida  $R_{23} = 100 \text{ K}\Omega$ .

$$P_2 = 100 \text{ K}\Omega$$

Resumiendo:

$$R_{23} = R_{24} = 100 \text{ K}\Omega$$

$$P_2 = \text{Potenciómetro} = 100 \text{ K}\Omega$$

$$R_{26} = 0 \text{ } (\Omega) = \text{no existe}$$

$$A_1 = \text{ECG941M}$$

Con lo que la ganancia varía de 0 a 1.

#### A2.4. AMPLIFICADOR DE POTENCIA

El servomotor a usarse trabaja con:

$$V_a = 16,89 \text{ (V)}$$

$$V_{cc} = 24 \text{ (V)}$$

$I_a \text{ max} = 7 \text{ Amp}$  a rotor bloqueado

$$T_{\text{max}} \text{ (continuo)} = 0,8474 \text{ New-m}$$

$$K_T = 0,195 \frac{\text{New-m}}{\text{Kt}}$$

$$I_a \text{ max} = \frac{T_{\text{max}}}{K_t} = \frac{0,8474}{0,195} = 4,35 \text{ A}$$

Por (2.81)  $I_{cQ10} = I_{cQ12} = I_{\text{servo}} = K I_a$

Con  $K = 1,5$

$I_{cQ10} = I_{cQ12} = 1,5 \times 4,35 \text{ Amp} = 6,53 \text{ Amp}$ . Del trabajo nominal de los transistores,  $I = 7 \text{ Amp}$  es límite superior de los transistores.

$$R_a = 1,28 \text{ } \Omega \text{ (Dato asociado al motor escogido)}$$

De (2.84)

$$P_{Q_{\max}} = \frac{K \cdot V_{cc}^2}{4 \cdot R_a} = \frac{1,5 \times 24^2}{4 \times 1,28} = 168,75 \text{ w}$$

Que es la potencia necesaria para los transistores Q10 y Q12.

Con esto se escoge

Q10: ECG 186A

$P = 160 \text{ W}$

$I_c = 10 \text{ Amp}$

$\beta = 80$

Y para Q12:

ECG 187 A     $P = 160 \text{ W}$

$I_c = 10 \text{ Amp}$

$\beta = 80$

Por (2.85)

$$I_{c_g} = \frac{I_{serv}}{\beta} = \frac{7 \text{ Amp}}{60} = 0,117 \text{ Amp}$$

$$P_{Q_g} = 0,12 \text{ Amp} \times V_{ce} = 0,12 \times (24 - 0,6 - 6)$$

$$P_{Q_g} = 2,1 \text{ W}$$

Con lo que Q9 se escoge: ECG 155     $P = 7,5 \text{ W}$

$I_c = 3 \text{ Amp}$

$\beta = 110$

y para Q11: ECG 131 ;     $P = 6 \text{ W}$

$I_c = 3 \text{ Amp}$

$\beta = 110$

Por (2.87)

$$I_{A_6} = \frac{I_{\text{servo}}}{\beta_9 \cdot \beta_{10}} = \frac{7 \text{ Amp}}{3000} = 2,33 \text{ mA}$$

$$(2.86) \quad R_{45} = \frac{V_{A_6 \text{max}} - 2 V_{be}}{I_{A_6}} = \frac{15 - 2 \times 0,7}{0,00233} = 5,84 \text{ K}\Omega$$

$$R_{45} = 4,7 \text{ K}\Omega + 1 \text{ K}\Omega \quad (2 \text{ resistencias})$$

$$R_{46} = R_{45}$$

$$R_{47} = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_{48} = 0,5 (\Omega) \quad \text{y} \quad P_{R_{48}} = K1 \cdot R_{48} (I_{\text{ser max}})^2$$

$$= 1,5 \times 0,5 \times 49$$

$$P_{R_{48}} = 36,8 \text{ (W)}$$

$$R_{44} = 22 \text{ K}\Omega$$

F3 = F4 y limitar a 5 Amp pues rotor bloqueado no se desea.

D32 = D31 = ECG 552 = D45 = D46

Resumiendo:

$$R_{44} = 22 \text{ K}\Omega$$

$$R_{45} = R_{46} = 4,7 \text{ K}\Omega + 1 \text{ K}\Omega$$

$$R_{47} = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_{48} = 0,5 (\Omega) \quad ; \quad P = 30 \text{ W}$$

$$Q_9 = \text{ECG } 324$$

$$Q_{10} = \text{ECG } 186A$$

$$Q_{11} = \text{ECG } 323$$

$$Q_{12} = \text{ECG } 187 A$$



D31 = D32 = D45 = D46 = ECG 552

F3 = F4 = 5 Amp - 24 (V)

A6 = LM741CN - ECG941M.

#### A2.5. INDICADOR DEL SENTIDO DE GIRO

$$V_{-max} = \frac{V_{cc}}{2} = 6 \text{ (V)}$$

R78 = R79 = 150 K $\Omega$

Por (2.90)

$$V_{+} = V_{cc} \frac{R80}{R80+R81} ; \quad \frac{R80}{R80+R81} = \frac{0,5}{12} = 4,17 \times 10^{-2}$$

Si R80 = 10 K $\Omega$

De la expresión anterior resulta:

R81 = 230 K $\Omega$  ; se asigna R81 = 220 K $\Omega$

Se escoge L6 = L7 = ECG 3000

$V_F = 1,7 \text{ (V)}$  (rojo)

$I_F = 40 \text{ mA}$

$$\frac{V_{cc}}{I_{A7max}} \leq R82 \leq \frac{V_{cc}}{I_{LEDmin}}$$

$$\frac{15}{0,02} \leq R82 \leq 0,01$$

$$750\Omega \leq R82 \leq 1,5 \text{ K}\Omega$$

R82 = 1K $\Omega$

Resumiendo:

R78 = R79 = 150 K $\Omega$

R80 = 10 K $\Omega$

$$R81 = 220 \text{ K}\Omega$$

$$R82 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$L6 = L7 = \text{ECG } 3000$$

$$A7 = \text{ECG } 941\text{M}$$

#### A2.6. CONTROL MANUAL

$$(2.92) \quad VA11 = -V.K1 - Vp.K2$$

donde  $-V_{cc} \leq V \leq +V_{cc}$

$$K1 = \frac{R42}{R36} \quad ; \quad K2 = \frac{R42}{R40}$$

se dedujo  $R42 = R36$  y se puede también hacer:

$$K2 = \frac{1}{2} \quad ; \quad 2.R42 = R40$$

$$R42 = 100 \text{ K}\Omega \quad \text{se escoge}$$

$$R40 = 200 \text{ K}\Omega = R36 = R37$$

$$R38 = R39 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$D27 = D28 = D29 = D30 = \text{ECG552}$$

$$P2 = P3 = 5\text{K}\Omega \text{ a } 20 \text{ K}\Omega, \text{ potenciómetros.}$$

Resumiendo:

$$R36 = R37 = R40 = 200 \text{ K}\Omega$$

$$R42 = 100 \text{ K}\Omega$$

$$R38 = R39 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$P3 = P4 = 5 - 20 \text{ K}\Omega \text{ (potenciómetros)}$$

$$D27 = D28 = D29 = D30 = \text{ECG552}$$

$$A11 = \text{ECG941M}$$

## A2.7. INDICADOR DE VELOCIDAD DE LA TURBINA

De las ecuaciones (2.94) y (2.95) se establece que hay que determinar  $\Delta V_t$ .

Se sabe que:

$$f_t = 15,75 \text{ Hz} ; \text{ el } 5\% \text{ de } f_t \text{ es } 0,79$$

Haciendo uso de 2.13.

$$V_t = N \cdot K \cdot V_{cc}$$

$$\Delta V_t = N \cdot K \cdot V_{cc} \cdot \Delta f_t$$

$$\Delta V_t = 60 \times 5,644 \times 10^{-4} \times 15 \times 0,79$$

$$\Delta V_t = 0,4 \text{ (V)}$$

de (2.94)

$$V_- = V_{cc} \cdot \frac{R_{98}}{P_6 + R_{98}} = V_{t_n} - V_t$$

$$\frac{R_{98}}{P_6 + R_{98}} = \frac{8 - 0,4}{15} = 0,5067 ; \text{ escogiendo } R_{98} = 47\Omega$$

se obtiene:

$$P_6 = 46,75 \text{ K}\Omega$$

$$P_6 = 100 \text{ K}\Omega \text{ ajustado } 46,75 \text{ K}\Omega$$

Con (2.95)

$$V_+ = V_{cc} \cdot \frac{R_{97}}{P_5 + R_{97}} = V_{t_n} + \Delta V_t$$

$$\frac{R_{97}}{P_5 + R_{97}} = \frac{P_5 + 0,4}{15} = \frac{8,4}{15} = 0,56 \text{ si se escoge } R_{97} = 47 \text{ K}\Omega$$

Se obtiene:

$$P_5 = 36,92 \text{ K}\Omega$$

$$P_5 = 50 \text{ K}\Omega \text{ ajustado a } 36,92 \text{ K}\Omega$$

L5 = ECG 3002 - rojo ;  $V_F = 2,1$  (V)

$$I_F = 35 \text{ mA}$$

(2.96)

$$R_{99} = \frac{V_{CC}}{I_{L5}} = \frac{15}{0,02} = 750 \Omega \text{ se escoge: } R_{99} = 820 \Omega$$

$$I_{B13} = \frac{20}{30} = 0,67 \text{ mA} ; \beta = 30 \text{ (de saturación de ECG 123A)}$$

De (2.97)

$$R_{100} = \frac{V_{CC}}{I_{L5}/\beta} = \frac{15 - 0,7 - 2,1}{0,00067} = 18,2 \text{ K}\Omega$$

$$R_{100} = 22 \text{ (K}\Omega)$$

Resumiendo:

$$R_{97} = R_{98} = 47 \text{ K}\Omega$$

P6 , P5 ; potenciómetros de 100 K $\Omega$  y 50 K $\Omega$  respectivamente

$$P_{99} = 820 \text{ (}\Omega)$$

$$R_{100} = 22 \text{ (K}\Omega)$$

$$Q_{13} = \text{ECG 123A}$$

$$D_{43} = D_{44} = \text{ECG 552}$$

$$A_8 = A_9 = A_{10} = \text{ECG941M}$$

$$L_5 = \text{ECG 3002 rojo}$$

## A2.8. FUENTES DE POLARIZACION

Potencia de disipación de los amplificadores operacionales; 500 mw

$$I_{consumc} = \frac{500 \text{ mw}}{30 \text{ V}} = 16,67 \text{ mA}$$

Considerando 30 amplificadores operacionales, se abarca el resto de consumo de los demás elementos.

$$I_{total} = 0,01667 \times 30 = 0,5 \text{ Amp}$$

Sin embargo se diseñan las fuentes propuestas para una corriente de consumo = 2 Amp. con lo que se obtiene larga vida.

$$I = 2 \text{ Amp.}$$

Para este caso no es necesario el transistor Q1 y Q2 de potencia, si se usan reguladores integrados de  $\pm 15$  (V) a 1 Amp de capacidad.

El transformador es de:

$$V \text{ primario} = 120 \text{ (V)}$$

$$V \text{ secundario} = 15 \text{ (V)}$$

$$V_{in} = \sqrt{2} \times 15 = 21,2 \text{ (V)}$$

Si se usa el regulador de voltaje LM78M15CP, con:

$$V_o = 15 \text{ (V)}$$

$$18 \text{ (V)} \leq V_{in} \leq 30 \text{ (V)}$$

$$5 \text{ mA} \leq I_o \leq 500 \text{ mA}$$

$$V_{cc} = (V_{reg} - V_{be})$$

Entonces:

+V<sub>cc</sub> = 15 - 0,7 = 14,3 (V), que será el real voltaje para polarizar los circuitos.

Por (2.101) se tiene:

$$P_1 = K_1 \cdot (V_{in} - V_o) I_L ; K_1 = 1,5$$

$$P_1 = 1,5 (21,2 - 14,3) \times 2$$

$$P_1 = 20,7 \text{ (w)}$$

Q1 se escoge: ECG56, con P = 30 (w)

$$I_c = 3 \text{ Amp}$$

$$\beta = 500$$

Para Q2 se escoge: ECG75, con

$$P = 40 \text{ w}$$

$$I_c = 6 \text{ Amp}$$

$$\beta = 500$$

Por (2.98)

$$I_{b1} = \frac{I_L}{\beta Q1} = \frac{2}{500} = 4 \text{ mA}$$

$$R6 = \frac{V_{LM} - V_{be1} - V_{cc}}{I_{b1}} = \frac{15 - 0,7 - 14,2}{0,004} = 25 \text{ } (\Omega)$$

$$R6 = 22 \text{ } (\Omega)$$

$$R7 = \frac{V1}{I_{R7}} \quad ; \quad I_{R7} = 2 I_{b1}$$

$$R7 = \frac{15}{0,008} = 1,875 \text{ K}\Omega \quad ; \quad R7 = 1,5 \text{ K}\Omega$$

Entonces, el consumo de LM78M15CP es de 12 mA

$$C7 = 5 \text{ uF} \quad \text{y} \quad C4 = 10 \text{ uF}$$

Por (2.102)

$$V_{z1} = V_{cc} + 1 = 14,2 + 1 \approx 15 \text{ (V)}$$

El zener es el ECG5024 con  $V_z = 15 \text{ (V)}$

$$P_z = 1/2 \text{ (w)}$$

Por (2.103)

$$R_{11} = \frac{1}{I_{Z1}} ; \text{ pero } I_{Z1} > I_{GT\text{min}} \text{ de tiristor}$$

Si se escoge tiristor:

$$\text{ECG5411: } I_T = 4 \text{ Amp}$$

$$I_G = 200 \text{ mA min}$$

$$V_{GT} = 1 \text{ (V)}$$

$$I_{\text{source}} = 25 \text{ Amp}$$

$$I_{Z1} > 0,2 \text{ mA}$$

por lo que si  $I_{Z1} = 5 \text{ mA}$

$$R_{11} = \frac{1}{0,005} = 200 \text{ } (\Omega)$$

Por (2.104)

$$R_{S2} = \frac{1}{I_L} \text{ pero } R_{S2} \text{ senza } I_{cc}, \text{ entonces:}$$

$$I_L = 3 \text{ Amp} > I_{\text{carg}} = 2 \text{ Amp}$$

por lo que:

$$R_S = \frac{1}{3 \text{ Amp}} = 0,33 \text{ } (\Omega); \text{ con } P = 3 \times 1 = 3 \text{ w}$$

$$P = 5 \text{ (w)}$$

o por (2.105)

$$R_5 = \frac{V_{in}}{I_{G2}} = \frac{21,2 \text{ (V)}}{0,0002} = 106 \text{ K}\Omega$$

Con,  $R_5 = 50 \text{ K}\Omega$  resulta suficiente y se asegura disparo de tiristor T2.

$C_9 = 220 \text{ pF}$  (se prueba con osciloscopio)

Por (2.106)

$$R_{10} = \frac{V_{cc}}{I_{L1}} ; \text{ L1 se escoge el ECG3002 verde } V_F = 2,1 \text{ (V)}$$

$$I_F = 35 \text{ mA}$$

$$R_{10} = \frac{14,2}{0,02} = 710$$

$$R_{10} = 820 \text{ } (\Omega)$$

Si  $I_L = 2 \text{ Amp}$ , entonces

$$\text{Fusible } F1 = K1 \cdot I_L = 1,2 \cdot I_L = 2,4 \text{ Amp}$$

$$F = 3 \text{ Amp a } 15 \text{ (V)}$$

Por (2.107)

$$C3 = \frac{I_L \cdot t}{V_{in}} = \frac{2}{120(21,2 - 15)} = 0,00269 \text{ F}$$

$C3 = 2200 \text{ uF} - 25 \text{ (V)}$  suficiente por sobre dimensionado de corriente.

Los diodos  $D1 = D2 = D3 = D4$  deben soportar  $I_L = 2 \text{ Amp}$  o más con  $V_{pI} > 21 \text{ (V)}$ .

Se escoge ECG5801 con  $V_{pI} = 100 \text{ (V)}$

$$I = 3 \text{ Amp}$$

$$I_{FM} = 150 \text{ Amp (source)}$$

De (2.109)

$$n = \frac{V_{pri}}{V_{sec}} = \frac{120}{15} = 8$$

Por (2.110)

$$S_{tr1} = 1,3 (15 \times 2) = 39 \text{ (VA)} \approx 40 \text{ (VA)}$$

Para -  $V_{cc}$ : todo es análogo a excepción de:

$$R_{14} = \frac{1 \text{ V}}{I_{z2}} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ } (\Omega)$$



$$R_{15} = \frac{V_{CC} - V_{ce} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{15 - 0,2 - 1}{0,001} = 13,8 \text{ K}\Omega$$

$$R_{15} = 11 \text{ K}\Omega$$

$$R_4 = \frac{1}{10^{-4}} = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_{s_1} = R_{s_2}$$

$$C_{s_2} = C_{s_1}$$

Resumiendo:

Para el transformador:

$$n = 8$$

$$P = 40 \text{ (VA)}$$

$$120/15 \text{ Vrms}$$

Para el resto del circuito

$$R_4 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_5 = 50 \text{ K}\Omega$$

$$R_6 = R_9 = 22 \text{ } (\Omega)$$

$$R_7 = R_8 = 1,5 \text{ K}\Omega$$

$$R_{10} = R_{13} = 820 \text{ } (\Omega)$$

$$R_{11} = 200 \text{ } (\Omega)$$

$$R_1 = R_2 = 0,33 \text{ } (\Omega) - 5 \text{ (w)}$$

$$R_{14} = 100 \text{ } (\Omega)$$

$$R_{15} = 11 \text{ K}\Omega$$

$$C_3 = C_6 = 2200 \text{ } \mu\text{F} - 25 \text{ (V) electrolítico.}$$

$$C_9 = C_{10} = 220 \text{ pF para más que 25 (V)}$$

$Cs_1 = Cs_2 = 220 \text{ pF}$  para más que 25 (V)  
 $C7 = C8 = 5 \text{ uF}$ - 25 (V) electrolítico  
 $C4 = C5 = 10 \text{ uF}$ - 25 (V) electrolítico  
 $L1 = L2 = \text{ECG3002}$   
 $Z1 = Z2 = \text{ECG5024}$   
 $Q3 = Q4 = \text{ECG123A}$   
 $T1 = T2 - T3 = T4 = \text{ECG5411}$   
 $F1 = F2 = 3 \text{ Amp} - 12 \text{ (V)}$   
 $D5 = D6 = D7 = D8 = D9 = \text{ECG552}$   
 $D10 = \text{ECG552}$   
 $Q1 = \text{ECG56}$   
 $Q2 = \text{ECG 75}$   
 $+ 15 \text{ (V) reg} = \text{LM78M15CP o ECG968}$   
 $- 15 \text{ (V) reg} = \text{LM79M15CP o ECG969}$

#### A2.9. FUENTES DEL SERVOMOTOR ELECTRICO

Para +  $V_{cc2}$

$$V_{cc2} = 23,3 \text{ (V)}$$

$$I_L = 5 \text{ Amp.}$$

Indicador L8: ECG3000 -  $I_F = 40 \text{ mA}$

$$R_{89} = \frac{V_{cc2} - V_L}{I_{L8}} = \frac{23,3 - 1,6}{0,015} = 1,44 \text{ K}\Omega$$

$$R_{89} = 1,5 \text{ K}\Omega$$

El circuito de regulación LM --- puede ser:

para Volt.(+): ECG972 y para Volt. (-) ECG971

$I_{min} = 5 \text{ mA}$ ,  $I_{max} = 1 \text{ Amp}$ , para los dos anteriores y  $V_o = 24 \text{ (V)}$

$$V_{cc2} = V_o - V_{be19} = 24 - 0,7 = 23,3 \text{ (V)}$$

$$+V_{cc2} = 23,3 \text{ (V)}$$

$$-V_{cc2} = 23,3 \text{ (V)}$$

Para el transistor de potencia Q19 (Q20) se tiene:

$$I_c = I_L = 5 \text{ Amp}$$

y por (2.101)

$$P_{19} = K_1 \cdot (V_{in} - V_{cc2}) I_L$$

Donde:

$$K_1 = 1,5 \text{ a } 2,0$$

$$P_{19} = 2(33,94 - 23,3) \times 5 = 106,4 \text{ (w)}$$

Donde:

$$V_{in} = V_{sec} \cdot \sqrt{2} = 24 \sqrt{2} = 33,94 \text{ (V)}$$

$V_{sec}$ , voltaje del secundario del transformador.

Se escoge para Q19 el ECG 36 con:

$$I_c = 12 \text{ Amp}$$

$$P = 100 \text{ (w)}$$

$$\beta = 60$$

Y para Q20 el ECG 37 con:

$$I_c = 12 \text{ Amp.}$$

$$P = 100 \text{ (w)}$$

$$\beta = 60$$

Q19 y Q20 son complementarios.

Mediante (2.98)

$$I_{b19} = \frac{I_L}{\beta_{19}} = \frac{5}{20} \quad (\beta_{19} \text{ es de saturación})$$

$$I_{b19} = 0,25 \text{ Amp}$$

Con (2.99)

$$R_{87} = \frac{(V_{LM} - V_{be19} - V_{cc2})}{I_{b19}} = \frac{(24 - 0,6 - 23,3)}{0,25} = 0,4 \Omega$$

$$R_{87} = 0,3 \Omega$$

Su potencia es:

$$\text{Pot} = (I_{b19})^2 \times R_{87} = 0,25^2 \times 0,3$$

$$\text{Pot} = 0,02 \text{ w}$$

$$\frac{V_{LM}}{I_{LM \max}} < R_{88} \leq \frac{V_{LM}}{2 I_{b19}}$$

$$\frac{24}{1} < R_{88} \leq \frac{24}{0,5}$$

$$24 \Omega < R_{88} \leq 48 \Omega$$

$$R_{88} = 33 (\Omega), \text{ con Pot} = (0,5)^2 \times 33 = 8,25 \text{ (w)}$$

$$\text{Pot} \geq 10 \text{ (w)}$$

$$C_{17} = 3,3 \text{ uF} \quad ; \quad C_{i1} = 10 \text{ uF} \quad ; \quad C_9 = 1000 \text{ pF} \quad (\text{pueden variar})$$

Para el filtro, con (2.107)

$$C15 = \frac{\Delta q}{\Delta v} = \frac{\Delta t \times i_L}{\Delta v}$$

$$\Delta v = \Delta V_{in} = V_i - (V_o + \Delta V_o) \quad (\Delta V_o, \text{ seguridad para rizado no afecta a } V_o).$$

$$\Delta v = \Delta V_{in} = 34 - (24 + 4) = 34 - 28 = 6 \text{ (V)}$$

$$C15 = \frac{(1/120) \times 3}{6} = 4167 \text{ uF}$$

$$4000 \text{ uF} \leq C15 \leq 5000 \text{ uF}, \quad 35 \text{ (V) electrofítico.}$$

Fusible electrónico:

$$R86 = R83$$

Con (2.113) ; si  $V_{R86} = 2 \text{ (V)}$

$$R86 + R83 = 2R83 = \frac{V'_{sec} - V_{ce14} - V_{in}}{1,2 I_L} = \frac{2 V_{R86}}{1,2 I_L} = \frac{4 \text{ V}}{1,2 \times 5} = 0,66 \Omega$$

Se elige  $R83 = R86 = 0,33 \text{ } (\Omega)$

Con (2.112):

$$\begin{aligned} P14 &= I_L (V_{cc}) = I_L (V'_{sec} - V_{in} - 2 I_L \cdot R86) \\ &= 5(34 - 30 - 2 \times 5 \times 0,33) \\ &= 3,3 \text{ (w)} \end{aligned}$$

Para Q14 se escoge: ECG 377;  $I_c = 10 \text{ Amp}$

$$P = 50 \text{ w}$$

$$\beta = 60$$

y para Q17 ECG 378;  $I_c = 10 \text{ Amp}$

$$P = 50 \text{ w}$$

$$\beta = 60$$

Con lo que por (2.114):

$$R_{84} = \frac{V'_{\text{sec}} - V_{b14}}{I_L / \beta_{14}} = \frac{34 - (30 + 0,2 + 0,7)}{5/30} = 18,6 \Omega$$

$$R_{84} = 22 (\Omega); \quad \text{Pot} = I_{R84}^2 \times R_{84} = (5/30)^2 \times 22 = 0,61 \text{ w}$$

$$\text{Pot} = 1 \text{ (w)}$$

En corto se tiene:

$$\text{Pot} = \frac{(V'_{\text{sec}} - V_{ce16} - V_{in})}{R_{84}} = 20 \text{ w se elige } 25 \text{ w}$$

$$R_{84} = 22 (\Omega) \text{ a } 25 \text{ (w)}$$

Por (2.115)

$$R_{85} = \frac{V'_{\text{sec}} - 2I_L R_{83} - V_{ce14} - V_{in}}{I_L / (\beta_{14} \cdot \beta_{16})}$$

$$V_{in} = 0$$

$$R_{85} = \frac{34 - 2 \times 5 \times 0,33 - 0,2}{5(30 \times 30)} = 5,49 \text{ K}\Omega$$

$$R_{85} = 5,1 \text{ K}\Omega - 1/2 \text{ w}$$

Q16 (Q18), tienen que resistir:

$$\frac{V'_{\text{sec}} - V_{ce} - V_{in}}{R_{84}} = \frac{34 - 0,2}{22} = 1,5 \text{ Amp;}$$

$$a \text{ Pot} = I \cdot V_{ce} = (1,5 \times 0,2) = 0,3 \text{ (w)}$$

Q16 es el ECG186A       $I_c = 3 \text{ Amp}$   
                                           $P = 10 \text{ w}$   
                                           $\beta = 80$

y Q18 es el ECG187A       $I_c = 3 \text{ Amp}$   
                                           $P = 10 \text{ w}$   
                                           $\beta = 80$

Los diodos D33, D34, D35 y D36 deben soportar  $I > 5 \text{ Amp}$ .

para el ECG 116               $I_F = 6 \text{ Amp}$   
                                           $V_{PI} = 200 \text{ (V)}$

Para el transformador:

Con (2.109)

$$\frac{V_{pri}}{V_{sec}} = \frac{120 \text{ V}}{24 \text{ V}} = 5$$

Con (2.110)

$$S_{tr} = V \cdot I_L \times 1,3 = 1,3 \times 24 \times 5 = 156 \text{ VA}$$

$$S_{tr} = 200 \text{ VA}$$

Resumiendo:

$$R88 = R95 = 33 \text{ } (\Omega) - 10 \text{ (w)}$$

$$R87 = R94 = 0,3 \text{ } (\Omega) \text{ o cero}$$

$$+24 \text{ (V)} \rightarrow \text{ECG972}$$

$$-24 \text{ (V)} \rightarrow \text{ECG971}$$

$$R86 = R93 = R83 = R91 = 0,33 (\Omega)$$

$$R84 = R90 = 22 (\Omega) - 25 (w)$$

$$R85 = R92 = 5,1 (K\Omega)$$

$$C15 = C16 = 4000 - 5000 \mu F \text{ para más que } 35 (V) \text{ electrolítico}$$

$$C11 = C12 = 10 \mu F - 35 (V) \text{ electrolítico}$$

$$C17 = C18 = 3,3 \mu F - 35 (V) \text{ electrolítico}$$

$$C19 = C20 = 1000 \text{ pF para más que } 35 (V)$$

$$R89 = R96 = 1,5 K\Omega$$

$$Q19 = ECG36$$

$$Q20 = ECG37$$

$$Q14 = ECG377$$

$$Q17 = ECG378$$

$$Q16 = ECG186-A$$

$$Q18 = ECG187A$$

$$D33 = D34 = D35 = D36 = ECG5854$$

$$D37 , D38 , D39 , D40 , D41 , D42 = ECG116$$

$$\text{Led L8 = L9 = ECG 3000 - rojo.}$$

## A2.10. MODALIDADES DE CONTROL (PID)

De la simulación se tiene que:

$$Kp = 2,94$$

$$Ki = 0,61 \text{ seg}^{-1}$$

$$Kd = 6 \text{ seg}$$

Mediante Ec. (2.30)

$$V_m = -V_{pot} \frac{R_{28}}{R_{122}} - V_e \frac{R_{28}}{R_{29}} \left[ \frac{P_p + R_{104}}{R_{27}} + \frac{SC_{24} (P_d + R_{31})}{SC_{24} \cdot R_{30} + 1} + \frac{1}{S \cdot C_{13} (P_i + R_{103})} \right]$$



Con  $R_{29} = R_{33} = R_{34} = R_{28} = R_{122} = 100 \text{ K}\Omega$

$$V_m = -V_{pot} - V_e \left[ K_p + K_{ds} + \frac{K_i}{s} \right]$$

( $V_{pot}$ . es negativo)

$$K_p = \frac{P_p + R_{104}}{R_{27}} \quad (2.31)$$

$2,94 \cdot R_{27} = P_p + R_{104}$ ; si  $R_{27} = R_{104} = 47 \text{ K}\Omega$  y  $P_p = 200 \text{ K}\Omega$  :

$K_p$  varía desde 1 a 5,2

Con (2.32)  $K_d = C_{24} (P_d + R_{31}) = 3,53$  (nominal)

Si  $C_{24} = 2,2 \text{ uF}$  ;  $P_d + R_{31} = 1,604 \text{ M}\Omega$

Si  $R_{31} = 1 \text{ M}\Omega$  y  $P_d = 5 \text{ M}\Omega$

$K_d$  varía desde 2,2 seg a 10,2 seg (el rango de variación contiene el valor nominal de  $K_d$ ).

Con (2.33)

$$K_i = \frac{1}{C_{13} (P_i + R_{103})} = 0,61 \text{ seg}^{-1}$$

Si  $C_{13} = 10 \text{ uF}$  ;  $P_i + R_{103} = 163,93 \text{ K}\Omega$

Si  $R_{103} = 47 \text{ }\Omega$  y  $P_i = 500 \text{ K}\Omega$

$K_i$  varía desde  $2,12 \text{ seg}^{-1}$  a  $1,75 \times 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$

Mediante (2.36)

$$f_d = \frac{1}{2\pi C_{24}(P_d + R_{31})} = \frac{1}{2\pi \cdot K_d} = \frac{1}{2\pi \times 3,53}$$

$$f_d = 0,0451 \text{ Hz}$$

$$f_T \simeq 10^3 \cdot f_d = 45,1 \text{ Hz}$$

por lo que mediante (2.40)

$$f_T = \frac{1}{2\pi C_{24} \cdot R_{30}} ; \quad R_{30} = \frac{1}{45,1 \times 2\pi \times 2,2 \times 10^{-6}} = 1,6 \text{ K}\Omega$$

$$R_{30} = 1,5 \text{ K}\Omega$$

Por (2.42)

$$f_F = \frac{1}{2\pi C_{14} \cdot R_{32}} ; \quad f_F \geq f_T ; \quad f_F = 10 \text{ Hz}$$

$$R_{32} = 10 \text{ K}\Omega \ll R_{33}$$

$$C_{14} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \times 10} = 1,59 \text{ uF}$$

$$C_{14} = 1 \text{ uF}$$

Con (2.46)

$$T \simeq R_{35} \cdot C_{13} \text{ para descargar } C_{13}$$

$$1 \simeq R_{35} \cdot C_{13}$$

$$R_{35} = \frac{1}{10 \text{ uF}} \leq 100 \text{ K}\Omega ; \quad R_{35} = 10 \text{ K}\Omega$$

Con lo que  $C_{13}$  se descarga en 0,1 seg.

#### A2.11. TRANSDUCTOR DE CORRIENTE Y OBTENCION DE (Vpot)

En la figura No. 74 se tiene el circuito a usarse.

T<sub>1A</sub>, T<sub>1B</sub>, T<sub>1C</sub>, transformadores de corriente (son iguales)

$$I_{TC} = \frac{I_L}{K}$$

Donde:

$I_{TC}$  , corriente de Tc.

$I_L$  , corriente de línea (o fase)

K , relación de transformación.

Si - Vpot es voltaje DC,  $V_A$  es como se presenta en la Figura 74 y

$$(+Vpot)_A = - \frac{P_{19}}{R_{116}} \times V_A$$

$$V_A \text{ es max; } \frac{V_A}{\sqrt{2}} = V_{TC} \text{ rms}$$

$$I_{TC} \cdot P_{16} = V_{TC} \text{ rms}$$

Lo anterior es para una fase, para tres fases se tiene:

$$V_{pot} = -\frac{P_{19}}{R_{116}} (V_A + V_B + V_C)$$

Si  $R_{116} = R_{117} = R_{119}$

y  $C_{28} = C_{29} = C_{30}$  y además  $D_{47} = D_{48} = D_{49}$

En caso óptimo  $V_A = V_B = V_C$ ; entonces:

$$V_{pot} = -K_2 \cdot 3V_A \quad \text{donde: } K_2 = \frac{P_{19}}{R_{116}}$$

Ejemplo: si  $W_0 = 850 \text{ Kw}$  trifásico

$$P_{1\phi} = \frac{850 \text{ Kw}}{3} = 283,3 \text{ Kw}$$

$$\cos \phi = 0,85$$

$$I_L = \frac{P_{1\phi}}{V_{LN} \times \cos \phi}$$

$$V_{pot} = - 4,5 \text{ (V)}$$

y juntamente con la realimentación negativa de posición deben contrarrestar en el estado estable a  $V_m$  (variable manipulada de acciones de control). Así  $V_{posición} = - 4,5$  para que el servomotor eléctrico se posicione en un punto estable de 4,5 cm (9 (V)).

De la corriente determinada se escoge el transductor de corriente.

Los voltajes de generación más comunes son:

130 V, 230 V, 400 V, 525 V, 1050 V, 3150 V,...

Se escoge  $V_{LL} = 525 \text{ (V)}$

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{525}{\sqrt{3}} = 303,1 \text{ (V)}$$

$$I_L = \frac{283,3}{303,1 \times 0,85} = 1100 \text{ Amp}$$

Se escoge 4NC1432 - 2DE21 de la SIEMENS, que tiene la relación de transformación 1200/5 Amp, con 5 VA de capacidad.

De este modo se tiene:

$$I_{TC} = \frac{I_L}{K} = \frac{1100 \text{ Amp}}{1200/5} = 4,583 \text{ Amp}$$

Además:

$$V_{TCrms} = I_{TC} \cdot P16$$

entonces:

$$V_{TCrms} = \frac{VA}{\sqrt{2}} = \frac{V_{pot}}{3 K2 \sqrt{2}}$$

$$\text{pero: } R_{TC} = \frac{P_{TC}}{I_{TC}^2} = R_{113} + P16 = \frac{5 \text{ (V)}}{(4,583)^2} = 0,2381$$

Si  $R_{113}$  que es la resistencia del cable eléctrico es 0,0831 ( $\Omega$ ) y

$P16 = 0,2 \text{ (}\Omega\text{)}$  (Potenciómetro de 1 ( $\Omega$ ) ajustado a 0,2 ( $\Omega$ ) y con potencia de 10 (w) )

Entonces:  $V_{TC rms} = 0,2 \times 4,538 \text{ (V)} = 0,9166 \text{ (V) rms.}$

por lo cual si  $V_{pot} = -4,5$  (V)

$$K2 = \frac{\sqrt{2} V_{TC \text{ rms}} \times 3}{-V_{pot}} = \frac{\sqrt{2} \times 3 \times 0,9166}{-(-4,5)} = 0,8642$$

$$K2 = \frac{P19}{R116}$$

El valor de  $K2 = 0,8642$  sirve para determinar  $K1$  de la siguiente ecuación:

$$\frac{P19}{R116} = K2 = \frac{V V_o'}{3 K1 P_{Go}}$$

donde  $K1$  indica la sensibilidad de toda la etapa de realimentación de potencia.

$$V = (525/\sqrt{3}) \sqrt{2} \text{ (Vpico)} \quad ; \quad V_{LL} = 525 \text{ (V)}_{AC}$$

$$V_o' = 4,5 \text{ (V) asumido.}$$

$$3 P_{Go} = 850 \text{ Kw}$$

Se quiere determinar  $K1$ :

$$\therefore K1 = \frac{4,5 \times \sqrt{2} (525/\sqrt{3})}{850 \times 10^3 \times 0,8642} = 2,625 \times 10^{-3} = 0,002625 \text{ (V/A)}$$

$$\text{En resumen: } K1 A I_L = \Delta V_o'$$

para  $I_L = 10$  Amp;  $\Delta V_o' = 0,02625$  (V) que es el voltaje  $V_{pot}$ , el cual se suma antes de ingresar al amplificador de potencia del servo motor eléctrico.

$$\text{Si } R116 = 100 \text{ K}\Omega$$

$$P19 = 0,8642 \times 100 \text{ K}\Omega = 86,42 \text{ K}\Omega$$

P19 es potenciómetro de  $100 \text{ K}\Omega$  ajustado a  $86,42 \text{ K}\Omega$

C28 = 470 uF - 25 (V) electrolítico.

D47 = ECG 552

Resumiendo:

TiA = TiB = TiC = 4NC1432 - 2 DE21 de SIEMENS.

R113 = R114 = R115 = 0,0381

P16 = P17 = P18 = Potenciómetro de 1 ( $\Omega$ ) ajustado a 0,2 ( $\Omega$ ) - 10 (w)

R116 = R117 = R118 = 100 K $\Omega$

P19 = potenciómetro de 100 K $\Omega$  ajustado a 86,42 K $\Omega$

D47 = D48 = D49 ; ECG 552

C28 = C29 = C30 = 470 uF - 25 (V) electrolítico

A14 = LM741C o ECG 941.

## A2.12. OSCILADOR

Por 2,61

$$VA'14 = Vo' = \frac{2}{\pi} VA13 = \frac{2}{\pi} 15 = 9,55 \text{ (V)} \quad (\text{salida})$$

Por (2.62)

$$T = 4 \cdot R51 \cdot C21 \frac{(R50)}{(R49)}$$

$$f = 1 \text{ KHz} ; T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} \text{ seg}$$

Si R51 = 10 K $\Omega$  , R50 = 47 K $\Omega$  , R49 = 100 K $\Omega$

$$C21 = \frac{T}{4R51 \times \left(\frac{R50}{R49}\right)} = \frac{10^{-3}}{4 \times 10^4 \left(\frac{47}{100}\right)} = 5,32 \times 10^{-8} \text{ F} = 0,0532 \text{ uF}$$

C21 = 0,05 uF no se necesita exacto a una frecuencia f = 1 KHz.

Se escoge 6 puntos de codos, 3 para la parte positiva y 3 para la negativa a. Por 2.64. se tiene:

$$VA14o1 = \frac{2}{\pi} VA13' \sin\left(\frac{\pi}{6+1}\right) = 9,55 \sin\left(\frac{\pi}{7}\right) = 4,14 \text{ (V)}$$

$$VA_{14o2} = \frac{2}{\pi} \times 15 \times \text{sen} \left( \frac{2\pi}{7} \right) = 7,467 \text{ (V)}$$

$$VA_{14o3} = \frac{2}{\pi} \times 15 \times \text{sen} \left( \frac{3\pi}{7} \right) = 9,31 \text{ (V)}$$

Por (2.65)

$$m_1 = \frac{6 + 1}{\pi} \left[ \text{sen} \frac{2\pi}{7} - \text{sen} \frac{\pi}{7} \right] = \frac{7}{\pi} (0,782 - 0,434)$$

$$m_1 = 0,775$$

$$m_2 = \frac{7}{\pi} \left[ \text{sen} \frac{3\pi}{7} - \text{sen} \frac{2\pi}{7} \right] = 0,4303$$

$$m_3 = \frac{7}{\pi} \left[ \text{sen} \frac{4\pi}{7} - \text{sen} \frac{3\pi}{7} \right] = 0$$

Por (2.67)

$$m_1 = \frac{R_{54}}{R_{52} + R_{54}} ; \text{ Si } R_{52} = 5,1 \text{ K}\Omega , \text{ entonces}$$

$$0,775R_{52} + 0,775R_{54} = R_{54}$$

$$R_{52} = \frac{1 - 0,775}{0,775} \times R_{54} = 0,2903 \times R_{54}$$

$$R_{54} = 1481 \text{ } (\Omega)$$

$$R_{54} = 1,5 \text{ K}\Omega$$

por 2.68.

$$m_2 = \frac{\frac{R53 \cdot R52}{R53 + R52}}{R54 + \frac{R53 \cdot R52}{R53 + R52}} = \frac{R53 \cdot R52}{R54 \cdot R53 + R54 \cdot R52 + R53 \cdot R52}$$

Despejando R53 de la ecuación anterior:

$$R53 = \frac{m_2 \cdot R52 \cdot R54}{R52 - m_2(R52 + R54)} = \frac{0,4303(5,1 \times 1,5)}{5,1 - 0,4303 \times 6,6} = 1,457 \text{ K}\Omega$$

R53 = 2 K $\Omega$  potenciómetro ajustado a 1,46 K $\Omega$

Por (2.70) 
$$I_c = \frac{V_3}{R_{eq}}$$

Y por (2.66)

$$V_3 = VA1403 - 0,5 = 9,31 - 0,5 = 8,81 \text{ (V)}$$

$$R_{eq} = \frac{V_3}{I_c} = \frac{8,81}{0,010} = 881 \text{ (\Omega)}$$

$$R_{eq} = R55 + R56 + R57$$

Por (2.71)

$$V_1 = \frac{V_2 \cdot R57}{R56 + R57} \quad \text{donde por (2.66) se tiene:}$$

$$4,14 - 0,5 = (7,47 - 0,5) \cdot \frac{R57}{R56 + R57}$$

$$3,64 = 6,97 \frac{R57}{R56 + R57}$$

Despejando R56

$$R56 = 0,915 R57$$

Si R57 = 220 ( $\Omega$ ) ; entonces R56 = 200 ( $\Omega$ )

para determinar R55

$$881 - 220 - 200 = R55 = 461 \text{ (\Omega)} ; \quad R55 = 470 \text{ (\Omega)}$$



Q21 es el 2N2222A con  $\beta = 200$  y  $\beta_{sat} = 30$ .

Mediante (2.74)

$$R62 = \frac{V3 + V_{be} Q21}{10 I_b} = \frac{8,81 + 0,7}{10 \times \frac{0,01}{30}} = 2,58 \text{ K}\Omega$$

Por (2.75)

$$R61 = \frac{V_{cc} - V3 - V_{be} Q21}{0,0033} = \frac{15 - 8,81 - 0,7}{0,0033} = 1,65 \text{ K}\Omega$$

Se escoge  $R62 = 1,5 \text{ K}\Omega$

$$R61 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$y \quad P7 = 2,856 + 1,65 - 1,5 - 1$$

$$P7 = 2 \text{ K}\Omega$$

P7, potenciómetro de 2 K $\Omega$

Resumiendo:

$$R49 = 100 \text{ K}\Omega$$

$$R50 = 47 \text{ K}\Omega$$

$$R51 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R52 = 5,1 \text{ K}\Omega$$

$$R54 = 1,5 \text{ K}\Omega$$

R53 , potenciómetro de 2K $\Omega$ ajustado a 1,46 K $\Omega$

$$R55 = 470 \Omega = R58$$

$$R56 = 200 \Omega = R59$$

$$R57 = 220 \Omega = R60$$

$$R61 = R64 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$R62 = R63 = 1,5 \text{ K}\Omega$$

P7 = P8 , potenciómetro de 2 K $\Omega$

A12, A13, A14, A15 : LM741C o ECG941

D13, D14, D15, D16, D17, D18 = ECG552

Q21 = 2N2222A o ECG123A

Q22 = 2N2907 o ECG153

La salida del oscilador se conecta al transformador de núcleo variable, en donde el área del círculo elegido es:

$$A = \pi r^2 ; \text{ donde si } r = 0,5 \text{ cm, } A = 0,7854 \text{ cm}^2$$

Se calcula entonces el número de espiras por voltio en el Primario:

Por (2.52)

$$N_{pri} = \frac{10^8}{4,44 \cdot f \cdot A \cdot B_{max}}$$

Si  $B_{max} = 2000$  gauss (porque no existe núcleo de hierro de ventana).

$$f = 1000 \text{ Hz}$$

$$A = 0,7584 \text{ cm}^2$$

$$N_{pri} = \frac{10^8}{4,44 \times 10 \times 0,7854 \times 2000} = 14,34 \frac{\text{espiras}}{\text{voltios}}$$

El número de espiras del primario es:

$$N_{pri} \times V_{pri} = 14,34 \times \frac{10}{\sqrt{2}} \cong 102 \text{ espiras}$$

Por (2.51)

$$N_{sec} = f_p \cdot N_{pri} = 1,5 \times 14,34 = 21,51 \frac{\text{espiras}}{\text{voltio}}$$

$$\text{Si } V_{sec} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07$$

El número de espiras del secundario es:

$$N_{sec} \times V_{sec} = 152,10 \cong 152$$

Longitud de bobina de 4-5 cm .

Número de cable AWG 32

## A2.13. REALIMENTACION DE POSICION

Con referencia a la figura 69

$$V_p = \frac{P15 + R74}{R70} (V_{ref} - V_{s1})$$

Si el núcleo está centrado:  $V_{s1} = 7,07 \sqrt{2} = 10 \text{ (V)}$

Con núcleo a desviación máxima:

$$V_{s1} = 5 \text{ (V)}$$

En caso centrado

$$V_p = 0 \text{ (V)} ; V_{ref} = 10 \text{ V DC}$$

Con desviación de núcleo:

$$V_p = 4,5 = \frac{P15 + R74}{R70} (10V - 5 V) \quad \frac{P15 + R74}{R70} \times 5$$

entonces:

$$0,9 R70 = (P15 + R74)$$

Si  $R70 = 100 \text{ K}\Omega$        $P15 + R74 = 90 \text{ K}\Omega$

$R74 = 10 \text{ K}\Omega$

$P15 = 100 \text{ K}\Omega$  (ajustable)

Z5, zener de 12 V.

Z5 es el ECG5021A -  $\frac{1}{2}$  w - 12 V

por lo que:

$$I_{Z5} = 15 \text{ mA} ; R71 = \frac{15 - 12}{0,015} = 200\Omega$$

$$R71 = 220\Omega$$

$P12 = 10 \text{ K}\Omega$

C23 , hasta 100 uF - 25 (V) electrolítico.

Resumiendo:

R74 = 10K $\Omega$

R72 = 100 K $\Omega$

R71 = 220 K $\Omega$

P15 , potenciómetro de 100 K $\Omega$  ajustado a 90 K $\Omega$

P12 = 10 K $\Omega$  ajustado hasta que Vref = + 10 (V)

D23 , D24 , D25 , D26 = ECG552

C23 = 100 uF - 25 (V) - electrolítico

A17 = LM741C o ECG941

#### A2.14. FILTRO

Se introdujo en la etapa de inversión de Vref de la velocidad de la turbina.

Con relación al circuito del filtro, del plano general:

Si  $\tau_F = 4$  seg.

$$\frac{V_{sal}}{V_{ref}} = \frac{R_{102}}{R_{101}} \left( \frac{1}{SC_{25}R_{102} + 1} \right)$$

$$\tau_F = C_{25} \cdot R_{102}$$

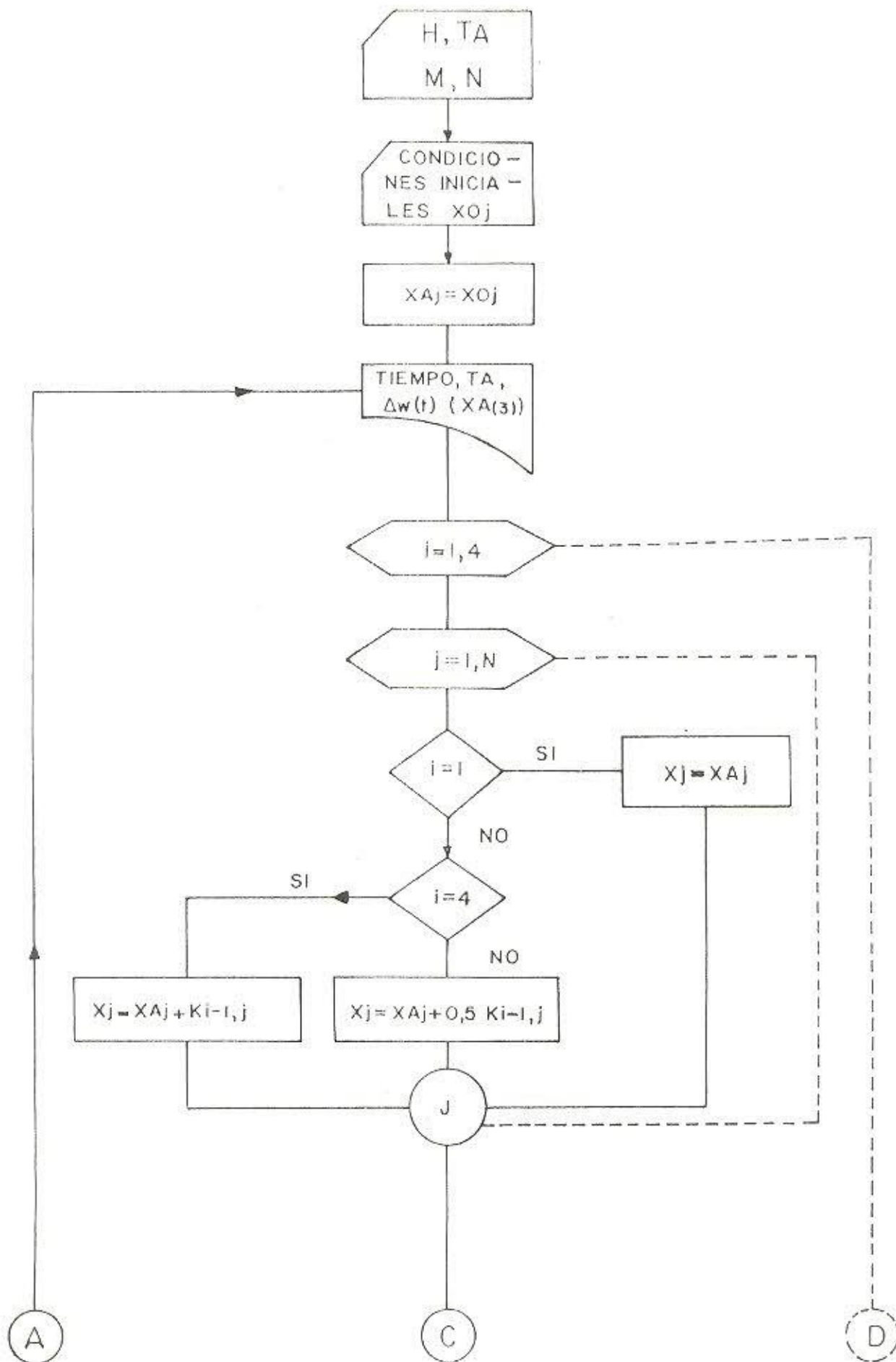
Si R102 = 100 K $\Omega$  y R101 = 100 K $\Omega$  entonces

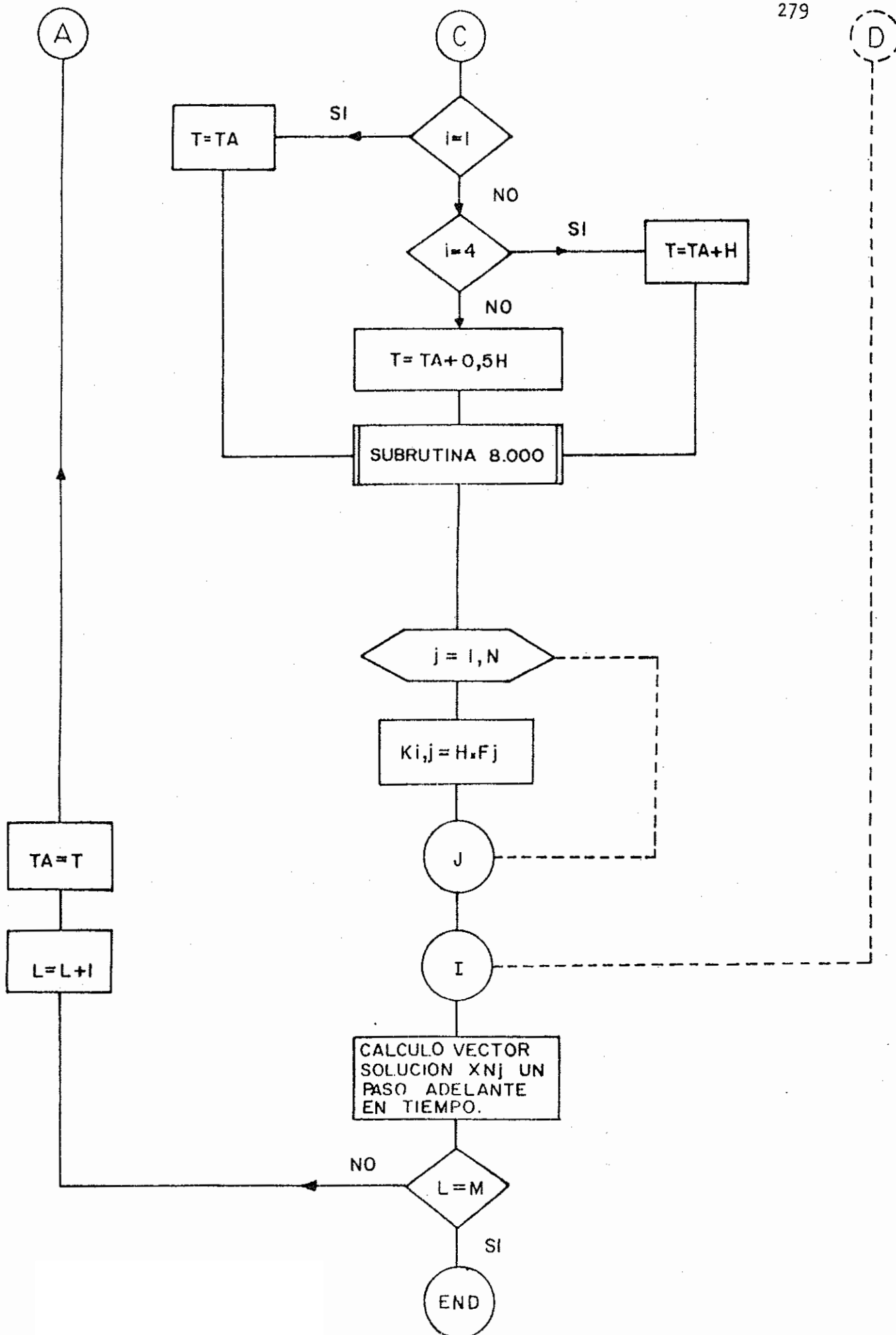
$$C_{25} = \frac{4}{100 \times 10^3} = 40 \text{ uF}$$

C25 = 40 uF para más que 25 (V) electrolítico.

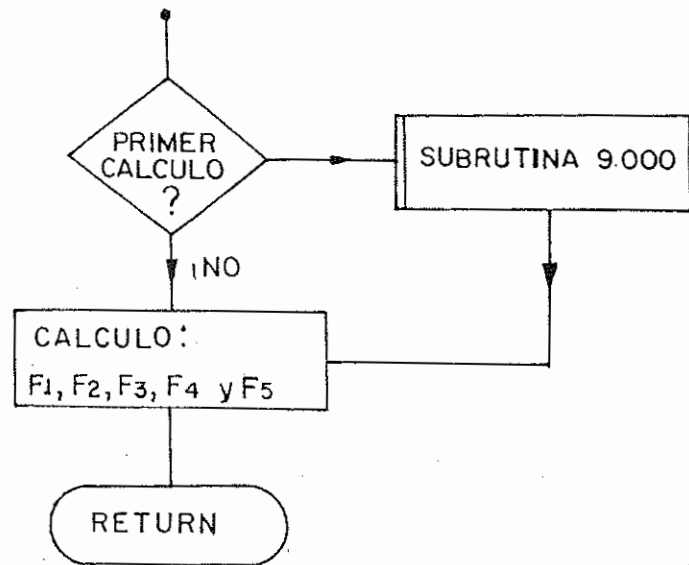
APENDICE A

PROGRAMA PARA LA SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

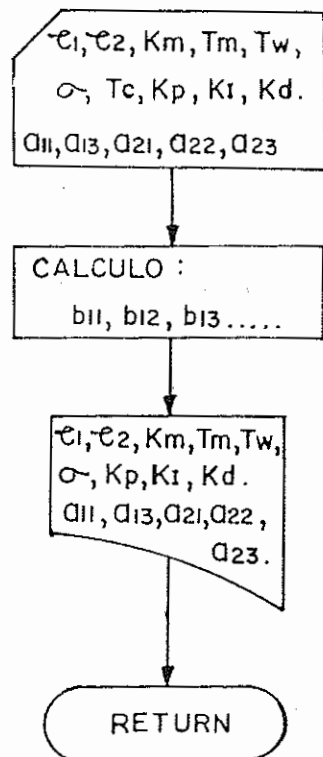




## SUBROUTINA 8.000



## SUBROUTINA 9.000





READY.

```

102 DIM A(2,3),B(5,5)
105 DIM XA(10),X0(10),X(10),XN(10)
110 DIM K(5,10)
112 OPEN 4,4
115 INPUT "TIEMPO INICIAL":TA
117 PO#=CHR$(16)
120 INPUT "NUMERO DE ECUACIONES":N
125 INPUT "NUMERO DE ITERACIONES":M
127 INPUT "INTERVALO DE TIEMPO":H
130 FOR L2= 1 TO N
140 INPUT "CONDICIONES INICIALES":X0(L2)
150 NEXT L2
160 FOR L1=1 TO N
170 XA(L1)=X0(L1)
180 NEXT L1
185 SE=1
190 L=1
200 FOR I=1 TO 4
210 FOR J=1 TO N
220 IF I=1 THEN 290
230 IF I=4 THEN 260
240 X(J)=XA(J)+0.5*K(I-1,J)
250 GO TO 290
260 X(J)=XA(J)+K(I-1,J)
270 GO TO 290
280 X(J)=XA(J)
290 NEXT J
300 IF I=1 THEN 360
310 IF I=4 THEN 340
320 T=TA+0.5*H
330 GO TO 370
340 T=TA+H
350 GO TO 370
360 T=TA
370 GOSUB 8000
390 FOR J=1 TO N
400 K(I,J)=H*F(J)
410 NEXT J
420 NEXT I
430 FOR J=1 TO N
440 XN(J)=XA(J)+(1./6.)*(K(1,J)+2*K(2,J)+2*K(3,J)+K(4,J))
450 XA(J)=XN(J)
470 NEXT J
472 TA=T
473 IF Z1=0 THEN 478
475 PRINT#4,PO#;"08";TA;PO#;"25";XA(3);PO#;"45";XA(2)
476 Z1=0: GO TO 480
478 Z1=1
480 IF L=M THEN 520
490 L=L+1
510 GO TO 200
515 CLOSE 4
520 END
8000 REM CALCULO DE LAS FUNCIONES F(J)
8010 IF SE=1 THEN 8080
8015 Z=PM*TC+PR*(MR/TF)*EXP(-T/TF)+PW*(MR-MR*EXP(-T/TF))

```

```

8020 F(1)=B(1,1)*X(1)+B(1,2)*X(2)+B(1,3)*X(3)+B(1,4)*X(4)+B(1,5)*X(5)+2
8030 F(2)=B(2,1)*X(1)+B(2,2)*X(2)
8040 F(3)=B(3,2)*X(2)+B(3,3)*X(3)+B(3,4)*X(4)+P2*TC
8050 F(4)=B(4,2)*X(2)+B(4,4)*X(4)
8060 F(5)=B(5,3)*X(3)+P3*(WR-WR*EXP(-T/TF))
8070 GO TO 8100
8080 COSUB 9000
8090 GO TO 8015
8100 RETURN
9000 REM CALCULO DE LOS COEF. B(I,J)
9010 INPUT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO":TF
9020 INPUT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA":T2
9030 INPUT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO":T1
9040 INPUT "COEF. DEL SERVO ELECTRICO":KM
9050 INPUT "TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO":TM
9060 INPUT "TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA":TW
9070 INPUT "COEFIC. SIGMA":SI
9080 INPUT "VELOCIDAD DE REFERENCIA":WR
9090 INPUT "TORQUE DE CARGA":TC
9100 INPUT "GANANCIA PROPORCIONAL":KP
9110 INPUT "GANANCIA INTEGRAL":KI
9120 INPUT "GANANCIA DERIVATIVA":KD
9130 INPUT "A11":A(1,1)
9140 INPUT "A13":A(1,3)
9150 INPUT "A21":A(2,1)
9160 INPUT "A22":A(2,2)
9170 INPUT "A23":A(2,3)
9180 B(1,1)=-1/TF
9190 B(1,2)=-((1/TF)*(KD*KM/TM)*(A(2,3)*A(1,1)-A(2,1)*A(1,3)))/A(1,1)
9200 B(1,3)=-((1/TF)*(KP+(KD*A(2,2)/TM))*KM
9210 B(1,4)=-((KD*KM*A(2,1))/(T1*TM*A(1,1)))
9220 B(1,5)=KM/T1
9230 PR=KM*KD/T1
9235 PM=(1/TF)*KM*(KD/TM+SI)
9240 PN=KP*KM/T1
9240 B(2,1)=1/T2
9250 B(2,2)=-1/T2
9260 B(3,2)=(A(1,1)*A(2,3)-A(2,1)*A(1,3))/A(1,1)*TM
9265 B(3,3)=A(2,2)/(TM)
9270 B(3,4)=A(2,1)/(TM*A(1,1))
9280 P2=-1/TM
9300 B(4,2)=A(1,3)/(TW*A(1,1))
9310 B(4,4)=-1/(TW*A(1,1))
9320 B(5,3)=-KI
9325 P3=KI
9327 PRINT#4,"INTERVALO DE TIEMPO":H
9330 PRINT#4,"CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO=":TF
9340 PRINT#4,"CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA=":T2
9345 PRINT#4,"CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-ELECTRICO=":T1
9350 PRINT#4,"COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO=":KM
9360 PRINT#4,"TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO=":TM
9370 PRINT#4,"TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA=":TW
9380 PRINT#4,"COEFICIENTE SIGMA=":SI
9390 PRINT#4,"TORQUE DE CARGA=":TC
9395 PRINT#4,"VELOCIDAD DE REFERENCIA":WR
9400 PRINT#4,"GANANCIA PROPORCIONAL=":KP
9410 PRINT#4,"GANANCIA INTEGRAL=":KI
9420 PRINT#4,"GANANCIA DERIVATIVA=":KD
9430 PRINT#4,"A11=":A(1,1)
9440 PRINT#4,"A13=":A(1,3)
9450 PRINT#4,"A21=":A(2,1)
9460 PRINT#4,"A22=":A(2,2)
9470 PRINT#4,"A23=":A(2,3)
9475 PRINT#4,
9477 PRINT#4,

```

```
9480 PRINT#4,
9490 PRINT#4,PO#;"08";"TIEMPO";PO#;"25";"VELOCIDAD";PO#;"45";"DESPLAZAMIENTO"
9500 PRINT#4,PO#;"25";"ANGULAR";PO#;"45";"DEL MECANISMO DE"
9505 PRINT#4,PO#;"45";"CONTROL DE FLUJO"
9510 PRINT#4,PO#;"09";"[SEG]";PO#;"26";"[P. U.]";PO#;"50";"[P. U.]"
9512 PRINT#4,
9515 PRINT#4,
9520 PRINT#4,PO#;"08";TA;PO#;"25";XA(3);PO#;"45";XA(2)
9525 M1=0
9530 SE=2
9535 Z1=0
9540 RETURN
```

READY.

## ALGUNAS VARIABLES DEL PROGRAMA

H , Intervalo de tiempo.

N , Número de ecuaciones diferenciales (5 en el presente caso).

M , Número de iteraciones.

Fj , Derivadas con respecto al tiempo de las variables de estado.

L , Contador.

A P E N D I C E B

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE RAICES

READY.

```
8000 REM CALCULO DE RAICES
8005 OPEN 4,4
8010 INPUT "C4=";C4
8015 INPUT "C3=";C3
8020 INPUT "C2=";C2
8025 INPUT "C1=";C1
8030 INPUT "C0=";C0
8035 M=0
8040 N=1
8045 L=0
8050 F1=0
8060 INPUT "U=";U
8070 INPUT "DELTA U=";DU
8080 C5=1
8100 P=C4-2*C5*U-C5
8110 Q=3*C5*(U^2)-2*C4*U+C5*(U^3)-C4*(U^2)+U*C3-C2+C3
8120 R=C4*(U^3)-C5*(U^4)-C3*(U^2)+C2*U+C0-C1
8130 D=Q^2-4*P*R
8140 IF D<0 THEN 8570
8150 PRINT "PARA EL VALOR DE U=";U
8155 V1=-Q/(2*P)+SQR(D)/(2*P)
8160 V2=-Q/(2*P)-SQR(D)/(2*P)
8170 PRINT"V1=";V1
8180 PRINT "V2=";V2
8190 D5=C5
8200 D4=C4-D5*U
8210 D3=C3-D4*U-D5*V1
8220 D2=C2-D3*U-D4*V1
8230 D1=C1-D2*U-D3*V1
8240 D0=C0-D2*V1
8245 PRINT "D1=";D1
8250 E=0.0001
8255 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8260 IF F1=0 THEN 8530
8270 IF F1>0 AND D1>0 THEN 8430
8280 IF F1<0 AND D1<0 THEN 8320
8290 PRINT "V1";V1
8300 PRINT "D1=";D1
8305 PRINT "N=";N
8310 GO TO 8620
8320 IF D1>F1 AND M=0 THEN 8370
8330 U=U-DU
8335 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8340 F1=D1
8345 M=1
8350 N=N+1
8360 GO TO 8100
8370 IF D1>0 THEN 8290
8380 U=U+DU
8400 F1=D1
8405 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8410 N=N+1
8420 GO TO 8100
8430 IF D1<F1 AND L=0 THEN 8480
8440 U=U-DU
8445 L=1
```

READY.

```
8000 REM CALCULO DE RAICES
8005 OPEN 4,4
8010 INPUT "C4=";C4
8015 INPUT "C3=";C3
8020 INPUT "C2=";C2
8025 INPUT "C1=";C1
8030 INPUT "C0=";C0
8035 M=0
8040 N=1
8045 L=0
8050 F1=0
8060 INPUT "U=";U
8070 INPUT "DELTA U=";DU
8080 C5=1
8100 P=C4-2*C5*U-C5
8110 Q=3*C5*(U^2)-2*C4*U+C5*(U^3)-C4*(U^2)+U*C3-C2+C3
8120 R=C4*(U^3)-C5*(U^4)-C3*(U^2)+C2*U+C0-C1
8130 D=Q^2-4*P*R
8140 IF D<0 THEN 8570
8150 PRINT "PARA EL VALOR DE U=";U
8155 V1=-Q/(2*P)+SQR(D)/(2*P)
8160 V2=-Q/(2*P)-SQR(D)/(2*P)
8170 PRINT"V1=";V1
8180 PRINT "V2=";V2
8190 D5=C5
8200 D4=C4-D5*U
8210 D3=C3-D4*U-D5*V1
8220 D2=C2-D3*U-D4*V1
8230 D1=C1-D2*U-D3*V1
8240 D0=C0-D2*V1
8245 PRINT "D1=";D1
8250 E=0.0001
8255 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8260 IF F1=0 THEN 8530
8270 IF F1>0 AND D1>0 THEN 8430
8280 IF F1<0 AND D1<0 THEN 8320
8290 PRINT "V1";V1
8300 PRINT "D1=";D1
8305 PRINT "N=";N
8310 GO TO 8620
8320 IF D1>F1 AND M=0 THEN 8370
8330 U=U-DU
8335 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8340 F1=D1
8345 M=1
8350 N=N+1
8360 GO TO 8100
8370 IF D1>0 THEN 8290
8380 U=U+DU
8400 F1=D1
8405 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8410 N=N+1
8420 GO TO 8100
8430 IF D1<F1 AND L=0 THEN 8480
8440 U=U-DU
8445 L=1
```

```
8430 F1=D1
8455 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8460 N=N+1
8470 GO TO 8100
8480 IF D1<0 THEN 8290
8490 U=U+DU
8495 IF E>=ABS(D1) THEN 8290
8500 F1=D1
8520 GO TO 8100
8530 U=U+DU
8540 F1=D1
8550 N=N+1
8560 GO TO 8100
8570 U=U+DU
8580 N=N+1
8590 IF N=200 THEN 8610
8600 GO TO 8100
8610 PRINT "ASIGNE OTRO VALOR A U, YA QUE NO CONVERGE"
8620 INPUT "QUIERE CONTINUAR 1/0";K
8625 IF K=1 THEN 8035
8630 PRINT#4,"C0=";C0
8640 PRINT#4,"C1=";C1
8650 PRINT#4,"C2=";C2
8660 PRINT#4,"C3=";C3
8670 PRINT#4,"C4=";C4
8680 PRINT#4,"U=";U
8690 PRINT#4,"V1=";V1
8700 PRINT#4,"V2=";V2
8710 PRINT#4,"D1=";D1
8720 END
```

READY.



READY.

```

8000 REM CALCULO DE RAICES
8020 READ C0,C1,C2,C3,C4,C5
8060 INPUT "U=";U
8100 P=C4-2*C5*U-C5
8110 Q=3*C5*(U↑2)-2*C4*U+C5*(U↑3)-C4*(U↑2)+U*C3-C2+C3
8120 R=C4*(U↑3)-C5*(U↑4)-C3*(U↑2)+C2*U+C0-C1
8130 D=Q↑2-4*P*R
8140 IF D<0 THEN 8270
8150 PRINT "PARA EL VALOR DE U=";U
8155 V1=-Q/(2*P)+SQR(D)/(2*P)
8160 V2=-Q/(2*P)-SQR(D)/(2*P)
8170 PRINT"V1=";V1
8180 PRINT "V2=";V2
8190 D5=C5
8200 D4=C4-D5*U
8210 D3=C3-D4*U-D5*V1
8220 D2=C2-D3*U-D4*V1
8230 D1=C1-D2*U-D3*V1
8240 D0=C0-D2*V1
8250 PRINT "D1=";D1
8260 PRINT "D0=";D0
8265 GO TO 8280
8270 PRINT "NO HAY EL VALOR DE V CORRESPONDIENTE A ESE VALOR DE U"
8280 END
8300 DATA 18.5185,-7.4074,-0.46296,12.9722,9.0666,1

```

READY.

APENDICE C

**PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LOS COEFICIENTES**

READY.

```

90 DIM A(2,3),B(5,5)
90 OPEN 4,4
100 REM CALCULO DE LOS COEF. B(I,J)
110 INPUT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO ELECTRICO":T1
120 INPUT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA":T2
130 INPUT "COEF. DEL SERVO ELECTRICO":KM
140 INPUT "TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO":TM
150 INPUT "TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA":TW
180 INPUT "GANANCIA PROPORCIONAL":KP
190 INPUT "GANANCIA INTEGRAL":KI
200 INPUT "GANANCIA DERIVATIVA":KD
210 INPUT "A11":A(1,1)
220 INPUT "A13":A(1,3)
230 INPUT "A21":A(2,1)
240 INPUT "A22":A(2,2)
250 INPUT "A23":A(2,3)
260 B(1,1)=-1/T1
270 B(1,2)=-((1/T1)*(KM*KD/TM)*(A(2,3)*A(1,1)-A(2,1)*A(1,3)))/A(1,1)
280 B(1,3)=-((1/T1)*(KM*KP+(KM*KD*A(2,2))/TM))
290 B(1,4)=-((KM*KD*A(2,1))/(T1*TM*A(1,1)))
300 B(1,5)=(KM)/T1
320 B(2,1)=1/T2
330 B(2,2)=-1/T2
340 B(3,2)=(A(1,1)*A(2,3)-A(2,1)*A(1,3))/A(1,1)*TM)
350 B(3,3)=A(2,2)/TM)
360 B(3,4)=A(2,1)/(TM*A(1,1))
380 B(4,2)=A(1,3)/(TW*A(1,1))
390 B(4,4)=-1/(TW*A(1,1))
400 B(5,3)=-KI
402 PRINT#4,B(1,1),B(1,2),B(1,3),B(1,4),B(1,5)
404 PRINT#4,B(2,1),B(2,2)
406 PRINT#4,B(3,2),B(3,3),B(3,4)
408 PRINT#4,B(4,2),B(4,4)
409 PRINT#4,B(5,3)
410 PRINT#4,"CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO-PILOTO=":T1
420 PRINT#4,"CONSTANTE DE TIEMPO DEL SERVO DE FUERZA=":T2
430 PRINT#4,"COEFICIENTE DEL SERVO ELECTRICO=":KM
440 PRINT#4,"TIEMPO DE ARRANQUE MECANICO=":TM
450 PRINT#4,"TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA=":TW
480 PRINT#4,"GANANCIA PROPORCIONAL=":KP
500 PRINT#4,"GANANCIA INTEGRAL=":KI
510 PRINT#4,"GANANCIA DERIVATIVA=":KD
520 PRINT#4,"A11=":A(1,1)
530 PRINT#4,"A13=":A(1,3)
540 PRINT#4,"A21=":A(2,1)
550 PRINT#4,"A22=":A(2,2)
560 PRINT#4,"A23=":A(2,3)
570 PRINT#4,
580 C4=-B(1,1)+B(2,2)+B(3,3)+B(4,4)
590 C3=B(1,1)*B(2,2)+B(3,3)*B(4,4)+(B(1,1)+B(2,2))*(B(3,3)+B(4,4))-B(1,2)*B(2,3)
600 A1=-B(3,3)*B(4,4)*(B(1,1)+B(2,2))-B(1,1)*B(2,2)*(B(3,3)+B(4,4))
610 A2=-B(1,4)*B(4,2)*B(2,1)+B(1,2)*B(2,1)*(B(3,3)+B(4,4))
620 C2=A1+A2-B(1,3)*B(3,2)*B(2,1)
630 A3=B(1,1)*B(2,2)*B(3,3)*B(4,4)-B(4,2)*B(1,3)*B(3,4)*B(2,1)
640 A4=B(1,4)*B(4,2)*B(2,1)*B(3,3)-B(1,2)*B(2,1)*B(3,3)*B(4,4)
650 C1=A3+A4+B(1,3)*B(3,2)*B(2,1)*B(4,4)-B(2,1)*B(5,3)*B(1,5)*B(3,2)

```

```
660 C0=-B(2,1)*B(5,3)*B(1,5)*B(3,4)*B(4,2)*B(2,1)*B(5,3)*B(1,5)*B(3,2)*B(4,4),
670 PRINT#4,"C4=";C4
672 PRINT#4,"C3=";C3
674 PRINT#4,"C2=";C2
676 PRINT#4,"C1=";C1
678 PRINT#4,"C0=";C0
680 CLOSE 4
690 END
```

READY.

ANEXO N° 2

PLANOS

## BIBLIOGRAFIA

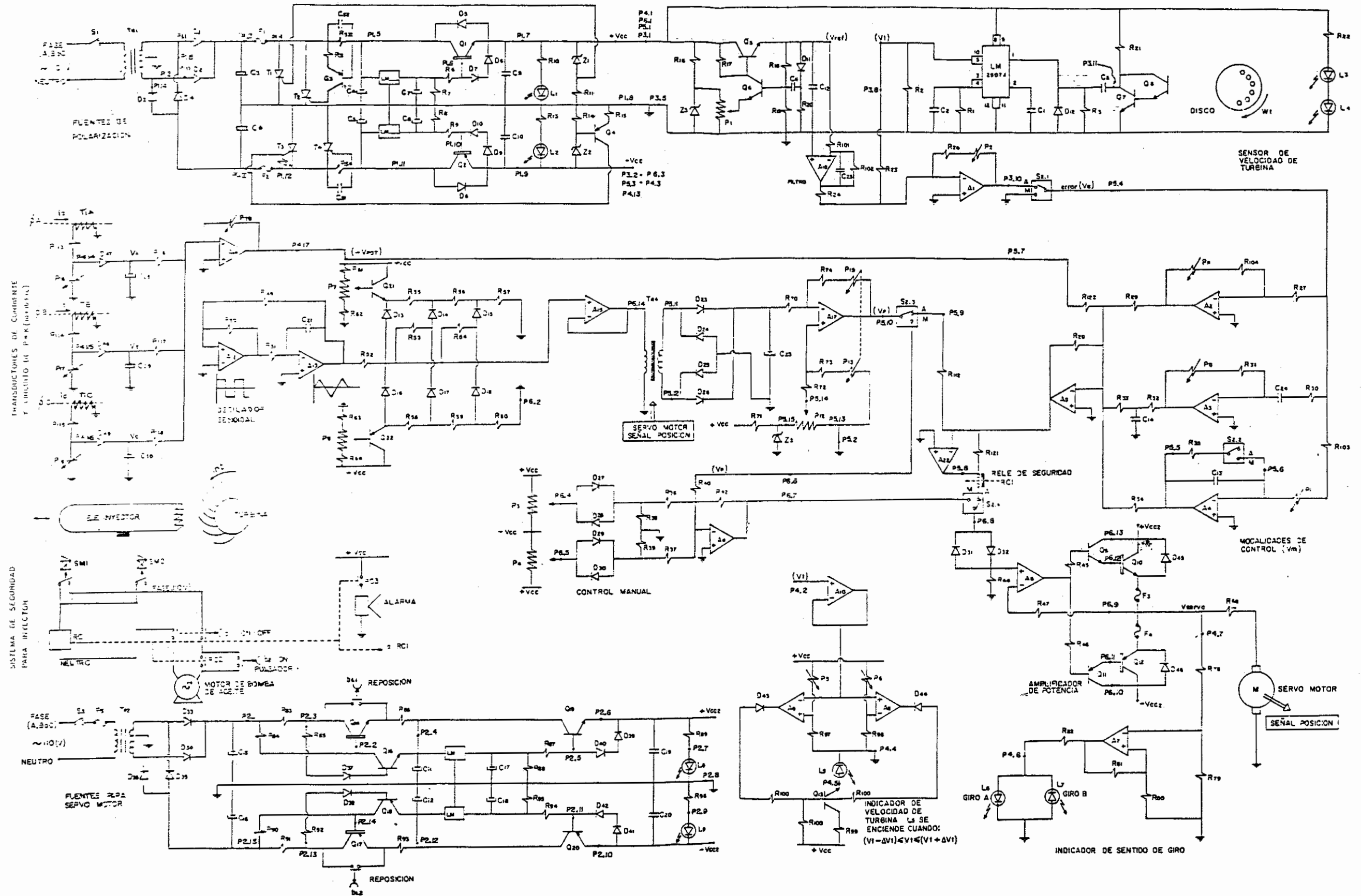
### REFERENCIAS

1. IEEE COMMITTEE REPORT. Dynamic Modelos for Eteam and Hydio Turbines in Power System Studies Paper T 73 089 - 0.
2. N. S. DHALIWAL. H. E. WICHERT. Analysis of P.I.D. Conversors in Multimachine System. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 97, No. 2, March - April 1977.
3. CABRERA, PROAÑO. Estudio y construcción de Regulador de Velocidad para una Turbina Pelton de Laboratorio. Tesis. Quito. Escuela Politécnica Nacional, 1983.
4. P. FLOR, M. GONZALEZ y D. USBECK, Diseño y construcción de un regulador electro-hidráulico de velocidad para una mini turbina Pelton con aplicación al Laboratorio. Tesis. Quito. Escuela Politécnica Nacional, 1986.
5. OLDENBURGER, DONELSON.- Dynamic Response of a Hydroelectric Plant IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas - 100, No. 1. October 1962.
6. Manual Técnico para Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de la OLADE. Volumen III, Tomo I: Manual de Reguladores Oleo - Mecánico de Velocidad.
7. OGATA. Ingeniería de Control Moderni. London Prentice Hall, 19.
8. R. L. KETTER. S. P. PROWEL. Jr. Modern Methods of Engineering Computarion. Mc Graw Hill - Book Company. 1969.
9. J. BLACKBURN, G. Reethof, J. Shearer. Fluid Power Control. MIT Press. 1960. Third Printing, April 1969.
10. J. E. SHIGLEY. Proyecto de Ingeniería Mecánica, Mc Graw Hill, México 1970.
11. TIETZE, SCHENK. Circuitos Electrónicos Abanzados, España - Marcombo - 1983.
12. MILLMAN, HALKIAS. Integrated Electronics. México. Mc Graw Hill 1972.
13. KOSOW. Máquinas Eléctricas.
14. TAUB, SCHILLING. Digital Integrated Electronics. México, Mc Graw Hill 1977.
15. Linear Data Book. National Semiconductor Corporation. 1982.
16. ECG. Semiconductor Replacement.

17. GUY A. LECLERCQ.- Transistores y Semiconductores Industriales. Marcombo - Barcelona 1977.
18. ELECTRO - GRAFT CORPORATION. Engineering Handbook. Dc Motors Speed Controls Servo Systems, October. 1973 (Second Edition).

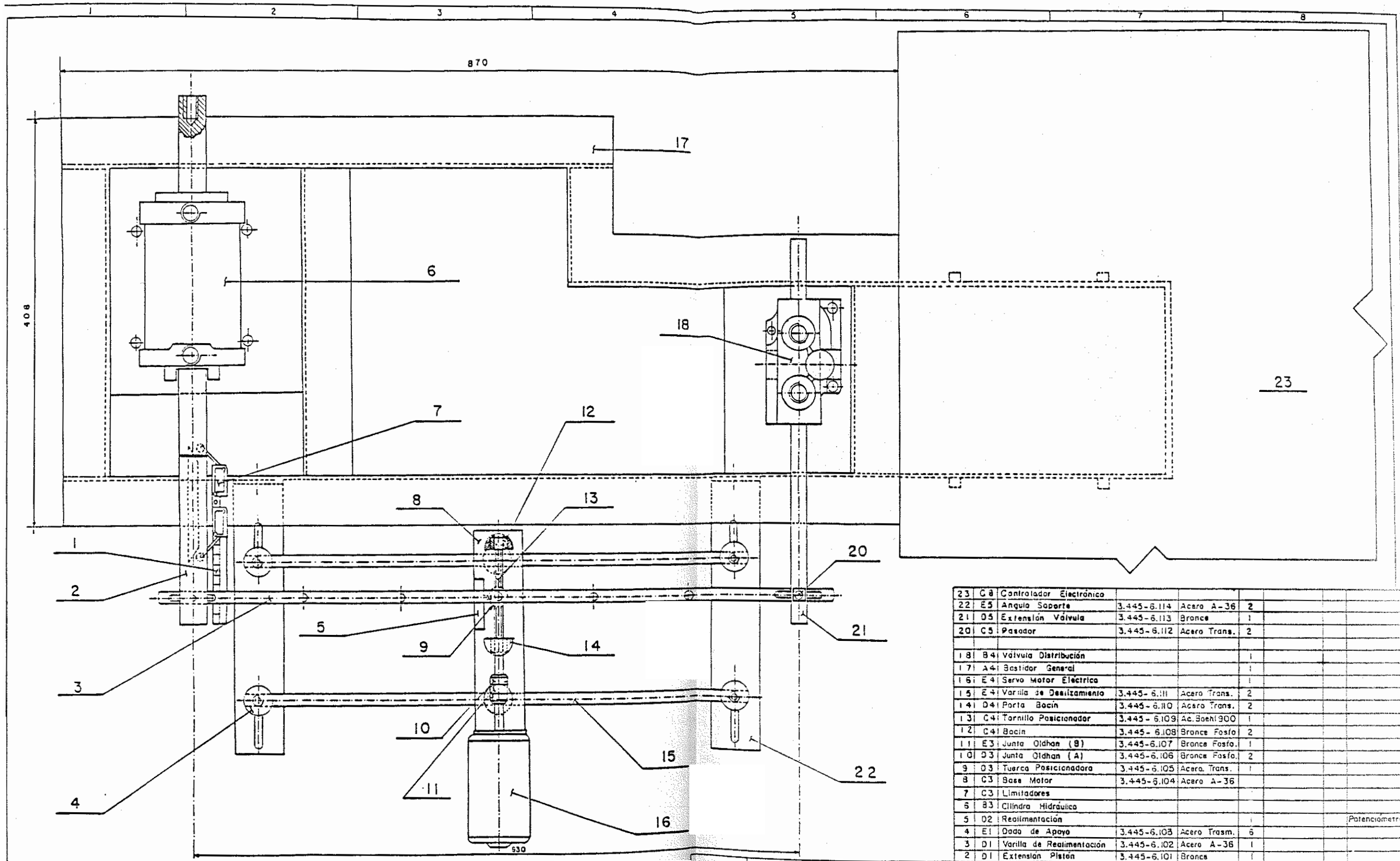
#### NORMAS

- IEC 249. Metal - clad base materials for printed circuits.
- IEC 297. Dimensions of panels and racks.
- IEC 326 - 2 (1976). Printed boards.  
Part. 2: Test methods.
- IEC 326 - 3A (1980) Printed boards.  
Part 3: Design and use of printed boards.
- IEC 326 - 3A (1982) Printed boards.  
First supplement.
- IEC 326 - 4 (1980) Printed boards.  
Part 4: Specification for single and double side printed boards with plain holes.
- IEC 603 - 2 (1980) Connectors for frequencies below 3 MHz for use with printed boards.  
Part 2: Two - part connectors for printed boards, for basic grid of 2.54 mm (0.1 in), with common mounting features.
- BS 5954: Part 2: 1985. Dimensions of Mechanical Structures of the 482.6 mm (19 in) Series.  
Part 2. Specifications for cabinets and Pitches of rack structures.
- BS 5954: Part 3: 1985. Dimensions of mechanical structures of the 482.6 mm (19 in) series.  
Part. 3. Specifications for subracks and associated plug - in units.
- BS 6221: Part 3: 1984. Printed Wiring Boards.  
Part. 3.. Guide for the design and use of printed wiring boards.
- BS 6221: Part 20: 1984: Printed wiring boards.  
Part 20. Guide for the assembly of printed wiring boards.



|                                               |                             |           |             |                     |  |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|-----------|-------------|---------------------|--|
|                                               |                             |           |             |                     |  |
|                                               |                             |           |             | QUITO _____ ECUADOR |  |
| FECHA                                         | MODIFICACION Y/O CORRECCION | REVISION  | APROBACION  | PLANO DE:           |  |
| SECRETARIA PERMANENTE<br>DEPARTAMENTO TECNICO |                             |           |             |                     |  |
| PROYECTO EJECUTIVO DETALLADO                  |                             |           |             |                     |  |
| ELABORADO:                                    | Juan Velasco                | PROYECTO: | Jorge Yáñez | AUTORIZADO:         |  |
| REVISADO:                                     |                             | REVISADO: |             | AUTORIZADO:         |  |
| SEÑALA:                                       |                             | SEÑALA:   |             | AUTORIZADO:         |  |
|                                               |                             |           |             | ING. RICARDO CORRIE |  |





|    |    |                          |             |               |               |
|----|----|--------------------------|-------------|---------------|---------------|
| 23 | C8 | Controlador Electrónico  |             |               |               |
| 22 | E5 | Angulo Soporte           | 3.445-6.114 | Acero A-36    | 2             |
| 21 | O5 | Extensión Válvula        | 3.445-6.113 | Bronce        | 1             |
| 20 | C5 | Pasador                  | 3.445-6.112 | Acero Trans.  | 2             |
| 18 | B4 | Válvula Distribución     |             |               | 1             |
| 17 | A4 | Bastidor General         |             |               | 1             |
| 16 | E4 | Servo Motor Eléctrico    |             |               | 1             |
| 15 | E4 | Varilla de Deslizamiento | 3.445-6.111 | Acero Trans.  | 2             |
| 14 | D4 | Porta Bacin              | 3.445-6.110 | Acero Trans.  | 2             |
| 13 | C4 | Tornillo Posicionador    | 3.445-6.109 | Ac. Saehi 900 | 1             |
| 12 | C4 | Bacin                    | 3.445-6.108 | Bronce Fosfo  | 2             |
| 11 | E3 | Junta Oidhan (B)         | 3.445-6.107 | Bronce Fosfo  | 1             |
| 10 | D3 | Junta Oidhan (A)         | 3.445-6.106 | Bronce Fosfo  | 2             |
| 9  | O3 | Tuerca Posicionadora     | 3.445-6.105 | Acero Trans.  | 1             |
| 8  | C3 | Base Motor               | 3.445-6.104 | Acero A-36    |               |
| 7  | C3 | Limitadores              |             |               |               |
| 6  | B3 | Cilindra Hidráulica      |             |               |               |
| 5  | O2 | Recalibración            |             |               | Potenciometro |
| 4  | E1 | Dado de Apoyo            | 3.445-6.103 | Acero Trasm.  | 6             |
| 3  | D1 | Varilla de Recalibración | 3.445-6.102 | Acero A-36    | 1             |
| 2  | D1 | Extensión Pistón         | 3.445-6.101 | Bronce        | 1             |

| FECHA | MODIFICACION Y/O CORRECCION | REVISION | APROBACION |
|-------|-----------------------------|----------|------------|
|       |                             |          |            |
|       |                             |          |            |

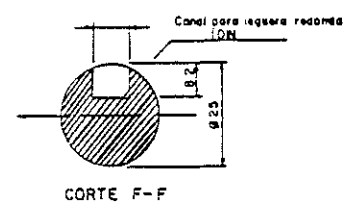
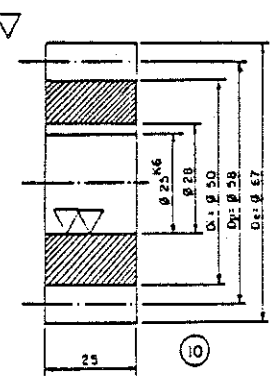
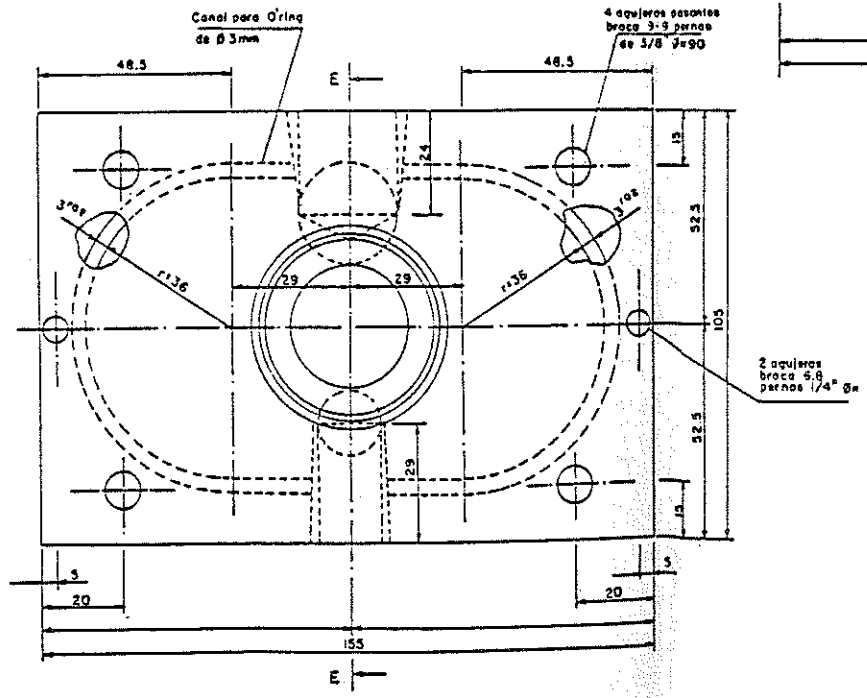
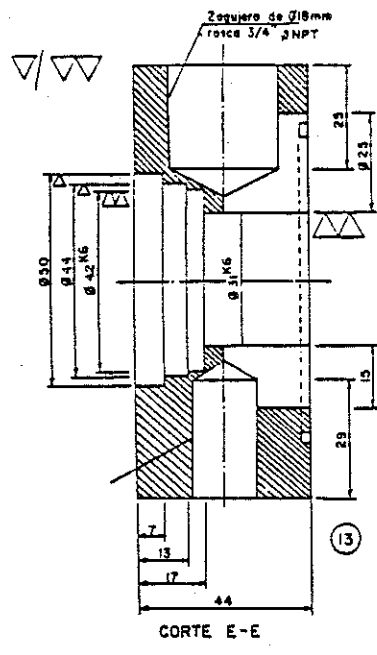
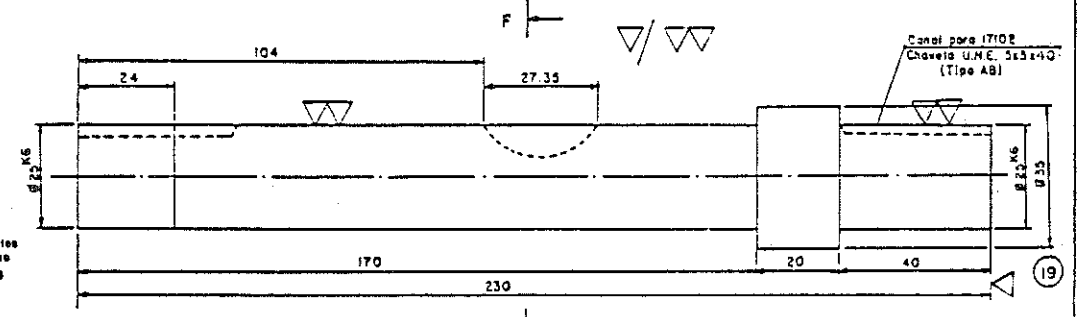
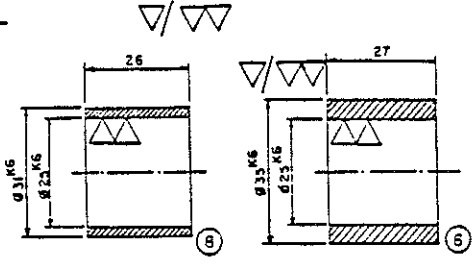
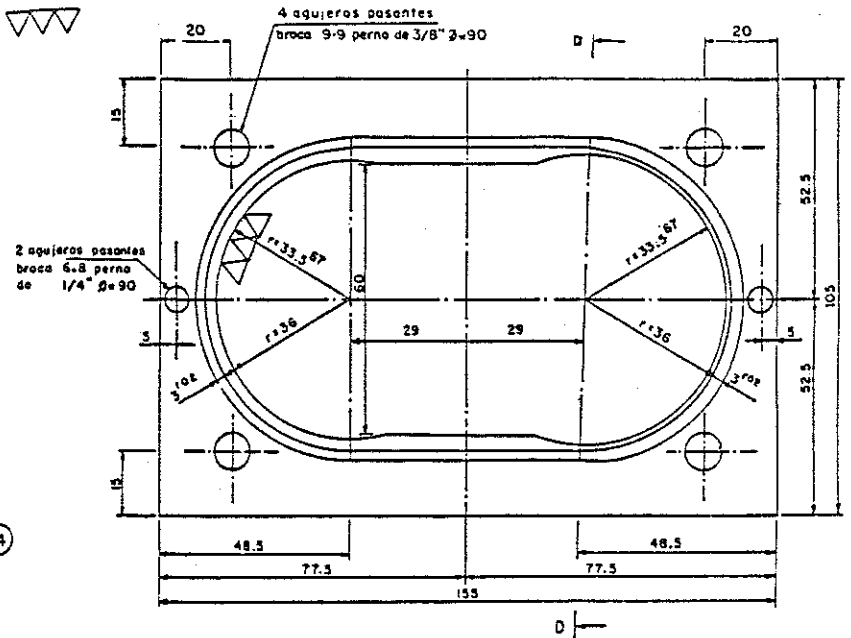
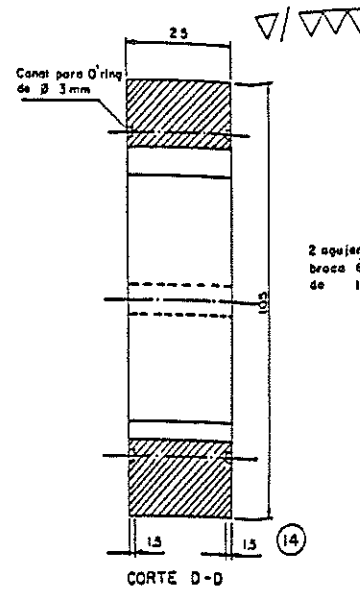
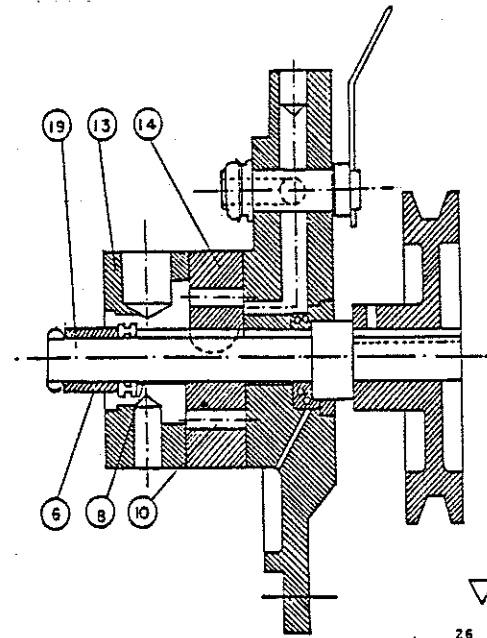
SECRETARIA PERMANENTE  
DEPARTAMENTO TECNICO  
PROYECTO EJECUTIVO DETALLADO



ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA  
QUITO ECUADOR

PLANO DE: **CONEXION SERVOMOTOR ELECTRICO  
CON SERVOMOTOR HIDRAULICO**

|                                  |                                  |                                   |
|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| DISEÑO:<br>P. Flor - M. González | DIBUJO:<br>P. Flor - M. González | APROBADO:<br>ING. GABRIEL SANCHEZ |
| PROYECTO MECANICO:               | REVISADO:                        | FECHA:                            |
| ESCALA:                          | APROBADO:<br>ING. RICHARD CODDIE | PLANO N°:                         |



| Nº | Detalle     | Cant | Material       | Dimensiones | Observación |
|----|-------------|------|----------------|-------------|-------------|
| 19 | Eje         | 1    | SAE 1045       | Ø28x233     |             |
| 14 | Cuerpo      | 1    | Hierro fundido | 30x158x108  |             |
| 13 | Cubierta    | 1    | Hierro fundido | 47x158x108  |             |
| 10 | Piñón recto | 1    | AISI-4142      | 28xØ60      |             |
| 8  | Becín       | 4    | Bronce         | 28xØ33      |             |
| 6  | Tapa        | 1    | SAE 1020       | 30xØ38      |             |

ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA  
QUITO ECUADOR

| FECHA                                                                         | MODIFICACION /YO CORRECCION | REVISION | APROBACION | PLANO DE:                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                                               |                             |          |            | <b>BOMBA DE ENGRANAJES</b>                                     |
| SECRETARIA PERMANENTE<br>DEPARTAMENTO TECNICO<br>PROYECTO EJECUTIVO DETALLADO |                             |          |            | DISEÑO: J. CORTEZ - H. BAJAÑA<br>PROYECTO MECANICO:<br>ESCALA: |
|                                                                               |                             |          |            | APROBADO: ING. GABRIEL SANCHEZ<br>FECHA:<br>PLANO Nº:          |
|                                                                               |                             |          |            | APROBADO: ING. RICHARD CORRIE                                  |