



91
9/

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DEL RODADO
AUTOMATICO DE LA TURBINA DE LA UNIDAD 1 DE
LA C. T. E. FRANCISCO PEREZ RIOS DE TULA, HGO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ing. Mecánico Electricista

P R E S E N T A :

Daniel Tamariz Frias

ASESOR DE TESIS

ING. ROBERTO MACIAS PEREZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

P R O L O G O

En países en proceso de desarrollo como México, la demanda de energía eléctrica llega a superar la capacidad producida, por esta razón se presenta la necesidad de utilizar los recursos energéticos con mayor eficiencia. Esto lleva consigo, además del adiestramiento del personal, el desarrollo de tecnologías y sistemas de control que conjuntamente al elemento humano contribuyen a la óptima utilización de la planta productora disponible.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (I.I.E.) encargado de desarrollar, actualizar e implantar las tecnologías que la industria eléctrica le demanda, realiza proyectos a la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) e industria manufacturera de equipo eléctrico.

Basándose en las experiencias acumuladas en la adquisición de señales y procesamientos de datos, el I.I.E. por medio del Departamento de Instrumentación y Control, desarrolla proyectos de control y automatización de plantas termoeléctricas.

La presente tesis forma parte de uno de estos proyectos, - tiene como objetivo el desarrollo de un algoritmo de control que realice el rodado automático de un turbogenerador de 300MW de la central termoeléctrica de Tula Hidalgo " Francisco Pérez Ríos " .

INTRODUCCION.

El arranque de un turbogenerador en las centrales termoeléctricas es un proceso largo, delicado y difícil. Los operarios deben cumplir con todos los preparativos del arranque, iniciar el rodado de la unidad siguiendo un patrón ya definido, revisar constantemente los supervisorios de la turbina, sincronizar la unidad al sistema y dar carga al generador.

Cuando el arranque no se hace correctamente, el consumo de energéticos es excesivo, se aplican esfuerzos inadmisibles a la turbina, el rotor recibe esfuerzos térmicos disminuyendo por lo tanto la vida útil de la unidad.

Para nuestros objetivos es posible dividir el arranque del turbogenerador en tres etapas: la primera de ellas incluye el cumplimiento de los preparativos del arranque, la segunda es el rodado de la turbina, la tercera es la sincronización del generador a la línea y toma de carga.

1) Los preparativos para el rodado consisten en satisfacer - todas aquellas condiciones necesarias para que la turbina - pueda ser acelerada; entre otros, están los siguientes:

a) La caldera debe contener la presión, temperatura y cantidad de vapor requeridos por la turbina.

b) El suministro de aceite de control, lubricación, y de alta presión debe ser el adecuado.

c) Los dispositivos de control y protección del turbogenerador deben encontrarse en su posición correcta.

d) Los indicadores luminosos, el suministro de agua, etc., deben funcionar correctamente.

Es larga la lista de preparativos, los cuales deben cumplirse antes de acelerar la turbina; en algunas ocasiones la mayoría de este equipo estará en servicio y solamente deberá ser revisado.

2) El siguiente paso a seguir es el rodado de la turbina, - esto se refiere a elevar la velocidad del rotor de 3rpm (- estado de tornaflecha) hasta 3,600rpm (velocidad nominal) La aceleración y tiempos de calentamiento que se apliquen - deben ser seleccionados como lo recomienda el fabricante, - ya que la turbina sufrirá una expansión al pasar de 25°C -- (temperatura ambiente) a 538°C (temperatura nominal del vapor). Durante todo el rodado deben revisarse constantemente los supervisorios de la turbina, como son:

- a) La excentricidad y vibración del rotor.
- b) La expansión diferencial de la carcasa.
- c) La temperatura diferencial del vapor y el metal en la cámara de impulso, etc.

3) La siguiente etapa, consiste en sincronizar el generador a la línea y tomar carga; en términos generales, se deben - realizar los siguientes pasos:

- a) excitar el generador.
- b) sincronizar el generador a la línea.
- c) tomar carga.
- d) cambio de carga.

OBJETIVO.

El objetivo de esta tesis es el diseño de un sistema de control, el cual colabore con la segunda etapa del arranque - del turbogenerador, es decir, el rodado de la turbina, el - cual deberá ejecutar automáticamente cumpliendo el patrón de - rodado recomendado por el fabricante.

Hay que hacer notar que el rodado de la turbina es un proce

so muy complejo en donde existen muchas variables que requieren estarse ajustando, estas variables son parametros de la turbina y de la caldera. El control a desarrollar en esta tesis es sobre la velocidad de la turbina, que es la principal variable a controlar en esta etapa del arranque. El control sobre la caldera y demás dispositivos seguirán siendo responsabilidad de los operadores.

El sistema de control será diseñado para ser implementado en una microcomputadora; antes de acelerar la turbina, revisará si los preparativos se han cumplido y al estar acelerando el rotor tomará únicamente las variables que involucren un cambio en la velocidad de la turbina.

Ya que es imposible contar con un turbogenerador de esta capacidad para hacer las pruebas y los ajustes, entonces se propone un modelo del turbogenerador y uno para el controlador, de esta manera los procesos de rodado de la turbina pueden ser simulados en una computadora.

El trabajo a realizar en esta tesis, es para la unidad 1 de la Central Termoeléctrica de Tula Hidalgo, donde se cuenta con un turbogenerador de la marca MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES.

INDICE

CAPITULO I

PAG.

DESCRIPCION DE LA UNIDAD UNO DE LA CENTRAL TERMoeLECTRICA DE TULA HIDALGO.

1.1 <u>CICLO TERMODINAMICO AGUA-VAPOR</u>	2
1.1.1 SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA	2
1.1.2 SISTEMA DE VAPOR	5
1.1.3 SISTEMA DE CONDENSADO	6
1.1.4 SISTEMA DE CIRCULACION DE AGUA	7
1.1.5 SISTEMA DE AIRE Y GASES	7
1.2 <u>EL TURBOGENERADOR</u>	9
1.2.1 SISTEMA DE ACEITE	12
1.2.1.1 SUMINISTRO DE ACEITE	12
1.2.1.2 SISTEMA DE LUBRICACION DE ACEITE	15
1.2.1.3 SISTEMA DE ACEITE DE CONTROL	15
1.2.1.4 SISTEMA DE ACEITE DE ALTA PRESION	16

CAPITULO II

DESCRIPCION DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL Y PROTECCION DE LA TURBINA.

2.1 <u>VALVULAS DE ADMISION DE VAPOR</u>	17
2.1.1 VALVULAS DE CORTE O ESTRANGULAMIENTO	17
2.1.2 SERVOMOTOR DE LA VALVULA DE CORTE	18
2.1.3 VALVULAS DE GOBIERNO	22
2.1.4 VALVULAS DE PARO DE RECALENTADO	22
2.1.5 SERVOMOTOR DE LAS VALVULAS DE PARO DE RECALENTADO	24
2.1.6 VALVULAS INTERCEPTORAS	26
2.2 <u>DISPOSITIVO DE CONTROL</u>	26
2.2.1 CONTROLADOR DE LAS VALVULAS DE ESTRANGULAMIENTO	28
2.2.2 CONTROLADOR DE LAS VALVULAS DE GOBIERNO	30
2.2.3 CONTROLADOR DE LAS VALVULAS INTERCEPTORAS	34
2.3 <u>DISPOSITIVOS DE PROTECCION</u>	36
2.3.1 DISPARO POR SOBREVOLOCIDAD	38

2.3.2	DISPARO POR BAJA PRESION DE ACEITE A COJINETES	39
2.3.3	DISPARO POR SOLENOIDE	39
2.3.4	DISPARO POR COJINETE DE EMPUJE	39
2.3.5	DISPARO POR BAJO VACIO	41

CAPITULO III

ARRANQUE DEL TURBOGENERADOR

3.1	<u>PREPARATIVOS DEL ARRANQUE</u>	43
3.2	<u>RODADO DE LA TURBINA</u>	46
3.2.1	SISTEMA DE CONTROL DE LAS VALVULAS DE CORTE	47
3.2.2	OPERACION DE LAS VALVULAS DURANTE EL RODADO	49
3.2.3	CURVAS DE RODADO	50
3.2.4	SUPERVISORIOS DE LA TURBINA	58
3.2.5	RODADO DE LA UNIDAD 1 DE LA C.T.E. DE TULA HIDALGO	63
3.3	<u>SINCRONIZADO Y CARGA DEL GENERADOR</u>	69

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL MODELO DEL TURBOGENERADOR Y DEL CONTROLADOR DE RODADO.

4.1	<u>DEFINICION DEL RODADO AUTOMATICO</u>	71
4.2	<u>SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA MICROCOMPUTADORA</u>	72
4.3	<u>MODELO DEL TURBOGENERADOR</u>	77
4.3.1	MODELADO DEL SUBSISTEMA 1	78
4.3.2	MODELADO DEL SUBSISTEMA 2	81
4.3.3	MODELADO DEL SUBSISTEMA 3	84
4.3.4	MODELADO DEL SUBSISTEMA 4	87
4.3.5	MODELADO DEL SUBSISTEMA 5	88
4.3.6	MODELADO DEL SUBSISTEMA 6	89
4.3.7	EVALUACION DEL MODELO DEL TURBOGENERADOR	90
4.4	<u>MODELO DEL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO</u>	104
4.4.1	SISTEMA DE CONTROL	105
4.4.2	BLOQUE GENERADOR DE PULSOS	107

4.4.3	BLOQUE DERIVADOR	112
4.4.4	BLOQUE GENERADOR DE PUNTO DE AJUSTE	113
4.4.4.1	MODULO ACOPLADOR	115
4.4.4.2	MODULO DETECTOR DE LA EXCENTRICIDAD/VIBRACIONES	116
4.4.4.3	MODULO DETECTOR DE TEMPERATURA	119
4.4.4.4	MODULO DETECTOR DE LA VELOCIDAD	120
4.4.4.5	MODULO QUE CALCULA EL TIEMPO DE CALENTAMIENTO Y ACELERACIONES	122
4.4.5	EVALUACION DEL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO	128

CAPITULO V

DESARROLLO DE LOS PROGRAMAS DE CONTROL

5.1	<u>LENGUAJE DARE P</u>	132
5.1.2	DESCRIPCION DEL MODELO	133
5.1.3	CONDICIONES INICIALES	135
5.1.4	SALIDA DE RESULTADOS	136
5.2	<u>PROGRAMACION DEL MODELO DE LA TURBINA</u>	137
5.2.1	AJUSTES AL MODELO DE LA TURBINA	141
5.3	<u>PROGRAMACION DEL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO</u>	149
5.3.1	DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL MODELO DEL CONTROLADOR	161
5.4	<u>PRUEBAS AL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO</u>	173
5.4.1	VARIACION DE LAS CONDICIONES DEL VAPOR	173
5.4.2	VARIACION DE LA EXCENTRICIDAD Y VIBRACIONES	192
5.4.3	VARIACION DE LA TEMPERATURA DIFERENCIAL	202
5.4.4	RODADOS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE HABER ESTADO PARADA LA UNIDAD	203
	CONCLUSIONES	217
	BIBLIOGRAFIA	225

CAPITULO I

DESCRIPCION DE LA UNIDAD 1 DE LA CENTRAL TERMoeLECTRICA DE TULA HIDALGO.

El la actualidad el proceso de generaci3n de energa el3c trica es el mismo para todas las plantas termoel3ctricas, variando 3nicamente en el tipo de equipo, capacidad de ge neraci3n, tipo de combustible utilizado, etc., la trans-- formaci3n de la energa desde la calor3fica al oxidarse - el combustible hasta la el3ctrica, se realiza principalmen te por tres dispositivos, que son:

- Una caldera o generador de vapor
- Una turbina de vapor
- Un generador de corriente alterna

En la caldera se transforma la energa potencial almacena da en el combustible a energa calor3fica al calentarse - el agua y convertirse en vapor.

En la turbina de vapor se transforma la energa calorifi ca del vapor en energa cin3tica en su eje, al expanderse el vapor a trav3s de los 3labes de la turbina.

En el generador de corriente alterna, la energa cin3tica en el rotor se convierte a energa el3ctrica, al girar en un campo magn3tico.

La central termoeléctrica de Tula Hidalgo cuenta con cinco unidades generadoras de electricidad, cada una con un turbogenerador de 300 MW, fabricado por MITSUBISHI. Dentro del funcionamiento de las unidades, aunque es semejante, existen diferencias en cuanto a tipo y marca de los dispositivos externos al turbogenerador. El trabajo de esta tesis se basa en la unidad uno, pero también puede aplicarse a las otras unidades.

El objetivo de este capítulo es el de describir el funcionamiento general de la unidad en cuestión, para que de esta manera podamos conocer la forma en que interactúan las variables externas al elemento que deseamos controlar, esto es, el turbogenerador. En la figura 1.1 aparece el ciclo de agua vapor, de entre sus elementos más importantes se encuentran: el turbogenerador, la caldera, el condensador, los calentadores, las bombas, etc.. El ciclo termodinámico que explica el funcionamiento de estos elementos se conoce como ciclo Rankine regenerativo con recalentamiento.

1.1 CICLO TERMODINAMICO AGUA-VAPOR.

Para la descripción del ciclo termodinámico es posible dividir el proceso en tres sistemas principales que son: Sistema de alimentación de agua, Sistema de vapor y Sistema de condensado. Existen otros sistemas auxiliares como son sistema de circulación de agua, sistema de aire y gases, sistema de combustible, etc.. El sistema eléctrico formado principalmente por el generador no será tratado.

1.1.1 SISTEMA DE ALIMENTACION DE AGUA.

El objetivo de este sistema es el suministrar la cantidad de agua requerida por la caldera para satisfacer los requerimientos de carga. El sistema se inicia en la salida del

deareador y termina en la entrada del economizador, ver fi gura 1.1, esto es, comprende tres bombas de alta presión dis puestas en paralelo y dos calentadores de alimentación de a- gua dispuestos en serie.

Las bombas de alimentación de agua succionan el agua del de- aereador a una presión de 11 kg/cm^2 y a una temperatura de -171°C y la entregan a los calentadores a una presión de 200 kg/cm^2 aproximadamente, los calentadores 6 y 7, toman el ca lor del vapor adquirido de las extracciones 6 y 7 respectiva mente y elevan la temperatura del agua a 250°C . Bajo estas condiciones de presión y temperatura del agua de alimenta--- ción, entra a la caldera, primeramente pasa al economizador, en donde aumenta su temperatura a 360°C , aprovechando la tem peratura de los gases, producto de la combustión.

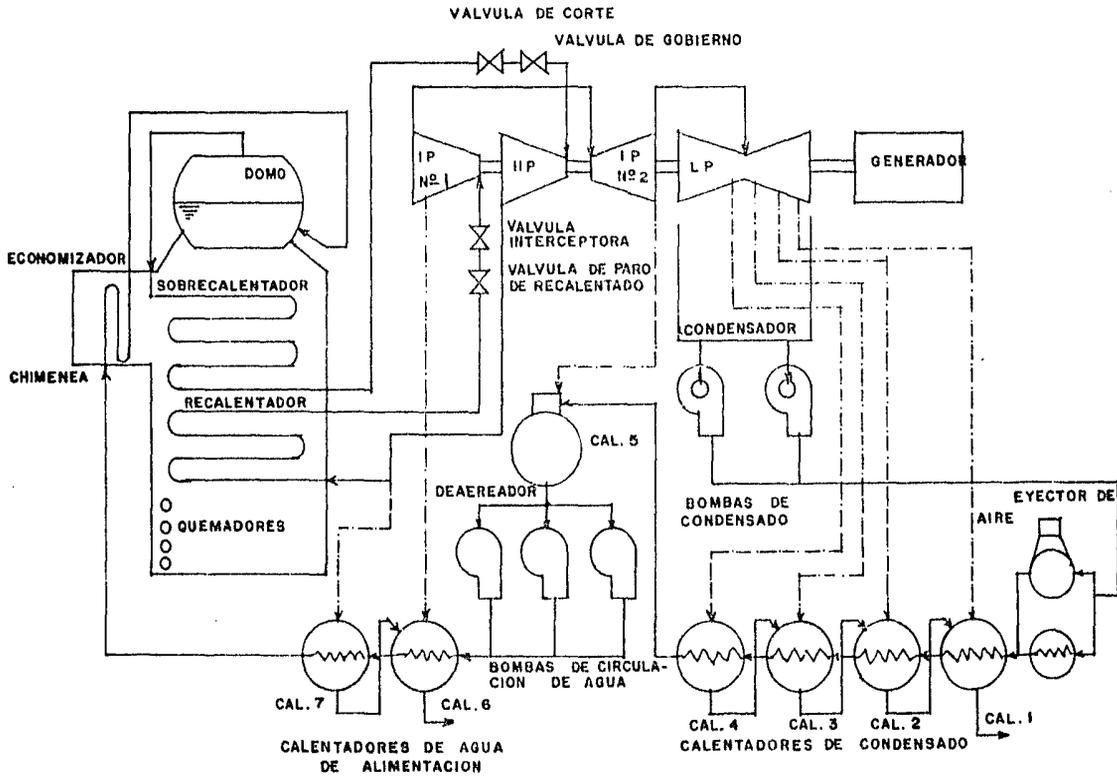


FIG - 1.1 CICLO DE AGUA-VAPOR DE UNA PLANTA TERMIELECTRICA

1.1.2 SISTEMA DE VAPOR.

Este sistema comprende a todos aquellos dispositivos en los que el fluido de trabajo es el vapor, se inicia en el domo de la caldera y termina en el condensador, esto es, comprende: el domo, el sobrecalentador, el recalentador, las válvulas de admisión de vapor, la turbina de alta presión (HP), presión intermedia (IP) y turbina de baja presión (LP); existen otros dispositivos de control y protección que no son -- descritos en este tema, ver figura 1.1.

De la salida del economizador, el agua entra al domo de la caldera a una presión de 187 kg/cm^2 a una temperatura de -- 360°C , aquí es donde se hace la separación de vapor del agua utilizando la energía calorífica que le transmite la combustión del material fósil. En la parte superior del domo se obtiene el vapor saturado, tiene una presión de 187 kg/cm^2 y -- una temperatura de 360°C ; pasa posteriormente al sobrecalentador, al salir de éste el vapor se llama "vapor principal", tiene una presión de 168 kg/cm^2 y una temperatura de 538°C -- aproximadamente, pasa posteriormente a las válvulas de corte o de estrangulamiento, una en cada costado de la turbina, de ahí, a la caja de distribución de vapor y a las válvulas de gobierno, cuatro en cada costado de la turbina, ver figura -- 1.1 y 1.2.

El vapor entra a la turbina de alta presión a través de ocho toberas, cuatro en la parte superior y cuatro en la parte inferior. La turbina de alta presión esta compuesta por álabes de acción (paso Curtis) y álabes de reacción. El vapor llega primero al paso Curtis y posteriormente a la etapa de reacción. El empuje axial provocado por los álabes del cilindro de alta presión es contrareestado por el pistón de balance.

A la salida de la turbina de alta presión se encuentra localizada la extracción N° 7, el vapor pasa al recalentador local-

lizado en la caldera en donde adquiere una temperatura de -538°C y su presión es de 40 kg/cm^2 . El vapor regresa a la turbina, pasando primeramente a través de la válvula de paro de recalentado y de la válvula interceptora para llegar a la turbina de presión intermedia N°1, en donde el vapor pierde presión y temperatura, a la salida de esta turbina, se encuentra la extracción N°6, el vapor se dirige a la turbina de presión intermedia N°2. En realidad, las turbinas de presión intermedia son una sola, aunque seccionada y con sentidos de flujo de vapor contrarios para compensar el empuje axial. Las turbinas de presión intermedia contienen únicamente álabes de reacción. Aquí se encuentra la extracción N°5. Ver figuras 1.1 y 1.2.

Después de pasar el vapor por la turbina de presión intermedia N°2, éste fluye hacia la turbina de baja presión. Esta es de doble flujo, con álabes rectos de reacción, el vapor entra a la parte central de la turbina expandiéndose a través del paso por los álabes hacia los dos sentidos y por lo tanto manteniéndose el equilibrio del empuje axial. Finalmente el vapor ya con muy baja temperatura y presión descarga al condensador. De la turbina de baja presión se toman extracciones del 1 al 4. Ver figuras 1.1 y 1.2.

1.1.3 SISTEMA DE CONDENSADO.

El sistema de condensado se inicia en el condensador y termina en el deareador, esto es, comprende el condensador, dos bombas dispuestos en paralelo, el eyector de aire y cinco calentadores dispuestos en serie, el último de éstos llamado también deareador. Ver figura 1.1.

El objetivo de este sistema es crear las condiciones necesarias para que sea aprovechado al máximo el trabajo realizado por la turbina al pasar el vapor a través de ella. Además de cerrar el ciclo de agua-vapor con mayor eficiencia posible.

El condensador efectúa el cambio de estado del vapor a líquido. Para lograrlo es necesario quitar al vapor su calor latente de vaporización, el agua que se obtiene es llamada -- " condensado ". El nivel del condensador se mantiene mediante el suministro de agua de repuesto proveniente del tanque de almacenamiento del condensado. El agua de circulación - mantiene en el condensador una temperatura de 40°C y una presión de vacío.

El condensado es succionado por las bombas de condensado, -- las cuales elevan la presión a 30 kg/cm², con lo cual se logra enviarlo a través de los calentadores en donde se eleva su temperatura hasta 171°C a la salida del deaereador. El deaereador es utilizado para remover el aire disuelto en el condensado, esto se logra elevando la temperatura del agua - para que la solubilidad disminuya y entonces reducir la presión del vapor en la atmósfera que lo rodea para remover los gases disueltos.

1.1.4 SISTEMA DE CIRCULACION DE AGUA.

El sistema de circulación de agua es utilizado para remover el calor contenido en todos aquellos dispositivos que lo requieran, como lo son: el condensador, los enfriadores de aceite, los enfriadores del sistema de Hidrógeno del generador, etc., para lo cual cuenta con bombas, torres de enfriamiento, filtros, etc.. Además, es utilizado para reponer el agua que se pierde en el ciclo agua-vapor.

1.1.5 SISTEMA DE AIRE Y GASES.

Este sistema comprende el aire y gases que circulan dentro - de la caldera, suministra el aire necesario para que se realice una buena combustión del material fósil, además aprovecha la temperatura de los gases producto de la combustión --

para aumentar la temperatura del fluido que circula por el e
conomizador, el sobrecalentador y el recalentador, antes de
descargarlo a la atmósfera.

1.2 EL TURBOGENERADOR.

El turbogenerador usado en esta unidad es manufacturado por MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES LTD, los elementos que lo componen están dispuestos en línea (compuesto tandem), contiene dos cilindros, uno que corresponde a la turbina de alta presión-presión intermedia y el otro a la turbina de baja presión, con doble escape. Ver figura 1.2.

La turbina de alta presión-presión intermedia utiliza la combinación de álabes de acción (impulso), y de reacción. Están soportados en la carcasa de la turbina de alta presión. La turbina de baja presión es un elemento de reacción recta con doble flujo, el vapor entra al centro de la turbina y fluye hacia los extremos, de donde pasa al condensador.

La carcasa que cubre a la turbina está dividida en interior y exterior, divididas ambas partes en el plano central horizontal para formar una base con tapa, está diseñada para que se pueda expandir libremente al sufrir cambios de temperatura. Además están provistas de aberturas por medio de las cuales se puede extraer vapor para el calentamiento del agua de alimentación y condensado, en total son siete las extracciones.

El rotor de la turbina está maquinado de un acero de aleación forjado sólido, comprende todas las partes móviles que componen la turbina, esto es, la flecha y los discos en cuya periferia van montados los álabes, en el extremo de entrada se encuentra un eje asegurado con pernos para formar el collar de empuje, el impulsor de aceite y el dispositivo de disparo por sobre velocidad (esto se verá mejor en el capítulo II). Los álabes usados en la turbina de baja presión son más largos y están soldados con plata, la estelita protege a la arista principal del álabe, contra erosión por impacto de

partículas de humedad. Entre los rotores de las turbinas de alta presión-presión intermedia y entre los de la turbina de baja presión y el generador, se usan acoplamientos con brida de tipo rígido. El elemento rotativo formado de esta manera, se coloca axialmente con el cojinete de empuje de la turbina de alta presión. El rotor del generador va unido al rotor - de la turbina de baja presión por un acoplamiento de tipo rígido. El elemento rotatorio principal formado de esta manera se apoya en siete cojinetes.

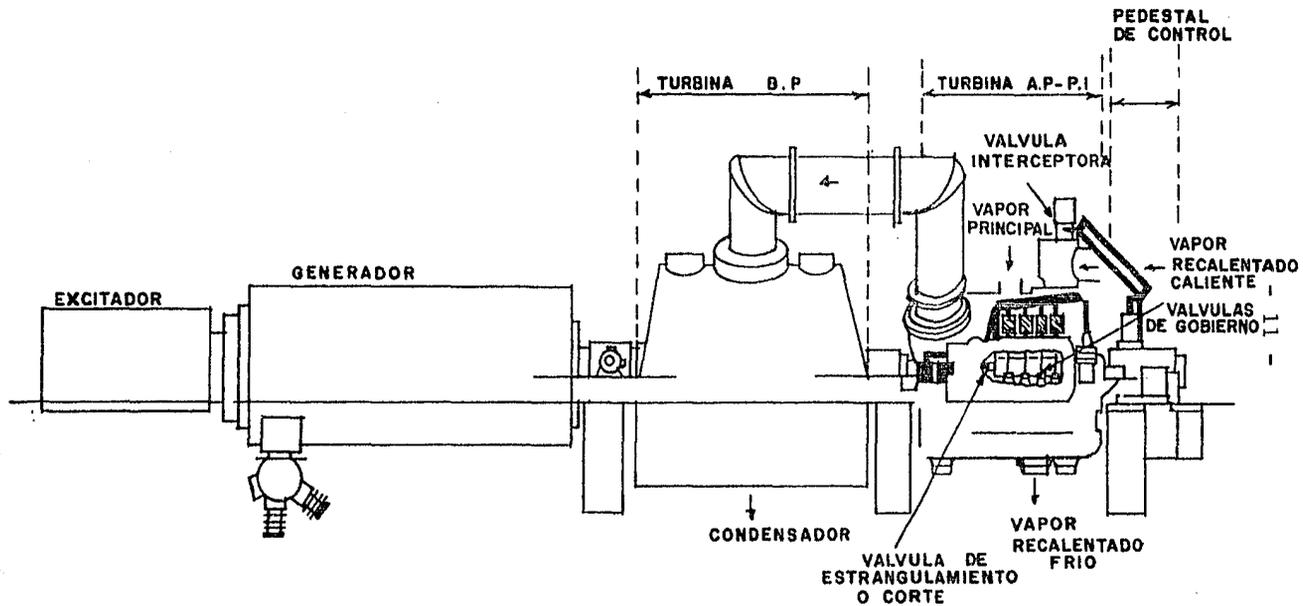


FIG. 12 TURBOGENERADOR MITSUBISHI DE 300 MW

1.2.1 SISTEMA DE ACEITE.

Antes de realizar la descripción detallada del turbogenerador, correspondiente al siguiente capítulo, es importante analizar el sistema de aceite que nos permita comprender mejor el funcionamiento de los diferentes dispositivos que componen la turbina.

Para el buen funcionamiento del turbogenerador es tan importante el sistema de aceite como lo es el sistema de vapor. El aceite es usado para lubricar las partes móviles, operar los servomotores de las válvulas, para mantener activos los dispositivos de protección, esto es, mantener vivo el turbogenerador.

El sistema de aceite se encarga de que nunca le falte el suministro de aceite al turbogenerador cuando esta en movimiento, aún cuando ocurran fallas en el suministro de energía.

1.2.1.1 SUMINISTRO DE ACEITE.

En operación normal el suministro de aceite lo constituye una bomba centrífuga montada en la flecha de la turbina, recibe el aceite a una presión de 1.15 kg/cm^2 y lo descarga a 24.6 kg/cm^2 de aquí el aceite es enviado hacia dos direcciones, una va al eyector de aceite instalado en el interior del tanque principal y la otra a la sección de aceite de alta presión. Ver figura - 1.3.

El eyector de aceite se encarga de transformar la alta presión y poco flujo de aceite en baja presión y bastante flujo de aceite. A la salida del eyector el aceite tiene una presión de 1.15 kg/cm^2 y es enviado a los enfriadores de aceite, en donde adquiere una temperatura de 40°C , de aquí se envía a lubricar las chumaceras.

Cuando la turbina se va a arrancar, la bomba principal no puede suministrar el aceite requerido por la baja velocidad que posee, por esta razón está instalada en el tanque principal de aceite una bomba auxiliar de aceite de C.A. la cual contiene dos impulsores, ver figura 1.3 uno para suministrar el aceite de alta presión y el otro para suministrar el aceite de lubricación.

En ocasiones solamente se requiere aceite de lubricación, cuando la turbina se encuentra en giro lento (estado de tornaflecha). Para esto existe otra bomba instalada también en el tanque principal de aceite y suministra únicamente aceite de lubricación a chumaceras, esta bomba es llamada bomba de aceite de tornaflecha de C.A.

Existe otra bomba de C.D. que actúa únicamente cuando existen fallas en el suministro de la energía eléctrica, llamada bomba de aceite de emergencia, suministra únicamente aceite de lubricación. Ver figura 1.3.

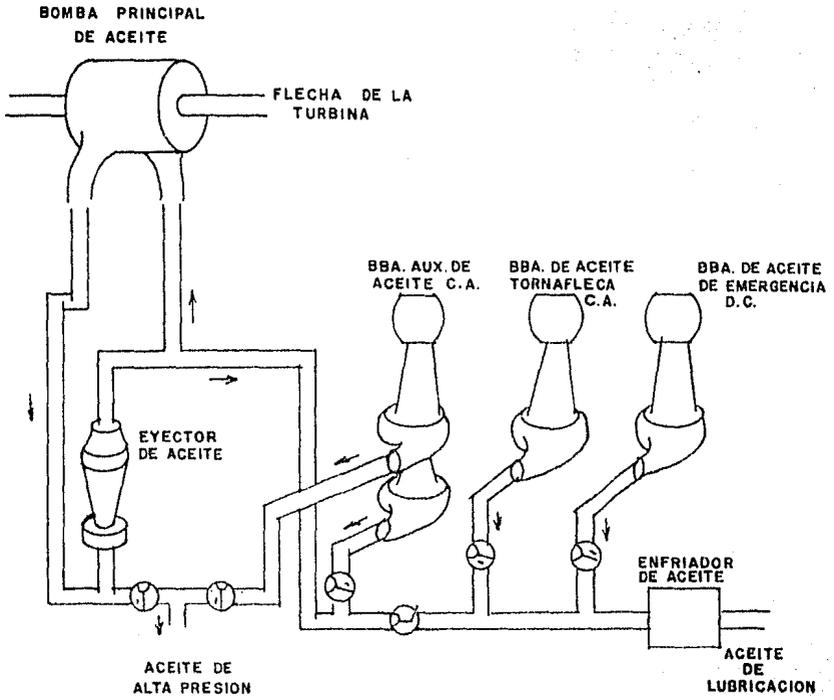


FIG. 1.3 SISTEMA DE SUMINISTRO DE ACEITE

La lubricación a los cojinetes nunca debe faltar, ya que de estar ausente la fricción entre los metales dañaría a la turbina, por esta razón existe un dispositivo automático que acciona a las diferentes bombas cuando la presión de aceite de lubricación llega a disminuir, esto es, cuando la presión -- llega a bajar entre un rango de .7 a .65 kg/cm² la bomba de aceite auxiliar entra en acción, cuando la presión llega a -- bajar entre un rango de .56 a .42 kg/cm² la bomba de tornaflecha es activada y cuando la presión es de .35 kg/cm² la bomba de emergencia entra en acción.

El sistema de aceite en el turbogenerador puede dividirse en tres tipos que son: sistema de lubricación de aceite, sistema de aceite de alta presión y sistema de aceite de control.

1.2.1.2 SISTEMA DE LUBRICACION DE ACEITE.

Este sistema de lubricación de aceite nunca debe faltar cuando el rotor de la turbina esté girando, el aceite es tomado de los enfriadores de aceite y enviado a cada uno de los siete cojinetes en donde descansa el rotor, también es enviado al cojinete de empuje, tiene dos objetivos principales -- que son:

- a) El de lubricar, esto es, formar una película de aceite entre el metal "Babbitt" de las chumaceras y los muñones, evitando de esta manera que se dañe el rotor de la turbina.
- b) Remover el calor generado por la fricción, así como el que es inducido a los muñones y cojinetes desde las regiones de la turbina que permanecen a elevadas temperaturas.

1.2.1.3 SISTEMA DE ACEITE DE CONTROL

El sistema de aceite de control se obtiene de la regulación de alta presión y es utilizado para ejercer el control sobre los diferentes dispositivos de la turbina, como son:

- a) Los encargados de la protección del turbogenerador.
- b) Los encargados del control del flujo del vapor.

En el siguiente capítulo se analizarán cada uno de estos dispositivos.

1.2.1.4 SISTEMA DE ACEITE DE ALTA PRESION.

El sistema de aceite de alta presión es usado para mover los servomotores de las válvulas, obtener la presión de control, la presión de restablecimiento (auto-stop), para operar el impulso del gobernador principal, etc.. Estos dispositivos también serán tratados en el siguiente capítulo.

La descripción hecha de la Unidad 1 a sido muy general, en donde unicamente se trataron los elementos más importantes para el objetivo de la tesis, naturalmente cada sistema tratado es más complejo, en donde en cada uno de ellos existen gran variedad de dispositivos de control y protección que aseguran su funcionamiento bajo condiciones normales de operación.

C A P I T U L O I I

DESCRIPCION DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL Y PROTECCION DE LA TURBINA.

En este capítulo se analizarán los dispositivos principales que componen y hacen funcionar el turbogenerador, además se analizarán conceptos que nos permitan comprender mejor el rodado de la turbina, para que de esta manera, podamos ejercer el control sobre este. Los dispositivos que serán analizados son: las válvulas de admisión de vapor, los dispositivos de protección y control.

2.1 VALVULAS DE ADMISION DE VAPOR.

En el paso de vapor hacia las diferentes turbinas se encuentran localizadas una serie de válvulas, ver figura 1.1, una de estas son de protección y cortan el flujo de vapor en casos de emergencia, otras son de regulación, las cuales regulan el flujo de vapor en función de la demanda que exista en la turbina. Las válvulas de regulación son las gobernadoras y las interceptoras, las válvulas de paro de recalentado son de protección. Las válvulas de corte o estrangulamiento tienen ambas funciones, son de regulación durante el proceso de rodado y son de protección cuando la turbina se encuentra en operación normal.

2.1.1 VALVULAS DE CORTE O ESTRANGULAMIENTO.

Estas válvulas son las primeras que se encuentra el flujo de vapor en su camino hacia la turbina, hay dos válvulas, una izquierda y otra derecha, idénticas en su construcción y operadas por el mismo sistema de control. Se encuentran instaladas en la estructura de la caja de distribución de vapor, muy cerca de las válvulas de gobierno, ver figura 1.2, de esta manera, es posible bloquear rápidamente el flu

jo de vapor cuando exista una avería en las válvulas gobernadoras, evitando de esta manera sobrevelocidad en la turbina.

En operación normal estas válvulas son de protección, están totalmente abiertas o están totalmente cerradas, y en el proceso de rodado de la turbina actúan como reguladoras de flujo de vapor. Se mantienen cerradas por la fuerza -- que ejerce el resorte de compresión sobre el vástago de la válvula y son abiertas por la acción de un servomotor operado por aceite, que está conectado al vástago de la válvula a través de eslabones y una palanca, ver figura 2.1, de tal forma que si existen fallas en el sistema de aceite es tas válvulas no serán abiertas.

El vástago de la válvula tiene un sistema de sellado de va por que permite tener gran libertad de movimiento y no dejar escapar el vapor. Esta es un tipo de válvula de operación de "Doble Tapón", los cuales son el tapón piloto y el tapón principal; uno en el interior del otro, ver figura - 2.1. Al abrir, el vástago primeramente abre al tapón pilo to, y posteriormente al tapón principal. Durante el rodado de la turbina, unicamente es accionado el tapón piloto.

Al estar cerrada la válvula ambos tapones cuentan con un sistema que les permite descansar sobre sus asientos sin dejar de pasar vapor.

2.1.2 SERVOMOTOR DE LA VALVULA DE ESTRANGULAMIENTO.

El servomotor ejerce la fuerza necesaria que permite la apertura de las válvulas de estrangulamiento, utiliza en su operación aceite de alta presión y aceite de control que permite al operario colocar la válvula de corte o estrangulamiento en cualquier posición deseada. En la figura 2.2 es tá representado este servomotor.

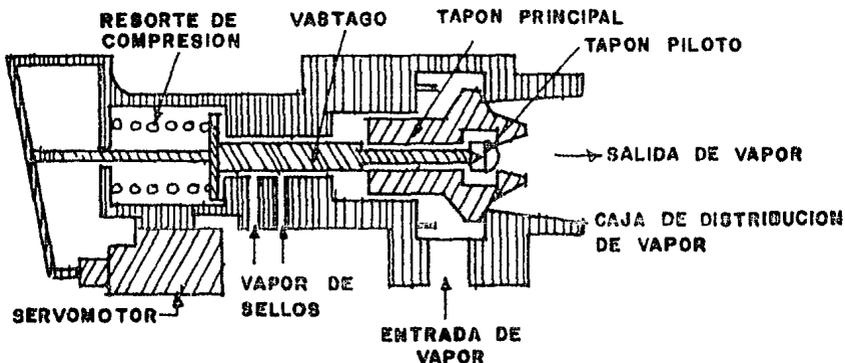


FIG. 2.1 VALVULA DE ESTRANGULAMIENTO O DE CORTE.-

CONSISTE DE DOS VALVULAS DESSALANCEADAS DE ASIEN-
 TIENTO SENCILLO, UNA COLOCADA DENTRO DE LA OTRA -
 (TAPON PRINCIPAL Y TAPON PILOTO). CUANDO ESTA EN PO-
 SICION CERRADA, SEGUN SE MUESTRA EN EL DIBUJO, LA -
 PRESION DE ENTRADA DE VAPOR SE COMBINA CON LA CAR-
 GA DEL RESORTE DE COMPRESION QUE ACTUA A TRAVES DEL -
 VASTAGO. AL ABRIR EL VASTAGO SEPARA PRIMERO AL TAPON
 PILOTO, POSTERIORMENTE AL TAPON PRINCIPAL.

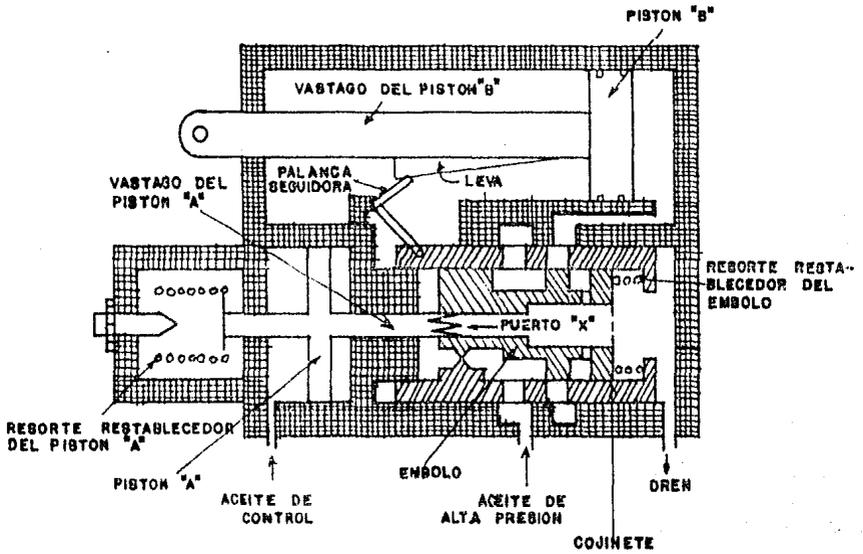


FIG. 2.2 SERVOMOTOR DE LAS VALVULAS DE ESTRANGULAMIENTO.

La forma de operación es la siguiente:

el aceite de control es introducido en el interior de la cámara del pistón "A", la fuerza que ejerce sobre el pistón es balanceada por el resorte restablecedor del pistón, de tal forma que a cada nivel de presión de control le corresponde una posición del pistón "A".

El aceite de alta presión es introducido a través del orificio compuesto por el émbolo y el cojinete del servomotor y drenado por los canales del puerto "X", ver figura 2.2, tallado sobre el vástago del pistón "A". El área del puerto "X" está determinada por la posición relativa del pistón "A" y el émbolo, formando de esta manera un orificio regulador de presión en la cámara "C".

La fuerza ejercida sobre el émbolo por la presión de la cámara "C" es balanceada por el resorte restablecedor del émbolo. La combinación del émbolo y el cojinete forman una válvula de control direccional permitiendo introducir el aceite de alta presión en el interior de la cámara del pistón "B". El movimiento del cojinete está controlado por la posición del vástago del pistón "B" por medio de la leva y la palanca seguidora, ver figura 2.2. Si hay una disminución de aceite de control, la presión en el interior de la cámara del pistón "A" disminuye, deslizándose por lo tanto el pistón "A" al igual que el émbolo y entonces el aceite de alta presión dentro de la cámara del pistón "B" es drenado.

Por lo tanto para cada presión de control de estrangulamiento hay una posición correspondiente del pistón "A", del émbolo, del pistón "B", del cojinete, del vástago del pistón "B" y por consiguiente una determinada apertura de la válvula de corte.

2.1.3. VALVULAS DE GOBIERNO.

El vapor al salir de la válvula de corte pasa a llenar la caja de distribución de vapor, en donde se encuentran localizadas las válvulas de gobierno o control, ver figura 2.3. Se encuentran localizadas cuatro válvulas de cada costado de la turbina, cuatro izquierdas y cuatro derechas, todas ellas accionadas por el mismo sistema de control.

Estas válvulas son de regulación, en operación normal y sirven para regular la velocidad de la turbina, mediante un sistema de regulación de velocidad especial, que será descrito posteriormente. Cuando el generador es conectado a la línea, existe un enlace eléctrico entre generadores, por ser síncronos, entonces queda sujeta la velocidad de la turbina y las válvulas de gobierno son utilizadas para regular la carga del generador. Son del tipo de tapón simple, los asientos están maquinados en el cuerpo de la caja, cada válvula esta hecha de dos piezas para que de una conexión flexible a su vástago, de tal manera que puedan auto-alinearse a su asiento y no dejar pasar vapor cuando estén cerradas.

Un servomotor operado por aceite de alta presión y aceite de control, semejante al descrito anteriormente, opera estas válvulas, la conexión entre el vástago de las válvulas y el vástago del servomotor es por medio de un par de eslabones y la palanca de operación, las válvulas de gobierno son cerradas por la fuerza que ejercen los resortes de compresión, al subir el vástago del servomotor, abren y al bajar cierran.

2.1.4 VALVULAS DE PARO DE RECALENTADO.

Las válvulas de paro de recalentado se encuentran instala--

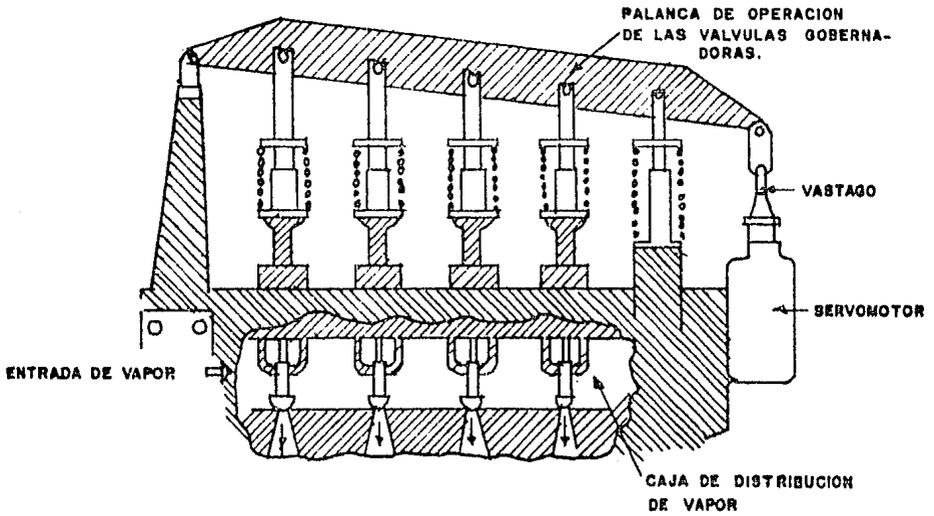


FIG. 2.3 VALVULAS GOBERNADORAS Y CAJA DE DISTRIBUCION DE VAPOR.

das en la tubería de regreso de vapor de recalentado, una izquierda y otra derecha, se encuentran muy juntas a las -- válvulas interceptoras, esto se hace con el objetivo de bloquear el flujo de vapor hacia la turbina inmediatamente en caso de emergencia.

Estas válvulas son de protección, están totalmente abiertas o totalmente cerradas, son del tipo de compuerta giratoria, sin compensación y asiento simple y con tubos en forma de Venturi a la entrada y a la salida, ver figura 2.4. Son operadas por un servomotor accionado por aceite de alta presión y aceite de restablecimiento o auto-stop (el aceite de restablecimiento también llamado de auto-stop se forma a partir del aceite de alta presión y es condición para que funcionen todos los dispositivos de control y protección de la turbina), de tal manera que cualquier dispositivo de -- protección puede hacer operar esta válvula. Cuando el vástago de operación del servomotor se encuentra hacia arriba, el disco giratorio permanece levantado, permitiendo el paso de vapor con una caída de presión despreciable, cuando baja el vástago de operación el disco baja cerrando la válvula.

2.1.5 SERVOMOTOR DE LA VALVULA DE PARO DE RECALENTADO.

Este servomotor no tiene mecanismos de realimentación, por lo -- tanto existen solo dos posiciones, que son, totalmente hacia arriba o totalmente hacia abajo.

Cuando la turbina está en condición de operación, existe -- aceite de auto-stop, este aceite es introducido en el inte-- rior de la cámara arriba de la válvula de alivio, ver figura 2.5, la fuerza que ejerce sobre el pistón vence a la fuerza que ejerce el resorte de compresión instalado en el vástago de la válvula de alivio. Al bajar la válvula de alivio, el aceite de alta presión es introducido en la cámara del pistón del servomotor, la fuerza que ejerce el aceite sobre el pistón vence la fuerza del resorte de compresión y el pistón se levanta. Si

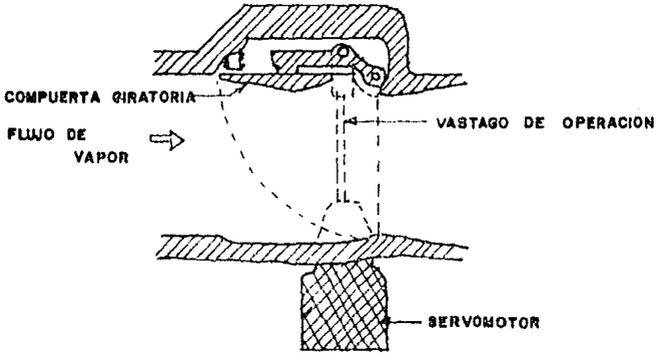


FIG. 2.4 VALVULA DE PARO DE RECALENTADO.

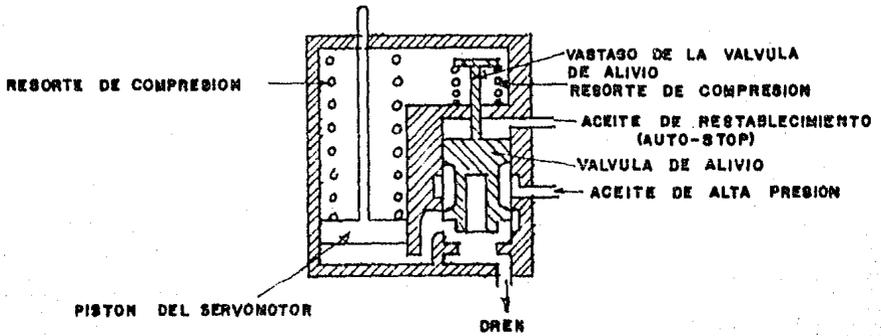


FIG. 2.5 SERVOMOTOR DE LA VALVULA DE PARO DE RECALENTADO.

no existe aceite de auto-stop la válvula de alivio se levanta y el aceite de alta presión localizado en la cámara del pistón del servomotor es drenado.

2.1.6. VALVULAS INTERCEPTORAS.

Estas válvulas son usadas para regulación, siguen después de las válvulas de paro de recalentado, se encuentran montadas sobre la tapa de la carcasa exterior de la turbina de presión intermedia, su servomotor se encuentra sobre la tapa de el pedestal de control, ambos se encuentran comunicados por una unión telescópica, ver figura 1.2, es una válvula de asiento simple, ver figura 2.6.

Su servomotor es operado por aceite de alta presión y presión de control proveniente del gobernador auxiliar, se cierra por la fuerza que ejerce el resorte de compresión instalado en la parte superior de su vástago.

El principal uso que tiene esta válvula es el de bloquear el flujo de vapor recalentado caliente cuando existe un rechazo de carga del generador y puede abrir cuando el gobernador ha ya controlado la velocidad de la turbina, evitando de esta manera que se active el dispositivo de disparo por sobre velocidad.

El servomotor opera de la misma forma como el de las válvulas de corte.

2.2 DISPOSITIVOS DE CONTROL DE LA TURBINA.

Hasta este momento, se han analizado las características de operación de las válvulas que permiten el flujo de vapor hacia la turbina, en este tema se tratará la forma de cómo se genera la señal de control que hace funcionar a los servomotores de dichas válvulas, cada una de estas tiene un sistema de control independiente y especializado.

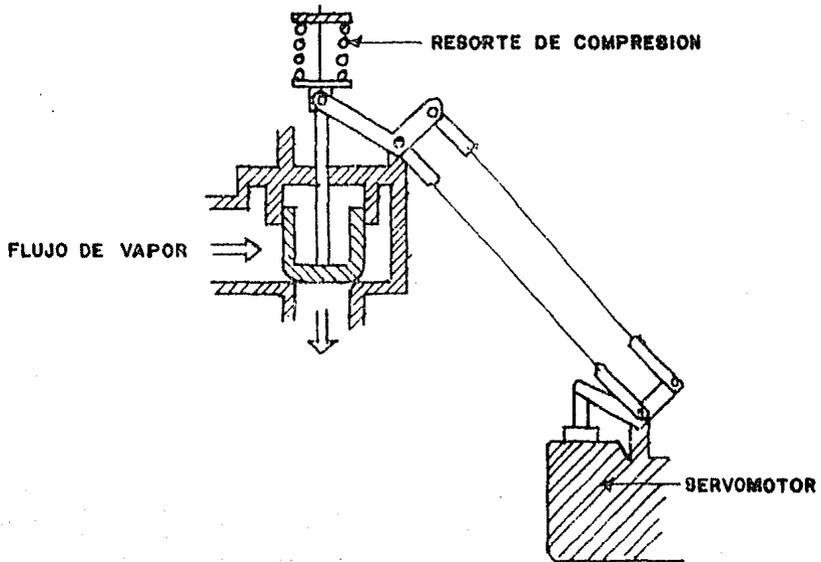


FIG. 2.6 VALVULA INTERCEPTORA.

La presión de control de las válvulas de corte la genera el "controlador de las válvulas de estrangulamiento". Existen tres formas de generar la presión de control de las válvulas de gobierno, que son: con el gobernador principal, con la válvula la "límite de carga", y con el "impulsor del gobernador principal". La presión de control para las válvulas interceptoras la forma el "gobernador auxiliar". Estos dispositivos, excepto el de las válvulas de corte, se encuentran agrupados en un bloque común llamado "bloque de control de la turbina" este bloque contiene además, un dispositivo de protección -- llamado "válvula de disparo de emergencia", se localiza en el pedestal de control.

2.2.1 CONTROLADOR DE LAS VALVULAS DE ESTRANGULAMIENTO.

El controlador de las válvulas de estrangulamiento se encuentra localizado en el pedestal de control de la turbina, consiste principalmente de una válvula de regulación de presión que puede ser operada manualmente mediante un volante o por medio de un motor desde un lugar remoto. En la figura 2.7 - se muestra este controlador, en la figura se observa que la válvula de copa que regula la presión de aceite es accionada por el "eje del controlador", el cual puede subir o bajar ya que se encuentra enroscado en el "cojinete del eje del controlador", que se mantiene fijo. El motor está conectado al "eje del controlador" a través de un sistema mecánico formado por: tornillos sinfin, engranes y embragues, ver figura 2.7.

El aceite de alta presión es introducido por la parte inferior de un bloque llamado "bloque de orificios múltiples", - en donde pasa a través de un orificio fijo y a través de válvula las check, llega a la válvula de copa de donde posteriormente es drenado. En si, la presión de control de las válvulas de corte es la caída de presión que sufre el aceite al pasar a través de la válvula de copa.

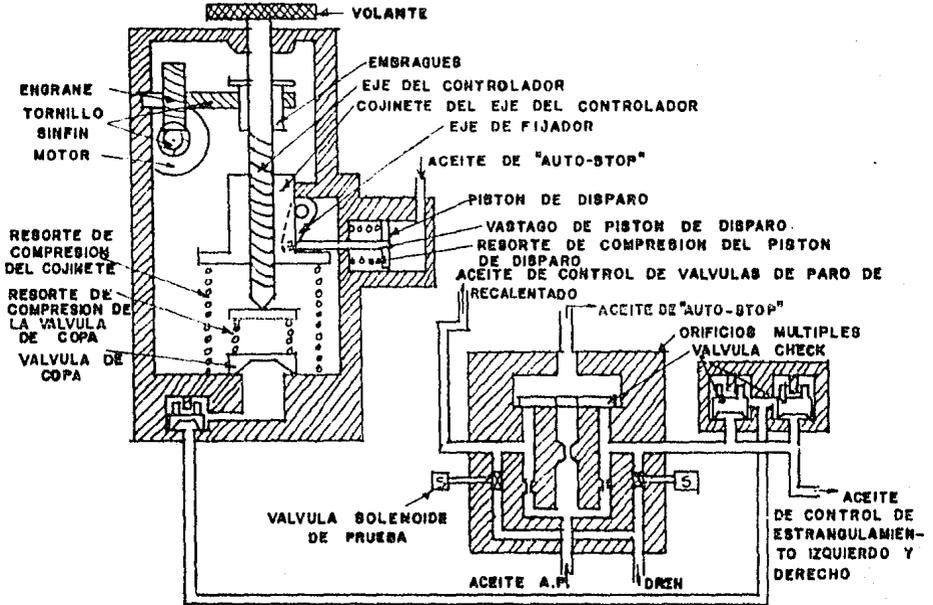


FIG. 2.7 CONTROLADOR DE LAS VALVULAS DE ESTRANGULAMIENTO.

El controlador incluye un dispositivo de protección, que no permite que haya presión de control si no existe aceite de restablecimiento (aceite de auto-stop); el mecanismo -- funciona de la siguiente manera: en condiciones normales existe aceite de auto-stop, este impulsa al "pistón de disparo", venciendo la fuerza que ejerce su resorte de compresión, este a la vez enclava el "eje del fijador" en el "cojinete del controlador" impidiendo cualquier movimiento, - de esta manera el "eje del controlador" puede subir o bajar sin ningún problema. Cuando no existe aceite de restablecimiento el "resorte de compresión del pistón" desenchava el "eje del fijador" entonces, el "cojinete del eje del controlador" es liberado y por medio de la fuerza del "resorte de compresión del cojinete" este es impulsado hacia arriba, por lo tanto el "eje del controlador" y la válvula de copa también son impulsados hacia arriba, haciendo la - caída de presión a través de la válvula de copa igual a cero.

Para poder formar de nuevo la presión de control se necesita rearmar el mecanismo del controlador, esto se logra haciendo que el "eje del fijador" enclave de nuevo en el "cojinete del eje del controlador".

2.2.2 CONTROLADOR DE LAS VALVULAS DE GOBIERNO.

Este controlador está encargado de generar la presión de control de las válvulas de gobierno, está compuesto por -- tres elementos principales que son: el gobernador principal, el impulsor del gobernador y la válvula límite de carga mostrados en la figura 2.8 y 2.9.

2.2.2.1 GOBERNADOR PRINCIPAL.

Al igual que el controlador de las válvulas de corte, este controlador puede ser operado por un volante y por medio -

de un motor, ambas formas hacen subir o bajar el eje del gobernador, el cual acciona una válvula de copa a través de un resorte de compresión y una palanca, ver figura 2.8. El objetivo principal del gobernador es el de dar carga a la unidad.

El aceite de alta presión es introducido a la cámara de control a través de un orificio y drenado por la válvula de copa. Al igual que el controlador anterior, la presión de control a las válvulas generadoras, es la caída de presión que sufre el aceite al pasar a través de la válvula de copa. Se cuenta también con una válvula de alivio que limita la presión de control a un valor máximo de 4.2 kg/cm^2 , evitando de esta manera dañar los dispositivos de medición.

2.2.2.2 IMPULSOR DEL GOBERNADOR.

El impulsor es usado para regular la velocidad de la turbina, consiste de un cuerpo cilíndrico con una serie de tubos insertados radialmente, forma parte de la flecha de la turbina, ver figuras 2.8 y 2.12. Se alimenta de aceite de alta presión que le llega a través de un orificio y genera una presión de aceite en la cámara de descarga del impulsor que varía según el cuadrado de la velocidad de la turbina. La presión formada en la cámara de descarga del impulsor se transmite a un fuelle llamado "fuelle del transformador", la fuerza que se ejerce sobre este fuelle debido a la presión del aceite es balanceada con la fuerza que ejerce el resorte de compresión del fuelle, ver figura 2.8. Si la velocidad de la turbina aumenta, la presión del impulsor aumenta y el fuelle hace subir la válvula de copa a través del vástago del fuelle y la palanca, con esto baja la presión de control y los servomotores cierran un determinado porcentaje de las válvulas de gobierno, bajando la velocidad de la turbina. De igual manera si baja la velocidad de la turbina, la presión del impulsor baja, la válvula de copa cierra, aumentando la presión de control y por lo tanto aumen-

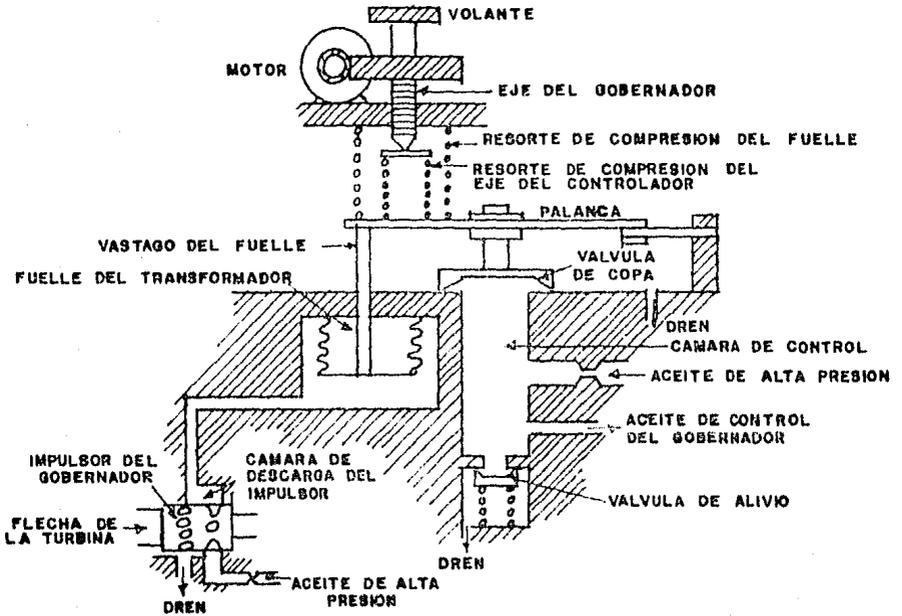


FIG. 2.8 CONTROLADOR DEL GOBERNADOR.

tando la velocidad de la turbina. De esta manera, el impulsor controla la velocidad de la turbina aún cuando varíen las condiciones de vapor o de la carga.

Cuando el turbogenerador trabaja conjuntamente con otros -- turbogeneradores de mayor capacidad, la velocidad de la turbina es controlada por la frecuencia que tenga la red y el impulsor ya no tiene efecto sobre la velocidad de la turbina.

2.2.2.3 VALVULA LIMITE DE CARGA.

El trabajo principal de esta válvula es limitar la carga en el turbogenerador, esta lo logra limitando el nivel de presión de control del gobernador. Al igual que los dos controladores mencionados anteriormente, este consiste de una válvula de copa reguladora de presión, puede ser operada -- por un volante o por un motor, ver figura 2.9. El aceite -- de alta presión es introducido a través de un orificio a la cámara de control (cámara "A") y drenado a través de la válvula de copa, al igual que los dos casos anteriores, la presión de control de la "válvula límite de carga" es la caída de presión que sufre el aceite al pasar a través de la válvula de copa.

Si la presión de la cámara "A" es mayor que la presión del "aceite de control del gobernador" la válvula check se mantiene cerrada y el aceite de "control del gobernador" no sufre ningún cambio, si la presión del "aceite de control del gobernador" llega a ser mayor, entonces la válvula check -- abre igualándose ambas presiones, esto es, la presión del -- "aceite de control del gobernador" quedará sujeta por la -- válvula limitadora de carga.

2.2.2.4 VALVULA DE DISPARO DE EMERGENCIA DEL SISTEMA DE GOBIERNO.

El bloque de control incluye una válvula de disparo de emer

gencia por medio del cual el aceite de control del gobernador es drenado en el caso de que exista una emergencia.

Esta consiste de una válvula de copa sujeta a su asiento -- por medio de un resorte, ver figura 2.10. Por la parte inferior le es aplicado el aceite auto-stop, de aproximadamente 8 kg/cm^2 , y por la parte superior se le aplica el aceite de control del gobernador, de aproximadamente 4.2 kg/cm^2 . - En operación normal cuando existe presión de restablecimiento, la válvula se mantiene cerrada y el aceite de control del gobernador no sufre ningún cambio, pero cuando el aceite de auto-stop es drenado por algún dispositivo, la válvula de copa abre y entonces el aceite de control del gobernador es drenado.

2.2.3 CONTROLADOR DE LAS VALVULAS INTERCEPTORAS (GOBERNADOR AUXILIAR)

El gobernador auxiliar es el encargado de generar la presión de control para las válvulas interceptoras, el objetivo de este controlador es el de responder a la aceleración de la turbina, a cambios de la razón de $6,480 \text{ rpm/min.}$ y que - continúe hasta incrementarse en $3,672 \text{ rpm}$ de velocidad final de la turbina, ocasionado por un rechazo total o parcial de la carga del generador.

Sus elementos más importantes son: la sección de respuesta a la aceleración, una válvula de copa, un volante de ajuste, un fuelle, una válvula de desfogue, una válvula de alivio y un dispositivo de prueba. La sección de respuesta a la aceleración lo componen un par de fuelles de retardo, un orificio y un diafragma, ver figura 2.11.

El funcionamiento es el siguiente: el aceite de descarga -- del impulsor del gobernador es introducido a este controlador a través de un orificio y comprime al fuelle, ver figura 2.11. La fuerza que ejerce el aceite sobre el fuelle es --

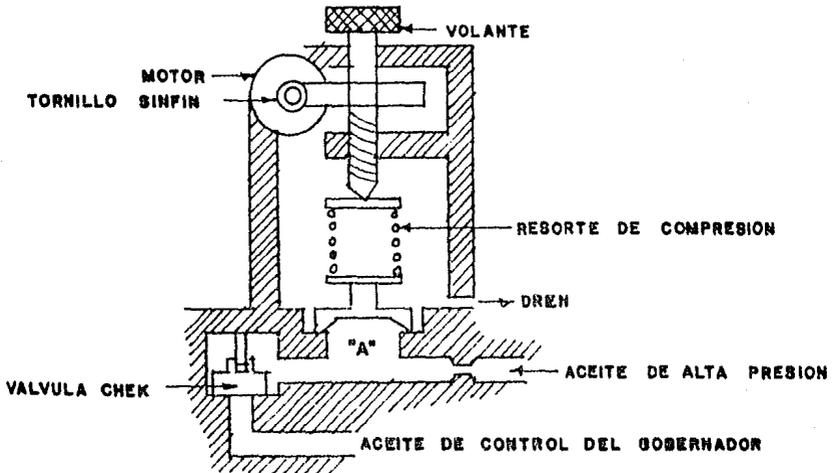


FIG. 2.9 VALVULA LIMITE DE CARGA.

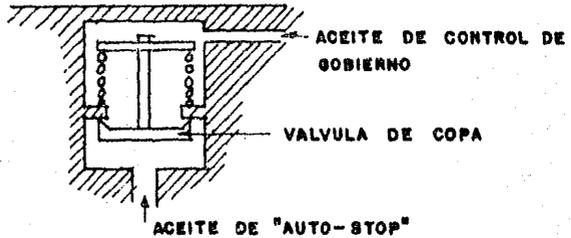


FIG. 2.10 VALVULA DE DISPARO DE EMERGENCIA DEL GOBERNADOR.

transmitida a la válvula de copa a través de una palanca, esta fuerza es contrarrestada por la fuerza debido al resorte de compresión de la válvula.

El aceite de alta presión es introducido a través de un orificio a la cámara de control de aceite y drenado a través de la válvula de copa, ver figura 2.11, en la cámara de control se forma el aceite de control del gobernador auxiliar y es la misma presión que se aplica en ambos lados del diafragma. Cuando la velocidad de la turbina se ve incrementada repentinamente, la presión del impulsor del gobernador aumenta y este levanta la válvula de copa, entonces el aceite de control del gobernador se ve disminuído, la presión arriba del diafragma baja, pero la presión en la parte inferior no baja, debido al dispositivo de retardo, esto hace que el diafragma se levante y a través del vástago se levante la válvula de copa y entonces el aceite de control del gobernador auxiliar es drenado. Esto ocurre un tiempo determinado mientras la presión en ambos lados del diafragma se iguala.

El controlador incluye una válvula de desfoque, ver figura 2.11, la cual se mantiene cerrada en operación normal, pero cuando el aceite de control del gobernador auxiliar es drenado, esta se abre drenando también el aceite de control de el gobernador.

También incluye una válvula de alivio la cual limita la presión de control del gobernador auxiliar para que no dañe los dispositivos de medición de presión, ver figura 2.11. El dispositivo de prueba por medio del cual se simula una aceleración de la turbina, es decir, corta el suministro de aceite proveniente del impulsor y repentinamente le permite el paso.

2.3 DISPOSITIVO DE PROTECCION.

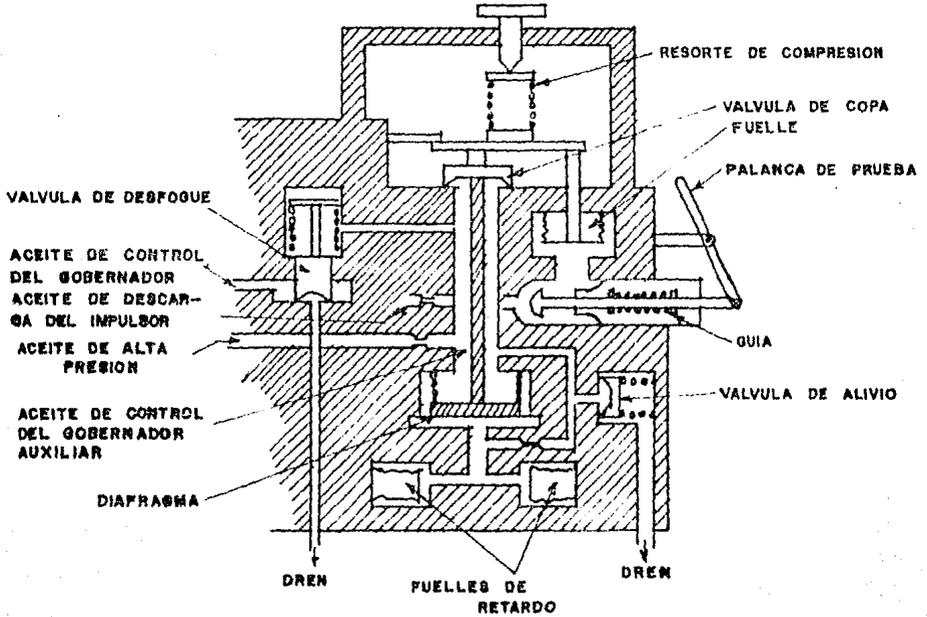


FIG. 2.11 GOBERNADOR AUXILIAR.

Los dispositivos de protección de la turbina son los encargados de poner fuera de operación a la turbina, es decir, disparar la unidad, esto ocurre cuando se presente una anomalía que ponga en peligro al turbogenerador. Estos dispositivos actúan automáticamente y drenan el aceite de restablecimiento (aceite de auto-stop) y por lo tanto las válvulas de admisión de vapor son cerradas.

Los dispositivos son los siguientes: disparo por sobrevelocidad, disparo por baja presión de aceite a cojinetes, disparo por bajo vacío en el condensador, disparo por solenoide y disparo por cojinete de empuje, ver figura 2.12.

En operación normal el aceite de alta presión es introducido a través de un orificio, formándose de esta manera el "aceite de disparo de emergencia"; el cual si no es activado ningún dispositivo de protección mantiene cerrada la válvula de disparo por sobrevelocidad evitando que el aceite de auto-stop sea drenado, ver figura 2.12.

2.3.1 DISPOSITIVO DE DISPARO POR SOBREVOLUCIDAD.

Este dispositivo es el encargado de no permitir que la velocidad de la turbina se eleve más allá de un valor ya definido y actúa cuando el gobernador auxiliar no puede controlar la aceleración. Está formado por una masa excéntrica instalada en el interior de la flecha de la turbina, ver figura 2.12, un resorte de compresión lo mantiene en su posición de enclavado, si la velocidad de la turbina llega a superar 3,996 rpm, la fuerza centrífuga de la masa vence la fuerza que ejerce el resorte, al salir dispara el gatillo que drena el aceite de disparo de emergencia, y por lo tanto, se abre la válvula de disparo por sobrevelocidad y entonces es drenado el aceite de auto-stop.

2.3.2 DISPARO POR BAJA PRESION DE ACEITE A COJINETES.

Este disparo consiste en un dispositivo formado por un pistón con diafragma, el cual está expuesto por la parte inferior a la presión del aceite del cojinete número 1, la fuerza debida al aceite es balanceada con la fuerza que produce el resorte de compresión, ver figura 2.12.

Si la presión del aceite baja de un valor determinando de .4 a .5 kg/cm², el resorte baja el pistón y entonces es activado el dispositivo que drena el aceite de disparo de emergencia y por lo tanto ocurre el disparo de la unidad, ver figura 2.12.

2.3.3 DISPARO POR SOLENOIDE.

Este disparo consiste de un dispositivo compuesto por un solenoide que está conectado mecánicamente a la válvula que drena el aceite de disparo de emergencia. Puede ser activado desde el cuarto de control o por los relevadores de protección del generador, por lo tanto, este disparo es considerado de emergencia y estará accionado a juicio del operador, ver figura 2.12.

2.3.4 DISPARO POR COJINETE DE EMPUJE.

Este disparo consiste de un dispositivo compuesto por un pistón con diafragma, la parte inferior está expuesta a presión de aceite, la fuerza que ejerce el aceite es balanceada por el resorte de compresión instalado en la parte superior, el pistón está conectado mecánicamente a la válvula que drena el aceite de disparo de emergencia. Incluye también un par de toberas cuyas entradas están cerradas a la superficie del cuello de empuje; el aceite de alta presión es suministrado a cada tobera a través de un orificio, la caída de presión que sufre el aceite al pasar a través de cada -

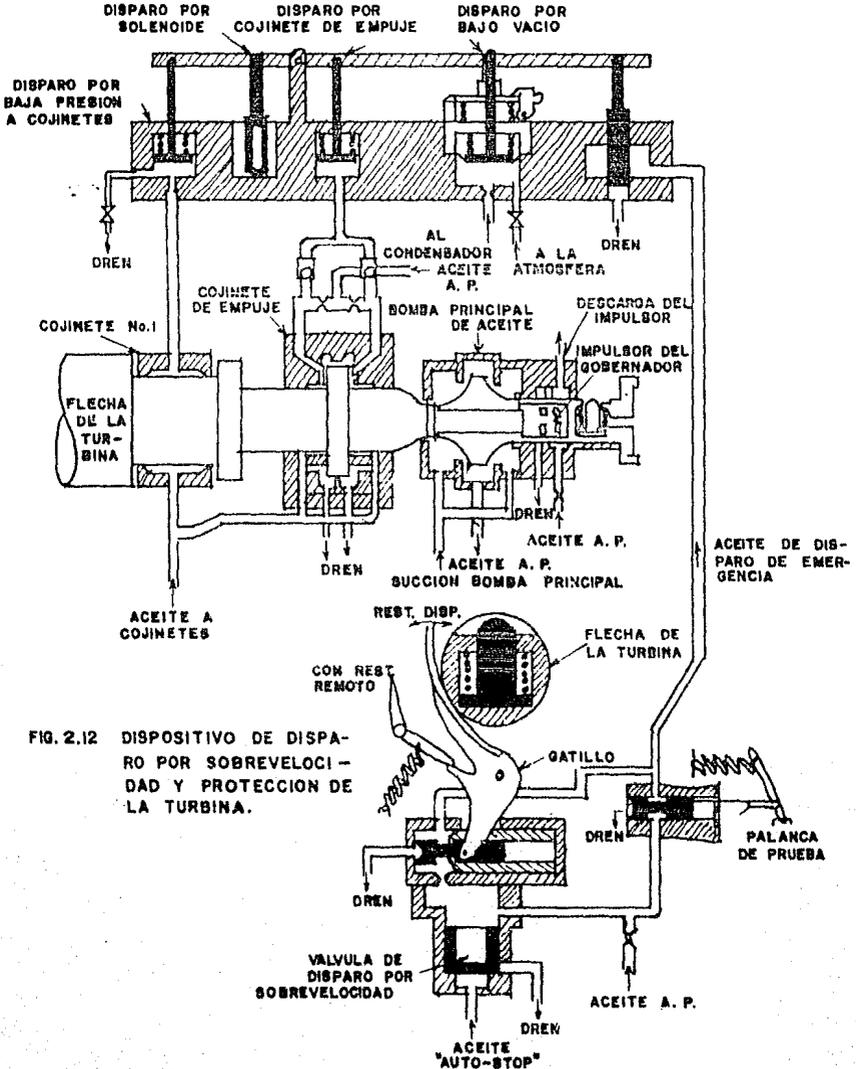


FIG. 2.12 DISPOSITIVO DE DISPARO POR SOBREVELOCIDAD Y PROTECCION DE LA TURBINA.

una de las toberas determina la presión de aceite que se aplica en el lado inferior del diafragma del pistón.

Excesivo desgaste del cojinete de empuje, ocasionará que el --cuello del cojinete de empuje se desplace hacia una de estas toberas y la caída de presión a través de esta se incrementa, venciendo la fuerza ejercida por el resorte de compresión del pistón y por lo tanto es drenado el aceite de disparo de emergencia.

Este disparo es utilizado para advertir el desgaste del cojinete de empuje y de esta manera prevenir daños ocasionados por rozamientos entre las partes móviles y fijas de la turbina.

2.3.5 DISPARO POR BAJO VACIO.

Este disparo utiliza un dispositivo, el cual contiene un pistón con membrana, la parte inferior está expuesta al vacío de el condensador, la fuerza que ejerce el vacío sobre el pistón esta equilibrada con la fuerza del resorte de compresión, ver figura 2.12, el pistón activa la válvula que drena el aceite de disparo de emergencia.

Cuando el vacío en el condensador baja a un valor determinado entre 300 y 390 mm Hg el pistón se eleva y ocurre el disparo, el dispositivo se desactiva cuando se ha alcanzado un vacío de entre 160 a 300 mm Hg y después se dispara en su valor normal de 300 y 390 mm Hg.

En este capítulo se ha descrito el funcionamiento de los dispositivos principales que componen el control y la protección de la turbina, naturalmente existen otros dispositivos y sistemas que no intervienen directamente en el rodado de la turbina y por esta razón no fueron tratados, entre otros están: el regulador de presión de estrangulamiento, el regulador de vapor de sellos, el sistema neumático de control, el generador, el excitador, etc.

C A P I T U L O I I I

ARRANQUE DEL TURBOGENERADOR.

En este capítulo se estudiará el proceso del arranque tal y como lo realizan los operarios de la Central Termoeléctrica de Tula Hidalgo, teniendo especial atención al rodado de la turbina ya que es nuestro objetivo principal. Los sistemas externos al turbogenerador como lo son: el sistema de aceite, de alimentación de agua, sistema de circulación de agua sistema de vapor(incluyendo el control sobre la caldera), etc., se consideran normales y en condiciones favorables de operación.

El arranque del turbogenerador, para nuestros objetivos ha sido dividido en tres etapas; la primera de ellas es el cumplimiento de los preparativos del arranque, la segunda es el rodado de la turbina, la tercera es la sincronización del generador a la línea y toma de carga. A continuación se analizan cada una de estas etapas.

Se estudiará además el comportamiento del turbogenerador en el proceso del rodado para que de esta manera se pueda realizar el modelo matemático que nos permita simular los procesos de rodados, y se incluyen los resultados obtenidos de la visita a la Central Termoeléctrica de Tula Hidalgo, en donde se nos permitió registrar el rodado de la unidad uno.

3.1 PREPARATIVOS DEL ARRANQUE.

Esta es la primera etapa en el arranque del turbogenerador, se puede presentar de muchas formas, ya que puede ser el primer arranque de la unidad, el arranque después de mantenimiento mayor, o después del disparo de la turbina por algún dispositivo de control, etc., por esta razón algunos de los preparativos pueden estar ya cumplidos y solo deban ser revisados.

En términos generales los pasos que se deben seguir para -- cumplir con los preparativos del arranque son los siguien-- tes:

- 1) Conectar todos los instrumentos supervisorios de la turbina.
- 2) Verificar el nivel de aceite en el tanque principal.
- 3) Arrancar la bomba de aceite del tornaflecha y verificar que la presión de aceite a cojinetes se establezca alrededor de 1 a 1.5 kg/cm².
- 4) Conectar en posición de "automático" los interruptores de control de los motores de las bombas siguientes: bomba de aceite de emergencia y bomba de aceite auxiliar.
- 5) Poner en servicio la unidad de aceite de sellos del generador y posteriormente proceder a llenar el generador -- con hidrógeno hasta una presión de 2.5 kg/cm².
- 6) Arranque de las bombas de circulación de agua y establecer el flujo de agua a través del condensador.
- 7) Arrancar y verificar que el siguiente equipo se encuen--

tre en operación: los extractores de vapor de aceite del tanque principal, del acondicionador de aceite y del tanque de sellos del generador.

- 8) Embragar y arrancar el motor del tornaflecha si aún no está en servicio.
- 9) Se debe arrancar una bomba de condensado y establecer el flujo de agua a través del condensador de vapor de sellos, los condensadores del banco de eyectores y los calentadores de alimentación de agua de baja presión.
- 10) Se debe poner en servicio un exhaustor del condensador de vapor de sellos y seleccionar el interruptor de control del exhaustor de reserva en el modo "automático".
- 11) Arrancar la bomba de aceite auxiliar y parar la bomba de aceite del tornaflecha posicionando el interruptor de control en el modo "automático".
- 12) Verificar el funcionamiento automático de los interruptores de presión de las bombas de aceite de la turbina.
- 13) Se deben poner en servicio los enfriadores de aceite de la turbina y mantener la temperatura del aceite de lubricación en 30°C.
- 14) Se considera que la caldera se encuentra encendida y deben de abrirse todos los drenes de la turbina.
- 15) Se debe verificar constantemente la temperatura de la carcasa de escape de la turbina de baja presión, observando que el sistema automático de rocío de la carcasa mantenga la temperatura de 70°C o menos.
- 16) Poner en servicio los sellos de vapor de la turbina, tal

que la temperatura de vapor por lo menos tenga 15°C de sobrecalentamiento. Los controladores del sistema de sellos deben de mantener una presión en el cabezal de 0.3 a 0.45 kg/cm², y en los sellos de 0.1 a 0.25 kg/cm². Verificar que la temperatura de los sellos de vapor de la turbina de baja presión se estabilice alrededor de 150°C.

- 17) Poner en servicio el eyector de arranque y cuando se observe un vacío de 10 mm Hg, proceder a cerrar la válvula rompedora de vacío.

- 18) Observar los siguientes instrumentos supervisores y verificar que estén registrando correctamente dentro de los límites de operación segura:
 - a) Excentricidad
 - normal \leq 0.05 mm
 - alarma = 0.075 mm
 - b) Posición del rotor
 - alarma: - 0.30 mm (- lado gobernador)
 - + 0.070 mm (+ lado generador)
 - disparo: - 0.75 mm
 - + 1.15 mm
 - c) Expansión diferencial
 - alarma - 3.5 mm
 - + 9.0 mm
 - d) Temperatura diferencial en metal de carcasa superior/inferior de la turbina de alta presión.
 - normal \leq 30°C
 - alarma = 42°C
 - disparo = 56°C
 - e) Vacío para rodar $>$ 500 mm Hg

- 19) Ajustar el gobernador principal a su posición mínima y la válvula de límite de carga a su posición máxima.

- 20) Verificar que la válvula de aislamiento del regulador de presión de estrangulamiento se encuentre cerrada.

- 21) Restablecer la turbina y verificar que las válvulas goberadoras, interceptoras y de paro de recalentado, abran en una posición del 100%.
- 22) Rearmar el mecanismo del controlador de las válvulas de corte.

Los operarios al terminar con estas tareas, han cumplido con los preparativos del arranque, con esto es posible continuar con la segunda etapa del arranque, es decir, el rodado de la turbina.

3.2 RODADO DE LA TURBINA.

El rodado de la turbina es el proceso más delicado en el arranque de la unidad, esto se debe principalmente a que la turbina sufrirá una dilatación al aumentar su temperatura, no siendo esta uniforme para todas las partes que la componen, esto es, el rotor no se dilatará respecto al tiempo en la misma proporción que la carcasa, por tener esta una masa mucho mayor.

El extremo de la turbina de baja presión se encuentra firme respecto al suelo por lo que queda fija en su posición axial, la parte de alta presión queda libre de expandirse axialmente ya que contiene una superficie de deslizamiento. La expansión se comunica al extremo frontal de la turbina a través del cojinete de empuje, de esta manera se logra tener las tolerancias normales en la sección de alta presión y alta temperatura en donde se encuentran las tolerancias más estrechas. La dilatación lateral también se presenta, pero esta es menos crítica pues la expansión es menor y más uniforme.

3.2.1 SISTEMA DE CONTROL DE LAS VALVULAS DE CORTE.

Este sistema de control incluye: las válvulas de corte o estrangulamiento, los servomotores de dichas válvulas, el controlador y un dispositivo de protección, por medio del cual no es posible abrir las válvulas si no existe aceite de restablecimiento y, el mecanismo se encuentre rearmado.

En el momento de disparar la turbina por alguno de los dispositivos de protección mencionados anteriormente, figura 2.12, el aceite de restablecimiento es drenado, con esto todos los dispositivos que operan con aceite son desactivados, las válvulas de admisión de vapor cierran, el aceite de alta presión suministrado por la bomba auxiliar de aceite es drenado; bajo estas condiciones la turbina está totalmente inactiva, se suministra aceite unicamente a los cojinetes, por medio del sistema de suministro de aceite que funciona automáticamente.

Restablecimiento de la turbina: para poder hacer el rodado, es necesario restablecer la turbina, para esto primeramente se debe revisar que ningún dispositivo de protección se encuentre activado, se deben tener todas las condiciones necesarias, tanto de presión como de temperatura y de vacío; la posición que deben tener los dispositivos de control antes de restablecer la turbina son:

i) La válvula límite de carga se debe encontrar en su máxima posición, esto es, la válvula de copa totalmente pegada a su asiento, no debe drenar el aceite de control, la presión debe ser de 3.1 kg/cm^2 . Con esto las válvulas de gobierno e interceptoras abrirán al 100% al restablecer la turbina (en el rodado de la turbina todas las válvulas de admisión de vapor deben de encontrarse al 100% de su apertura, excepto las válvulas de corte).

ii) El gobernador principal en su posición mínima, es decir, -

que unicamente el resorte de compresión del fuelle mantenga - la válvula de copa pegada a su asiento, ver figura 2.8, debe existir 3.8 a 4.2 kg/cm² de presión en el aceite de control del gobernador. Esto se hace para que cuando la turbina tenga velocidad el impulsor del gobernador tome el control de la velocidad en 3,384 r.p.m. aproximadamente.

Teniendo estas condiciones en la turbina, se procede al restablecimiento de la siguiente manera: restablecer la turbina a control remoto desde la sala de control: al efectuarse esta maniobra, opera el restablecimiento remoto que rearma el dispositivo de disparo por sobre velocidad, cerrando la válvula de copa que drena el aceite de disparo de emergencia y por lo tanto se cierra la válvula de disparo por sobre velocidad, ver figura 2.12, por ser de mayor presión, es decir, la presión de disparo de emergencia es de alta presión de 20 a 22 - Kg/cm², y la presión del aceite de restablecimiento es de 8 a 9 kg/cm².

Al existir aceite de restablecimiento todos los dispositivos de control y protección de la turbina son activados, menos el controlador de las válvulas de estrangulamiento, ya que este debe ser rearmado para que pueda ser operado.

Rearme del Controlador de las Válvulas de Estrangulamiento.

Para rearmar el mecanismo del controlador se procede de la siguiente manera: posicionar en el sentido de bajar el interruptor de control que acciona el motor (desde la sala de control) al hacer esto, el eje del controlador se comienza a desatornillar del cojinete del controlador y por lo tanto el eje gira en sentido de disminuir. En el momento en que el motor para y enciende una señal luminosa en la sala de control, esto indica que el mecanismo del controlador de la válvula de corte ha sido rearmado, esto es, el eje del fijador se ha enclavado en el cojinete del controlador impidiendole cualquier movimiento.

Hasta este momento, las válvulas de corte todavía siguen cerradas, pero están listas para comenzar a abrir y acelerar la turbina.

3.2.2 OPERACION DE LAS VALVULAS DURANTE EL RODADO.

Antes de describir el arranque de la unidad, es importante tener presente el comportamiento del turbogenerador en el proceso de rodado, esto será de gran utilidad para modelar la turbina.

Cuando la turbina se encuentre preparada para iniciar el rodado, la presión de control de las válvulas de corte es de -- 1.2 a 1.3 kg/cm², no siendo suficiente para abrir las válvulas. Para subir la presión de control es necesario accionar en el sentido de "subir" el interruptor que controla el motor del controlador de las válvulas de corte, al hacer esto, se aplican 127 VDC al motor, este al girar hace que la válvula de copa baje aumentando la caída de presión del aceite al pasar a través de ella y por lo tanto aumenta la presión de control. Cuando la presión llega a tomar el valor de 1.4 a 1.6 Kg/cm², las válvulas de corte estarán a punto de abrir.

Por cada nuevo pulso que se aplique en sentido de "subir" le corresponde un determinado nivel de presión de control, por consiguiente, una correspondiente apertura de las válvulas de corte que dejan pasar una determinada cantidad de flujo de vapor hacia la turbina haciéndola girar.

Si se desea bajar la velocidad, se debe girar en sentido de "bajar" el interruptor de control de motor, es cuando se aplican -127 VDC haciendo girar el motor en sentido contrario, entonces disminuye la presión de control.

Las válvulas de gobierno, las interceptoras y las de paro de recalentado se mantendrán al 100% de su apertura y el generador sin carga. La aceleración que se le aplique a la turbina

debe cumplir con las curvas de rodado que recomienda el fabricante para cada caso en particular. Cuando la velocidad de la turbina llegue a un valor de 3,384 r.p.m. el impulsor del gobernador aplicará al fuelle una presión de aceite de 1.8 -- Kg/cm², siendo suficiente para empezar a abrir la válvula de copa del gobernador principal. Cuando el fuelle aún no logra abrir la válvula de copa, es este momento la presión de control en el limitador de carga es de 3.1 kg/cm², en el gobernador principal con la válvula de copa totalmente pegada en su asiento existe una presión de control de 3.8 a 4.2 Kg/cm². -- Cuando se empieza a abrir la válvula de copa del gobernador -- debido al impulsor del gobernador, la presión de control del gobernador empezará a disminuir y cuando llegue a 3.1 Kg/cm², o menor tomará el control de la velocidad de la turbina, esto ocurre aproximadamente en 3,384 r.p.m., el gobernador mantendrá fija la velocidad en ese valor y las válvulas de gobierno se encontrarán para entonces al 20% su apertura aproximadamente.

Posteriormente se procede a abrir las válvulas de corte al -- 100%, esta se logra girando el interruptor de control del motor en sentido de "subir", cuando la presión de control llegue a 3.8 o 4 Kg/cm² esta válvula alcanzara el 100% de su -- apertura y se enciende un indicador luminoso en el tablero de control. Para poder seguir incrementando la velocidad de la turbina se debe operar el controlador de las válvulas de gobierno, al igual como se realizó para las válvulas de corte. -- Se debe girar el interruptor que controla el motor del controlador del gobernador en sentido de "subir"; por cada pulso -- que se aplique, la presión de control del gobernador aumentará un determinado valor y por lo tanto la apertura de las válvulas aumentará permitiendo mayor flujo de vapor hacia la turbina. Cuando la velocidad sea de 3,600 r.p.m. se habrá terminado el rodado.

3.2.3 CURVAS DE RODADO.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura inicial de la

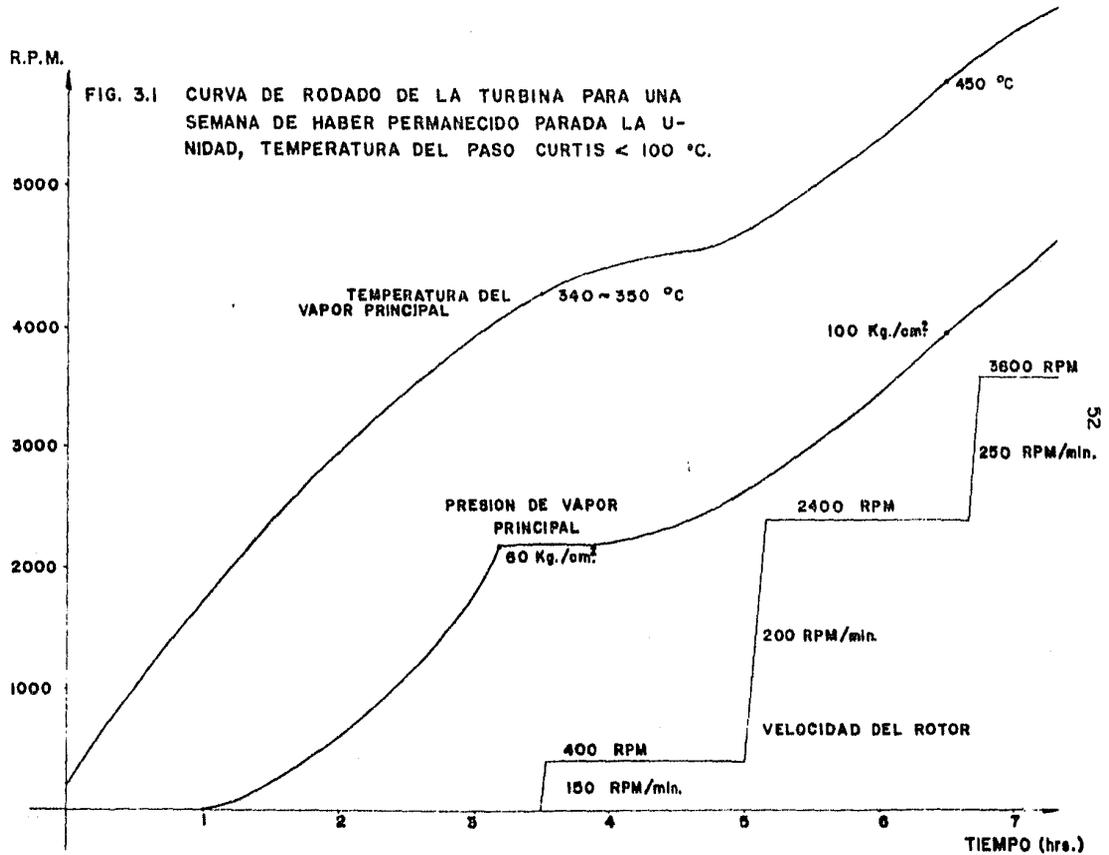
turbina es lo que hace diferente a cada rodado, si al iniciar el rodado la temperatura en la cámara de impulso es menor de 100°C se dice que es un rodado frío, si la temperatura en la cámara de impulso es mayor de 100°C se dice que es un rodado caliente.

Para establecer el programa de cada rodado los operarios de la central termoeléctrica de Tula Hidalgo, utilizarán curvas específicas de rodado donde es seleccionada cada una de ellas dependiendo del tiempo que haya estado parada la unidad, siendo esta, una manera de determinar la temperatura inicial de la cámara de impulso.

Cuando se hace un rodado frío, el vapor que entra a la turbina debe tener un sobrecalentamiento mínimo de 55°C pero no más de 450°C de temperatura total, con un vacío tan alto como sea posible y presión de 60 y 80 Kg/cm² en el vapor principal. Cuando se hace un rodado caliente se debe usar vapor a presión baja y a temperatura alta para minimizar la pérdida de temperatura. En términos generales, se efectúan los siguientes pasos para el rodado de la turbina:

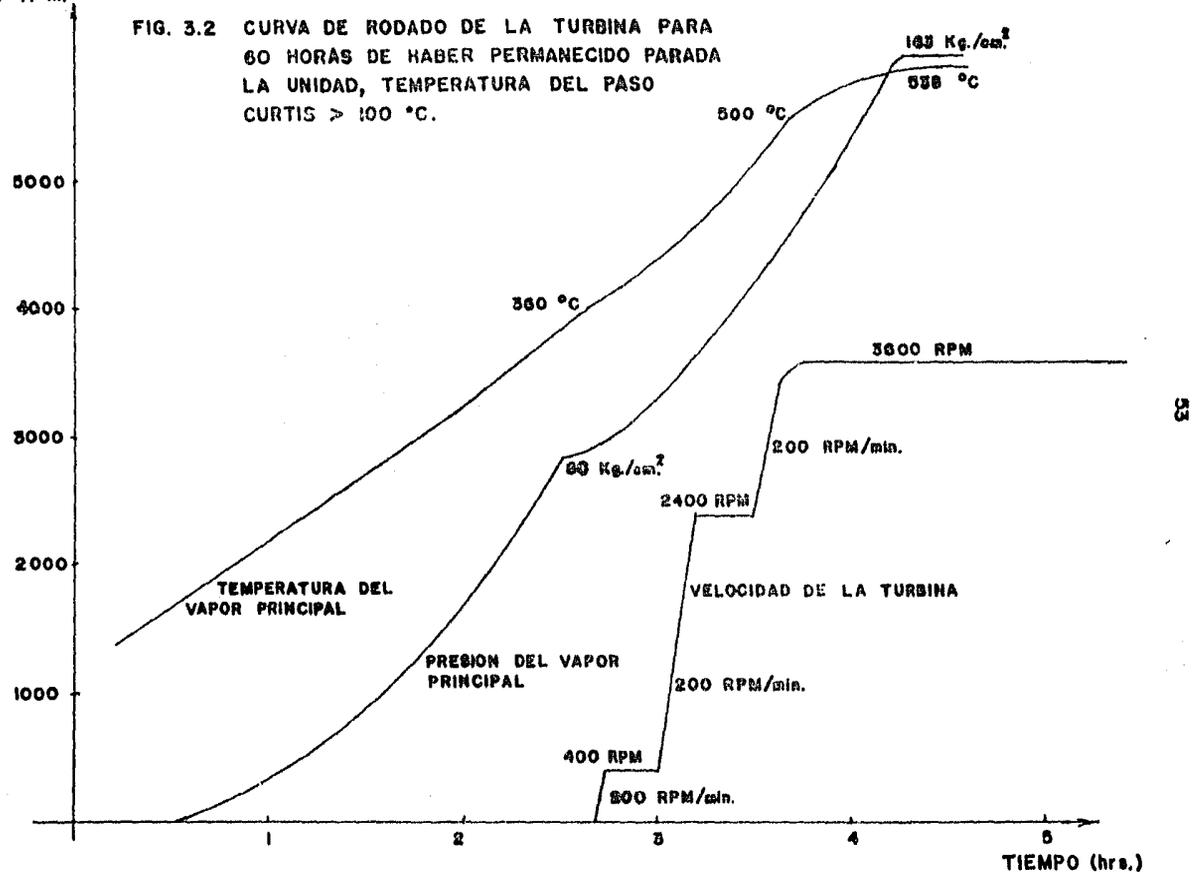
3.2.3.1 PROCEDIMIENTO PARA EL RODADO DE LA TURBINA.

- 1) Abrir las válvulas de estrangulamiento lo suficiente para acelerar el rotor a 400 r.p.m. a una razón de 150 o 200 r.p.m./min., y verificar tan pronto como se incrementa la velocidad del rotor que el tornaflecha desembrage automáticamente. Poner la perilla de control remoto del tornaflecha en la posición de "FUERA". Nunca deberá de ser arrancada la turbina con vapor desde la posición de reposo, es decir, con el tornaflecha fuera de servicio.
- 2) Seguir la curva de arranque recomendada por el fabricante, en las figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 aparecen las curvas de rodado para una semana o más, 60 hrs., 8 hrs. y 2 hrs. respectivamente.



R. P. M.

FIG. 3.2 CURVA DE RODADO DE LA TURBINA PARA 60 HORAS DE HABER PERMANECIDO PARADA LA UNIDAD, TEMPERATURA DEL PASO CURTIS > 100 °C.



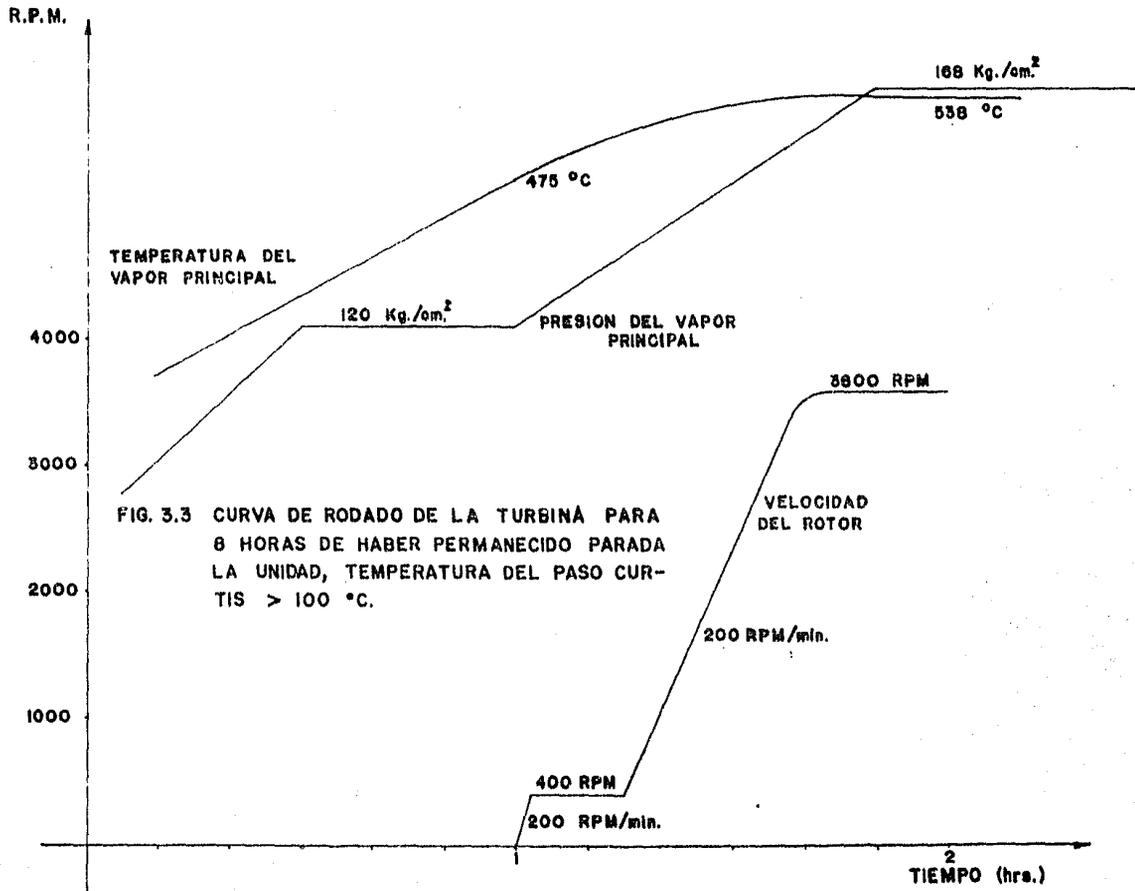
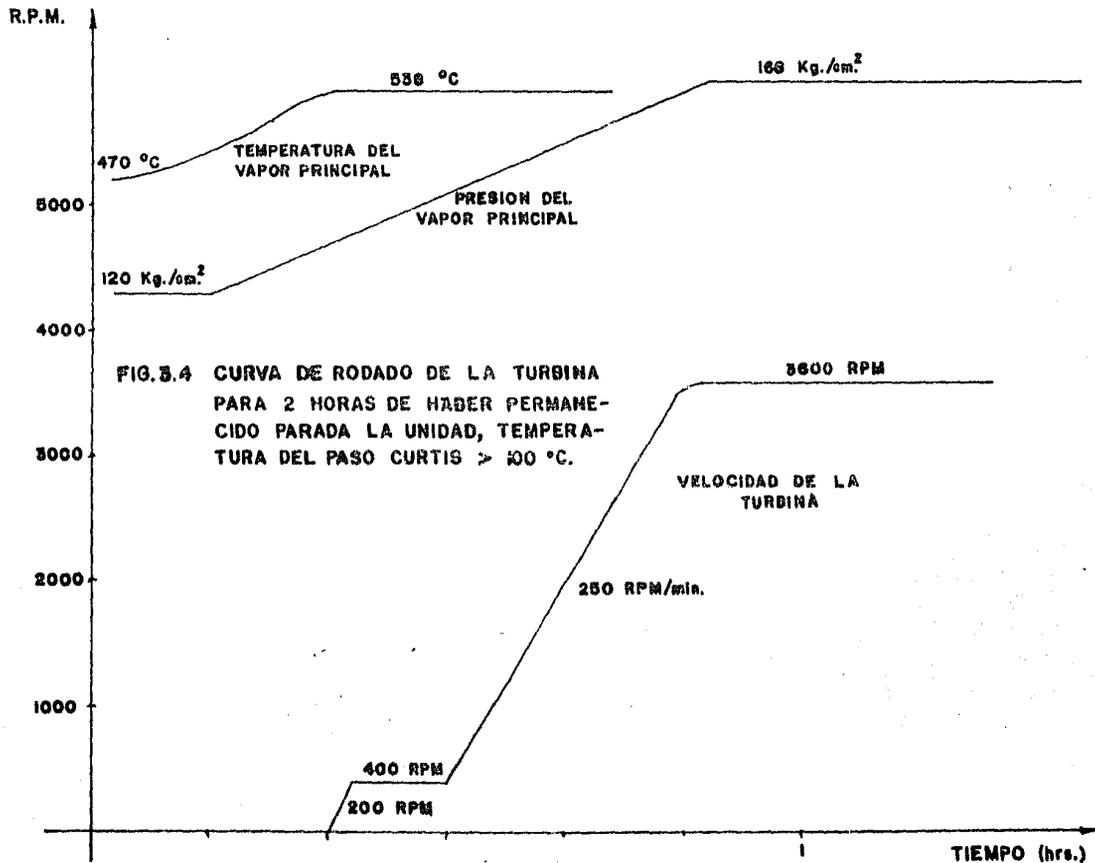


FIG. 3.3 CURVA DE RODADO DE LA TURBINA PARA 8 HORAS DE HABER PERMANECIDO PARADA LA UNIDAD, TEMPERATURA DEL PASO CURTIS > 100 °C.



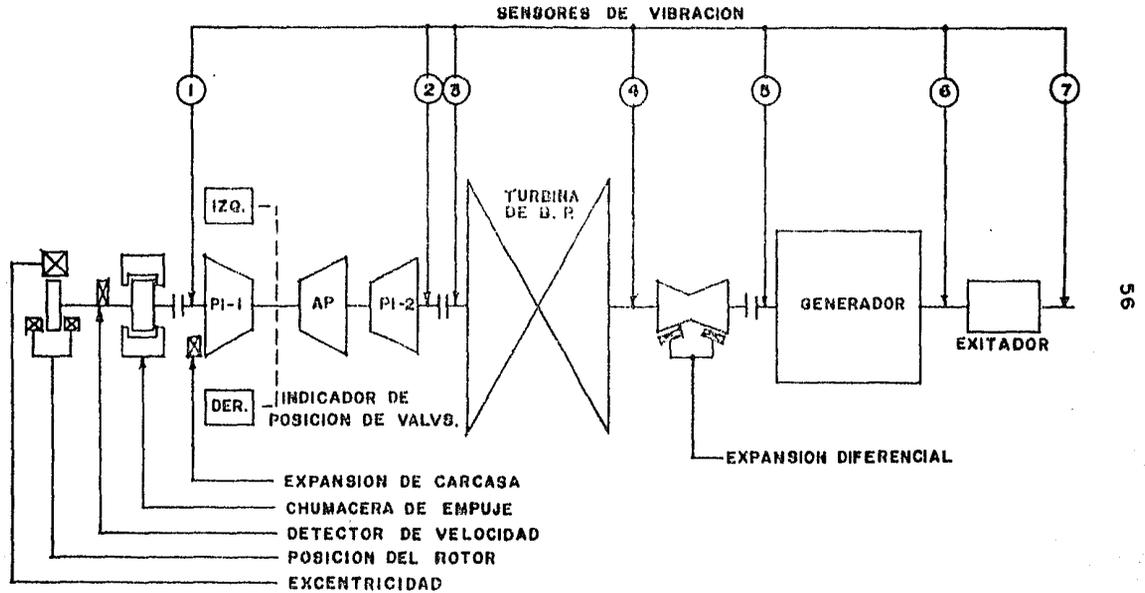


FIG. 3.5 LOCALIZACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS SUPERVISORIOS.

3) Mantener la velocidad en 400 r.p.m. el tiempo suficiente para verificar los instrumentos supervisorios de la -- turbina, a fin de asegurarse que no haya condiciones insatisfactorias. Durante este período se deben supervisar -- constantemente la excentricidad de la flecha de la turbina, así como la temperatura diferencial entre el metal y el vapor de la cámara de impulso.

4) Incrementar la velocidad con el controlador de las válvulas de corte y verificar que aproximadamente a 600 r.p.m., se realice la transferencia automática de medición de excentricidad a medición de vibración. El ajuste del control de temperatura del aceite de lubricación de la turbina se debe de modificar de 30°C a 40°C.

5) Si al incrementar la velocidad de la turbina, las condiciones de temperatura medidas o los instrumentos supervisorios indican que los límites recomendados están aproximados o excedidos, se sugiere reducir la velocidad a -- 400 r.p.m. y esperar un tiempo suficiente para que las -- condiciones de la turbina se tengan dentro de los límites de operación segura.

6) En caso de haber realizado mantenimiento mayor o haber removido los cojinetes de la unidad, es una buena práctica que estando la velocidad en 400 r.p.m. cerrar las válvulas de estrangulamiento, dejando girar libremente al rotor y cerciorarse localmente de que no haya fricciones o rozamientos en la unidad. En caso satisfactorio seguir -- con el rodado normal.

7) Durante los períodos en que se incrementa la velocidad de la turbina se deberá vigilar constantemente las vibraciones en todos los cojinetes del turbogenerador. La -- máxima vibración se presenta a velocidades entre 2,100 y 2,200 r.p.m. aproximadamente.

8) Incrementar la velocidad de la turbina hasta llegar alrededor de 2,400 r.p.m., a una razón no mayor de 200 a 250 -- r.p.m. /min. La presión y temperatura del vapor deben elevarse como se muestra en las figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4. -- Mantener la velocidad por un tiempo ya predeterminado.

9) Proceder a incrementar la velocidad de la turbina hasta 3,600 r.p.m. a razón de 200 o 250 r.p.m., verificar que aproximadamente a 3,380 r.p.m., el gobernador principal asuma el control de la velocidad de la turbina mediante el cierre de las válvulas de gobierno desde 100% hasta un valor -- aproximado de 20% de apertura. Abrir lentamente las válvulas de estrangulamiento para cerciorarse que el gobernador principal esté controlando la velocidad correctamente, al estar al 100% de apertura las válvulas de corte, se incrementa la velocidad con las válvulas de gobierno hasta llegar a 3,600 r.p.m.

10) Mantener la velocidad de la turbina alrededor de 3,600 r.p.m. y parar la bomba de aceite auxiliar, el interruptor -- de esta bomba se debe colocar en el modo "AUTOMATICO". Verificar que la presión de descarga de la bomba principal de aceite y la presión de aceite de lubricación a los cojinetes de la turbina se encuentren dentro de los límites recomendados para operación.

3.2.4 SUPERVISORIOS DE LA TURBINA.

En el proceso de rodado de la turbina, los operarios deben -- revisar constantemente los "supervisorios de la turbina", ya que estos indican el estado general en que se encuentra el -- turbogenerador en el momento de estar acelerado el rotor. De esta manera es posible corregir a tiempo las fallas o anomalías que se puedan presentar, asegurando el rodado, y no aplicando esfuerzos al rotor que disminuyan la vida útil de -- la unidad.

En la figura 3.5 se observa la localización de los instrumentos supervisorios de la turbina, estos instrumentos incluyen un sistema de alarmas y disparo de la unidad cuando los valores de operación segura han sido excedidos; en algunos casos el disparo se deja a criterio del operario.

1) Excentricidad del rotor: la excentricidad nos indica la curvatura que tiene el rotor debido a la diferencia de temperatura que existe entre sus alrededores, debido a que al parar la turbina, la parte superior de la carcasa se encuentra más caliente que la parte inferior. Esta curvatura se logra minimizar manteniendo el rotor en giro lento (estado de tornaflecha).

La medición de la excentricidad se hace cuando la turbina se encuentra en giro lento y cuando la velocidad de la turbina es menor de 600 r.p.m.; cuando la velocidad es mayor, un dispositivo hidráulico desactiva el medidor de excentricidad y activa los dispositivos de medición de vibraciones. Los límites de operación son los siguientes:

Menor o igual a 0.05 mm operación normal
Mayor o igual a 0.075 mm alarma

2) Vibraciones del rotor. Cuando la velocidad de la turbina es mayor de 600 r.p.m., la curvatura del rotor es medida en forma de vibraciones.

Estas vibraciones son medidas en cada uno de los siete cojinetes siendo el número siete el que vibra con mayor amplitud. El nivel de vibración que tenga el rotor del turbogenerador nos indica si el rodado se está llevando en forma correcta.

Los niveles de operación son los siguientes:

menores de 0.075 mm	Operación normal
de 0.075 a 0.125 mm	Mantener velocidad constante.
de 0.125 a 0.25 mm	Bajar velocidad
de 0.25 o mayor	Disparo de la unidad.

En velocidad crítica, de 2,100 a 2,200 r.p.m.

de 0.125 mm a 0.25 mm	Rebasar rápidamente
de 0.25 o mayores	Disparo de la unidad.

3) Posición del rotor. En el proceso de rodado, cuando la -- turbina se dilata desproporcionalmente debido a los diferen-- tes gradientes de temperatura del rotor y la carcasa, es peli-- groso que exista fricción entre las partes movibles y fijas, por estar ambas muy juntas en la sección de alta presión y al-- ta temperatura; por esta razón se registra la posición axial del collar de empuje del rotor respecto al soporte del cojine-- te de empuje, que determina cuando la posición relativa del -- rotor es peligrosa. Los límites de operación son los siguien-- tes:

- 0.3 mm ; + 0.7 mm Alarma
- 0.75 mm ; + 1.15 mm Disparo

(-) significa lado turbina
(+) significa lado gobernador

4) Expansión diferencial. Al igual que el registrador que de-- tecta la posición del rotor, el detector de la expansión dife-- rencial tiene como objetivo activar una alarma cuando las dis-- tancias entre las partes fijas y móviles de la turbina han su-- perado los límites de operación segura y se corre el peligro de que haya fricción entre ellas, esto sucede principalmente porque la dilatación del rotor y la carcasa no son proporciona-- les, la expansión diferencial es medida entre las partes fi-- jas y móviles de la turbina, los límites de operación son --

los siguientes:

- 3.5 mm ;+9.0 mm Alarma
- (-) significa lado turbina
- (+) significa lado gobernador

5) Expansión de la carcasa. Este instrumento es el encargado de registrar la expansión que sufre la carcasa al elevar su temperatura en el proceso de rodado. Como se mencionó anteriormente, la turbina está fija al cimiento de la parte central de la turbina de baja presión y el pedestal del gobernador puede desplazarse libremente a lo largo de su posición axial. Este registrador mide la posición del pedestal del gobernador relativo en un punto fijo, esto es, el cimiento. El objetivo principal del instrumento es detectar si no existe obstrucción en los patines de deslizamiento de la carcasa, además de comparar la expansión de la carcasa en condiciones semejantes de la turbina.

6) Instrumentos detectores de temperatura. Existen otros instrumentos supervisorios de la turbina, encargados de detectar la temperatura en diferentes partes del turbogenerador, estos activan una alarma cuando los límites de operación segura son excedidos y el disparo se deja al criterio del operador. La función de cada uno y los límites de operación son los siguientes:

Temperatura en la descarga del aceite de los cojinetes:

- a) 71°C, máxima temperatura en el cojinete más caliente para operación continua.
- b) 77°C, alarma.

Temperatura del metal de los cojinetes de apoyo:

- a) temperaturas menores de 91°C normales.
- b) 107°C, alarma.
- c) 113°C, disparo u otra acción correctiva.

Temperatura del metal del cojinete de empuje:

- a) temperaturas, : : : a 95°C
- b) 99°C alarma
- c) 107°C disparo u otra acción correctiva.

Temperatura diferencial del metal y el vapor en la cámara de impulso:

- a) 110°C a-56°C normal
- b) 140°C a-83°C límite máximo

(+) significa: vapor > metal

(-) significa: vapor < metal

Temperatura diferencial entre la superficie interior de la -- brida horizontal y el perno adyacente del cilindro de alta -- presión, no debe exceder de 110°C.

Temperatura diferencial entre el metal de la carcasa superior con respecto a la carcasa inferior de la turbina:

- a) menor de 30°C normal
- b) 42°C alarma
- c) 56°C disparo u otra acción correctiva.

Temperatura de escape de la turbina de baja presión no debe exceder 120°C.

Existen otros supervisorios como lo es el revisar localmente -- la posición de las válvulas y la variable mas importante, es -- to es, la velocidad de la turbina.

3.2.5 RODADO DE LA UNIDAD 1 DE LA CTE DE TULA HIDALGO.

Se presentó la oportunidad de registrar el rodado de la Unidad 1 de la Central Termoeléctrica de Tula Hidalgo "Francisco Pérez Ríos". En donde los operarios realizan el rodado de la -- turbina en forma normal, el rodado fué de tipo frío, después - del mantenimiento mayor a la unidad. Existieron limitaciones de equipo y disponibilidad de señales, pero se logró graficar las siguientes señales:

a) En un registrador térmico TIGRAPH conectado a las tarjetas de interfaz del SADRE (Sistema de Adquisición de Datos y Registro de Eventos), se graficaron las siguientes señales:

Presión de vapor principal

Presión de aceite de control de la válvula de corte derecha.

Presión de aceite de control de la válvula de corte izquierda.

Presión en el paso Curtis.

Velocidad de la turbina.

Posición del interruptor de control del motor del controlador de las válvulas de corte.

b) Con la computadora del SADRE se listó la siguiente señal:

Duración de los pulsos de voltaje que se aplicaron al motor -- del controlador de las válvulas de corte.

Los pulsos de voltaje que se aplicaron al motor del controlador, son registrados de dos formas diferentes, con el graficador térmico y con la computadora del SADRE, esto es debido a - que con el graficador no fué posible conocer la duración de dichos pulsos, solamente se pudo conocer el sentido. En la computadora solamente tuvimos oportunidad de registrar una señal, que fué la duración de los pulsos sin importar su sentido "subir" o "bajar".

Cinco horas y media después de haber iniciado el rodado de la turbina fué disparada, debido a que la caldera salió fuera de control. Las gráficas obtenidas de este rodado se resumen en las figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, en estas figuras solo aparecen los intervalos del rodado que consideramos de mayor interés para nuestros propósitos. La presión del paso Curtis resultó más pequeña de lo que esperábamos, su valor casi no se despegó de la línea de referencia, por esta razón no aparece en las figuras.

En la figura 3.6 aparecen los primeros 20 minutos de rodado, en donde se puede apreciar la aceleración que se le aplicó al rotor, la variación de la presión de control, los pulsos de voltaje que se aplicaron al motor del controlador de las válvulas de corte y la presión del vapor principal. Por ser rodado frío después de realizar mantenimiento mayor a la unidad, al estar la velocidad en 400 r.p.m., se cerraron las válvulas de corte para revisar localmente si no existían rozamientos del rotor. En las figuras se pintó una raya punteada en 1.41 Kg/cm^2 de la presión de control para indicar el momento en que abren o cierran las válvulas de corte.

En la figura 3.7 se puede apreciar la velocidad de la turbina, la presión de control y la presión del vapor principal, esta sección del rodado tiene importancia ya que a las 3 hrs. y 30 min. después de iniciar el rodado fueron abiertas las válvulas de gobierno al 100%, pues por descuido del operario no se encontraban totalmente abiertas. Los pulsos de voltaje no aparecen en esta gráfica pues para nuestros objetivos solo nos bastan los registrados en la figura 3.6.

En la figura 3.8 se aprecian las mismas variables que en la figura anterior, esta sección del rodado lo consideramos de interés ya que se observan variaciones de la pre---

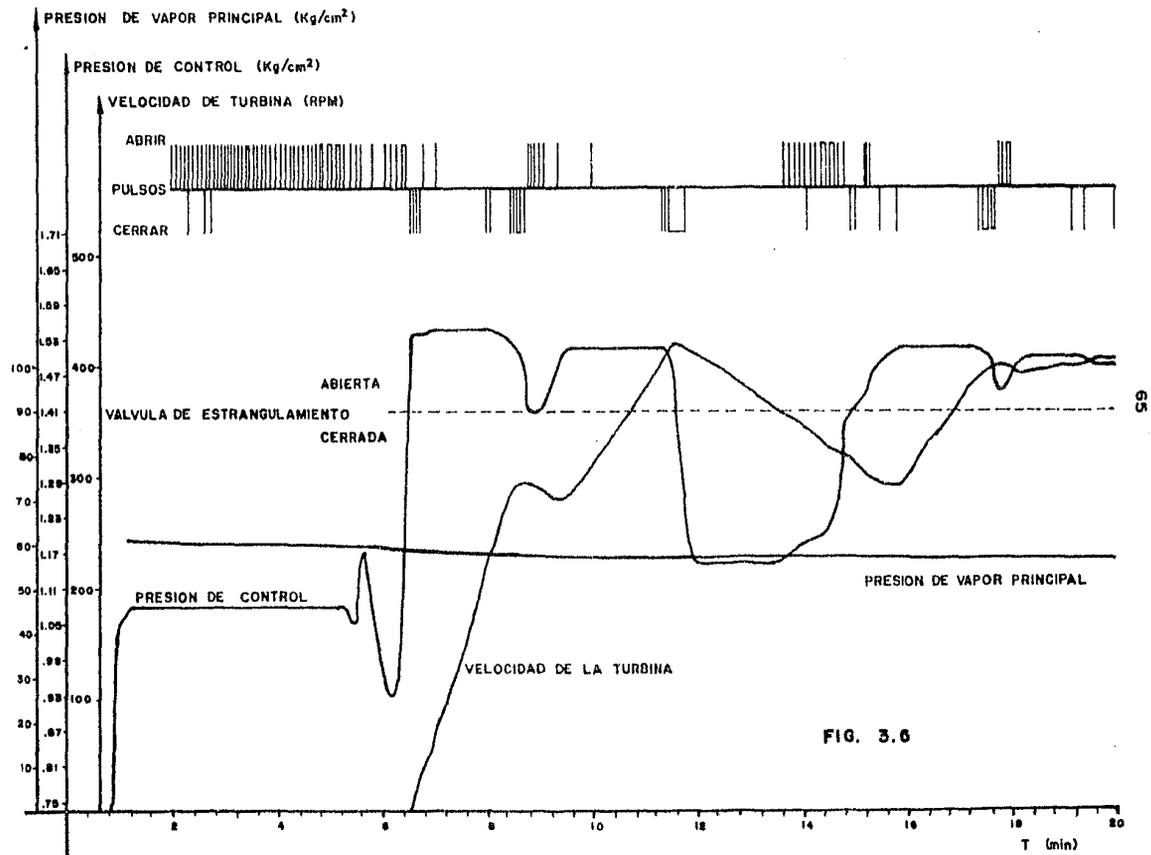


FIG. 3.6

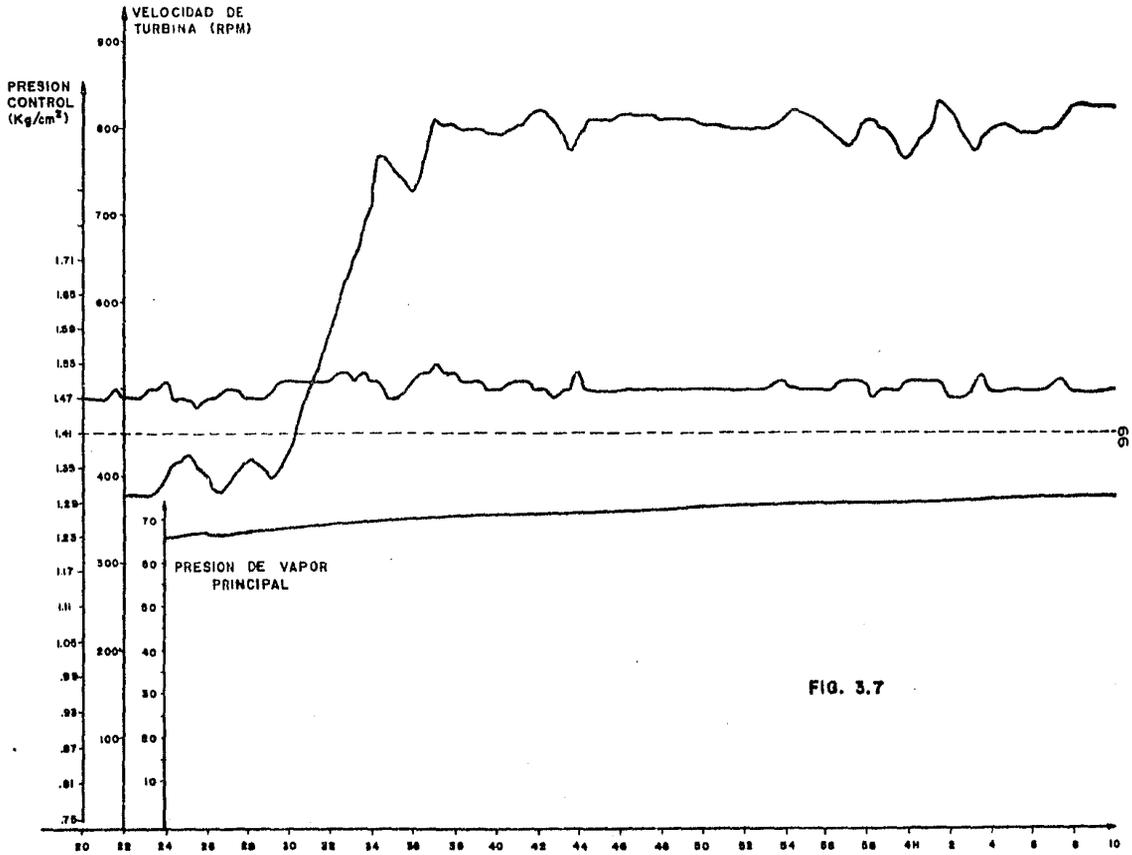


FIG. 3.7

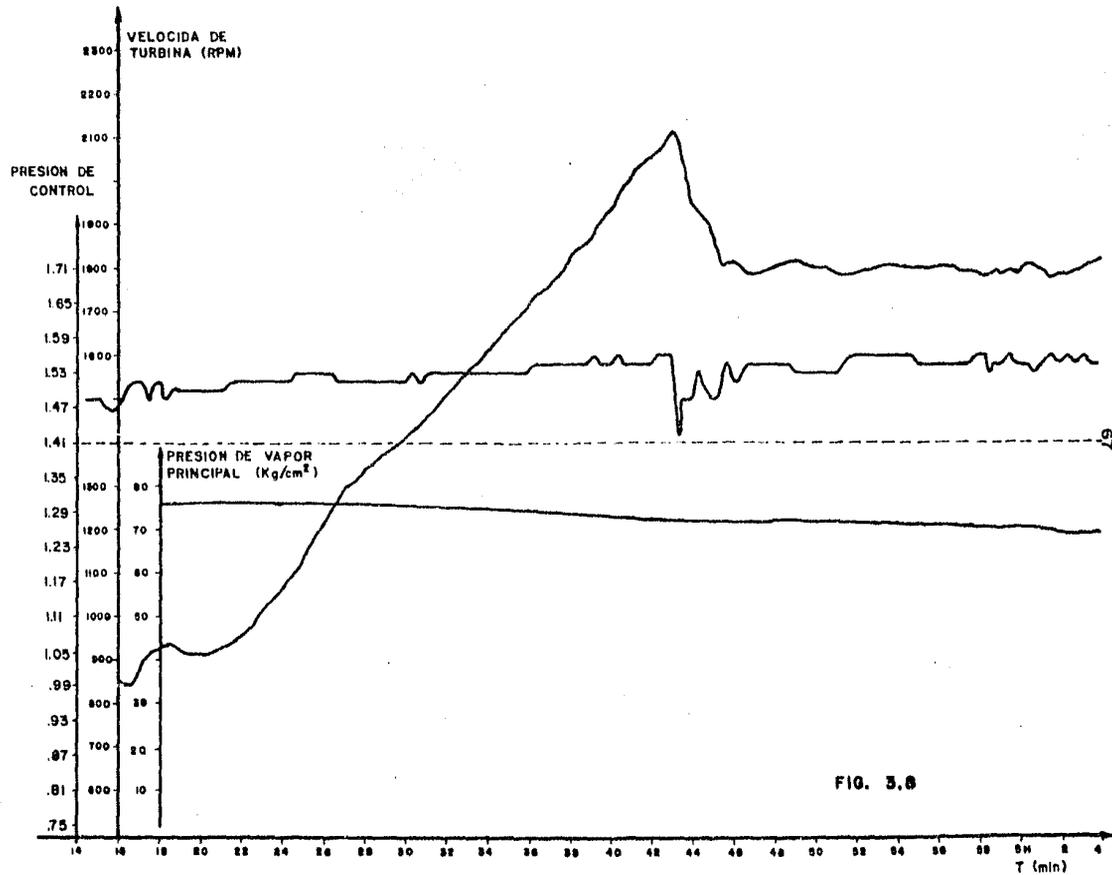
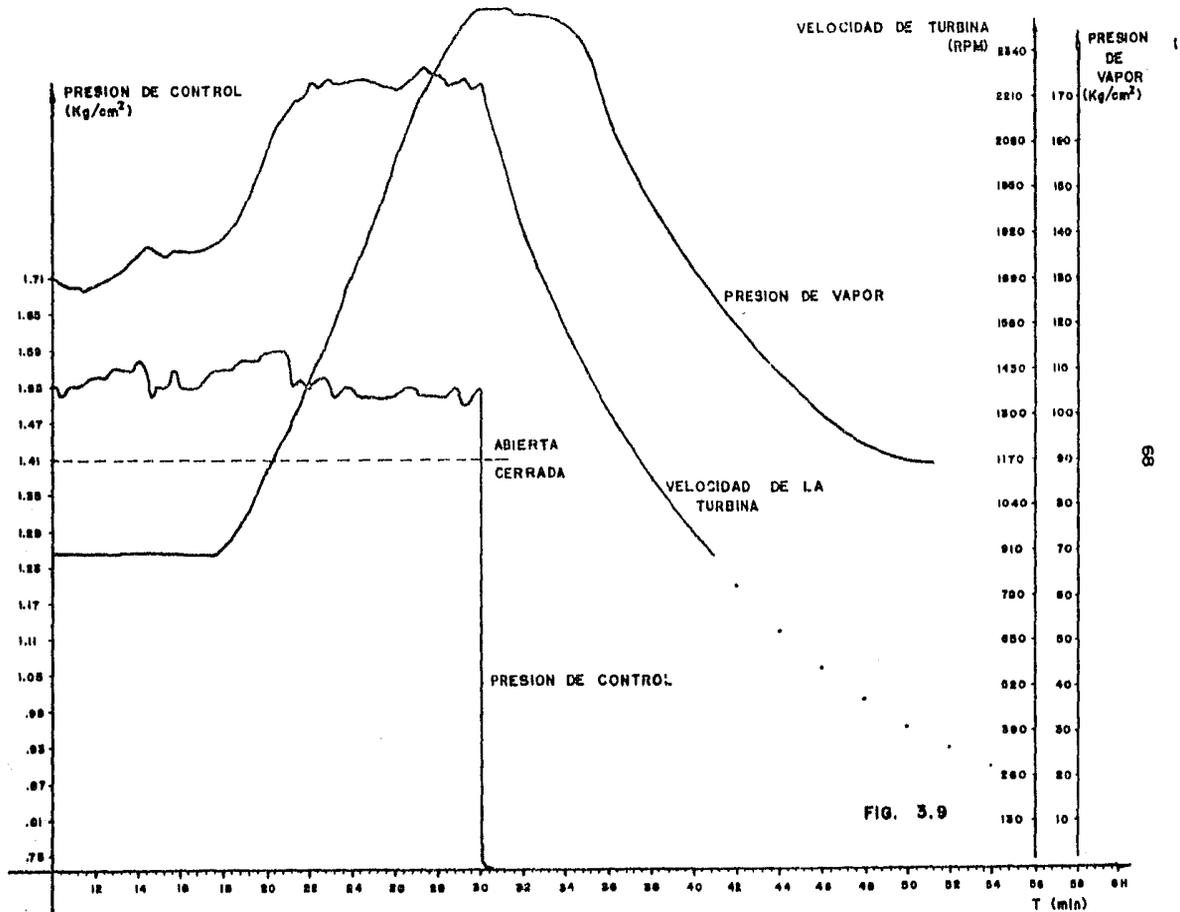


FIG. 3.6



sión de control y de la velocidad de la turbina, que resulta de gran interés para evaluar el modelo de la turbina. - En la figura 3.9 aparece el fin del rodado, en donde se aprecia el disparo de la turbina.

3.3 SINCRONIZACION Y CARGA DEL GENERADOR.

La última etapa del arranque es sincronizar el generador a la línea y toma de carga. Para poder hacer la sincronización es necesario que el voltaje, la fase y la frecuencia del generador sean iguales a los de la línea. La igualación de voltaje se logra ajustando el excitador, la frecuencia y la fase por medio del controlador del gobernador. La descripción en términos generales de los pasos que se deben seguir en este proceso, son los siguientes:

- 1) Ajustar el gobernador principal para controlar la velocidad de la turbina y efectuar los preparativos para sincronizar la unidad al sistema.

- 2) Sincronizar la unidad y tomar 5 o 10% de la carga nominal, mantener esta carga todo el tiempo requerido para estabilizar las temperaturas de vapor a la entrada de la turbina. Se recomienda que durante esta etapa de estabilización de las temperaturas se transfiera del gobernador principal a la válvula de límite de carga para evitar oscilaciones de las válvulas de control ocasionadas por las variaciones de frecuencia del sistema.

- 3) Incrementar la carga de la unidad a razón de 3 MW/minuto, al llegar a 50 MW, se comienza a desbloquear las extracciones de vapor de la turbina, la carga se debe estabilizar en 60 MW para esta maniobra.

- 4) Cuando la temperatura del metal de la carcasa superior con respecto a la inferior alcance una diferencia de 30°C,

en este momento, se comienza a cerrar los drenes de las líneas de vapor de la turbina.

5) Efectuadas las maniobras anteriores, se sigue con el incremento de carga. La temperatura del vapor principal deberá ser estabilizada en un valor de 538°C. La presión de el vapor principal no deberá ser incrementada hasta su valor de régimen normal de 168 Kg/cm², pues este incremento dependerá de la sílice existente en el vapor que es llevado a la turbina y en el agua de la caldera.

6) Una vez que la unidad se trabajó con el incremento de carga, y la presión del vapor y temperatura se estabilizaron dentro de sus valores de régimen, se debe poner en servicio el regulador de presión inicial de estrangulamiento.

7) Durante esta etapa de arranque, se deberán de vigilar constantemente todos los parámetros de operación de la turbina. Al terminar esta etapa se da fin al arranque del -- turbogenerador.

CAPITULO IV.

DESARROLLO DEL MODELO DEL TURBOGENERADOR Y DEL SISTEMA DE CONTROL DE RODADO DE LA TURBINA.

En este capítulo se define el modelo del turbogenerador y del sistema de control a la velocidad de la turbina, que son usados en la simulación del proceso de rodado. Para tal objetivo se define primeramente el rodado automático que se espera alcanzar, en base a los objetivos planteados. Así también se define el conjunto de señales de entrada y salida utilizadas por el sistema de control que aseguren el rodado y eviten esfuerzos en el rotor. El turbogenerador para poder ser modelado es dividido en varios subsistemas, y los parámetros de cada uno de estos, serán evaluados con las gráficas obtenidas en el rodado de turbina registrado en Tula.

4.1 DEFINICION DEL RODADO AUTOMATICO.

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de un sistema de control que acelere la turbina automáticamente en el proceso de rodado del turbogenerador de la Unidad 1 en la C.T.E. de Tula Hidalgo. Actualmente, este proceso lo realizan los operarios en forma manual, accionando el sistema de control de las válvulas de corte y el sistema de control de las vál vu las de gobierno con lo cual se eleva la velocidad de la turbina de 3 R.P.M. hasta 3,600 R.P.M.

Para fines de automatización de este proceso se propone que el rodado de la turbina sea de 3 R.P.M. hasta 3,384 R.P.M., aproximadamente, de esta manera unicamente se utilizará el sistema de control de las válvulas de corte, dejando el sistema de control de las válvulas de gobierno para la tercera

etapa del arranque, esto es, una vez que el circuito controlador abra totalmente las válvulas de corte, el operario corregirá la frecuencia y fase del generador con las válvulas de gobierno, y una vez sincronizada la unidad tomará carga de la línea. En el proceso de rodado de la turbina existen otras variables que se requieren estar ajustando, tales como la presión y la temperatura del vapor principalmente, estas variables seguirán siendo responsabilidad de los operadores, el circuito controlador solo tomará las variables que involucren cambios en la velocidad de la turbina.

El sistema de control a desarrollar en esta tesis, está pensado para ser implementado en una microcomputadora, la cual se mantendrá comunicada con el operario y con el turbogenerador, pues no debe acelerar la turbina si no se han cumplido los preparativos del arranque, y al estar acelerando el rotor debe conocer el estado en el cual se encuentra el turbogenerador, para asegurar de esta manera el rodado de la turbina y proteger el turbogenerador.

4.2 SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA MICROCOMPUTADORA.

En este tema se tratarán el conjunto de las señales de entrada y salida que le permitan a la microcomputadora realizar el rodado sin ningún peligro para la turbina.

4.2.1 SEÑALES DE SALIDA.

Para ejercer el control sobre la velocidad de la turbina es necesario que la microcomputadora tenga una señal de salida, esta es hacia el interruptor que controla el motor del servomotor de las válvulas de corte, el interruptor solo tiene tres posiciones que son: 'Subir', 'Bajar' y 'Neutro'. Naturalmente deben existir señales luminosas que le indiquen al operario el estado en que se está llevando a cabo el rodado, pero como en esta tesis solo se simulará el rodado, estas señales no serán consideradas. Por lo que solo se tomará una señal de salida.

4.2.2 SEÑALES DE ENTRADA.

Estas señales pueden ser divididas en dos grupos, uno de ellos corresponde a las señales de condición para el rodado, es decir, los preparativos del arranque. El otro grupo corresponde a las señales de control, es decir, los supervisorios de la -- turbina.

a) Señales de condición.

Para que el arranque pueda llevarse a cabo, deben ser favorables todas las condiciones de operación del turbogenerador ya que de lo contrario el rodado será un fracaso. La microcomputadora debe acelerar el rotor cuando los preparativos del --- arranque se hayan cumplido, pidiendo posteriormente la autorización del opario para iniciar el rodado. Se observa que la - mayoría de los preparativos del arranque son secuenciales, ejemplo:

Para que las válvulas gobernadoras, de paro de recalentado e - interceptoras se encuentren al 100% de su apertura, deben de - haberse cumplido los siguientes requisitos:

- i) Todos los dispositivos de protección de la turbina deben es tar desactivados, de lo contrario la turbina estaría disparada
- ii) La bomba de aceite auxiliar debe de estar activada, ya que de lo contrario no habrá aceite de alta presión.
- iii) El limitador de carga en su máxima posición ya que de lo contrario las válvulas gobernadoras no abrirán al 100%.
- iv) Turbina restablecida.

Si la temperatura y presión del aceite a los cojinetes es correcta, esto indicará lo siguiente:

- i) Los enfriadores de aceite a los cojinetes están funcionando.
- ii) Las bombas de circulación de agua activadas.
- iii) El sistema de aceite de lubricación en condiciones favorables, etc.

Si el vacío en el condensador es de 500 mm Hg, entonces:

- i) La válvula rompedora de vacío cerrada.
- ii) En servicio el exhaustor del condensador, etc.

Por estas razones es necesario tomar una lista reducida de señales que le indiquen a la microcomputadora que los preparativos del arranque se han cumplido. Esta lista es la siguiente:

- a.1) Presión y temperatura de aceite a cojinetes del rotor, el rango es:
Presión de 0.7 a 1.4 Kg/cm²
Temperatura menor de 30°C
- a.2) Presión de hidrógeno en el generador: 2.5 Kg/cm²
- a.3) Vacío en el condensador: menor o igual a 500 mm Hg.
- a.4) Posición de las válvulas de admisión de vapor.
Totalmente abiertas: gobernadoras, interceptoras y de paro de recalentado.
Totalmente cerradas: de corte o estrangulamiento.
- a.5) El motor de tornaflecha: embragado y girando.
- a.6) Controlador de las válvulas de gobierno: en posición mínima.

a.7) Controlador de las válvulas de corte: rearmado.

a.8) Sistema de sellos:

Presión en el cabezal: de 0.3 a 0.45 Kg/cm²

Presión en los sellos: de 0.1 a 0.25 Kg/cm²

Temperatura del vapor de sellos de la turbina de baja presión:
150°C ± 30°C

a.9) Excentricidad del rotor: menor o igual a 0.05 mm.

b) Señales de control.

En este tema se tratarán los supervisorios de la turbina, de los cuales hará uso la microcomputadora para conocer el estado de la turbina y ejercer el control sobre esta.

Cuando algún supervisorio de la turbina excede su valor de los límites de operación segura, es activada una alarma, dejando al criterio del operador la corrección de la anomalía o el disparo de la unidad. Solamente existen dos casos de los cuales la velocidad del rotor se ve afectada por el valor anormal que contengan, siendo estos: la excentricidad/vibraciones (la excentricidad y las vibraciones serán tratadas como una sola variable) y el valor de la temperatura en la turbina.

Para fines de control, la microcomputadora tomará como variable principal la velocidad del rotor, ya que es lo que se desea controlar, y por lo anteriormente dicho, también es necesario que detecte constantemente la temperatura diferencial del vapor y el metal en el paso Curtis, y la excentricidad/vibraciones del rotor. Los otros supervisorios también son importantes, pero la microcomputadora no podrá hacer nada cuando su valor exceda los límites de operación segura, el operario hará las correcciones necesarias cuando se presenten las alarmas correspondientes. De esta manera el rodado de la turbina queda determinado por estas tres variables:

b.1) Velocidad de la turbina.- Este parámetro será tomado para poder corregir la aceleración recomendada y mantenerla constante en los tiempos de calentamiento.

b.2) Temperatura diferencial del vapor y metal en la cámara de impulso: el límite de operación es el siguiente:

110°C a - 56°C normal
140°C a - 83°C límite máximo

(+) significa: vapor > metal
(-) significa: vapor < metal

Cuando la temperatura diferencial salga de estos límites se debe mantener la velocidad constante hasta que sea corregido el error.

b.3) Excentricidad/vibraciones: estas dos variables son consideradas como una sola, ya que al desactivarse el dispositivo que registra la excentricidad se activa el dispositivo que registra las vibraciones, ambas miden la curvatura del rotor, además, tienen la misma escala de medición. Los límites de operación son los siguientes:

$0 \leq E/V < 0.07$ mm : continuar con el rodado normal.

$0.07 \leq E/V < 0.125$ mm : mantener la velocidad de la turbina constante.

$0.125 \leq E/V < 0.25$ mm : disminuir la velocidad de la turbina.

$0.25 \leq E/V$ mm : disparar la unidad.

Para el caso de la velocidad crítica de: 2,100 a 2,200 R.P.M.

$0 \leq E/V < 0.25$ mm : continuar con el rodado normal.

$0.20 \leq E/V$ mm : disparar la unidad.

4.3 MODELADO DEL TURBOGENERADOR.

Un modelo del turbogenerador que considere: los mecanismos de control y protección, la carga en el generador, el comportamiento del rotor bajo cambios de temperatura, expansión de carcasa, potencia que desarrollan las tres turbinas, etc., sería muy complejo.

Nuestro objetivo es obtener un modelo simple que satisfaga nuestras necesidades, basándonos en que el turbogenerador durante el proceso de rodado puede ser simplificado por las siguientes razones:

- 1) El generador no tiene carga.
- 2) La mayoría de los dispositivos de control y protección no operan (actúan sólo cuando el turbogenerador está en operación normal).
- 3) Las válvulas de paro de recalentado e interceptoras están totalmente abiertas.
- 4) Las válvulas de gobierno se encuentran abiertas al 100%, - empiezan a cerrar cuando la velocidad de la turbina llega a - 3,384 r.p.m.
- 5) La turbina es acelerada únicamente con el sistema de control de las válvulas de corte.
- 6) Se considera una sola turbina que sea equivalente a tres.

El sistema que resulta tomando en cuenta estas consideraciones es una masa de inercia " J " girando en un medio viscoso, el par que ejerce el vapor sobre la turbina es regulado por una válvula operada por un sistema hidráulico, ver figura 4.1

Para modelar el sistema presentado en la figura 4.1 se divide

en seis subsistemas funcionales, los cuales son:

a) Subsistema 1: comprende el motor de corriente directa y la carga que representa el sistema mecánico hasta la válvula de copa.

b) Subsistema 2: comprende el circuito hidráulico de aceite - de control.

c) Subsistema 3: comprende la apertura de la válvula de corte y del servomotor en función de la presión de control.

d) Subsistema 4: comprende el flujo de vapor hacia la turbina en función de la apertura de la válvula de corte y de las propiedades del vapor.

e) Subsistema 5: comprende el par que ejerce el flujo de vapor sobre la turbina.

f) Subsistema 6: comprende la velocidad de la turbina en función del par que ejerce el vapor.

A continuación se analiza cada subsistema, obteniendo la expresión matemática que lo rige.

4.3.1 MODELADO DEL SUBSISTEMA 1.

Este subsistema comprende el motor de corriente directa incluyendo la carga que representa el sistema mecánico de transmisión hasta la válvula de copa. En la figura 4.2, se observa el modelo, de donde se tiene:

Ra: resistencia de la armadura.

La: inductancia de la armadura.

ia: corriente de la armadura.

if: corriente de campo.

E: voltaje aplicado a la armadura.

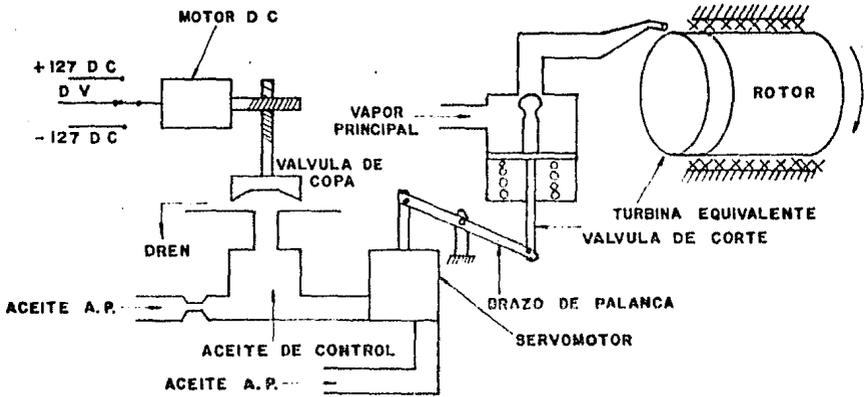


FIG. 4.1 MODELO DEL TURBOGENERADOR EN EL PROCESO DE RODADO.

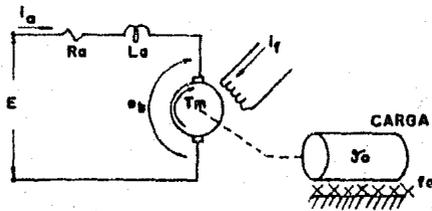


FIG. 4.2 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA CON CARGA.

eb: voltaje inducido

T_m: torque del motor

J_o: momento de inercia equivalente del motor y la carga referida a la flecha del motor.

f_o: coeficiente de fricción de la viscosidad del motor y de la carga referida a la flecha del motor.

Supondremos la magnetización lineal, entonces tiene:

$$\phi = K_f \cdot i_f \quad \text{donde } K_f \text{ es constante}$$

El torque proporcional al flujo y a la corriente de armadura

$$T_m = K_i \cdot K_f \cdot i_f \cdot i_a \quad \text{donde } K_i \text{ es constante}$$

$$T_m = K_T \cdot i_a \quad \text{donde } K_T \text{ es constante de torque}$$

El voltaje inducido proporcional a la velocidad

$$e_b = k_b \cdot v_m \quad \text{donde } K_b \text{ es constante}$$

v_m es la velocidad del motor

La ecuación diferencial de la armadura queda:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = E \quad \text{--- (1)}$$

La ecuación del torque o par queda:

$$J_o \frac{dv_m}{dt} + f_o \cdot v_m = T_m \quad \text{--- (2)}$$

De la ecuación número 2 se tiene:

$$i_a = \frac{J_o}{K_T} \cdot \frac{dv_m}{dt} + \frac{f_o}{K_T} \cdot v_m \quad \text{--- (3)}$$

La ecuación número 3 en la ecuación número 1 se tiene:

$$L_a \frac{d}{dt} \left(\frac{J_o}{K_T} \cdot \frac{dv_m}{dt} + \frac{f_o}{K_T} v_m \right) + P_a \left(\frac{J_o}{K_T} \frac{dv_m}{dt} + \frac{v_m f_o}{K_T} \right) + K_b v_m = E$$

Por ser motor de corriente directa suponemos que: $L_a \approx 0$, quedando:

$$J_o \frac{R_a}{KT} \frac{dv_m}{dt} + \left(\frac{R_a f_o}{KT} + K_b \right) v_m = E$$

Si hacemos las siguientes definiciones:

$$J_{eq} = \frac{R_a J_o}{KT} ; f_{eq} = \frac{R_a f_o}{KT} + K_b ; \tau_m = \frac{J_{eq}}{f_{eq}}$$

La ecuación diferencial del subsistema 1 nos queda:

$$\tau_m \frac{dv_m}{dt} + v_m = K_m E \quad \text{donde } \tau_m \text{ es la constante de tiempo}$$

K_m es la ganancia

4.3.2 MODELADO DEL SUBSISTEMA 2

El subsistema 2 está compuesto por un circuito hidráulico, formado por una bomba de aceite de alta presión, un orificio fijo, una cámara donde se forma la presión de control y una válvula de copa, ver figura 4.3.a. Se considera el flujo del aceite laminar e incomprensible, por lo tanto, se puede modelar con un sistema lineal.

Para encontrar la presión de control se hace una analogía con un circuito eléctrico equivalente, en la figura 4.3.b se muestra dicho circuito. De la figura 4.3.a,b se tiene:

- R_1 es la resistencia hidráulica debida al orificio 1.
- R_2 es la resistencia hidráulica debida a la válvula de copa.
- V_p es la fuente de voltaje que representa a la bomba de aceite.
- I es la corriente eléctrica que representa el gasto hidráulico
- V_c es la tensión en R_2 y representa la presión de control "Pc"

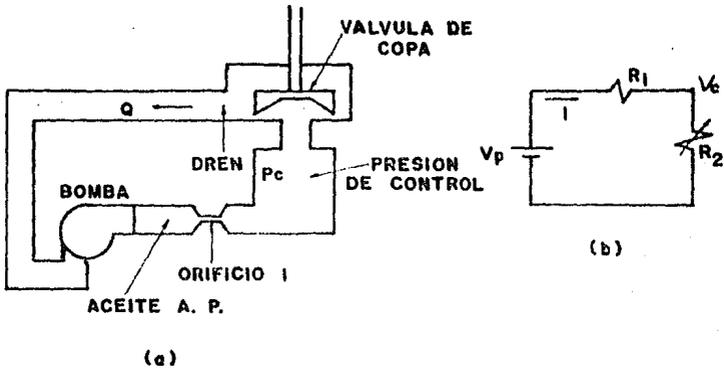


FIG. 4.3 (a) CIRCUITO HIDRAULICO DEL SUBSISTEMA 2.
(b) CIRCUITO ELECTRICO EQUIVALENTE.

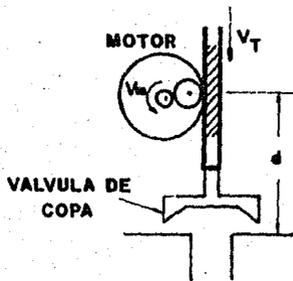


FIG. 4.4 VARIACION DE LA VALVULA DE COPA.

Del circuito eléctrico equivalente, figura 4.3.b se tiene:

$$V_c = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_p \quad \text{---} \quad \textcircled{1}$$

Por ser una divisora de tensión. De las figuras 3.6,7,8,9 se observa que la máxima presión de control para el rodado de la turbina es de 1.6 Kg/cm^2 aproximadamente, la presión del aceite en la descarga de la bomba es de 25 Kg/cm^2 , lo que indica que la mayor caída de presión es debida al orificio 1, de donde podemos concluir:

$$R_1 \gg R_2 \quad \text{es decir} \quad R_1 + R_2 \doteq R_1$$

Entonces se tiene:

$$V_c = \frac{R_2}{R_1} V_p = \frac{V_p}{R_1} R_2 = K_1 \cdot R_2 \quad \text{donde } K_1 \text{ es constante.}$$

De donde se puede obtener la presión de control como:

$$P_c = K_1 \cdot R_2 \quad \text{---} \quad \textcircled{2}$$

Supondremos que para nuestros objetivos la resistencia hidráulica "R2" es proporcional al desplazamiento "d" de la válvula de copa, por sufrir variaciones muy pequeñas, en la figura 4.4 está representado este desplazamiento.

Entonces se tiene:

$$R_2 = K_2 \cdot d \quad \text{donde } K_2 \text{ es constante y depende de la forma de la válvula, la viscosidad del aceite, etc.}$$

La distancia "d" queda determinada por:

$$d = V_T t \quad \text{donde: } V_T \text{ es la velocidad del vástago de la válvula de copa, siendo igual a la velocidad tangencial el engrane que hace contacto con el vástago}$$

$$V_T = r \cdot (K_3 \cdot V_m) \quad \text{donde: } r \text{ es el radio del engrane que toca al vástago; } (K_3 \cdot V_m): \text{ es la velocidad del engrane que toca al vástago de la válvula de copa y es proporcional a la velocidad del motor.}$$

De las dos relaciones anteriores se tiene:

$$d = r \cdot (K_3 \cdot V_m) \cdot t$$

Sustituyendo este valor en el valor de R2, se tiene:

$$R_2 = K_2 \cdot r \cdot (K_3 \cdot V_m) \cdot t = K_4 \cdot V_m t$$

Como la velocidad del motor no es constante se tiene:

$$R_2 = K_4 \cdot \int V_m \cdot dt \quad \text{---} \quad \textcircled{3}$$

Sustituyendo la ecuación número 3 en la ecuación número 2, se tiene:

$$P_c = K_1 \cdot K_4 \cdot \int V_m \cdot dt = K \cdot \int V_m \cdot dt$$

donde: K es una constante para determinar experimentalmente.

4.3.3 MODELADO DEL SUBSISTEMA 3

El subsistema 3 comprende al servomotor, el brazo de palanca y la válvula de estrangulamiento. Lo que nos interesa calcular en este punto es el porcentaje de apertura de la válvula, en función de la presión de control. De la figura 4.1 se observa:

$$A_p = K \cdot Y \quad \text{---} \quad \textcircled{1}$$

donde: A_p : apertura de la válvula

Y : desplazamiento del vástago del servomotor.

K : constante de proporcionalidad debido al brazo de palanca.

Para encontrar el desplazamiento del vástago del servomotor recurrimos al manual: "MEMOS DE OPERACION DE TULA", en donde se

encuentra la gráfica que relaciona el desplazamiento del vástago del servomotor de las válvulas de estrangulamiento en función de la presión de control. Esta gráfica aparece en la figura 4.5 donde se observa que la curva puede ser dividida en dos rectas, que son:

a) Para presión de control de 1.41 a 2.43 Kg/cm²

Pendiente:

$$M_a = \frac{\Delta Y}{\Delta P_c} = \frac{34-0}{2-1.41} = 57.6271 \frac{\text{mm}}{\text{Kg/cm}^2} \text{ aproximado}$$

la ordenada: $b_a = Y_a - M_a \cdot P_c$ se evalúa para el punto p: (1.41,0)
 $b_a = -1.41(57.6271) = -81.2542 \text{ mm}$

por lo tanto: $Y_a = 57.6271 \cdot P_c - 81.2542$

b) Para presión de control de 2.43 a 3.2 Kg/cm²

Pendiente:

$$m_b = \frac{\Delta Y}{\Delta P_c} = \frac{200 - 80}{3.0 - 2.6} = 300 \frac{\text{mm}}{\text{Kg/cm}^2}$$

la ordenada:

$$b_b = Y_b - m_b \cdot P_c; \text{ evaluada en el punto P: } (3.2, 247)$$
$$b_b = 247 - 300(3.2) = -713$$

Por lo tanto queda:

$$Y_b = 300 \cdot P_c - 713$$

Dividiendo ambas ecuaciones con el máximo valor que puede tomar el desplazamiento tenemos:

$$Y_a(P_u) = \frac{Y_a}{247} = 0.2333 P_c - 0.329$$

$$Y_b(P_u) = \frac{Y_b}{247} = 1.2146 P_c - 2.8866$$

De esta manera el máximo valor que puede tener el desplazamiento del vástago es unitario, como deseamos que la máxima apertura de la válvula de corte también sea unitaria, la --

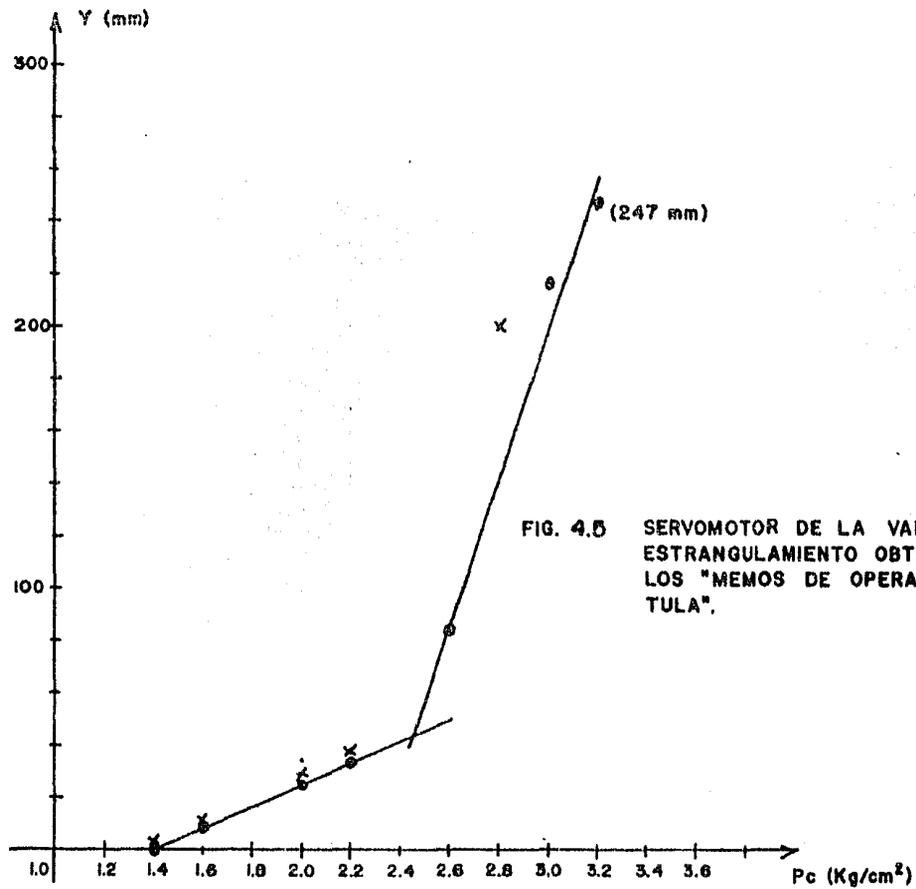


FIG. 4.5 SERVOMOTOR DE LA VALVULA DE ESTRANGULAMIENTO OBTENIDA DE LOS "MEMOS DE OPERACION DE TULA".

constante "K" de la ecuación 1 toma el valor de 1, por lo tanto nos queda:

a) Para la presión de control entre: $1.41 \leq P_c < 2.43 \text{ Kg/cm}^2$

$$A_p = 0.2333 P_c - 0.329$$

b) Para la presión de control entre: $2.43 < P_c \leq 3.2 \text{ Kg/cm}^2$

$$A_p = 1.2146 P_c - 2.8866$$

4.3.4 MODELADO DEL SUBSISTEMA 4.

Este subsistema comprende el flujo de vapor hacia la turbina, controlado por la apertura de la válvula de estrangulamiento. La relación que existe entre la apertura de la válvula, el flujo y las propiedades del vapor está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{W} = 2N6 \cdot F_p \cdot C_v \cdot Y \sqrt{X \cdot P_1 \cdot D_1}$$

El flujo es multiplicado por el número 2 ya que son dos válvulas, de donde:

- \dot{W} : Es el flujo total del vapor
- $N6$: Es una constante y depende del sistema de unidades en que se trabaje.
- F_p : Es un factor de geometría de la tubería.
- C_v : Es el coeficiente de la válvula, está dada por la siguiente ecuación:

$$C_v = C_{v0} \left(\frac{C_{vm}}{C_{v0}} \right)^{APER}$$

donde: C_{v0} es el C_v para la mínima apertura.

C_{vm} es el C_v para la máxima apertura.

A_{per} : es la apertura de la válvula, su valor está entre 0 y 1

- Y : Es el factor de expansión, está dado por la siguiente ecuación:

$$Y = 1 - \frac{X}{3F K \cdot X_T}$$

donde: " FK " y " X_T " son constantes y son obtenidas de tablas.

- X : Es la relación de la caída de presión en la válvula, entre la presión de entrada, esto es:

$$X = \frac{\Delta P}{P_1}$$

- P_1 : Es la presión del vapor a la entrada de la válvula.
- D_1 : Es la densidad del vapor a la entrada de la válvula.

4.3.5 MODELADO DEL SUBSISTEMA 5

Comprende el par-motor que ejerce el vapor sobre la turbina, está determinada por la siguiente ecuación:

$$T = P/V_T$$

donde T: es el par-motor que ejerce el vapor sobre la turbina.
P: es la potencia que desarrolla la -- turbina.
 V_T : es la velocidad angular de la turbina.

La potencia se determina de la siguiente manera:

$$P = \dot{W} (h_1 - h_2) \eta_T$$

donde \dot{W} : es el flujo de vapor.
h1: es la entalpía a la entrada - de la turbina.
h2: es la entalpía a la salida de la turbina.
 η_T : es la eficiencia total de la turbina.

De las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$T = \frac{1}{V_T} \dot{W} (h_1 - h_2) \eta_T$$

4.3.6 MODELADO DEL SUBSISTEMA 6.

Al no existir carga en el generador el rotor se comporta como una masa de inercia "J" girando en un medio viscoso de coeficiente "f", excitado por el par "T" que ejerce el vapor sobre la turbina. Figura 4:6.

De la segunda ley de Newton para sistemas mecánicos se establece:

$$J A_T = \sum T$$

donde J: momento de inercia
 A_T : aceleración angular de la turbina
T: par de excitación.

de donde se tiene:

$$J \frac{dV_T}{dt} + f \cdot V_T = T$$

donde: f es el coeficiente de fricción.

Este modelo no considera las vibraciones del rotor, por esta razón se anexará un generador de vibraciones en los programas de control que compense esta deficiencia.

4.3.7 EVALUACION DEL MOLDEO DEL TURBOGENERADOR.

En este tema se presentará una aproximación de las constantes obtenidas en el desarrollo del modelo del turbogenerador, para esto, se utilizarán las curvas obtenidas en el rodado de la unidad 1 de la C.T.E. de Tula Hidalgo, las tablas de las propiedades del vapor, etc., para posteriormente ajustar su valor -- con ayuda de una computadora. Naturalmente, se harán algunas consideraciones que nos permitan simplificar las ecuaciones -- que describen al modelo, pues lo que se pretende en este trabajo es conocer el comportamiento global del sistema, y no el comportamiento de cada una de sus partes.

Las constantes a determinar son: $G_m, K_m, K, N_G, F_p, C_v, Y, n_T, J, f$.

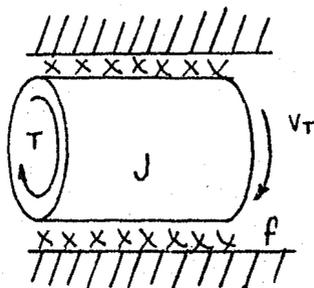


FIGURA 4.6 Modelo del rotor del turbogenerador.

4.3.7.1 EVALUACION DE τ_m , K_m , K

Las ecuaciones que involucran estos tres parámetros, son las siguientes:

$$\tau_m \frac{dV_m}{dt} + V_m = K_m \cdot E \dots \textcircled{1}$$

de donde:

τ_m : es la constante de tiempo del subsistema 1.

K_m : es la ganancia del subsistema 1.

E : es la excitación al sistema, puede tener los valores de $--$
 $(-1, 0, 1)$.

$$P_c = K \cdot \int V_m \cdot dt \dots \textcircled{2}$$

K : es la ganancia del subsistema 2

Despejando V_m de la ecuación número 2, se tiene:

$$V_m = \frac{1}{K} \frac{dP_c}{dt}$$

Sustituyendo " V_m " en la ecuación número 1, se tiene:

$$\tau_m \frac{d^2 P_c}{dt^2} + \frac{dP_c}{dt} = K_m \cdot K \cdot E \dots \textcircled{3}$$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$P_c = P_{ch} + P_{cp}$$

La ecuación homogénea es: $\tau_m \frac{d^2 P_c}{dt^2} + \frac{dP_c}{dt} = 0$

La ecuación auxiliar: $\tau_m \Gamma^2 + \Gamma = 0$

Las raíces: $r_1 = 0$, $r_2 = -1/\tau_m$

La solución homogénea es: $P_{ch} = C_1 + C_2 \exp(-t/\tau_m)$

Una solución particular es: $P_{cp} = K_m K E t$

La solución general es:

$$P_c = C_1 + C_2 \exp(-t/\tau_m) + K_m K E t \dots \textcircled{4}$$

Para evaluar esta ecuación se hará uso de la gráfica que aparece en la figura 3.6, en donde se puede apreciar el inicio del rodado de la turbina, esta gráfica fue seleccionada ya que en ella se puede apreciar un pulso de voltaje relativamente grande, pudiéndose considerar este como un escalón unitario de excitación.

Estando la velocidad de la turbina en 400 r.p.m. y una presión de control de 1.5 Kg/cm^2 , el operario colocó el interruptor del controlador de las válvulas de estrangulamiento en "bajar" ($E=-1$) por un tiempo aproximado de 15 seg., la presión de control disminuyó a un valor de 1.2585 Kg/cm^2 .

En la figura 4.7 se puede apreciar mejor esta variación.

Evaluando la presión de control para $t=0$ y $t=.148848$, de la ecuación 4, se tiene: $P_c(0) = C_1 + C_2 = 1.5 \dots \textcircled{5}$

$$P_c(0.148848) = C_1 + C_2 \exp(-0.1488/\tau_m) - K_m K (0.148848) = 1.3689 \dots \textcircled{6}$$

También se puede apreciar que a partir de $t=0.14176$ aproximadamente, la presión de control tiene una variación lineal, lo que implica que los efectos de la exponencial empiezan a

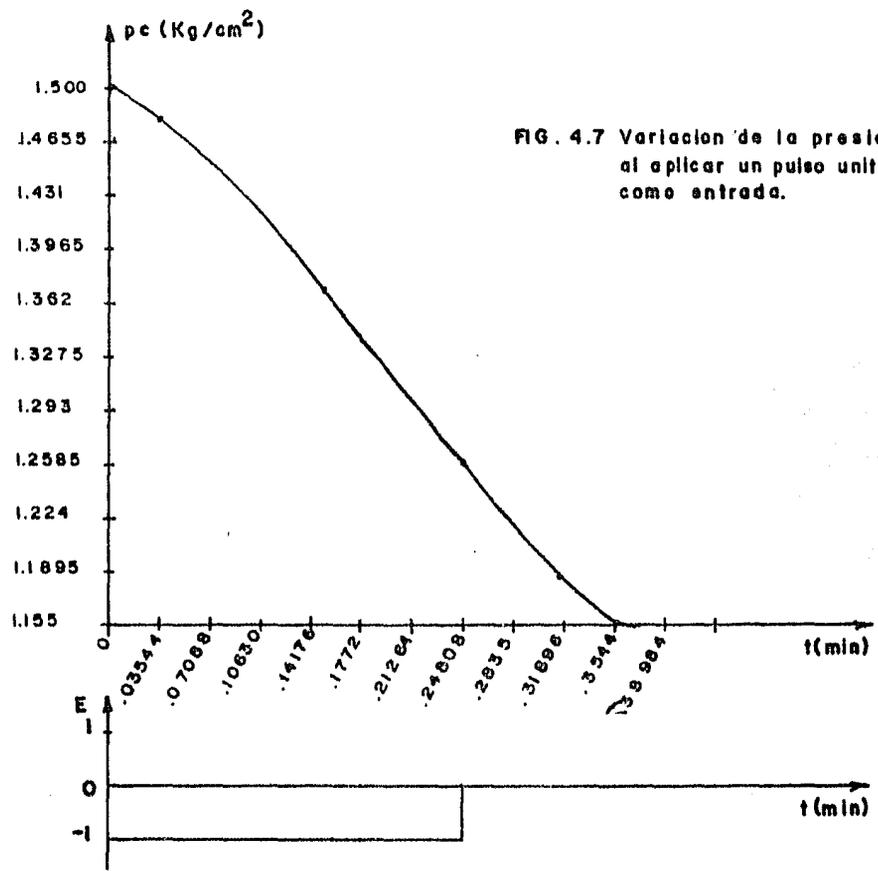


FIG. 4.7 Variacion de la presión de control al aplicar un pulso unitario negativo como entrada.

ser despreciables, la ecuación de la recta comprendida en el tramo (0.14176 a 0.24808 min.) es la siguiente:

$$P_c = 1.534 + (-1.119) t \dots \textcircled{7}$$

Como en este intervalo de tiempo P_c es muy parecida a P_c^e se hace una semejanza entre las ecuaciones "6" y "7", obteniendo los siguientes resultados:

$$C_2 \exp(-0.1488/\bar{t}_m) \doteq 0 \dots \textcircled{8}$$

$$C_1 = 1.534$$

$$K_m K = 1.119$$

No es tan importante conocer el valor de K_m y K por separado, ya que ambas forman un valor constante y se puede cargar a -- cualquiera de las ecuaciones "1" o "2", el valor de " C_2 " es -- el siguiente:

$$C_2 = 1.5 - C_1 = 1.5 - 1.534 = -0.034$$

Sustituyendo estos valores a la ecuación "4" nos queda:

$$P_c = 1.543 - 0.034 \exp(-t/\bar{t}_m) + 1.119 Et \dots \textcircled{9}$$

Para encontrar el valor de \bar{t}_m , se evalúa la ecuación "9" -- en el punto ($t=0.03544$, $P_c=1.481$), de donde se tiene:

$$1.534 - 0.034 \exp(-0.0354/\bar{t}_m) - 1.119 (0.03544) = 1.481$$

$$\exp(-0.0354/\bar{t}_m) = 0.3924$$

$$\therefore \bar{t}_m = 0.038 \text{ min.}$$

Con estos resultados obtenidos, se sustituyen en la ecuación "8" para verificar si se cumple la suposición realizada.

$$C2 \exp (-0.1488/6m) = -0.00067 \pm 0$$

Con esto se confirma que se tiene una buena aproximación de los parámetros calculados.

4.3.7.2 EVALUACION DE : N_6 , F_p , C_v , Y , η_T , J , f .

Para fines del controlador de rodado automático propuesto - en esta tesis, no es necesario evaluar el flujo de vapor (\dot{w}) el par de la turbina (T), el coeficiente de fricción (f), - etc., solo interesa conocer el efecto final, esto es, la velocidad de la turbina (V_T), en función de las variables de entrada, como lo son: la presión y la temperatura del vapor y los pulsos de voltaje que se aplican al motor del controlador de las válvulas de estrangulamiento.

La ecuación que rige el flujo de vapor es:

$$\dot{w} = 2N_6 F_p C_v Y \sqrt{X \cdot P_1 \cdot D_1} \dots \dots \textcircled{1}$$

Sean $2N_6 F_p = K_1$ por ser constantes

La ecuación del coeficiente de la válvula es:

$$C_v = C_{v0} (C_{vm}/C_{v0})^{APER}$$

De donde se observa que si $APER=1$ entonces $C_v=C_{vm}$, y si $APER=0$ $C_v= C_{v0}$. Esta relación es de tipo exponencial, característico en las válvulas, pero cuando la apertura de la válvula es menor al 10% ($APER \leq .01$), esta relación puede ser aproximada a una función lineal, de la forma:

$$C_v = K_2 (APER) \dots \textcircled{2}$$

Esto es de gran utilidad para nuestro caso, ya que durante el rodado de la turbina, la válvula de estrangulamiento no se abre más del 10% antes de que las válvulas gobernadoras tomen el control de la velocidad de la turbina. Cuando la presión de control toma el valor de 1.4 Kg/cm^2 aproximadamente, las válvulas de estrangulamiento están totalmente cerradas, y cuando toma el valor de 3.2 Kg/cm^2 , las válvulas están totalmente abiertas, ver figura 4.5 Durante el rodado el valor de la presión de control no llega a ser mayor que 1.7 Kg/cm^2 , ver figura 3.6, 7, 8, 9, que representa el 6.8% de la apertura total (de la ec. del subsistema 3). Por esta razón se tomará la ecuación "2" para el cálculo de Cv.

La ecuación para el valor de "X" es:

$$X = \frac{\Delta P}{P_1} = \frac{P_1 - P_2}{P_1}$$

De donde P_2 es la presión despues de la válvula, por las mismas razones presentadas para el cálculo de Cv, se supone que las variaciones de P_2 son muy pequeñas comparadas con el valor de P_1 , de tal forma que se pueden considerar constantes, esto es:

$$P_2 = K_3 \cdot P_1; \text{durante el rodado, donde } K_3 \ll 1$$

entonces se tiene:

$$X = \frac{P_1 - K_3 P_1}{P_1} = \frac{P_1 (1 - K_3)}{P_1} = K_4$$

Esto coincide con las curvas obtenidas en el rodado de la Unidad 1 de la C.T.E. de Tula Hidalgo, en donde la presión del paso Curtis permanecía casi constante. La presión del paso Curtis no fué graficada en las figuras 3.6, 7, 8, 9, ya que su valor se graficó en una escala total de 160 Kg/cm^2 (igual que la del vapor principal), y su valor casi no se despegó de la línea de cero.

Si el valor de "X" es constante, "Y" también es constante, esto es:

$$Y = 1 - \frac{X}{3 FK XT} = 1 - \frac{K4}{3FK XT}$$

donde FK y KT son constantes.

Sea: $K5 = K1 K2 Y \sqrt{K4}$ la ecuación "1" nos queda:

$$\dot{W} = K5 (APER) \sqrt{P1 D1} \dots \dots \textcircled{3}$$

La ecuación que describe el par de la turbina es:

$$T = \frac{1}{V_T} \dot{W} (h1-h2) n_T \dots \dots \textcircled{4}$$

De donde "h1" es la entalpía a la entrada de la turbina y "h2" es la entalpía a la salida de la turbina. Como no se cuenta con los valores de presión y temperatura del vapor a la entrada de la turbina, se tomarán los valores antes de la válvula de estrangulamiento, despreciando por consiguiente la caída de entalpía de dicha válvula, se tomará la eficiencia constante. De las ecuaciones "3" y "4" se tiene:

$$T = \frac{1}{V_T} K6 \cdot (APER) \cdot \sqrt{P1 \cdot D1} \cdot (h1-h2) \dots \dots \textcircled{5}$$

de donde $K6 = K5 \cdot n_T$

La ecuación "5" relaciona el par de la turbina, la velocidad del rotor del turbogenerador y el flujo de vapor a través de los álabes de la turbina, todo esto bajo condiciones de estado estable (sin existir aceleración en el rotor).

El modelo que describe al rotor del turbogenerador es el siguiente:

$$J \frac{dV_T}{dt} + f \cdot V_T = T$$

Dividiendo entre el coeficiente de fricción "f" se tiene:

$$\frac{J}{f} \frac{dV_T}{dt} + V_T = \tau_T \frac{dV_T}{dt} + V_T = \frac{T}{f} \dots \textcircled{6}$$

De donde τ_T es la constante de tiempo del rotor, para poder evaluarla se hace uso de la gráfica de la figura 3.9, en -- donde se aprecia el disparo de la unidad. La línea puntea-- da que aparece en la curva de la velocidad de la turbina es una extrapolación, pues no se contó con los puntos experi-- mentales en esta zona, esta es la causa por lo que no se -- puede conocer directamente el valor de τ_T , correspondien-- te al 63.2% del valor de la velocidad inicial.

La solución de la ecuación diferencial "6" sin excitación y con velocidad inicial V_{T0} es:

$$V_T = V_{T0} \cdot \exp(-t/\tau_T)$$

Despejando " τ_T " se tiene:

$$\frac{V_T}{V_{T0}} = \exp(-t/\tau_T)$$

$$\ln \frac{V_T}{V_{T0}} = - \frac{1}{\tau_T} t$$

$$\therefore \tau_T = - \frac{t}{\ln \left(\frac{V_T}{V_{T0}} \right)} \dots \textcircled{7}$$

Para encontrar el valor de " τ_T " se evaluará la ecuación "7" en varios puntos de la curva de velocidad de la turbina de la figura 3.9, que nos permita sacar un promedio de todos ellos.

Con $V_{T0} = 2249$ r.p.m. y los tiempos tomados a partir del disparo, se tiene:

Para el punto (2 min., 1,820 r.p.m.):

$$\bar{v}_T = 9.4496 \text{ min.}$$

Para el punto (4min., 1,560 r.p.m.):

$$\bar{v}_T = 10.935 \text{ min.}$$

Para el punto (6min., 1,306.5r.p.m.):

$$\bar{v}_T = 11.047 \text{ min.}$$

Para el punto (8min., 1,118 r.p.m.):

$$\bar{v}_T = 11.446 \text{ min.}$$

Para el punto (10min., 955.5 r.p.m.):

$$\bar{v}_T = \frac{10}{\ln \left(\frac{955.5}{2249} \right)} = 11.682 \text{ min.}$$

El promedio de todos ellos es: $\bar{v}_T = 1091$ min. que aproximadamente toma el valor de $\bar{v}_T = 11$ min. Entonces la ecuación "6" nos queda:

$$11 \frac{dVT}{dt} + VT = \frac{T}{f} \dots \textcircled{8}$$

Esta ecuación queda representada en la figura 4.8 en donde se

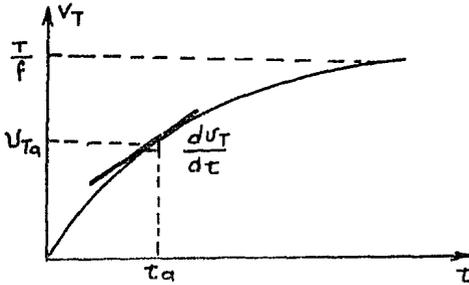


Figura 4.8 representación de la ecuación "7".

puede observar que la velocidad de la turbina en estado estable toma el valor de: T/f . Esto es importante para nuestros objetivos, ya que podemos sustituir este valor en la ecuación "5", esto es:

$$V_T = \frac{T}{f}$$

$$T = \frac{1}{\frac{T}{f}} K_6 (APER) \sqrt{P_1 \cdot D_1} (h_1 - h_2)$$

$$\frac{T^2}{f} = K_6 (APER) \sqrt{P_1 \cdot D_1} (h_1 - h_2)$$

Dividiendo esta ecuación entre f se tiene:

$$\frac{T^2}{f^2} = \frac{K_6}{f} (APER) \sqrt{P_1 \cdot D_1} (h_1 - h_2)$$

$$\left(\frac{T}{f}\right)^2 = K_7 (APER) \sqrt{P_1 \cdot D_1} (h_1 - h_2) \dots \textcircled{9}$$

De la ecuación "8" y "9" tenemos:

$$\left(11 \frac{dVT}{dt} + VT \right)^2 = K7 (APER) \sqrt{P1 \cdot D1} (h1-h2) \dots \textcircled{10}$$

La ecuación "10" nos será de gran utilidad para poder evaluar la constante "K7", haciendo uso de las figuras 3.7, 8 9, la gráfica de la figura 3.6 no será usado, ya que en ese tiempo por descuido las válvulas gobernadoras no estaban al 100% de su apertura, se utilizarán las tablas de vapor para evaluar la entalpía y la densidad. Todas las unidades serán en el sistema internacional, excepto el tiempo que será medido en minutos.

Presión "P" en (Kg/cm²)

Entalpía "h" en (KJ/Kg)

Densidad "D" en (Kg/m³)

Velocidad "V_T" en (r.p.m.)

Entonces las unidades de la constante K₇, es:

$$K7 = \left[\frac{(r.p.m.)^2}{\frac{KJ}{Kg} \sqrt{\frac{Kg}{cm^2} \frac{Kg}{m^3}}} \right]$$

La entalpía 2 (h2) para todos los casos es:

Vacío en el condensador = 500 mm Hg = 0.3466 Kg/cm²

Temperatura nominal de salida = 100°C

de tablas se tiene: h2 = 2684.97 KJ/Kg

Las temperaturas de vapor no fueron medidas, se evaluarán basandose en el rodado típico de la turbina bajo endiciones iniciales frias, semejante al rodado registrado (figura 3.1), en donde se puede apreciar que a cada nivel de presión le corresponde una determinada temperatura.

Para poder evaluar a K7 se usaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{APER: } 0.2294Pc - 0.3212$$

$$\left(\frac{T}{f}\right)^2 = \left(11 A_T + V_T\right)^2 \quad \text{donde: } A_T \text{ es la aceleración de la turbina.}$$

$$S = (\text{APER}) \sqrt{P1 \cdot D1} \quad (h1-h2)$$

Entonces "K7" queda definido de la siguiente manera:

$$K7 = (T/f)^2/S$$

Se tomaron los siguientes puntos (Tabla: 4.1). De donde de observa que:

$$K7 = 5.526 \times 10^3$$

	PLM ² 0	VF	AV	(T/F) ² × 10 ⁶	Fe	SMER	PV	γ _v	D	h	s	87 × 10 ³
1	785	27.5	1.0530	1.515	0.02634	70	367	26.518	3069.63	429.724	7.1046	
2	790	6	0.63563	1.385	0.01916	71	370	26.762	3069.7	362.39	1.9364	
3	800	12.5	0.8788	1.5	0.0229	71	370	26.762	3069.74	368.085	2.2663	
4	810	25	1.1777	1.57	0.01163	72	373	27.014	3075.95	276.235	4.2616	
5	798	07.5	1.416	1.575	0.02634	72	373	27.014	3075.95	454.138	3.184	
6	875	0	0.7654	1.385	0.01944	72.5	374	27.134	3079.6	360.67	2.246	
7	810	0	0.664	1.485	0.01944	73	376	27.275	3082.3	344.91	1.9019	
8	800	0	0.640	1.465	0.01944	73.5	377	27.434	3083.99	348.69	1.935	
9	850	0	0.7225	1.385	0.01944	75	382	27.998	3096.99	306.954	1.9598	
10	920	18.75	1.2604	1.5	0.0229	75	381	27.821	3092.2	446.731	2.820	
11	1050	36.25	2.7647	1.515	0.02634	76	384	28.183	3098.8	501.5	5.5108	
12	1240	37.5	4.631	1.53	0.02978	76	384	28.1869	3098.84	570.385	8.5	
13	1335	43.75	3.2988	1.515	0.02634	75.5	383	27.9998	3094.49	498.99	6.611	
14	1630	50	4.7525	1.531	0.02978	75	381	27.8926	3092.34	554.732	0.567	
15	1770	43.75	5.0681	1.545	0.03322	75	381	27.8926	3092.34	523.089	9.6888	
16	2035	37.5	5.9803	1.545	0.03322	71	376	27.2744	3082.36	588.995	10.172	
17	2100	50	7.0225	1.56	0.03666	73	376	27.2744	3082.36	649.887	10.600	
18	1800	-25	2.4964	1.53	0.02978	73	373	27.0142	3075.95	513.5	4.862	
19	1800	0	3.24	1.545	0.03322	71	370	27.7622	3069.74	557.176	5.015	
20	1670.5	32.5	4.1178	1.575	0.04011	69	365	26.2155	3060.46	640.588	6.42	
21	1735.5	31.25	6.913	1.56	0.03666	69	365	26.2155	3060.46	585.451	11.808	
22	2249	-16.25	4.2855	1.515	0.02634	145	450	50.3	2156	1060.77	4.04	
23	2249	48.75	7.7576	1.53	0.02978	160	500	51.036	2294.44	1640.12	4.73	

TABLA 4.1

K7 = 5,526 × 10³

103

4.4 MODELO DEL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO.

El rodado de la unidad 1 de la C.T.E. de Tula Hidalgo, lo realizan operarios basados en el entrenamiento, en experiencias acumuladas y en las curvas del rodado recomendadas por el fabricante. En el capítulo: "Arranque del Turbogenerador" se observa que utilizan cuatro curvas en el rodado, cada una de ellas para un tiempo diferente de calentamiento. Entonces se selecciona una de ellas dependiendo del tiempo en que ha estado parada la unidad (es una forma de estimar la temperatura inicial de la turbina).

El encargado de acelerar el rotor, observa la velocidad de la turbina y aplica pulsos de voltaje al motor del controlador de las válvulas de estrangulamiento, tratando de ajustar la velocidad a la recomendada en la curva de rodado seleccionada, y revisando constantemente los supervisorios de la turbina.

El trabajo a realizar por el controlador de rodado automático es semejante al del operario y se puede resumir de la siguiente manera: una vez cumplidos los preparativos para el arranque, se pedirá el tiempo de haber estado parada la unidad, y la autorización para acelerar la turbina. Con esto, el controlador genera una curva de rodado, la velocidad del rotor se ajusta a la curva generadora si los supervisorios lo permiten. Si la temperatura diferencial del vapor y metal en la cámara de impulso sale fuera del rango permitido, se mantendrá la velocidad del rotor constante, hasta que sea corregida la anomalía. Dependiendo del valor de la excentricidad/vibraciones, debe tomar alguna de las siguientes decisiones: rodado normal, mantener la velocidad constante, bajar velocidad, disparo de la unidad.

4.4.1 SISTEMA DE CONTROL.

Para poder realizar el control sobre la velocidad de la turbina, es necesario proponer un sistema de control, el cual sujete la velocidad del rotor y la haga cumplir el patrón de rodado correspondiente. Basándonos en la teoría de control se propone el sistema de control de la figura 4.9

En la figura 4.9 se puede observar que el sistema de control - está compuesto por los siguientes bloques:

- 1) La Planta: en este caso es el turbogenerador, el cual tiene una sola entrada y varias salidas. La entrada corresponde al interruptor del motor del controlador de las válvulas de estrangulamiento, existen tres estados: "subir", "bajar" y "neutro". Las salidas son: la velocidad de la turbina, la excentricidad/vibraciones de la flecha del turbogenerador, la temperatura diferencial del vapor y el metal en la cámara de impulso. Existen otras salidas, como lo son: los preparativos del arranque y los demás supervisorios, que no son utilizados para este sistema de control.
- 2) Bloque generador de pulsos. Este bloque tiene una entrada y una salida, la entrada le corresponde la señal de error "e", que es la diferencia entre el punto de ajuste (P.A.) y la aceleración del rotor. La salida corresponde a pulsos unitarios de duración variable; si son positivos representa "subir"; si es negativo representa "bajar"; si es cero, representa "neutro".
- 3) Bloque derivador: este bloque tiene una entrada y una salida, la entrada es la velocidad de la turbina, la salida es la aceleración de la turbina, esto es, solamente deriva de velocidad.
- 4) Bloque generador del punto de ajuste (P.A.): este bloque -- tiene varias entradas y una salida, las entradas son: la velo-

cidad de la turbina, la excentricidad/vibraciones, la temperatura diferencial del vapor y el metal en la cámara de impulso. La salida es el punto de ajuste (P.A.). Este bloque es el encargado de dirigir todo el rodado.

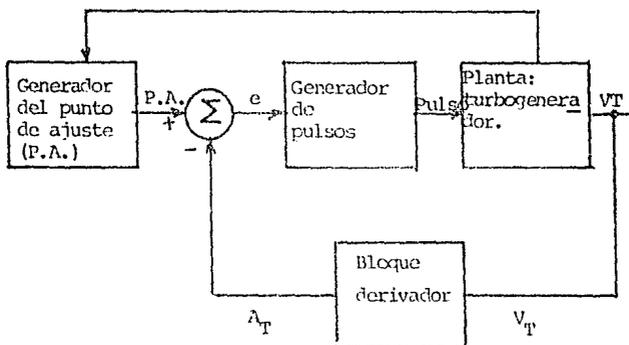


Figura 4.9 Sistema de control de rodado automático del turbogenerador.

El funcionamiento es el siguiente: ver figura 4.9. Al inicio del rodado, con los preparativos del arranque ya cumplidos y otorgado el tiempo de estar parada la unidad, el bloque generador del punto de ajuste (P.A.), calcula los tiempos de calentamiento, conoce la velocidad a la cual se deben aplicar estos tiempos y la aceleración que debe tener el rotor. Para poder operar, toma la velocidad del turbogenerador, así como, la excentricidad/vibraciones y la temperatura diferencial del vapor y metal en la cámara de impulso, con esto, genera el punto de ajuste que para este caso, es la aceleración que debe tener el turbogenerador en ese momento.

El bloque derivativo, toma la velocidad del rotor y la deriva, la señal de error, se forma a partir de la diferencia del P.A. y la aceleración del rotor. El generador de pulsos toma la señal de error "e" y genera un pulso. Al aplicar un pulso al turbogenerador, este cambia su velocidad, la cual es derivada por el bloque derivador y comparada con el P.A. Deja de haber pulsos cuando el error "e" es cero.

De esta manera la velocidad del turbogenerador es controlada por el bloque generador de P.A., siendo este, el encargado de dirigir todo el rodado.

4.4.2 BLOQUE GENERADOR DE PULSOS.

Consultando la curva del rodado de la Unidad 1 de Tula Hidalgo, figura 3.6 se observa: El operario aplica un pulso y espere un momento, observa el cambio de velocidad que sufre el -- turbogenerador como resultado del pulso aplicado. Si el cambio de velocidad deseado es muy grande, aplica una ráfaga de pulsos todos ellos de aproximadamente la misma duración.

El trabajo del bloque generador de pulsos, es el mismo que el del operario, con las siguientes características:

- a) Si el error es positivo, lo que indica que el punto de ajuste (P.A.) se encuentra por arriba de la aceleración de la turbina, entonces se requieren pulsos positivos que suban la velocidad de la turbina.
- b) Si el error es negativo, lo que indica que el punto de ajuste (P.A.) se encuentra por abajo de la aceleración de la turbina, entonces se requieren pulsos negativos que bajen la velocidad del rotor.
- c) Si el error es pequeño, se requiere de un pulso de poca duración para corregir el error.
- d) Si el error es grande, se requiere de un pulso de mucha duración a diferencia del operario que aplica muchos pulsos de poca duración.
- e) En el momento que se aplica un pulso para corregir un error, es necesario esperar un determinado tiempo que nos permita detectar el efecto que sobre la velocidad tiene el pulso; debido a las constantes de tiempo que aparecen en el modelo y

principalmente la del rotor del turbogenerador.

f) Si el error es menor que un valor determinado "Ke" no debe sacar pulsos, por considerarlos innecesarios.

4.4.2.1 Calculo del pulso y su respaldo.

En la figura 4.10 aparece la forma del pulso y su respaldo, - del cual se tiene:

$$D = t_2 - t_1$$

$$R = t_3 - t_2$$

donde: t_1 : es el tiempo de inicio del pulso.

t_2 : es el tiempo final del pulso y tiempo de inicio del respaldo.

t_3 : tiempo final del respaldo.

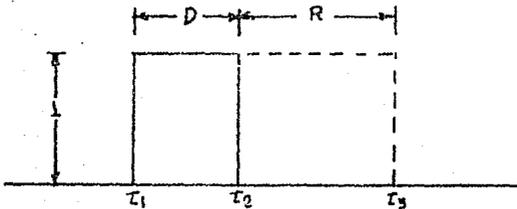


FIGURA 4.10 Pulso unitario, salida del bloque generador de pulsos.

Entonces se tiene:

$$D = Kpe$$

D: duración del pulso

R: duración del respaldo

Kp: constante de proporcionalidad, para ser determinada experimentalmente.

e: señal de error.

El tiempo de respaldo es una protección, el cual evita que -- existan pulsos aún cuando exista señal de error. El elemento de consideración en el rodado es el rotor del turbogenerador, ya que presenta un momento de inercia muy grande, y por consiguiente una constante de tiempo grande (comparada con los otros elementos del modelo), entonces se tiene:

$$R = TR + TI$$

donde: TR: tiempo de respaldo, debido al rotor del turbogenerador.

TI: tiempo de respaldo, debido a otros elementos del modelo.

Como en el rodado se exige aceleración constante o cero, el - cálculo de "TR" se hace con el modelo del rotor del turbogenerador, esto es:

El modelo del rotor es de la siguiente manera:

$$\tau_T (dv_T/dt) + v_T = T/f$$

Ya que solo interesa la variación, se hace: $T/f = F$, quedando:

$$\tau_T (dv_T/dt) + v_T = F \dots \textcircled{1}$$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$v_T = F (1 - \exp (- t/\tau_T)) \dots \textcircled{2}$$

Nos representa la variación de la velocidad al aplicarle un es calón de valor "F", ver figura 4.11.a.

Como interesa la variación de la velocidad, o sea, la aceleración, se tiene:

$$dv_T/dt = (F/\tau_T) \exp (-t/\tau_T) \dots \textcircled{3}$$

Ver figura 4.11.b Para poder determinar el tiempo de respaldo debido al rotor "TR" es necesario fijar un intervalo de tiempo en el que tarda en variar la aceleración del rotor lo suficiente, antes de aplicar el siguiente pulso de excitación.

En la figura 4.10.b, se observa que el valor de "TR" le corresponde el valor de "K" y el intervalo de cambio de la aceleración "D" es:

$$D = F/\tau_T - K$$

Si "D" lo igualamos a un porcentaje "a" del valor máximo de la aceleración F/τ_T , se tiene:

$$F/\tau_T - K = a \cdot F/\tau_T$$

a: es una fracción y representa el porcentaje máximo de cambio de aceleración permitido, antes de aplicar otro pulso.

Despejando "K" tenemos:

$$K = F/\tau_T (1-a)$$

Evaluando en la ecuación "3" el punto formado por "TR" y "K", queda:

$$K = (F/\tau_T) \exp(-TR/\tau_T) = (F/\tau_T) (1-a)$$

Despejando "TR" se tiene:

$$TR = -\tau_T \ln(1-a)$$

El valor de "a" se determinará experimentalmente.

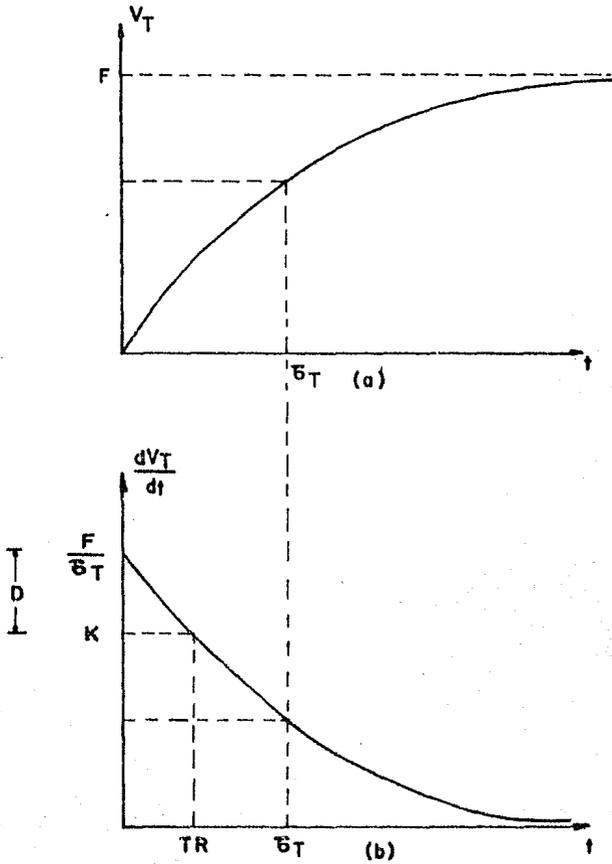


FIG. 4.11 a: Respuesta de la velocidad de la turbina a un escalón unitario.
 b: Respuesta de la aceleración de la turbina al mismo escalón unitario.

Para evaluar "TI", se consideran los valores de las constantes de tiempo que aparecen en el modelo del turbogenerador, para nuestro caso solo se considera la constante de tiempo - del motor del controlador de las válvulas de estrangulamiento, esto es:

$$TI = \tau_m$$

Entonces para el respaldo del pulso se tiene:

$$R = (-\tau_m) \ln (1 - a) + \tau_m$$

4.4.3 BLOQUE DERIVADOR.

Este bloque es el encargado de derivar la señal de velocidad de la turbina, teniendo como salida la aceleración de la misma. En la figura 4.12 aparece la forma de calcularla.

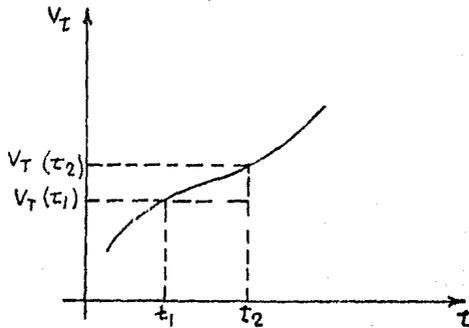


Figura 4.12 Cálculo de la aceleración de la turbina.

La aceleración queda determinada como:

$$A_T = \frac{V_T (t_2) - V_T (t_1)}{Dt}$$

donde: $V_T(t_2)$; es la velocidad de la turbina en el tiempo actual " t_2 ".

$V_T(t_1)$; es la velocidad de la turbina en el tiempo " t_1 " anterior - al tiempo " t_2 ".

$\Delta t = t_2 - t_1$, es el incremento - del tiempo en que se hace el muestreo.

Para hacer el cálculo de la aceleración, es necesario considerar el tiempo de muestreo, hacer el Δt lo mas pequeño que sea posible y definir cual será la aceleración al realizar el -- cálculo del error "e".

4.4.4 BLOQUE GENERADOR DEL PUNTO DE AJUSTE.

Como se mencionó anteriormente, este bloque es el encargado - de dirigir el rodado de la turbina, para lograrlo, cuenta con módulos lógicos, dependiendo del estado de la turbina, deciden que aceleración se debe tener en ése momento.

Para cualquier cambio imprevisto en el rodado, este bloque es el que se comunica con el operario, por los objetivos de este trabajo, no se definirá esa comunicación, suponiendo que todos los rodados son normales, que todos los preparativos del arranque son cumplidos y que se cuenta siempre con la autorización para iniciar el rodado.

En este bloque, están definidos cinco módulos funcionales, -- que conjuntamente definen el punto de ajuste (P.A.). Figura -- 4.13 estos son:

a) Módulo que calcula el tiempo de calentamiento y las aceleraciones: el objetivo de este módulo es el cálculo de los --- tiempos de calentamiento en 400 r.p.m. y en 2,400 r.p.m., -- así también como las aceleraciones que debe tener el rotor, - para hacer estos cálculos, utiliza el tiempo en que ha estado

parada la unidad medido en horas.

b) Módulo detector de velocidad: este módulo se encarga de generar la curva de rodado a ejecutar, toma la señal de velocidad de la turbina y decide que punto de ajuste debe existir - en ese momento. Este módulo define el rodado si no existen - anomalías en el turbogenerador.

c) Módulo detector de la diferencia de temperatura del vapor y el metal en la cámara de impulso: cuando la temperatura se encuentra en un rango permitido, este módulo no interviene en el rodado, pero cuando ocurre lo contrario, mantiene la velocidad del rotor constante, hasta que sea corregida la anomalía. Este módulo tiene más prioridad que el anterior.

d) Módulo detector de la excentricidad/vibraciones: Para dirigirir el rodado, este módulo es el que tiene la mas alta prioridad toma el valor de la excentricidad/vibraciones y lo compara -- con cuatro diferentes niveles ya definidos. Dependiendo del nivel que le corresponda, toma alguna de las siguientes decisiones: mantener rodado normal, mantener la velocidad constante, disminuir la velocidad, disparo de la unidad.

e) Módulo acoplador: este módulo es el encargado de acoplar - la señal de P.A. sugerida por los módulos anteriormente explicados, y el P.A. que se va a comparar con la aceleración de la turbina. Esto es debido principalmente a las características del rotor del turbogenerador, que no permite hacer cambios bruscos de velocidad, con este módulo se hacen suavemente.

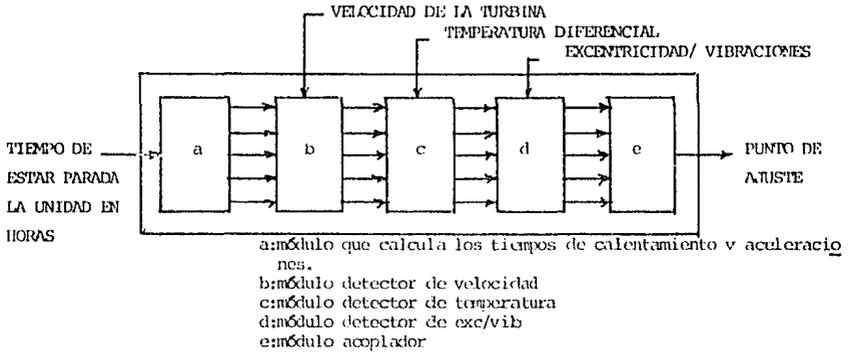


FIGURA 4.13 Bloque generador del punto de ajuste (P.A.), en donde: son señales de realimentación: la velocidad, la temperatura y exc/vib.

La señal de salida es: el punto de ajuste.

La señal de inicio de rodado: el tiempo de estar parada la unidad.

4.4.4.1 MODULO ACOPLADOR.

El objetivo de este módulo es hacer suave los cambios de aceleración que se piden en el rodado de la turbina, además, colocar la velocidad del rotor a un valor deseado, aún cuando se esté comparando aceleración. El algoritmo matemático que satisface estos objetivos es el siguiente:

$$P.A. = P (1 - (V_T/V_F)^N)$$

donde: P.A.: es punto de ajuste.

P : es aceleración deseada de la turbina (pendiente de las curvas de rodado).

VT : velocidad de la turbina.

VF: velocidad a la cual se requiere llegar (velocidad de calentamiento).

N : es una constante que determina la suavidad de cambio de aceleración.

Para poder entender esta ecuación se evalúa para la primera etapa del rodado, esto es, de 3 a 400 r.p.m. a una aceleración de 200 r.p.m./min. En la figura 4.14 es graficada esta ecuación para diferentes valores de "N" en donde se aprecia: -- N = 1, el cambio de aceleración de 200 r.p.m./ min. a 0.0 - r.p.m./min. es lineal y cuando "N" es muy grande ($N \rightarrow \infty$) el cambio es instantáneo, entre estos dos casos existe una amplia gama de curvas para satisfacer nuestros objetivos, - el valor de "N" debe ser encontrado experimentalmente.

Se observa además que el P.A. es cero cuando $V_T=V_F$, lo que significa que la aceleración es cero cuando la velocidad de la turbina llega a ser igual a la velocidad de calentamiento.

Para poder evaluar esta ecuación se requieren: P, V_T , V_F , - N, variables que debe de recibir de los otros módulos. En la figura 4.15 queda definido este módulo:

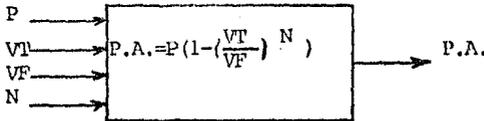


FIGURA 4.15 Módulo acoplador

4.4.4.2 MODULO DETECTOR DE LA EXCENRICIDAD/VIBRACIONES.

Uno de los parámetros del turbogenerador, que no deben ser olvidados durante el rodado son: la excentricidad y las vibraciones, pues estos indican el estado anormal en la operación, y - de no ser considerados llevarían el rodado al fracaso, dañando el rotor del turbogenerador.

El objetivo de este módulo es llevar a cabo las acciones correctivas que recomienda el fabricante cuando el valor de estos llega a ser anormal, teniendo la prioridad mas alta para cambiar la velocidad del rotor. Los límites de operación aparecen en el tema "Supervisorios de la turbina". El módulo está definido como aparece en la figura 4.16.

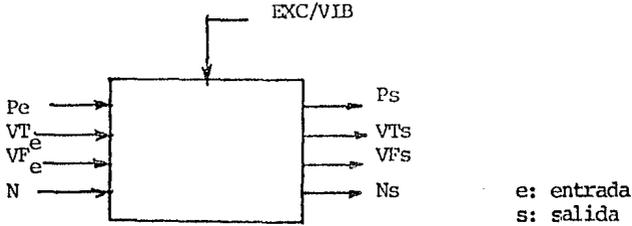


FIGURA 4.16 Módulo detector de la excentricidad/vibraciones.

Como se mencionó anteriormente, el módulo puede tomar cuatro diferentes decisiones, los cambios que debe hacer a sus salidas para cada caso son:

1) Rodado normal:

$$\begin{aligned} P_s &= P_e \\ VT_s &= VT_e \\ VF_s &= VF_e \\ N_s &= N_e \end{aligned}$$

2) Mantener la velocidad constante:

$$\begin{aligned} P_s &= P_e \\ VT_s &= VT_e \\ VF_s &= VT_e \\ N_s &= N_e \end{aligned}$$

3) Bajar velocidad:

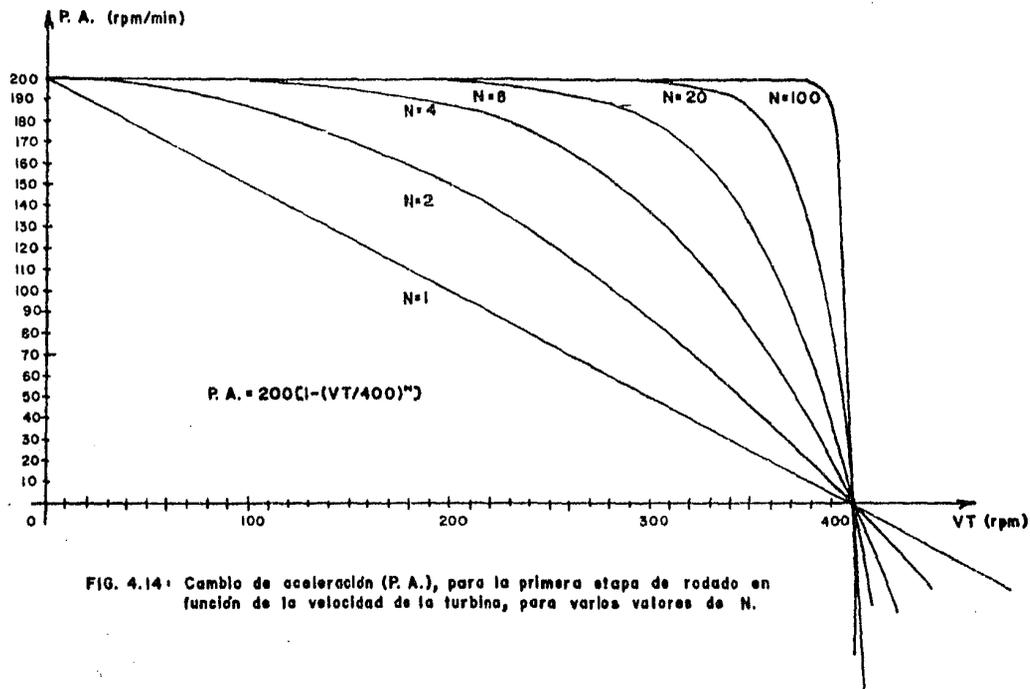


FIG. 4.14: Cambio de aceleración (P. A.), para la primera etapa de rodado en función de la velocidad de la turbina, para varios valores de N.

$$\begin{aligned} P_s &= P_e \\ VT_s &= VT_e \\ VF_s &= K2 \cdot VT_e : \text{donde } K2 < 1 \text{ y debe ser calculado experi} \\ N_s &= N_e \end{aligned} \quad \text{mentalmente.}$$

4) Disparo de la unidad.

En el disparo no importa el valor a la salida, ya que la válvula de estrangulamiento está cerrada.

4.4.4.3 MODULO DETECTOR DE TEMPERATURA.

Este módulo es el encargado de detectar la diferencia de temperatura entre el vapor y el metal en la cámara de impulso, la única acción correctiva que puede tomar es mantener la velocidad constante y esperar a que el operario cambie la temperatura del vapor principal. Cuando la diferencia de temperatura entra en los límites permitidos, entonces el módulo permite -- que el rodado continúe normalmente.

Para tomar acciones correctivas, este módulo tiene menor prioridad que el módulo detector de exc/vib.

En la figura 4.17 aparece definido este módulo. Para detener la velocidad de la turbina, realiza los siguientes cambios a sus salidas:

$$\begin{aligned} P_s &= P_e \\ VT_s &= VT_e \\ VF_s &= VT_e \\ N_s &= N_e \end{aligned}$$

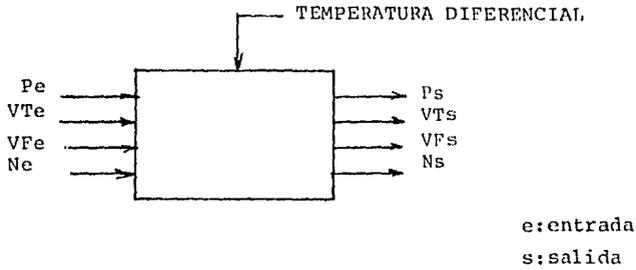
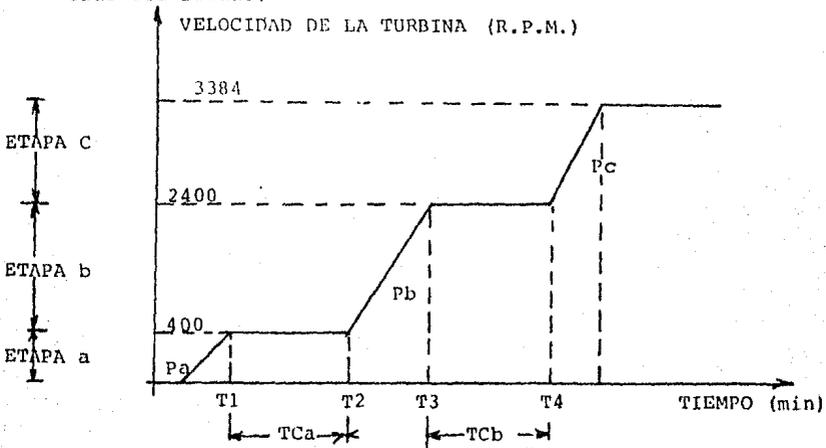


FIGURA 4.17 Módulo detector de la temperatura.

4.4.4.4 MODULO DETECTOR DE LA VELOCIDAD.

Este módulo es el encargado de detectar la velocidad de la turbina, y dirigir el rodado bajo condiciones normales de operación. Tiene la menor prioridad para hacer cambios de velocidad cuando ocurren anomalías. En la figura 4.18 aparece una curva de rodado típica, en donde la velocidad ha sido dividida en tres etapas, cada una de ellas representa un estado del rodado.



DONDE: Pa: aceleración en la etapa "a"
 Pb: aceleración en la etapa "b"
 Pc: aceleración en la etapa "c"

FIGURA 4.18 Curva de rodado típica del turbogenerador.

TCa: tiempo de calentamiento en la etapa "a"
 TCb: tiempo de calentamiento de la etapa "b"

En la figura 4.19 queda definido este módulo, en donde las entradas son:

- 1) Velocidad de la turbina.
- 2) Pa: aceleración en la etapa "a"
- 3) Pb: aceleración en la etapa "b"
- 4) Pc: aceleración en la etapa "c"
- 5) TCa: tiempo de calentamiento en la etapa "a"
- 6) TCb: tiempo de calentamiento en la etapa "b"

las salidas son:

- 1) P : aceleración que se propone a la turbina
- 2) VT: velocidad de la turbina.
- 3) VF: velocidad final o velocidad de calentamiento.
- 4) N : número entero, representa la rapidez -- con que es cambiada la aceleración.

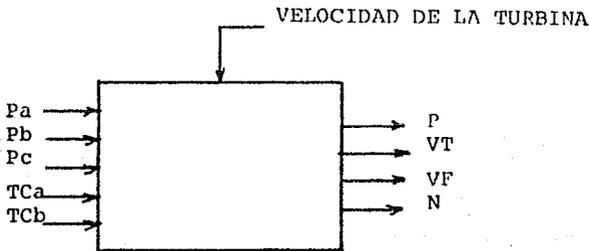


FIGURA 4.19 Módulo detector de velocidad.

La salida para cada una de las etapas es:

Etapas "a"; de 3 r.p.m. a 400 r.p.m.

$$P = Pa$$

VT= velocidad de la turbina.

VF= 400 r.p.m.

N = constante a determinar.

Etapa "b"; de 400 r.p.m. a 2,400 r.p.m.

P = Pb

VT= velocidad de la turbina

VF= 2,400 r.p.m.

N = constante a determinar

Etapa "c" ; de 2,400 r.p.m. a 3,384 r.p.m.

P = Pc

VT= velocidad de la turbina

VF= 3,384 r.p.m.

N = constante a determinar

El tiempo que permanecerá en la etapa "a", está determinado por "TCa".

$$TCa = T2 - T1 \quad \text{ver figura 4.18}$$

El tiempo que permanecerá la etapa "b" está determinado por "TCb".

$$TCb = T4 - T3 \quad \text{ver figura 4.18}$$

4.4.4.5 MODULO QUE CALCULA EL TIEMPO DE CALENTAMIENTO Y ACELERACIONES.

Para poder definir este módulo haremos uso de las curvas de rodado utilizadas por la C.F.E., en el rodado de la Unidad 1 de la C.T.E. de Tula Hidalgo. En las figuras 3.1, 2, 3, y 4, aparecen estas curvas, de donde se observa que el único dato que utilizarán para seleccionar cualquiera de estas es el tiempo de haber estado parada la unidad (es una forma de aproximar la temperatura inicial de la turbina).

El modelo queda definido de la siguiente manera, figura 4.20 la entrada es el tiempo de haber estado parada la unidad -- (T.P.) medido en horas, las salidas son: Pa, Pb, Pc, TCa, - TCb, definidas en el módulo detector de velocidad.

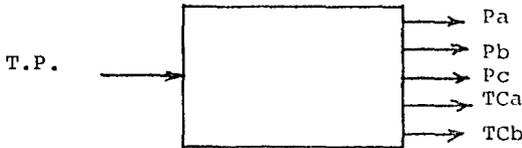


FIGURA 4.20 MODULO QUE CALCULA LOS TIEMPOS DE CALENTAMIENTO Y LAS ACELERACIONES.

De las cuatro curvas de rodado, se puede obtener la siguiente información:

a) Tiempo de haber estado parada la unidad (T.P.) 168 hrs. o más, figura 3.1

$$Pa = 150 \text{ r.p.m./min.}$$

$$Pb = 250 \text{ r.p.m./min.}$$

$$Pc = 250 \text{ r.p.m./min.}$$

$$TCa = 90 \text{ min.}$$

$$TCb = 95 \text{ min.}$$

b) Tiempo de haber estado parada la unidad: 60 hrs., figura 3.2

$$Pa = 200 \text{ r.p.m./min.}$$

$$Pb = 200 \text{ r.p.m./min.}$$

$$Pc = 200 \text{ r.p.m./min.}$$

$$TCa = 16 \text{ min.}$$

$$TCb = 16 \text{ min.}$$

c) Tiempo de haber estado parada la unidad: 8 hrs., figura - 3.3

Pa = 200 r.p.m./min.
Pb = 200 r.p.m./min.
Pc = 200 r.p.m./min.
TCa = 25 min.
TCb = 0 min.

d) Tiempo de haber estado parada la unidad: 2 hrs., ver figura 3.4

Pa = 250 r.p.m./min.
Pb = 250 r.p.m./min.
Pc = 250 r.p.m./min.
TCa = 16 min.
TCb = 0 min.

De la información anterior se observa: la mayoría de las pendientes (aceleraciones) son de 200 r.p.m./min., la menor es de 150 r.p.m./min., y la máxima de 250 r.p.m./min. Para fines de este trabajo, consideramos que todas serán la media - de 200 r.p.m./min. Se tendría un pequeño esfuerzo al rotor solo en el caso de T.P. = 168 hrs., ya que su primer pendiente es de 150 r.p.m./min., cuando las pendientes son de 250 r.p.m./min., no se manifiesta ningún problema.

Para el cálculo de los tiempos de calentamiento se define - tiempo de calentamiento total (TCAL) como la suma de TCa y - TCb, se obtiene la siguiente tabla:

T.P. (hrs)	TCAL (min)
2	16
8	25
60	36
168	185

Con esta tabla se obtiene la gráfica que se muestra en la figura 4.21

De la curva ajustada, se observa: el tiempo de calentamiento (TCAL) para T.P. = 2 queda abajo de la curva, en realidad esto no es problema, ya que en lo único en que repercute es -- que aumenta el tiempo de calentamiento, dejando de ser 16 -- min. el tiempo mínimo de calentamiento y pasar a ser 25 min.

La curva de la figura 4.21 es del tipo:

$$TCAL = A (T.P.)^n + B \quad \text{-----} \quad \textcircled{1}$$

en donde A, B, n son constantes. Para calcular "B", la ecuación 1 se evalúa en el punto (0,25), quedando:

$$25=A(0)^n + B \quad \text{DONDE } B=25$$

Para encontrar el valor de "A" y "n" se evaluará la ecuación para dos puntos diferentes, y obtener dos ecuaciones, entonces se tiene:

$$\text{Para el punto } (60,36) : 36=A (60)^n + 25 \quad \text{-----} \quad \textcircled{2}$$

$$\text{Para el punto } (168,185) : 185=A (168)^n + 25 \quad \text{-----} \quad \textcircled{3}$$

de la ecuación 2 se tiene : $A = \frac{11}{(60)^n}$ sustituyendo en la ecuación ③, $185 = \frac{11}{(60)^n} (168)^n + 25$; $14.545 = (2.8)^n$ donde: -

$$n = \frac{\text{Ln } (14.545)}{\text{Ln } (2.8)}$$

entonces se tiene $n=2.6$; y el valor de $A=261.69 \times 10^{-6}$

quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$TCAL = 261.69 \times 10^{-6} (T.P.)^{2.6} + 25$$

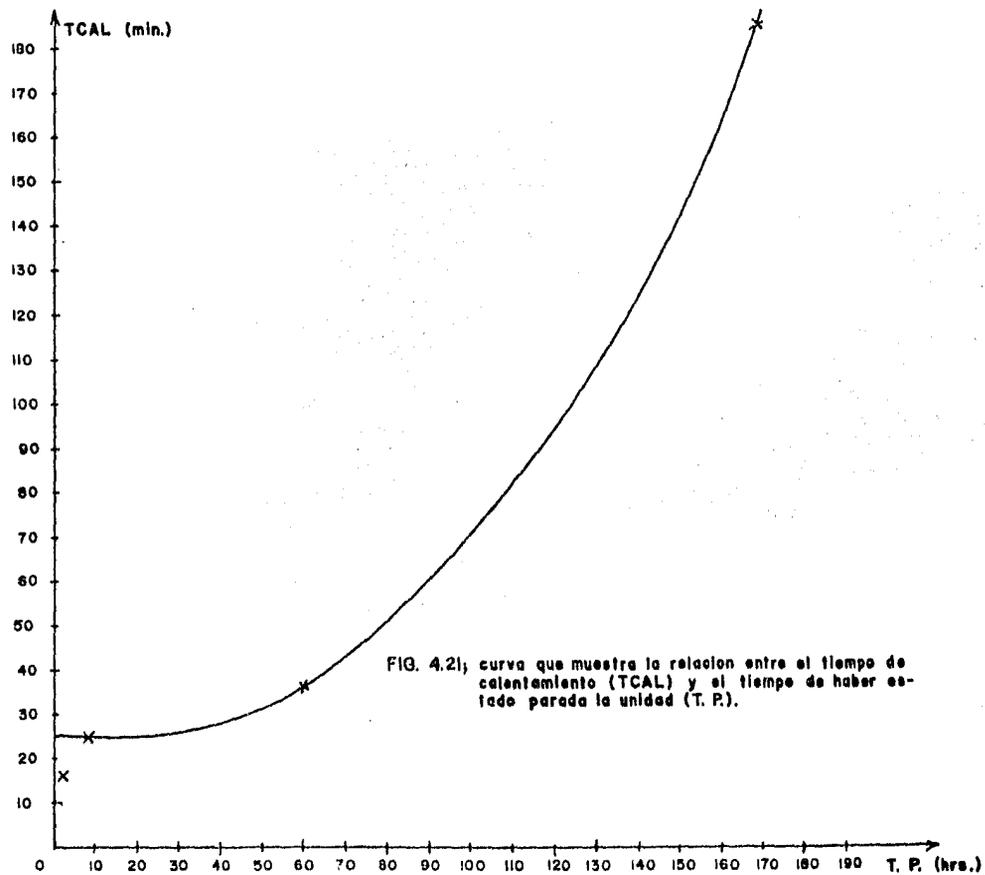


FIG. 4.21; curva que muestra la relacion entre el tiempo de calentamiento (TCAL) y el tiempo de haber estado parada la unidad (T. P.).

Evaluando esta ecuación para T.P. = 2, 8, 60, y 168 se tiene la siguiente tabla:

T.P.	TCAL
2	25.00
8	25.06
60	35.99
168	184.81

Esta tabla coincide con la tabla anteriormente obtenida, -- excepto para T.P. = 2, como ya se explicó anteriormente.

Cuando T.P. $>$ 8 Hrs. los tiempos de calentamiento en 400 r.p.m. (TCa) y en 2,400 r.p.m. (TCb) son iguales, cada uno de ellos vale la mitad de TCAL.

Cuando T.P. \leq 8 hrs., existe un solo tiempo de calentamiento, este es en 400 r.p.m. (TCa), su valor es igual a TCAL.

Entonces, las salidas para este módulo, quedan definidas de la siguiente manera:

a) Para cuando T.P. \leq 8 hrs.

$$Pa = Pb = Pc = 200 \text{ r.p.m./min.}$$

$$TCa = TCAL \text{ min.}$$

$$TCb = 0$$

b) Para cuando T.P. $>$ 8hrs.

$$Pa = Pb = Pc = 200 \text{ r.p.m./min.}$$

$$TCa = \left(\frac{1}{2}\right) TCAL$$

$$TCb = TCa$$

4.4.5 EVALUACION DEL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO.

En este tema, se obtendrá una aproximación del valor de las constantes obtenidas en el desarrollo del modelo del controlador de rodado automático, para tal objetivo se hace uso de las curvas obtenidas en el rodado de la unidad 1 de la C.T.E de Tula Hidalgo, para que posteriormente sean ajustadas utilizando una computadora. Las constantes a determinar son:

- a) K_p : determina la duración del pulso.
- b) K_e : determina el error mínimo, que genera pulso
- c) a : porcentaje de variación máxima de la aceleración de la turbina.
- d) N : determina la suavidad de cambio de aceleración.
- e) K_2 : determina la disminución de la velocidad de la turbina.

4.4.5.1 CALCULO DE K_p .

El valor de K_p es la relación entre la duración del pulso -- "D" y la señal de error "e", esto es:

$$K_p = \frac{D}{e}$$

Para encontrar el valor de "D" y "e" , se hace uso de la gráfica que aparece en la figura 3.6, y de los tiempos obtenidos en la computadora del SADRE, obteniendo:

1) En promedio los pulsos aplicados fueron de 250 mseg., el menor fué de 150 mseg.

2) Para abrir las válvulas de estrangulamiento de 1.41 Kg/cm^2 se usaron un número de pulsos que sumaron un tiempo total de 4.633 seg., la aceleración de la turbina en promedio fué :

$$\frac{\Delta \text{VT}}{\Delta t} = \frac{280 \text{ r.p.m.} - 150 \text{ r.p.m.}}{.8 \text{ min.}} = 162.5 \text{ r.p.m./min.}$$

3) Para elevar la presión de control de 1.41 Kg/cm^2 a 1.515 Kg/cm^2 , se usaron un número de pulsos que sumaron un tiempo total de: 3.0803 seg. el cambio de aceleración fué de -25 r.p.m./min a 67 r.p.m./min .

El cálculo de "Kp" para el punto "2" es:

$$Kp = \frac{D}{e} = \frac{D}{P.A.-AT} = \frac{0.0772167 \text{ min.}}{162.5 \text{ r.p.m./min.-0}} = 475.18 \times 10^{-6} (\text{min}^2/\text{rpm})$$

El cálculo de "Kp" para el punto "3" es:

$$Kp = \frac{D}{e} = \frac{D}{P.A.-AT} = \frac{0.051383 \text{ min}}{63 \text{ r.p.m./min} - (-25 \text{ r.p.m./min})} = 583.3898 \times 10^{-6} (\text{min}^2/\text{rpm})$$

Con estos valores obtenidos de "Kp" se observa que en realidad no es una constante, existe una variación en su valor para los dos cálculos obtenidos. En realidad, esto no es un problema, ya que por ser un sistema realimentado, se auto-corrige, lo único que determina el valor de "Kp" es la duración del pulso y si el pulso aplicado es insuficiente para corregir el error, entonces se aplica otro pulso.

Para hacer las corridas en la computadora, se utilizará el valor de 400×10^{-6} , 500×10^{-6} y 600×10^{-6} , para seleccionar el más conveniente.

4.4.5.2 CALCULO DE Ke.

Para determinar este valor mínimo del error "Ke", que sea significativo para generar un pulso, se tiene:

El pulso más pequeño fué de 150 mseg.

Para el caso de $Kp = 400 \times 10^{-6} (\text{min}^2/\text{r.p.m.})$

$$Ke = \frac{0.0025 (\text{min})}{400 \times 10^{-6} (\text{min}^2/\text{r.p.m.})} = 6.25 (\text{r.p.m./min})$$

Para el caso de $Kp = 600 \times 10^{-6} (\text{min}^2/\text{r.p.m.})$ se tiene:

$$Ke = \frac{0.025 (\text{min})}{600 \times 10^{-6} (\text{min}^2/\text{r.p.m.})} = 4.167 (\text{r.p.m./min.})$$

De estos dos casos extremos se establece que el valor de K_e sea de 5 (r.p.m./min)

4.4.5.3 CALCULO DE: a, N, K_2 .

El valor de estas constantes deben ser encontradas experimentalmente, ya que no se cuenta con los elementos suficientes para determinar su valor, por tal motivo en este tema solo se establecen una serie de valores posibles para ser seleccionado el mejor.

Para " a ", se toma el valor de: .05%, .10%, .20%.

Para " N ", se toma el valor de: 1, 10, 20, 50, 100.

Para " K_2 " se toma el valor de 0.95; ya que en los manuales no se especifica la rapidez de disminución de velocidad.

CAPITULO V

DESARROLLO DE LOS PROGRAMAS DE CONTROL.

Como conclusión del capítulo anterior, se obtuvo el siguiente sistema de control para ejercer el rodado automático de la -- turbina. Ver figura 5.1

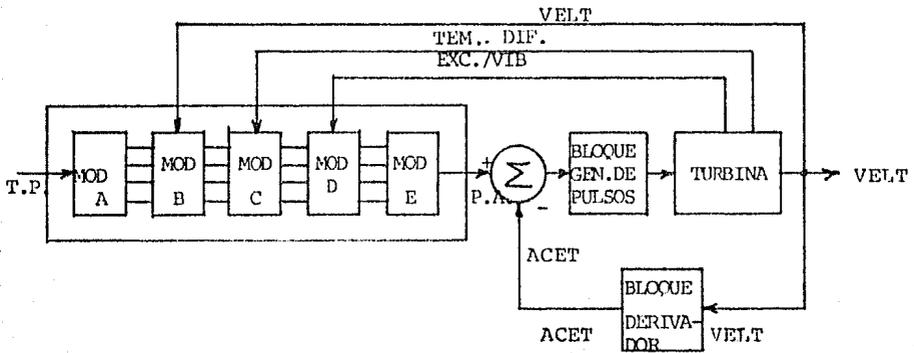


FIGURA 5.1 Sistema de control puesto para el rodado automático de la turbina.

En donde la turbina quedó modelada por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas:

- 1)
$$Z_m \frac{dV_m}{dt} + V_m = K_m E$$
- 2)
$$P_c = K \int V_m dt$$

$$\begin{aligned} 3) \text{ APER} &= 0.2333 \text{ Pc} - 0.3289 & \text{Si: } 1.41 \leq \text{Pc} < 2.43 \\ \text{APER} &= 1.2146 \text{ Pc} - 2.8866 & \text{Si: } 2.43 < \text{Pc} \leq 3.2 \end{aligned}$$

$$4) \left(\frac{T}{f} \right)^2 = K7 (\text{APER}) \sqrt{P1 \cdot D1} \quad (h1-h2)$$

$$5) \frac{T}{f} = \zeta_T \frac{dV_T}{dt} + V_T$$

En este capítulo se establecerán programas de computadora necesarios que permitan la simulación del rodado de la turbina. En primer lugar se describirá el lenguaje de paquete DARE P utilizado para la simulación, posteriormente se ajustarán los modelos del turbogenerador y del controlador, finalmente se harán pruebas que justifiquen la validez del controlador de rodado automático.

5.1 LENGUAJE DARE P.

Aquí se expondrá una breve introducción al lenguaje DARE P, ya que será utilizado para la simulación de la turbina, el controlador y por consiguiente el rodado de la turbina. Se explicará la estructura básica y únicamente los comandos usados, de tal manera que ayude a comprender los programas de control que se desarrollen.

DARE P, es un lenguaje estructurado, está basado en FORTRAN y es utilizado para simular sistemas continuos. Los programas deben estar compuestos de los siguientes tres elementos.

- 1) La descripción del modelo.
- 2) Las condiciones iniciales.
- 3) La salida de los resultados.

Esta secuencia no debe ser alterada, el lenguaje solo reconoce este orden. Al terminar con la descripción del modelo es necesario colocar la instrucción "END" en las columnas 1, 2 y 3. Posteriormente indicar las condiciones iniciales y los da-

tos que requiere el sistema para poder hacer la simulación, - se debe colocar otra instrucción "END" en las columnas 1, 2, y 3 para indicar el fin de las condiciones iniciales, en seguida se debe poner los comandos de salida y las variables -- que se quieran obtener. Para terminar el programa se debe colocar otra instrucción "END" en las columnas 1, 2 y 3.

Se deben tener presentes los siguientes puntos:

- a) Un signo de pesos (\$) en la columna 1, 3, 4, 5 ó 6 indica que la instrucción continúa en la siguiente línea.
- b) Las columnas 73-78 son reservadas para el sistema.
- c) Los comentarios pueden ser introducidos con un asterisco (*) en la columna 1.

5.12 DESCRIPCION DEL MODELO.

En esta parte del programa se escriben las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema contínuo que se desea estudiar. Se pueden emplear varios bloques, cada uno de ellos definidos para un fin específico. Para inidicar el inicio de un bloque se coloca un signo de pesos (\$) en la columna 2 seguida de la primer letra del nombre del bloque correspondiente, ejemplo:

Derivate Block (\$ D 1)
Logic Block (\$ L)
Fortran Block (\$ F)
Table Block (\$ T)

Para nuestros objetivos solo se utilizará el: Derivate Block - (\$ D 1)

Derivate Block: este consiste de una serie de ecuaciones diferenciales de primer orden y ecuaciones algebraicas, las cuales describen el modelo a estudiar.

Una ecuación diferencial es conocida como ecuación de estado, y se compone de una variable (llamada de estado) seguida de un punto (.); en seguida por un signo de igual (=) y una expresión aritmética. La variable de estado seguida por un punto, representa la primera derivada de la variable de estado. Ejemplo:

$X. = X + 1$ donde: X: es la variable de estado
X.: es la primera derivada de la variable de estado.
X+1: es la expresión que define a la primera derivada.

La ecuación algebraica, es una expresión aritmética, se compone de una variable (llamada variable definida) seguida de un signo de igual (=), y una expresión aritmética. Ejemplo:

$RES = PAR/36.1$
donde: RES: es la variable definida
PAR/36.1: es la expresión que define la variable.

Las ecuaciones de estado y algebraicas pueden estar en cualquier orden, utilizan las columnas desde la 1 hasta la 72 (- tienen formato libre), deben tener solución y cumplir con -- las siguientes reglas:

- a) La derivada de una variable solo puede aparecer a la izquierda de la ecuación y seguida por un signo de igual (=).
- b) La letra π no debe aparecer como nombre de una variable.
- c) Las variables de estado y las definidas no deben ser dimensionadas o declaradas lógicas.

d) El máximo número de caracteres para una variable es de cinco.

El bloque derivativo puede contener una sección de procedimiento (PROCEDURAL SECTION), la cual inicia con el comando " PROCED " seguido por el nombre de las variables definidas dentro de esta sección, un signo de igual (=) y el nombre de las variables cuyos valores son procesados, los nombres sucesivos son separados por comas (,). Ejemplo:

```
PROCED  NOM1, NOM2 = VAR, PROT
```

Las variables a la izquierda del signo igual son tratadas como salidas, las variables a la derecha son tratadas como entradas. Las líneas en esta sección son tratadas como instrucciones FORTRAN, cualquier instrucción fortran puede aparecer, Ejemplo: IF, GO TO, DO, CONTINUE, etc.. La sección de procedimiento termina con el comando ENDPRO.

La descripción del modelo termina con la instrucción END en la columna 1, 2, 3 y continúa la sección de las condiciones iniciales.

5.13 CONDICIONES INICIALES.

En esta sección deben ser evaluados todos los valores iniciales de las variables no definidas utilizadas en el bloque derivativo. El lenguaje DARE P hace uso de este valor para iniciar la integración de las ecuaciones diferenciales si alguno de estos valores no es iniciado el sistema le asignará el valor de cero. Para la ejecución del programa, el paquete utiliza otra serie de variables que deben ser definidas en esta sección, entre otras están las siguientes:

VARIABLE	Valor que le asigna el sistema si no es iniciada.	Uso:
----------	---	------

T	0.	- Tiempo, es la variable independiente en la simulación.
TMAX	Ninguno	- Es el valor máximo que toma "T", es usado para terminar la simulación, debe ser iniciada.
NPOINT	101	- Es el número deseado de puntos de salida.
COMINT	TMAX/(NPOINT-1)	- Es el intervalo de comunicación, es el valor por el cual "TNEXT" es incrementado cada vez que ocurre una salida.
TNEXT	COMINT	- Es el siguiente valor de T en el cual se realiza una salida.
DT	COMINT/2	- Es el incremento de tiempo utilizado por las subrutinas de integración.

La sección de condiciones iniciales termina con el comando -- "END" en las columnas 1,2 y 3.

5.14 SALIDA DE RESULTADOS.

Los valores de las variables calculadas son almacenadas en -- archivos definidos por el lenguaje, para fines de este trabajo no es importante mencionar los nombres de estos archivos, lo importante de esto es que se requiere de comandos de salida para tomar las variables deseadas y colocarlas en algún -- dispositivo de salida, como lo es una impresora, una terminal, una graficadora, etc., además de indicar la forma de presentarlos.

Los comandos de salida son de la forma:

COMANDO; NOMBRE DE LA VARIABLE

a) Comando; es el nombre de la función de salida, puede ser -- cualquiera de las siguientes: LIST, PLOT, GRAPH, REWIND, FACTOR.

Para nuestros objetivos solo se utilizarán los siguientes:

LIST: Ordena las variables de salida en listas en forma de tabla.

PLOT: Se obtienen las gráficas de las variables de salida por medio de una impresora.

El sistema solo lee la primera letra del comando, para terminar el comando se utiliza un espacio en blanco, comas, o paréntesis, para la salida de los resultados, pueden ser usados uno o más comandos.

b) Nombre de la variable: son los nombres de las variables que deseamos conocer, podemos obtener un número máximo de 10, cada una de ellas separadas por comas. Opcionalmente a una variable se le puede sumar o restar otra variable o una constante, esto es:

```
VARIABLE 1 ( + o - )VARIABLE 2  
VARIABLE 1 ( + o - )CONSTANTE
```

Para terminar esta sección, se debe colocar la instrucción "END" en las columnas 1, 2, y 3.

5.2 PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE LA TURBINA.

En base a lo anterior, se hará la programación del modelo del turbogenerador, los ajustes finales a las constantes calculadas del modelo, se definirá el generador de excentricidad/vibraciones y de la temperatura diferencial, se definirán además los parámetros de entrada, como son: la excitación (E), la temperatura, presión, densidad, y entalpía del vapor.

Se utilizará el siguiente código de representación:

T_m = TACM

V_m = VELM
E = PULSO
 $K_m \cdot K$ = GAN
Pc = PREC
 $(T/f)^2$ = PAR
P1 = PREV
D1 = DENV
h1 = ENT 1
h2 = ENT 2
 ζ_T = TAOT
 V_T = VELT
K7 = CON 7

Entonces el modelo de la turbina queda representado de la siguiente manera:

\$D1

* ECUACIONES QUE DETERMINAN EL COMPORTAMIENTO DEL TURBOGENERADOR
* EN EL PROCESO DE RODADO:

* ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 1

* $VELM. = (PULSO - VELM) / TAQM$

* ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 2

* $PREC. = GAN + VELM$

* ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 3

* $APER = (PEND * PREC + ORD) * CERR$

* ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 4,5

* $PAR = CON7 * APER + SORT(PREC * DENV) * (ENT1 - ENT2)$

* ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 6

* $VELT. = (-VELT + SQRT(PAR)) / TAQT$

* ECUACIONES AUXILIARES QUE PERMITEN GRAFICAR LAS VARIABLES

* $EX = 30. * PULSO$
* $PRECA = 250. * PREC - 300.$

* RELACIONES AUXILIARES DEL SUBSISTEMA 3

* $PROCED PEND, ORD, CERR = PREC$
* $CERR = 1.$
* $IF(PREC, LE, 1.41) CERR = 0.$
* $IF(PREC, GT, 1.41, AND, PREC, LT, 2.43) THEN$
* $PEND = 0.2333$
* $ORD = -0.3209$
* $ENDIF$
* $IF(PREC, GE, 2.43, AND, PREC, LT, 3.2) THEN$
* $PEND = 1.2146$
* $ORD = -2.8866$
* $ENDIF$
* $ENDPRO$

* ESTE BLOQUE EXITA AL TURBOGENERADOR

* $PROCED PULSO = T$
* $PULSO = 0.$
* $IF(T, GE, 2.56, AND, T, LE, 2.6372167) PULSO = 1.$
* $IF(T, GE, 4.4, AND, T, LE, 4.4772167) PULSO = -1.$
* $IF(T, GE, 5.36, AND, T, LE, 5.4113383) PULSO = 1.$
* $IF(T, GE, 7.36, AND, T, LE, 7.6172317) PULSO = -1.$
* $ENDPRO$

* END

*
*
*

*
*
*
*

CONDICIONES INICIALES

VELM=0.,PREC=1.41,TAOM=0.038,CON7=5.52&E03
PREV=60.0,BENV=23.68,ENT1=3043.0,ENT2=2684.97
VELT=3.,TAOT=11.,TMAX=10.,NPOINT=51,GAN=1.119

*
END
*
*
*
*
*
END

VARIABLES DE SALIDA

PLOT EX,PREC,VELT
LIST PULSO,PREC,APER,VELT

5.21 AJUSTES AL MODELO DE LA TURBINA

Aquí se ajustan con ayuda de una computadora los valores de los parámetros calculados en temas anteriores.

5.21.1 DETERMINACION DE $K_m \cdot K$ (GAN)

Para determinar si el valor calculado de $K \cdot K_m$ (GAN) es el correcto, se simulará la primer etapa del rodado, tal y como lo realizaron los operarios de Tula Hidalgo, Figura 3.6, de donde se observa que la presión de vapor casi se mantuvo constante y por tal razón, la temperatura, la densidad y la entalpía se mantienen constantes, esto es:

$$\begin{aligned} \text{PREV} &= 60 \text{ Kg/cm}^2 \\ \text{TEMV} &= 350^\circ\text{C} \\ \text{DENV} &= 23.68 \text{ Kg/cm}^3 \\ \text{ENT1} &= 3040 \text{ KJ /Kg} \\ \text{ENT2} &= 2684.97 \text{ KJ /Kg} \end{aligned}$$

En la figura 3.6 también se observa que los pulsos aplicados de voltaje están distribuidos, para simplificar el programa se consideran pulsos equivalentes, esto es:

En $T = 6.56$ min. se aplica un pulso (+) de: 0.0772167 min. aprox.
En $T = 8.4$ min. se aplica un pulso (-) de: 0.0772167 min. aprox.
En $T = 9.36$ min. se aplica un pulso (+) de: 0.0513383 min. aprox.
En $T = 11.36$ min. se aplica un pulso (-) de: 0.2572317 min. aprox.

Se considera que la presión de control (PREC) inicia en 1.41 -- Kg/cm^2 y no en 1.08 Kg/cm^2 , con esto se eliminan los pulsos anteriores a 1.41 Kg/cm^2 , y el tiempo se recorre 4 min. a la izquierda, para centrar la gráfica de salida. Se corre el programa con $\text{GAN} = 1.119$ ver gráfica de la figura 5.2 a,b.

De la figura se observa que la presión de control (PREC) es baja, ya que:

Primer valor máximo debe ser: 1.545 y resulta de 1.49393
Segundo valor máximo debe ser: 1.515 y resulta de 1.46595

Con el valor de GAN = 2.1 se tiene la figura 5.3 a,b de donde se tiene:

Primer valor máximo es: 1.5675
Segundo valor máximo es: 1.515

Se observa que solo se cumple el segundo valor máximo de presión, esto puede ser debido a que se inició la presión de control en 1.41 y se eliminaron los pulsos anteriores.

Se considera bueno el valor de PREC=2.1

FLOW EX-FRECAVELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+00

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.00E-01

TIME	1.00E+01	5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02
0.00000E+00			13	12							
2.00000E-01			13	12							
4.00000E-01			13	12							
6.00000E-01			13	12							
8.00000E-01			13	12							
1.00000E+00			13	12							
1.20000E+00			13	12							
1.40000E+00			13	12							
1.60000E+00			12	12							
1.80000E+00			13	12							
2.00000E+00			13	12							
2.20000E+00			3	12							
2.40000E+00			3	12							
2.60000E+00			03	1	12						
2.80000E+00			1	3	1	2					
3.00000E+00			1		3	2					
3.20000E+00			1		3	2					
3.40000E+00			1		1	3					
3.60000E+00			1		2	13					
3.80000E+00			1		2	3					
4.00000E+00			1		2	3					
4.20000E+00			1		2		3				
4.40000E+00			1		2			3			
4.60000E+00			1		12			3			
4.80000E+00			1		12			3			
5.00000E+00			1		12			3			
5.20000E+00			1		12			3			
5.40000E+00			0	1	12			3			
5.60000E+00			1		1	2		3			
5.80000E+00			1		1	2		3			
6.00000E+00			1		2			3			
6.20000E+00			1		2			3			
6.40000E+00			1		2			3			
6.60000E+00			1		2			3			
6.80000E+00			1		2			3			
7.00000E+00			1		2			3			
7.20000E+00			1		2			3			
7.40000E+00			1	0	1	2		3			
7.60000E+00			1	0	2	1		3			
7.80000E+00			21					13			
8.00000E+00			21					3			
8.20000E+00			21					3			
8.40000E+00			21					3			
8.60000E+00			21					3			
8.80000E+00			21					3			
9.00000E+00			21					3			
9.20000E+00			21					3			
9.40000E+00			21					3			
9.60000E+00			21					13			
9.80000E+00			21					13			
1.00000E+01			21					3			

-1.00E+02 -5.00E+01 0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02 1.50E+02 2.00E+02 2.50E+02 3.00E+02 3.50E+02 4.00E+02

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 FRECA
 3 VELT

FIGURA 5.2.a

PL0T EX+FRECA+VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+00

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.00E+01

TIME	1.00E+02	5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02
0.00000E+00			17	12							
2.00000E-01			13	12							
4.00000E-01			13	12							
6.00000E-01			13	12							
8.00000E-01			13	12							
1.00000E+00			13	12							
1.20000E+00			13	12							
1.40000E+00			13	12							
1.60000E+00			13	12							
1.80000E+00			13	12							
2.00000E+00			13	12							
2.20000E+00			3	12							
2.40000E+00			3	12							
2.60000E+00			33	12							
2.80000E+00			1	3	2						
3.00000E+00			1	3	2						
3.20000E+00			1	3	2						
3.40000E+00			1	3	3						
3.60000E+00			1	2	13						
3.80000E+00			1	2	3						
4.00000E+00			1	2	3						
4.20000E+00			1	2	3						
4.40000E+00			1	2	3						
4.60000E+00			1	12	3						
4.80000E+00			1	12	3						
5.00000E+00			1	12	3						
5.20000E+00			1	12	3						
5.40000E+00			0	1	12	3					
5.60000E+00			1	2	3						
5.80000E+00			1	2	3						
6.00000E+00			1	2	3						
6.20000E+00			1	2	3						
6.40000E+00			1	2	3						
6.60000E+00			1	2	3						
6.80000E+00			1	2	3						
7.00000E+00			1	2	3						
7.20000E+00			1	2	3						
7.40000E+00			1	0	2						
7.60000E+00			1	0	2						
7.80000E+00			21								
8.00000E+00			21								
8.20000E+00			21								
8.40000E+00			21								
8.60000E+00			21								
8.80000E+00			21								
9.00000E+00			21								
9.20000E+00			21								
9.40000E+00			21								
9.60000E+00			21								
9.80000E+00			21								
1.00000E+01			21								

-1.00E+02 -5.00E+01 0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02 1.50E+02 2.00E+02 2.50E+02 3.00E+02 3.50E+02 4.00E+02

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 FRECA
 3 VELT

FIGURA 5.2.a

LIST PULSO, PPEC, APER, VEL I

TIME	PULSO	PPEC	APER	VEL I
0.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	3.00000E+00
2.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.94575E+00
4.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.87287E+00
6.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.84073E+00
8.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.78956E+00
1.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.73930E+00
1.20000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.68995E+00
1.40000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.64148E+00
1.60000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.59389E+00
1.80000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.54715E+00
2.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.50126E+00
2.20000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.45619E+00
2.40000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.41194E+00
2.60000E+00	1.00000E+00	1.42602E+00	3.79692E-03	3.36714E+00
2.80000E+00	0.00000E+00	1.40343E+00	1.95170E-02	2.25926E+01
3.00000E+00	0.00000E+00	1.49392E+00	1.96321E-02	4.39749E+01
3.20000E+00	0.00000E+00	1.49392E+00	1.96327E-02	6.49839E+01
3.40000E+00	0.00000E+00	1.49393E+00	1.96327E-02	8.56143E+01
3.60000E+00	0.00000E+00	1.49392E+00	1.96327E-02	1.05873E+02
3.80000E+00	0.00000E+00	1.49395E+00	1.96380E-02	1.25786E+02
4.00000E+00	0.00000E+00	1.49393E+00	1.96323E-02	1.45802E+02
4.20000E+00	0.00000E+00	1.49393E+00	1.96323E-02	1.64486E+02
4.40000E+00	0.00000E+00	1.49394E+00	1.96371E-02	1.83323E+02
4.60000E+00	0.00000E+00	1.41140E+00	3.80440E-04	1.91766E+02
4.80000E+00	0.00000E+00	1.41001E+00	5.47171E-05	1.89898E+02
5.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	5.30481E-05	1.87424E+02
5.20000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	5.30481E-05	1.85180E+02
5.40000E+00	1.00000E+00	1.42602E+00	3.79412E-03	1.83767E+02
5.60000E+00	0.00000E+00	1.46573E+00	1.30555E-02	1.92881E+02
5.80000E+00	0.00000E+00	1.46595E+00	1.31066E-02	2.11120E+02
6.00000E+00	0.00000E+00	1.46595E+00	1.31063E-02	2.25129E+02
6.20000E+00	0.00000E+00	1.46595E+00	1.31062E-02	2.38886E+02
6.40000E+00	0.00000E+00	1.46595E+00	1.31065E-02	2.52395E+02
6.60000E+00	0.00000E+00	1.46594E+00	1.31035E-02	2.65860E+02
6.80000E+00	0.00000E+00	1.46595E+00	1.31062E-02	2.78683E+02
7.00000E+00	0.00000E+00	1.46595E+00	1.31065E-02	2.91478E+02
7.20000E+00	0.00000E+00	1.46594E+00	1.31040E-02	3.04039E+02
7.40000E+00	-1.00000E+00	1.44993E+00	9.36794E-03	3.16188E+02
7.60000E+00	-1.00000E+00	1.24146E+00	0.00000E+00	3.12875E+02
7.80000E+00	0.00000E+00	1.17956E+00	0.00000E+00	3.07237E+02
8.00000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	3.01702E+02
8.20000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	2.96265E+02
8.40000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	2.90928E+02
8.60000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	2.85686E+02
8.80000E+00	0.00000E+00	1.17919E+00	0.00000E+00	2.80539E+02
9.00000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	2.75484E+02
9.20000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	2.70521E+02
9.40000E+00	0.00000E+00	1.17919E+00	0.00000E+00	2.65646E+02
9.60000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	2.60860E+02
9.80000E+00	0.00000E+00	1.17921E+00	0.00000E+00	2.56160E+02
1.00000E+01	0.00000E+00	1.17920E+00	0.00000E+00	2.51545E+02

FORTRAN STOP

FIGURA 5.2.b

FLOT EX,FRECA,VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 1.00E+01

VERTICAL SCALF FACTOR = 2.00E-01

TIME	-3.00E+02	-2.00E+02	-1.00E+02	0.00E+00	1.00E+02	2.00E+02	3.00E+02	4.00E+02	5.00E+02	6.00E+02	7.00E+02
0.0000E+00				3	2						
2.0000E-01				3	2						
4.0000E-01				3	2						
6.0000E-01				3	2						
8.0000E-01				3	2						
1.0000E+00				3	2						
1.2000E+00				3	2						
1.4000E+00				3	2						
1.6000E+00				3	2						
1.8000E+00				3	2						
2.0000E+00				3	2						
2.2000E+00				3	2						
2.4000E+00				3	2						
2.6000E+00				3	1	2					
2.8000E+00				1	3						
3.0000E+00				1	3	2					
3.2000E+00				1	3						
3.4000E+00				1	2	3					
3.6000E+00				1	2	3					
3.8000E+00				1	2	3					
4.0000E+00				1	2	3					
4.2000E+00				1	2		3				
4.4000E+00				1	2		3				
4.6000E+00				1	2		3				
4.8000E+00				1	2		3				
5.0000E+00				1	2		3				
5.2000E+00				1	2		3				
5.4000E+00				0	1	2		3			
5.6000E+00				1	2		3				
5.8000E+00				1	2		3				
6.0000E+00				1	2		3				
6.2000E+00				1	2		3				
6.4000E+00				1	2		3				
6.6000E+00				1	2		3				
6.8000E+00				1	2		3				
7.0000E+00				1	2		3				
7.2000E+00				1	2		3				
7.4000E+00				1	0	2		3			
7.6000E+00				2	0			3			
7.8000E+00				2	1			3			
8.0000E+00				2	1			3			
8.2000E+00				2	1			3			
8.4000E+00				2	1			3			
8.6000E+00				2	1			3			
8.8000E+00				2	1			3			
9.0000E+00				2	1			3			
9.2000E+00				2	1			3			
9.4000E+00				2	1			3			
9.6000E+00				2	1			3			
9.8000E+00				2	1			3			
1.0000E+01				2	1			3			

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 FRECA
 3 VELT

FIGURA 5.3.a

LIST PULSO,PREC,APER,WILEY

TIME	PULSO	PREC	APER	WILEY
0.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00
2.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	1.94505E+00
4.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.77207E+00
6.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	3.49309E+00
8.00000E-01	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	4.12011E+00
1.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	4.66313E+00
1.20000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	5.12215E+00
1.40000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	5.50717E+00
1.60000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	5.82219E+00
1.80000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	6.06721E+00
2.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	6.24223E+00
2.20000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	6.34725E+00
2.40000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	6.38227E+00
2.60000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	6.34729E+00
2.80000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	6.24231E+00
3.00000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	6.06733E+00
3.20000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	5.82235E+00
3.40000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	5.50737E+00
3.60000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	5.12239E+00
3.80000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	4.66741E+00
4.00000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	4.12243E+00
4.20000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	3.49345E+00
4.40000E+00	0.00000E+00	1.56750E+00	3.67970E-02	2.77247E+00
4.60000E+00	0.00000E+00	1.41263E+00	6.67456E-04	2.05149E+00
4.80000E+00	0.00000E+00	1.41001E+00	5.61176E-05	1.33051E+00
5.00000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	6.24253E+02
5.20000E+00	0.00000E+00	1.41000E+00	0.00000E+00	2.59003E+02
5.40000E+00	1.00000E+00	1.44007E+00	7.06825E-03	2.47240E+02
5.60000E+00	0.00000E+00	1.51459E+00	2.44543E-02	2.35233E+02
5.80000E+00	0.00000E+00	1.51500E+00	2.45504E-02	2.18425E+02
6.00000E+00	0.00000E+00	1.51500E+00	2.45498E-02	1.94072E+02
6.20000E+00	0.00000E+00	1.51500E+00	2.45498E-02	1.62273E+02
6.40000E+00	0.00000E+00	1.51500E+00	2.45503E-02	1.24574E+02
6.60000E+00	0.00000E+00	1.51498E+00	2.45447E-02	8.50750E+01
6.80000E+00	0.00000E+00	1.51500E+00	2.45498E-02	5.17550E+01
7.00000E+00	0.00000E+00	1.51500E+00	2.45502E-02	2.99230E+01
7.20000E+00	0.00000E+00	1.51498E+00	2.45455E-02	1.42488E+01
7.40000E+00	-1.00000E+00	1.48493E+00	1.75343E-02	4.29186E+01
7.60000E+00	-1.00000E+00	1.09371E+00	0.00000E+00	4.24703E+01
7.80000E+00	0.00000E+00	9.77533E-01	0.00000E+00	4.17051E+01
8.00000E+00	0.00000E+00	9.76878E-01	0.00000E+00	4.09536E+01
8.20000E+00	0.00000E+00	9.76878E-01	0.00000E+00	4.02158E+01
8.40000E+00	0.00000E+00	9.76874E-01	0.00000E+00	3.94912E+01
8.60000E+00	0.00000E+00	9.76877E-01	0.00000E+00	3.87796E+01
8.80000E+00	0.00000E+00	9.76844E-01	0.00000E+00	3.80309E+01
9.00000E+00	0.00000E+00	9.76874E-01	0.00000E+00	3.72938E+01
9.20000E+00	0.00000E+00	9.76877E-01	0.00000E+00	3.65710E+01
9.40000E+00	0.00000E+00	9.76849E-01	0.00000E+00	3.58594E+01
9.60000E+00	0.00000E+00	9.76874E-01	0.00000E+00	3.51397E+01
9.80000E+00	0.00000E+00	9.76877E-01	0.00000E+00	3.44217E+01
1.00000E+01	0.00000E+00	9.76854E-01	0.00000E+00	3.41452E+01

FORTRAN STOP
 %DCL-W-11VVERB, unrecognized command verb - check validity and spelling
 ^DEART^

FIGURA 5.3.b

5.21.2 DETERMINACION DE K7 (CON 7)

En las simulaciones realizadas para el cálculo de "PREC". - Figura 5.3 a, se observa que el valor de la velocidad llega a ser: 429 r.p.m. aproximadamente igual a la que aparece en la gráfica de la figura 3.6 del rodado real.

En la simulación la primer pendiente es de 136.3 r.p.m./min y la segunda es de 75.97 r.p.m./min., en el rodado real, la primer pendiente es de: 150 r.p.m./min. y la segunda es de 75 r.p.m./min.

Para verificar si "CON 7" es correcto se simuló otro rodado pero ahora fijando el valor de PREC, esto es:

$$\begin{aligned} \text{PREC} &= 1.485 \text{ Kg/cm}^2 \\ \text{PREV} &= 73.5 \text{ Kg/cm}^2 \\ \text{DENV} &= 27.4349 \text{ Kg/cm}^2 \\ \text{ENT1} &= 3083.99 \\ \text{ENT2} &= 2684.97 \end{aligned}$$

Los resultados de esta corrida aparecen en la figura 5.4, - se observa que la velocidad casi se estabiliza en 1100 r.p.m., cuando en realidad debería estabilizarse en 900 r.p.m. - aproximadamente, esto debe de esperarse ya que en el cálculo de "CON 7" existió mucha variación en su valor.

Con los resultados obtenidos podemos afirmar que el valor - de CON 7 (K7) es adecuado.

PLOT EX,FRECA,VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 2.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 4.00E-01

TIME	-4.00E+02	-2.00E+02	0.00E+00	2.00E+02	4.00E+02	6.00E+02	8.00E+02	1.00E+03	1.20E+03	1.40E+03	1.60E+03
0.00000E+00	+	+	3-2	+	+	+	+	+	+	+	+
4.00000E-01	:	:	1 3 2	:	:	:	:	:	:	:	:
8.00000E-01	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
1.20000E+00	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
1.60000E+00	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
2.00000E+00	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
2.40000E+00	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
2.80000E+00	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
3.20000E+00	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
3.60000E+00	:	:	1 2 3	:	:	:	:	:	:	:	:
4.00000E+00	+	+	1-2	+	3	+	+	+	+	+	+
4.40000E+00	:	:	10 2	:	3	:	:	:	:	:	:
4.80000E+00	:	:	1 2	:	3	:	:	:	:	:	:
5.20000E+00	:	:	1 2	:	3	:	:	:	:	:	:
5.60000E+00	:	:	1 2	:	3	:	:	:	:	:	:
6.00000E+00	:	:	1 2	:	3	:	:	:	:	:	:
6.40000E+00	:	:	1 2	:	3	:	:	:	:	:	:
6.80000E+00	:	:	1 2	:	3	:	:	:	:	:	:
7.20000E+00	:	:	1 2	:	3	:	:	:	:	:	:
7.60000E+00	:	:	10 2	:	3	:	:	:	:	:	:
8.00000E+00	+	+	1-2	+	+	+	+	+	+	+	+
8.40000E+00	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
8.80000E+00	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
9.20000E+00	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
9.60000E+00	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
1.00000E+01	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
1.04000E+01	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
1.08000E+01	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
1.12000E+01	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
1.16000E+01	:	:	1 2	:	:	3	:	:	:	:	:
1.20000E+01	+	+	1-2	+	+	+	3	+	+	+	+
1.24000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.28000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.32000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.36000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.40000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.44000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.48000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.52000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.56000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.60000E+01	+	+	1-2	+	+	+	3	+	+	+	+
1.64000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.68000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.72000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.76000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.80000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.84000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.88000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.92000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
1.96000E+01	:	:	1 2	:	:	:	3	:	:	:	:
2.00000E+01	+	+	1-2	+	+	+	3	+	+	+	+

-4.00E+02 -2.00E+02 0.00E+00 2.00E+02 4.00E+02 6.00E+02 8.00E+02 1.00E+03 1.20E+03 1.40E+03 1.60E+03

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 FRECA
 3 VELT

FIGURA 5.4

5.3 PROGRAMACION DEL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO.

Para la programación del sistema de control, primeramente se definirá el diagrama de flujo para cada bloque que lo componen, posteriormente se presentará el programa total. Para ajustar los parámetros del modelo, se simulará la primera etapa de rodado, suponiendo que para las otras dos también se cumplen, entonces se tiene:

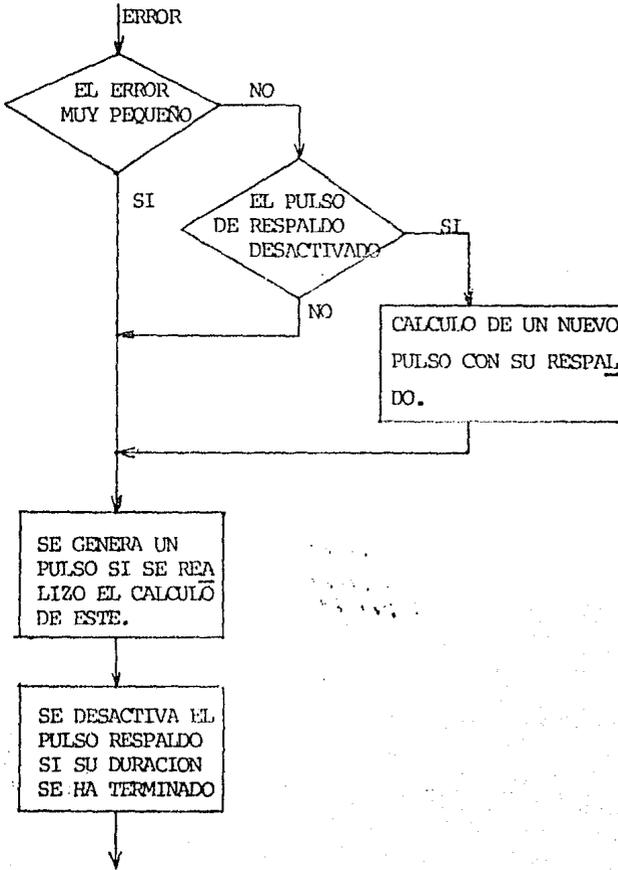
1) Diagrama de flujo para el bloque derivador.

En el capítulo anterior se determinó la forma de obtener la derivada. Para nuestro caso se cuenta con el modelo de la turbina, en donde se define su aceleración, por lo tanto, la aceleración queda definida de la siguiente manera:

$$\begin{array}{c} \downarrow \text{VELT} \\ \boxed{\text{ACET} = \text{VELT} \cdot (\text{SQRT} (\text{PAR}) - \text{VELT}) / \text{TAOT}} \\ \downarrow \text{ACET} \end{array}$$

2) Diagrama de flujo para el bloque generador de pulsos.

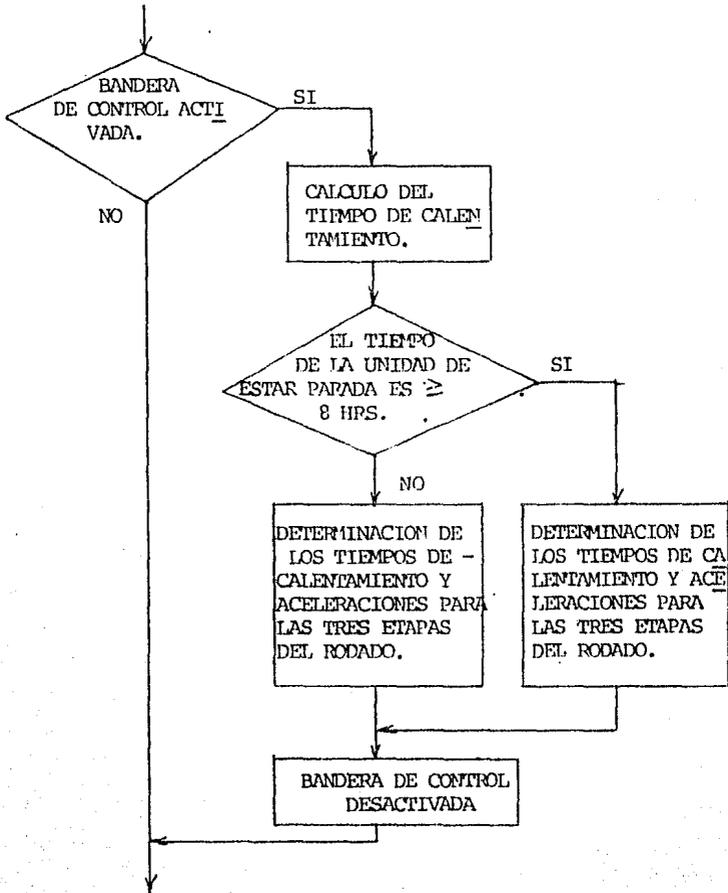
Los requisitos que debe cumplir este bloque quedaron definidos en el capítulo anterior, entonces se tiene:



3) Diagrama de flujo para el bloque generador de P.A.

Este bloque está compuesto de cinco módulos, cada uno de ellos encargado de una tarea específica, cada módulo será definido separadamente para su mejor comprensión.

3.1) Módulo que determina los tiempos de calentamiento y aceleraciones:

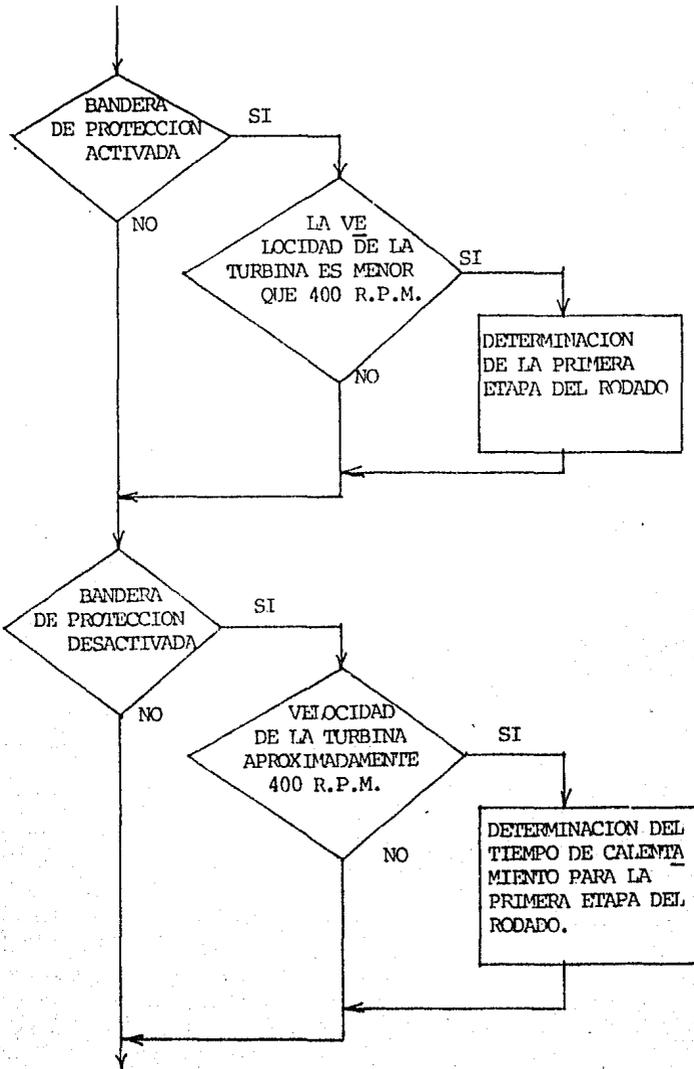


La bandera de control es utilizada para que este cálculo se realice una sola vez.

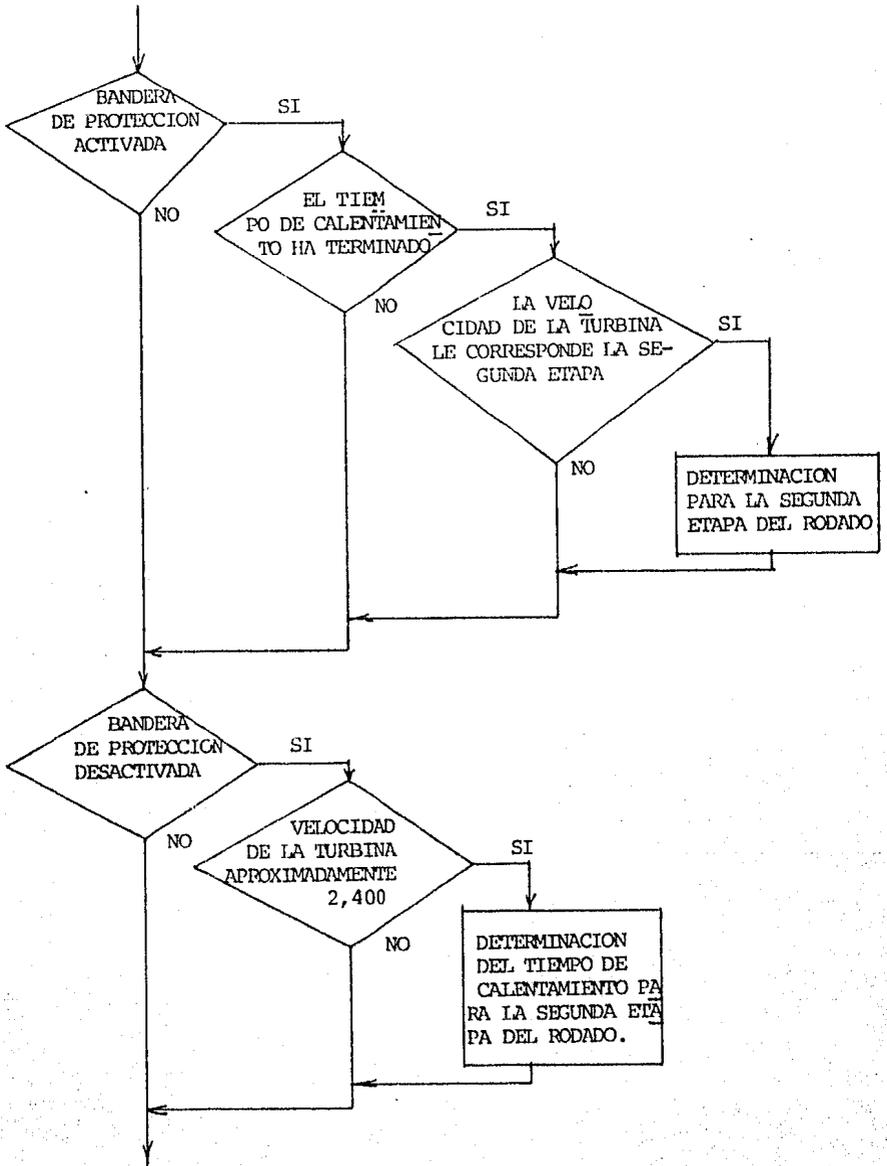
3.2) Módulo que detecta la velocidad de la turbina.

Este módulo ejecuta las tres etapas del rodado, utiliza banderas de control y protección que optimizan el programa.

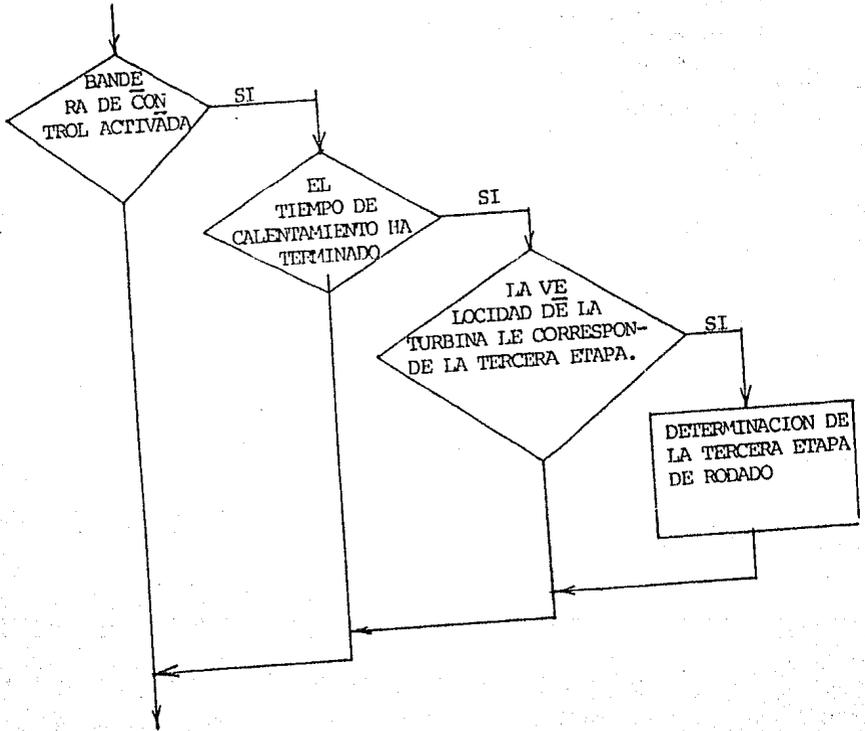
3.2.a) Diagrama de flujo para la primera etapa de rodado.



3.2.1) Diagrama de flujo para la segunda etapa del rodado:

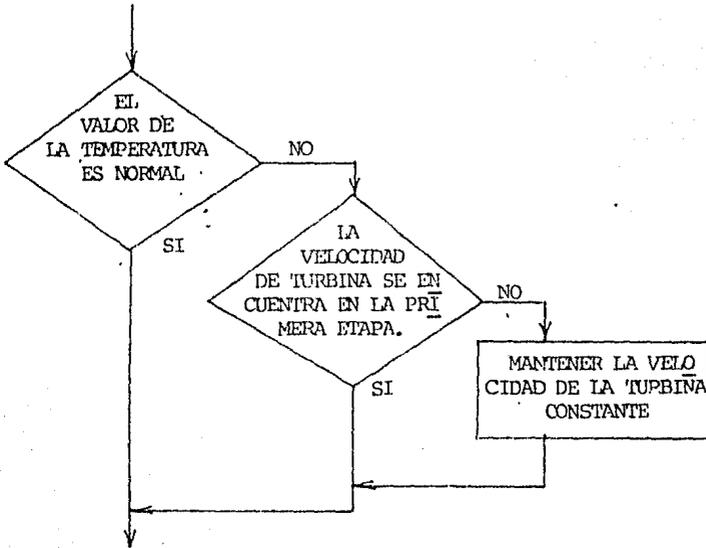


3.2.o) Diagrama de flujo para la tercera etapa del rodado.

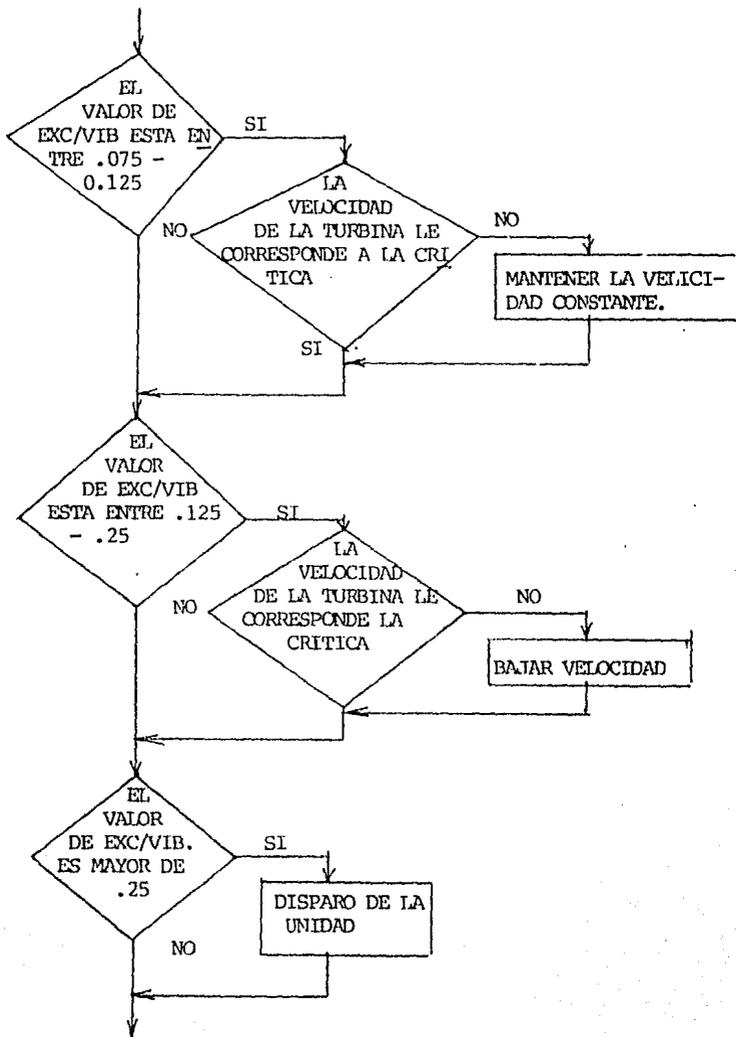


3.3) Diagrama de flujo para el módulo detector de temperatura diferencial.

Este módulo mantiene la velocidad de la turbina constante si el valor de la temperatura diferencial excede el límite de operación segura, excepto para la primera etapa del rodado.



3.4) Diagrama de flujo para el módulo detector de la excentricidad y vibraciones (EXVI).



3.5) Diagrama del flujo del módulo acoplador.

Este módulo es solo la solución de una ecuación, esto es:

$$P.A. = P (1 - (V_T/V_F)^N)$$

Con esto el controlador de rodado automático y el modelo de la turbina quedan definidos como lo muestra el listado que aparece a continuación.

*D1

- 157 -

```
*
*
*   ECUACIONES QUE DETERMINAN EL COMPORTAMIENTO DEL TURBOGENERADOR
*   EN EL PROCESO DE RODADO:
*
*   ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 1
*
*   VELM.=(PULSO-VELH)/TAOH
*
*   ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 2
*
*   PREC.=GAN*VELM
*
*   ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 3
*
*   APER=(PEND*PREC+ORD)*CERR
*
*   ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 4,5
*
*   PAR=CON7*APER*SQRT(FREV*DENV)*(ENT1-ENT2)
*
*   ECUACION QUE MODELA EL SUBSISTEMA 6
*
*   VELT.=(-VELT+SQRT(PAR))/TAOT
*
*
*   ECUACIONES AUXILIARES QUE PERMITEN GRAFICAR LAS VARIABLES
*
*   EX=30.*PULSO
*   PRECA=250.*PREC-300.
*
*
*   RELACIONES AUXILIARES DEL SUBSISTEMA 3
*
*   PROCED  PEND,ORD,CERR=PREC
*   CERR=1.
*   IF(PREC.LE.1.41)CERR=0.
*   IF(PREC.GT.1.41.AND.PREC.LT.2.43)THEN
*       PEND=0.2333
*       ORD=-0.3289
*   ENDIF
*   IF(PREC.GE.2.43.AND.PREC.LT.3.2)THEN
*       PEND=1.2146
*       ORD=-2.8866
*   ENDIF
*   ENDPRO
*
*
*
* ***** MODELO DEL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO *****
*
*
*   BLOQUE DERIVADOR
*
*
*   ACET=(SQRT(PAR)-VELT)/TAOT
*
*
*
```


BAND5=0.

ENDIF

- 159 -

ENDIF

ENDIF

IF(BAND4.EQ.0.)THEN

IF(VELT.GE.2395.0.AND.VELT.LE.2404.)THEN

T3=T

T4=T3+TCB

BAND1=1.

BAND2=1.

BAND3=0.

BAND4=1.

BAND5=1.

ENDIF

ENDIF

*
*
*
*
*
*

TERCER ETAPA DEL ROBADO

IF(BAND5.EQ.1.)THEN

IF(T.GT.T4)THEN

IF(VELT.GE.2395.)THEN

PEN=PENC

VELF=3384.

BAND1=1.

BAND2=1.

BAND3=0.

BAND4=1.

BAND5=0.

ENDIF

ENDIF

ENDIF

*
*
*
*
*
*

MODULO DETECTOR DE LA TEMPERATURA DIFERENCIAL

IF(TEMP.LE.TM1.OR.TEMP.GE.TM2)THEN

IF(VELT.GT.406.)THEN

VELF=VELT

ENDIF

ENDIF

*
*
*
*
*
*

MODULO DETECTOR DE LA EXCENTRICIDAD Y VIBRACIONES

IF(EXVI.GT.0.075)THEN

IF(EXVI.GE.0.075.AND.EXVI.LT.0.125)THEN

IF(VELT.LT.2100.0.OR.VELT.GT.2200.)THEN

VELF=VELT

ENDIF

ENDIF

IF(EXVI.GE.0.125.AND.EXVI.LT.0.25)THEN

IF(VELT.LT.2100.0.OR.VELT.GT.2200.)THEN

VELF=VELT*DECVEL

BAND1=0.

BAND2=0.

BAND3=1.

BAND4=1.

BAND5=1.

ENDIF

ENDIF

ENDIF

MODULO ACOPLADOR

PA=FEN*(1,-(VELT/VELF)**GRADO)

FORMACION DE LA SENAL DE ERROR

ERROR=PA-ACET

BLOQUE GENERADOR DE PULSOS

IF(ERROR.LT,-ERRM.OR.ERROR.GT,ERRM)THEN

IF(PULSOR.EQ.0.)THEN

DUR=ERROR*CTE

TEP=T

TFP=TEP+ABS(DUR)

RESP=TAOM-ALOG(1,-PORC)*TAOT

TFR=TFP+RESP

PULSOR=1.

ENDIF

ENDIF

IF(ERROR.GT.0.)THEN

PULSO=1.

ELSE

PULSO=-1.

ENDIF

IF(T.GT,TFP)PULSO=0.

IF(T.GT,TFR)PULSOR=0.

ENDPRO

END

CONDICIONES INICIALES

VELM=0.,PREC=1.1,TAOM=0.038,CON7=5.526E03

PREV=60.,DENV=23.68,ENT1=3043.,ENT2=2684.97

VELT=3.,TAOT=11.,TMAX=8.,NPOINT=50,ERRM=5.0

CTE=4.0E-04,PORC=.005,GRADO=1.,TPAR=10.

TM1=-56.,TM2=110.,DECVEL=.95,GAN=2.1,EXVI=0.,TEMP=0.

END

VARIABLES DE SALIDA

PLOT EX,PRECA,VELT

END

5.3.1) DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL MODELO DEL CONTROLADOR.

En este tema se evaluarán las constantes que permanecieron indefinidas en el desarrollo del modelo del controlador. Las constantes a determinar son las siguientes:

Ke; se le llamará CTE
a; se le llamará PORC
N; se le llamará GRADO

Los requisitos que deben satisfacer estos parámetros son: - optimizar el número de pulsos, evitar sobre tiros que puedan hacer inestable al sistema, las aceleraciones deben ser las indicadas. Para tal objetivo solamente se simulará la primera etapa del rodado, suponiendo que para las otras dos también se cumplen. La excentricidad y las vibraciones -- así como la temperatura diferencial se consideran normales, las condiciones del vapor para ajustar estos valores son -- las siguientes:

$P = 60 \text{ Kg/cm}^2$
 $T = 350^\circ\text{C}$
 $h1 = 3043$
 $h2 = 2684.97$
 $D1 = 23.68 \text{ Kg/m}^3$

las condiciones del rodado son las siguientes:

Tiempo máximo de ejecución (TMAX = 10 min.)
Número de puntos a graficar (N POINT = 50)
Tiempo de estar parada la unidad (TPAR = 10 hrs.)

Se grafica:

Los pulsos de excitación , los cuales fueron amplificados -

(EXC).

La presión de control a la cual también se cambió su escala
(PRECA)

La velocidad de la turbina (VELT).

5.31.1 Ajuste de: GRADO (N)

Como se mencionó anteriormente el valor, de " GRADO " nos determina el cambio de aceleración que el controlador le aplica a la turbina, de un valor máximo al valor de cero. Para determinar el valor más adecuado se simulará la primera etapa del rodado con los valores de 1, 10, 20, 50 y 100, manteniendo constantes los otros parámetros ($CTE=4 \times 10^{-4}$, $PORC = 0.05\%$). En las figuras 5.5, 6, 7, 8 y 9 aparecen las gráficas correspondientes.

En estas gráficas, la curva con el número 1 representa los pulsos que el controlador de rodado aplica a la turbina, estos pulsos son representativos, pues los verdaderamente calculados son de duración muy pequeña imposible de ver en las gráficas. La curva con el número 2 representa la presión de control de las válvulas de corte, y la curva con el número "3" representa a la velocidad de la turbina, esta es la única variable que aparece en escala real, pues las otras dos han sido amplificadas para que puedan ser apreciadas.

De las cinco gráficas obtenidas se observa que la que más se apega a las características requeridas es la que aparece en la figura 5.6, ya que se mantiene la aceleración casi constante y llegando a 400 r.p.m. se hace cero, sin existir sobre tiros ni oscilaciones. La curva de velocidad que aparece en la figura 5.7, con GRADO = 20 también puede ser recomendable aunque ya sea notorio el sobretiro. De esto, se puede concluir que el " GRADO " del controlador no debe ser menor de 10 ni mayor de 20.

PLOT EXP/PRECA/WELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E100

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

TIME	-5.00E100	0.00E100	5.00E100	1.00E102	1.50E102	2.00E102	2.50E102	3.00E102	3.50E102	4.00E102	4.50E102
0.00000E100	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2.04082E-01		03	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4.08163E-01		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.12245E-01		0	1	03	12	21	30	39	48	57	66
8.16327E-01		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.02041E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.22449E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.42857E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.63265E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.83673E100	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.04082E100	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.24490E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.44898E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.65306E100		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.85714E100		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.06122E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.26531E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.46939E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.67347E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.87755E100		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4.08163E100	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.28571E100		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4.48980E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.69388E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.89796E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5.10204E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5.30612E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5.51020E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5.71429E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5.91837E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.12245E100	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.32653E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.53061E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.73469E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.93878E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7.14286E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7.34694E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7.55102E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7.75510E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7.95918E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8.16327E100	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8.36735E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8.57143E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8.77551E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8.97959E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9.18367E100	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9.38775E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9.59183E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9.79592E100		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.00000E101		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

-5.00E101 0.00E100 5.00E101 1.00E102 1.50E102 2.00E102 2.50E102 3.00E102 3.50E102 4.00E102 4.50E102

SYMBOL VARIABLE NAME

GRADO = 1

- 1 EX
- 2 PRECA
- 3 WELT

FIGURA 5.5

FORTRAN STOP

PLOT EX,PRECA,VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+00

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

TIME	-5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02	4.50E+02
0.00000E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.04082E-01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4.08163E-01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.12245E-01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.16327E-01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.02041E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.22449E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.42857E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.63265E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.83673E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.04082E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.24490E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.44898E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.65306E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.85714E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.06122E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.26531E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.46939E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.67347E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.87755E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4.08163E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4.28571E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4.48980E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4.69388E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4.89796E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.10204E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.30612E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.51020E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.71429E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.91837E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.12245E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.32653E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.53061E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.73469E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.93878E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.14286E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.34694E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.55102E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.75510E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.95918E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.16327E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.36735E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.57143E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.77551E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8.97959E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9.18367E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9.38776E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9.59184E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9.79592E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.00000E+01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

-3.00E+01 0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02 1.50E+02 2.00E+02 2.50E+02 3.00E+02 3.50E+02 4.00E+02 4.50E+02

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 PRECA
 3 VELT
 FORTRAN STOP

GRADO = 10

FIGURA 5.6

PLOT EX,PRECA,VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+00

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

TIME	-5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02	4.50E+02
0.00000E+00	2	03	1								
2.04082E-01		03	1 2								
4.08163E-01		1	3		12						
6.12245E-01		1		3	1 2						
8.16327E-01		1			13 2						
1.02041E+00		1			2 3						
1.22449E+00		0	1		2	3					
1.42857E+00		0	1		2		3				
1.63265E+00		0	1		2			3			
1.83673E+00		0	1		2				3		
2.04082E+00	1				2				3		
2.24490E+00		1			2					3	
2.44898E+00		1		2							3
2.65306E+00		1	2								3
2.85714E+00		2									3
3.06122E+00		1	2								3
3.26531E+00		1		2							3
3.46939E+00		1	2								3
3.67347E+00		1		2							3
3.87755E+00		1		2							3
4.08163E+00		1		2							3
4.28571E+00		1		2							3
4.48980E+00		1		2							3
4.69388E+00		1		2							3
4.89796E+00		1		2							3
5.10204E+00		1		2							3
5.30612E+00		1		2							3
5.51020E+00		1		2							3
5.71428E+00		1		2							3
5.91837E+00		1	0		2						3
6.12245E+00	0	1		2							3
6.32653E+00		1		2							3
6.53061E+00		1		2							3
6.73469E+00		1		2							3
6.93878E+00		1		2							3
7.14286E+00		1		2							3
7.34694E+00		1		2							3
7.55102E+00		1		2							3
7.75510E+00		1		2							3
7.95918E+00		1	0		2						3
8.16327E+00	1			2							3
8.36735E+00		1		2							3
8.57143E+00		0	1		2						3
8.77551E+00		1		2							3
8.97959E+00		1		2							3
9.18367E+00		1		2							3
9.38776E+00		1		2							3
9.59184E+00		1		2							3
9.79592E+00		1		2							3
1.00000E+01		1		2							3

-5.00E+01 0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02 1.50E+02 2.00E+02 2.50E+02 3.00E+02 3.50E+02 4.00E+02 4.50E+02

GRADO = 20

SYMBOL VARIABLE NAME

- 1 EX
- 2 PRECA
- 3 VELT

FORTRAN STOP

FIGURA 5.7

PLOT EX/PRECA/VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 1.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

TIME	-4.00E+02	-3.00E+02	-2.00E+02	-1.00E+02	0.00E+00	1.00E+02	2.00E+02	3.00E+02	4.00E+02	5.00E+02	6.00E+02
0.00000E+00					2 3	1					
2.04082E-01					3	12					
4.08163E-01					1	3	12				
6.12245E-01					1	3	12				
8.16327E-01					1	3	2				
1.02041E+00					1		23				
1.22449E+00					0	1	2	3			
1.42857E+00					0	1	2	3			
1.63265E+00					0	1	2	3			
1.83673E+00					0	1	2	3			
2.04082E+00					0	1	2	3			
2.24490E+00					1	0	2		3		
2.44898E+00					1	0	2		3		
2.65306E+00					1	2			3		
2.85714E+00				2	1	0			3		
3.06122E+00			2		1				3		
3.26531E+00			2		0	1			3		
3.46939E+00			2		0	1			3		
3.67347E+00					2	1			3		
3.87755E+00					0	2			3		
4.08163E+00					1	0	2		3		
4.28571E+00					1	0	2		3		
4.48980E+00					1	0	2		3		
4.69388E+00					2	1	0		3		
4.89796E+00			2		1	0			3		
5.10204E+00			2		0	1			3		
5.30612E+00			2		0	1			3		
5.51020E+00				2	1				3		
5.71429E+00					2	0	1		3		
5.91837E+00					1	2			3		
6.12245E+00					1	0	2		3		
6.32653E+00					1	0	2		3		
6.53061E+00					1	2			3		
6.73469E+00				2	1	0			3		
6.93878E+00			2		1				3		
7.14286E+00			2		0	1			3		
7.34694E+00				2	0	1			3		
7.55102E+00					2	1			3		
7.75510E+00					0	2	1		3		
7.95918E+00					1	2			3		
8.16327E+00					1	0	2		3		
8.36735E+00					1	2			3		
8.57143E+00					2	1	0		3		
8.77551E+00				2	1				3		
8.97959E+00				2	0	1			3		
9.18367E+00					2	1			3		
9.38776E+00					2	1			3		
9.59184E+00					0	1	2		3		
9.79592E+00					1	2			3		
1.00000E+01					1	0	2		3		

-4.00E+02 -3.00E+02 -2.00E+02 -1.00E+02 0.00E+00 1.00E+02 2.00E+02 3.00E+02 4.00E+02 5.00E+02 6.00E+02

SYMBOL VARIABLE NAME

- 1 EX
- 2 PRECA
- 3 VELT

GRADO = 50

FORTRAN STOP

FIGURA 5.8

PLOT EX/PRECA/VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 1.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

TIME	-4.00E+02	-3.00E+02	-2.00E+02	-1.00E+02	0.00E+00	1.00E+02	2.00E+02	3.00E+02	4.00E+02	5.00E+02	6.00E+02
0.00000E+00					2-3						
2.04082E-01					3 12						
4.08163E-01					1 3	12					
6.12245E-01					1 3	12					
8.16327E-01					1	3 2					
1.02041E+00					1		23				
1.22449E+00					0 1	2 3					
1.42857E+00					0 1	2	3				
1.63265E+00					0 1	2		3			
1.83673E+00					0 1	2		3			
2.04082E+00					0-1		2		3		
2.24490E+00					1		2		3		
2.44898E+00					1	2			3		
2.65306E+00					1 0 2				3		
2.85714E+00				12	1 0				3		
3.06122E+00			2		1 0				3		
3.26531E+00		2			1 0				3		
3.46939E+00		2			0 1				3		
3.67347E+00			2		0 1				3		
3.87755E+00				2	0 1				3		
4.08163E+00					0-21				3		
4.28571E+00					0 1	1 2			3		
4.48980E+00					1 0	2			3		
4.69388E+00					21 0				3		
4.89796E+00				2	1 0				3		
5.10204E+00			2		0 1				3		
5.30612E+00				2	0 1				3		
5.51020E+00					2 0 1				3		
5.71429E+00					0 1 2				3		
5.91837E+00					1 0	12			3		
6.12245E+00					1-2				3		
6.32653E+00				2	1 0	1			3		
6.53061E+00			2		0 1				3		
6.73469E+00				2	0 1				3		
6.93878E+00					2 0 1				3		
7.14286E+00					0 1 2				3		
7.34694E+00					1 0	2			3		
7.55102E+00					12 0				3		
7.75510E+00				2	1 0				3		
7.95918E+00				2	0 1				3		
8.16327E+00				2	0-1				3		
8.36735E+00					0 21				3		
8.57143E+00					1 0		2		3		
8.77551E+00					1 0 2				3		
8.97959E+00					2 1 0				3		
9.18367E+00				2	1 0				3		
9.38776E+00					0 1				3		
9.59184E+00					2 0 1				3		
9.79592E+00					0 1 2				3		
1.00000E+01					1 0	2			3		

-4.00E+02 -3.00E+02 -2.00E+02 -1.00E+02 0.00E+00 1.00E+02 2.00E+02 3.00E+02 4.00E+02 5.00E+02 6.00E+02

GRADO = 100

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 PRECA
 3 VELT

FIGURA 5.9

FORTRAN STOP

5.31.2 AJUSTE DE CTE.

Seleccionando el valor de 10 para "GRADO" por ser el más conveniente y con PORC igual a .05%, se simula el rodado con CTE igual a 5×10^{-4} , y 6×10^{-4} , en las figuras 5.10 y 5.11 aparecen las gráficas correspondientes. De estas gráficas se observa que cuando $CTE = 5 \times 10^{-4}$ la presión de control es muy estable, pero cuando $CTE = 6 \times 10^{-4}$ la presión de control es menos estable. Por esta razón se selecciona $CTE = 5 \times 10^{-4}$.

5.31.3 AJUSTE DE PORC.

Para determinar el valor de "PORC" se simulará el rodado con los valores ya seleccionados de: GRADO = 10 y $CTE = 5 \times 10^{-4}$; y con los valores de PORC igual a: .10% y .20%, en las figuras 5.12 y 5.13 aparecen estas gráficas. Se observa que el valor de 10% para "PORC" es el más adecuado ya que presenta mayor estabilidad.

Por lo tanto los valores de los parámetros del controlador del rodado recomendados para ejercer el control sobre la turbina, son los siguientes:

GRADO = 10
CTE = 5×10^{-4}
PORC = .10%

PLOT EX,PRECA,VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+00

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

	-5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02	4.50E+02
TIME	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
0.00000E+00	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
2.04082E-01	†	03	1 2	†	†	†	†	†	†	†	†
4.08163E-01	†	1 3	†	12	†	†	†	†	†	†	†
6.12245E-01	†	†	3	2	†	†	†	†	†	†	†
8.16327E-01	†	†	†	13 2	†	†	†	†	†	†	†
1.02041E+00	†	†	†	2 3	†	†	†	†	†	†	†
1.22449E+00	†	†	†	2	3	†	†	†	†	†	†
1.42857E+00	†	0 1	†	2	†	3	†	†	†	†	†
1.63265E+00	†	†	†	2	†	†	3	†	†	†	†
1.83673E+00	†	†	†	2	†	†	†	3	†	†	†
2.04082E+00	†	†	†	2	†	†	†	†	3	†	†
2.24490E+00	†	1 0	†	12	†	†	†	†	†	3	†
2.44898E+00	†	1 0	†	2	†	†	†	†	†	†	3
2.65306E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
2.85714E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
3.06122E+00	†	1 0	12	†	†	†	†	†	†	†	3
3.26531E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
3.46939E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
3.67347E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
3.87755E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
4.08163E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
4.28571E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
4.48980E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
4.69388E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
4.89796E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
5.10204E+00	†	0 1	12	†	†	†	†	†	†	†	3
5.30612E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
5.51020E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
5.71429E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
5.91837E+00	†	0 1	12	†	†	†	†	†	†	†	3
6.12245E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
6.32653E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
6.53061E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
6.73469E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
6.93878E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
7.14286E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
7.34694E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
7.55102E+00	†	1 0	12	†	†	†	†	†	†	†	3
7.75510E+00	†	†	2	†	†	†	†	†	†	†	3
7.95918E+00	†	0 1	12	†	†	†	†	†	†	†	3
8.16327E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
8.36735E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
8.57143E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
8.77551E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
8.97959E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
9.18367E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
9.38776E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
9.59184E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
9.79592E+00	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
1.00000E+01	†	†	12	†	†	†	†	†	†	†	3
†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†

-5.00E+01 0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02 1.50E+02 2.00E+02 2.50E+02 3.00E+02 3.50E+02 4.00E+02 4.50E+02

SYMBOL VARIABLE NAME

- 1 EX
- 2 PRECA
- 3 VELT

FIGURA 5.10

FORTRAM STOP

PLOT EX,PRECA,VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+00

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

TIME	-5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02	4.50E+02
0.00000E+00	1	03	1	2							
2.04082E-01	1	03	1	2							
4.08163E-01	1	3		2							
6.12245E-01	1		3	2							
8.16327E-01	1			3	2						
1.02041E+00	1				2	3					
1.22449E+00	1				2		3				
1.42857E+00	1				2			3			
1.63265E+00	1				2				3		
1.83673E+00	1	0			2					3	
2.04082E+00	1										3
2.24490E+00	1	0			2						
2.44898E+00	1	0			2						
2.65306E+00	1		2								3
2.85714E+00	1		2								3
3.06122E+00	1		2								3
3.26531E+00	1		2								3
3.46939E+00	1		2								3
3.67347E+00	1		2								3
3.87755E+00	1		2								3
4.08163E+00	1	0									
4.28571E+00	0	1	2								3
4.48980E+00	1		2								3
4.69388E+00	1		2								3
4.89796E+00	1		2								3
5.10204E+00	1		2								3
5.30612E+00	1		2								3
5.51020E+00	1		2								3
5.71429E+00	1		2								3
5.91837E+00	1		2								3
6.12245E+00	1										3
6.32653E+00	1		2								3
6.53061E+00	1		2								3
6.73469E+00	1		2								3
6.93878E+00	1		2								3
7.14286E+00	1		2								3
7.34694E+00	1		2								3
7.55102E+00	1		2								3
7.75510E+00	1		2								3
7.95918E+00	1		2								3
8.16327E+00	1										3
8.36735E+00	1		2								3
8.57143E+00	1		2								3
8.77551E+00	1		2								3
8.97959E+00	1	0	2								3
9.18367E+00	1		2								3
9.38776E+00	1		2								3
9.59184E+00	1		2								3
9.79592E+00	1	0	2								3
1.00000E+01	1		2								3

SYMBOL VARIABLE NAME

- 1 EX
- 2 PRECA
- 3 VELT

FIGURA 5.11

FORTRAN STOP

TIME	-5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02	4.50E+02
0.00000E+00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.04002E-01	1	03 1 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4.08163E-01	1	0 31	1	12	1	1	1	1	1	1	1
6.12245E-01	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1
8.16327E-01	1	0	1	13 2	1	1	1	1	1	1	1
1.02041E+00	1	1	1	2 31	1	1	1	1	1	1	1
1.22449E+00	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1
1.42857E+00	1	1	1	2	1	3 1	1	1	1	1	1
1.63265E+00	1	1	1	2	1	1 3	1	1	1	1	1
1.83673E+00	1	1	1	2	1	1	13	1	1	1	1
2.04002E+00	1	1	1	2	1	1	1	3 1	1	1	1
2.24490E+00	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1
2.44898E+00	1	1	0 2	1	1	1	1	1	1	3 1	1
2.65306E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	3 1	1
2.85714E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
3.06122E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
3.26531E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
3.46939E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
3.67347E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
3.87755E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
4.08163E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
4.28571E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
4.48980E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
4.69388E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
4.89796E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
5.10204E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
5.30612E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
5.51020E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
5.71429E+00	0	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
5.91837E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
6.12245E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
6.32653E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
6.53061E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
6.73469E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
6.93877E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
7.14286E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
7.34694E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
7.55102E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
7.75510E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
7.95918E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
8.16327E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
8.36735E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
8.57143E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
8.77551E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
8.97959E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
9.18367E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
9.38776E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
9.59184E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
9.79592E+00	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1
1.00000E+01	1	1	12	1	1	1	1	1	1	1	3 1

-5.00E+01 0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02 1.50E+02 2.00E+02 2.50E+02 3.00E+02 3.50E+02 4.00E+02 4.50E+02

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 PRECA
 3 VELT
 FORTRAN STOP

FIGURA 5.12

PLOT EX,PRECA,VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+00

VERTICAL SCALE FACTOR = 2.04E-01

TIME	-5.00E+01	0.00E+00	5.00E+01	1.00E+02	1.50E+02	2.00E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.50E+02	4.00E+02	4.50E+02
0.00000E+00	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2.04082E-01	+	03	1 2	1	1	1	1	1	1	1	1
4.08163E-01	+	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1
6.12245E-01	+	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1
8.16327E-01	+	1	1	1	3 2	1	1	1	1	1	1
-1.02041E+00	+	1	1	1	2 3	1	1	1	1	1	1
1.22449E+00	+	1	1	1	2	1	3	1	1	1	1
1.42857E+00	+	1	1	1	2	1	1	3	1	1	1
1.63265E+00	+	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1
1.83673E+00	+	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1
2.04082E+00	+	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1
2.24490E+00	+	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3
2.44898E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
2.65306E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
2.85714E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
3.06122E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
3.26531E+00	+	1	0	2	1	1	1	1	1	1	3
3.46939E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
3.67347E+00	+	1	0	2	1	1	1	1	1	1	3
3.87755E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
4.08163E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
4.28571E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
4.48979E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
4.69388E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
4.89796E+00	+	1	0	2	1	1	1	1	1	1	3
5.10204E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
5.30612E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
5.51020E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
5.71429E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
5.91837E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
6.12245E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
6.32653E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
6.53061E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
6.73469E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
6.93878E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
7.14286E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
7.34694E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
7.55102E+00	+	0	1	2	1	1	1	1	1	1	3
7.75510E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
7.95918E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
8.16327E+00	+	0	1	2	1	1	1	1	1	1	3
8.36735E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
8.57143E+00	+	0	1	2	1	1	1	1	1	1	3
8.77551E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
8.97959E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
9.18367E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
9.38776E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
9.59184E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
9.79592E+00	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
1.00000E+01	+	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

-5.00E+01 0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02 1.50E+02 2.00E+02 2.50E+02 3.00E+02 3.50E+02 4.00E+02 4.50E+02

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 EX
 2 PRECA
 3 VELT

FIGURA 5.13

FORTRAN STOP

5.4 PRUEBAS AL CONTROLADOR DE RODADO AUTOMATICO.

Una vez teniendo el modelo del turbogenerador y el control de rodado automático, es posible hacer las pruebas necesarias -- que garanticen su funcionamiento bajo condiciones anormales - de operación.

El sistema analizado en esta tesis tiene como variable de entrada la presión y temperatura del vapor, la variable de salida es la velocidad de la turbina, existen otras variables internas como son la excentricidad y vibraciones y la temperatura diferencial. Naturalmente existen más variables en el funcionamiento de un turbogenerador, pero no son tratadas ya que están fuera de nuestro objetivo.

Las pruebas que se le harán al sistema de control que aseguren su funcionamiento son las siguientes:

- i) Variación de las condiciones de vapor.
- ii) Variación de la excentricidad y vibraciones.
- iii) Variación a la diferencia de temperatura.
- iv) Diferentes tiempos de haber estado parada la unidad.

5.41 VARIACION DE LAS CONDICIONES DE VAPOR.

Con la variación de las condiciones del vapor se garantizará que aunque cambien la presión y la temperatura del vapor, el sistema de control cumplirá con la curva de rodado que se ha establecido. Para estas pruebas se supondrá las vibraciones y la temperatura diferencial como normales.

En el modelo del turbogenerador, la relación que involucra a las condiciones del vapor es la siguiente:

$$\text{PAR} = \text{CON } 7 * \text{APER} * \text{SQRT} (\text{PREV} * \text{DENV}) * (\text{ENT1} - \text{ENT2}) \text{ . } \textcircled{1}$$

Sea VAR una nueva variable definida como:

$$\text{VAR} = \text{SQRT} (\text{PREV} * \text{DENV}) * (\text{ENT} 1 - \text{ENT} 2) \dots \textcircled{2}$$

Sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 1 nos queda:

$$\text{PAR} = \text{CONT} 7 * \text{APER} * \text{VAR}$$

Con esto, solamente variando "VAR" equivaldrá a variar la presión y la temperatura del vapor. Para encontrar el rango de variación se evaluará para las condiciones mínimas y máximas de presión y temperatura del vapor, entonces se tiene:

	PRESION	TEMP.	DENSIDAD	ENTALPIA	VAR
mínima	60	350	23.68	3043	10×10^3
intermedia	120	500	37.31	3348.2	47.7×10^3
máxima	168	538	49.61	3393.8	69.3×10^3

Para poder analizar el rodado de la turbina para estos valores de VAR, se define un rodado con las siguientes características:

Tiempo de estar parada la unidad 10 hrs. (TPAR = 10)

Duración del rodado 61 min. (TMAX = 61)

Número de puntos para graficar 116 (NPOINT = 116)

GRADO = 10

PORC = .10%

CTE = 5×10^{-4}

En la figura 5.14 aparece el rodado de la turbina con las condiciones mínimas de vapor, es decir $\text{VAR} = 10 \times 10^3$, en donde se puede observar que el controlador de rodado acelera la turbina cumpliendo con la curva recomendada por el fabricante, aún cuando las condiciones de vapor permanecieron constantes y con valores mínimos. Aparece también el listado de las variables de la turbina, que nos permite conocer su valor en todo el proceso.

PLOT EX:PRECA+VELT

FIGURA 5.14

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 5.30E-01

	-1.00E+03	-5.00E+02	0.00E+00	5.00E+02	1.00E+03	1.50E+03	2.00E+03	2.50E+03	3.00E+03	3.50E+03	4.00E+03
TIME	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
0.00000E+00	+	+	2-31	+	+	+	+	+	+	+	+
5.30435E-01	+	+	13	+	+	2	+	+	+	+	+
1.06087E+00	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
1.59130E+00	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.12174E+00	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.65217E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
3.18261E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
3.71304E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
4.24348E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
4.77391E+00	+	+	01 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
5.30435E+00	+	+	1-3-12	+	+	+	+	+	+	+	+
5.83478E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
6.36522E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
6.89565E+00	+	+	01 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
7.42609E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
7.95652E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
8.48696E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
9.01739E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
9.54783E+00	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.00783E+01	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.06087E+01	+	+	10-3-12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.11391E+01	+	+	10 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.16696E+01	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.22000E+01	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.27304E+01	+	+	01 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.32609E+01	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.37913E+01	+	+	01 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.43217E+01	+	+	10 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.48522E+01	+	+	1 3 12	+	+	+	+	+	+	+	+
1.53826E+01	+	+	01 31	+	+	12	+	+	+	+	+
1.59130E+01	+	+	1-13	+	+	12	+	+	+	+	+
1.64435E+01	+	+	1 3	+	+	12	+	+	+	+	+
1.69739E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
1.75043E+01	+	+	01 3	+	+	2	+	+	+	+	+
1.80348E+01	+	+	01 3	+	+	2	+	+	+	+	+
1.85652E+01	+	+	01 13	+	+	2	+	+	+	+	+
1.90957E+01	+	+	01 3	+	+	2	+	+	+	+	+
1.96261E+01	+	+	01 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.01565E+01	+	+	01 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.06870E+01	+	+	01 31	+	+	2	+	+	+	+	+
2.12174E+01	+	+	01-13	+	+	12	+	+	+	+	+
2.17478E+01	+	+	01 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.22783E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.28087E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.33391E+01	+	+	1 31	+	+	2	+	+	+	+	+
2.38696E+01	+	+	1 13	+	+	2	+	+	+	+	+
2.44000E+01	+	+	10 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.49304E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.54609E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.59913E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.65217E+01	+	+	1-3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.70522E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.75826E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.81130E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.86435E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.91739E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
2.97043E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+
3.02348E+01	+	+	1 3	+	+	2	+	+	+	+	+

3.07652E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.12957E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.1R261E+01	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3	-----	2	-----	-----
3.23565E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.28870E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.34174E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.39470E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.44783E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.50087E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.55391E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.60696E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.66000E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.71304E+01	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3	-----	2	-----	-----
3.76609E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.81913E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.87217E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.92522E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
3.97826E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
4.03130E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
4.08435E+01	:	:	01	:	:	:	3	:	2	:	:
4.13739E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
4.19043E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
4.24348E+01	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3	-----	2	-----	-----
4.29652E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
4.34957E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	2	:	:
4.40261E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	:	:	2
4.45565E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	:	:	2
4.50870E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	:	:	2
4.56174E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	:	:	2
4.61478E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	:	:	2
4.66783E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	:	:	2
4.72087E+01	:	:	1	:	:	:	3	:	:	:	2
4.77391E+01	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3	-----	2	-----	-----
4.82696E+01	:	:	10	:	:	:	:	:	3	:	2
4.88000E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
4.93304E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
4.98609E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.03913E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.09217E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.14522E+01	:	:	10	:	:	:	:	:	3	:	2
5.19826E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.25130E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.30435E+01	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3	-----	-----
5.35739E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.41043E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.46348E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.51652E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.56957E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.62261E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.67565E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.72870E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.78174E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.83478E+01	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3	-----	-----
5.88783E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.94087E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
5.99391E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
6.04696E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2
6.10000E+01	:	:	1	:	:	:	:	:	3	:	2

-1.00E+03 -5.00E+02 0.00E+00 5.00E+02 1.00E+03 1.50E+03 2.00E+03 2.50E+03 3.00E+03 3.50E+03 4.00E+03

SYMBOL VARIABLE NAME
1 EX
2 PRECA
3 VELT

TIME	PULSO	PREC	VELT	ACET
0.0000E+00	1.0000E+00	1.1000E+00	3.0000E+00	-2.7272E-01
5.3043SE-01	0.0000E+00	1.7629E+00	5.0185E+01	1.8941SE+02
1.06087E+00	0.0000E+00	1.84261E+00	1.5634E+02	2.00536E+02
1.59136E+00	0.0000E+00	1.84881E+00	2.61480E+02	1.92511E+02
2.12174E+00	0.0000E+00	1.7953E+00	3.5572E+02	1.49329E+02
2.65217E+00	0.0000E+00	1.42248E+00	4.00366E+02	4.05640E-01
3.18261E+00	0.0000E+00	1.41275E+00	4.00405E+02	-1.85975E+01
3.71304E+00	0.0000E+00	1.43234E+00	4.01210E+02	1.25666E+01
4.24348E+00	0.0000E+00	1.42297E+00	3.99985E+02	1.13709E+00
4.77391E+00	1.0000E+00	1.41430E+00	3.99517E+02	-1.43670E+01
5.3043SE+00	0.0000E+00	1.41844E+00	4.01371E+02	-6.10158E+00
5.83478E+00	0.0000E+00	1.42506E+00	4.00254E+02	3.97605E+00
6.36522E+00	0.0000E+00	1.42117E+00	4.01125E+02	-1.62409E+00
6.89565E+00	1.0000E+00	1.41356E+00	4.00904E+02	-1.63330E+01
7.42609E+00	0.0000E+00	1.41204E+00	4.02043E+02	-2.05963E+01
7.95652E+00	0.0000E+00	1.41848E+00	3.97704E+02	-5.87637E+00
8.48696E+00	0.0000E+00	1.41979E+00	3.99410E+02	-3.63755E+00
9.01739E+00	0.0000E+00	1.43495E+00	4.00045E+02	1.54289E+01
9.54783E+00	0.0000E+00	1.43758E+00	4.01129E+02	1.79669E+01
1.00783E+01	0.0000E+00	1.42775E+00	3.99456E+02	7.44794E+00
1.06087E+01	-1.0000E+00	1.42435E+00	4.01171E+02	2.94031E+00
1.11391E+01	-1.0000E+00	1.42496E+00	4.00409E+02	3.82892E+00
1.16696E+01	1.2584E-05	1.43120E+00	3.97023E+02	1.14364E+01
1.22000E+01	0.0000E+00	1.42092E+00	4.01101E+02	-2.00049E+00
1.27304E+01	1.0000E+00	1.41356E+00	4.00947E+02	-1.63516E+01
1.32609E+01	-7.19164E-06	1.41204E+00	4.02027E+02	-2.07965E+01
1.37913E+01	1.0000E+00	1.41874E+00	4.00171E+02	-5.46988E+00
1.43217E+01	-1.0000E+00	1.43711E+00	4.00930E+02	1.75224E+01
1.48522E+01	1.4383E-05	1.41875E+00	4.00003E+02	-5.44185E+00
1.53826E+01	1.0000E+00	1.81800E+00	4.39177E+02	1.68629E+02
1.59136E+01	-5.3937E-06	2.01866E+00	5.42198E+02	2.05416E+02
1.64435E+01	0.0000E+00	2.02828E+00	6.49689E+02	1.97647E+02
1.69739E+01	0.0000E+00	2.06889E+00	7.54902E+02	1.96376E+02
1.75043E+01	1.0000E+00	2.10256E+00	8.58669E+02	1.93626E+02
1.80348E+01	1.0000E+00	2.14897E+00	9.61358E+02	1.93244E+02
1.85652E+01	1.0000E+00	2.19538E+00	1.06377E+03	1.92609E+02
1.90957E+01	1.0000E+00	2.24179E+00	1.16579E+03	1.91750E+02
1.96261E+01	1.0000E+00	2.28820E+00	1.26730E+03	1.90721E+02
2.01565E+01	1.0000E+00	2.33461E+00	1.36822E+03	1.89525E+02
2.06870E+01	1.0000E+00	2.38102E+00	1.46847E+03	1.88192E+02
2.12174E+01	1.0000E+00	2.42744E+00	1.56797E+03	1.86742E+02
2.17478E+01	1.0000E+00	2.58372E+00	1.65194E+03	1.88789E+02
2.22783E+01	0.0000E+00	2.59681E+00	1.75508E+03	1.89963E+02
2.28087E+01	0.0000E+00	2.59683E+00	1.85345E+03	1.81030E+02
2.33391E+01	0.0000E+00	2.59682E+00	1.94719E+03	1.72505E+02
2.38696E+01	0.0000E+00	2.59682E+00	2.03652E+03	1.64332E+02
2.44000E+01	-1.0000E+00	2.57934E+00	2.11911E+03	1.42719E+02
2.49304E+01	0.0000E+00	2.56200E+00	1.88252E+03	1.21734E+02
2.54609E+01	0.0000E+00	2.54226E+00	2.24939E+03	9.86620E+01
2.59913E+01	0.0000E+00	2.51407E+00	2.29507E+03	6.75102E+01
2.65217E+01	0.0000E+00	2.50397E+00	2.32694E+03	5.42765E+01

TIME	PULSO	PREC	VELT	ACET
2.70522E+01	0.00000E+00	2.49128E+00	2.35075E+03	3.05322E+01
2.75826E+01	0.00000E+00	2.47190E+00	2.36630E+03	1.48174E+01
2.81130E+01	0.00000E+00	2.47507E+00	2.37067E+03	1.74918E+01
2.86435E+01	0.00000E+00	2.46206E+00	2.35050E+03	0.51119E-01
2.91739E+01	0.00000E+00	2.46338E+00	2.39156E+03	2.60180E+00
2.97043E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.39258E+03	1.89500E+00
3.02348E+01	0.00000E+00	2.46338E+00	2.39357E+03	1.81747E+00
3.07652E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.39450E+03	1.72867E+00
3.12957E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.39539E+03	1.64564E+00
3.18261E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.39624E+03	1.56692E+00
3.23565E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.39705E+03	1.49205E+00
3.28870E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.39782E+03	1.42092E+00
3.34174E+01	0.00000E+00	2.46332E+00	2.39856E+03	1.35457E+00
3.39478E+01	0.00000E+00	2.46334E+00	2.39926E+03	1.29304E+00
3.44783E+01	0.00000E+00	2.46335E+00	2.39993E+03	1.23281E+00
3.50087E+01	0.00000E+00	2.46335E+00	2.40065E+03	1.17470E+00
3.55391E+01	0.00000E+00	2.46336E+00	2.40137E+03	1.11807E+00
3.60696E+01	0.00000E+00	2.46336E+00	2.40205E+03	1.06229E+00
3.66000E+01	0.00000E+00	2.46336E+00	2.40280E+03	1.00849E+00
3.71304E+01	0.00000E+00	2.46336E+00	2.40362E+03	9.56291E-01
3.76609E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.40332E+03	9.18102E-01
3.81913E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.40380E+03	8.75577E-01
3.87217E+01	0.00000E+00	2.46341E+00	2.40425E+03	8.89316E-01
3.92522E+01	0.00000E+00	2.46220E+00	2.40082E+03	-3.27245E-01
3.97826E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.40136E+03	1.09803E+00
4.03130E+01	0.00000E+00	2.46340E+00	2.40193E+03	1.00933E+00
4.08435E+01	1.00005E+00	2.46106E+00	2.39973E+03	-1.65291E+00
4.13739E+01	-6.47248E-05	2.46286E+00	2.40094E+03	4.90284E-01
4.19043E+01	0.00000E+00	2.47211E+00	2.40098E+03	1.19192E+01
4.24348E+01	0.00000E+00	2.46337E+00	2.40112E+03	1.11972E+00
4.29652E+01	0.00000E+00	2.46341E+00	2.40169E+03	1.12620E+00
4.34957E+01	0.00000E+00	2.45844E+00	2.40195E+03	-5.26996E+00
4.40261E+01	0.00000E+00	2.68936E+00	2.45715E+03	1.93151E+02
4.45565E+01	0.00000E+00	2.68963E+00	2.55726E+03	1.84231E+02
4.50870E+01	0.00000E+00	2.69543E+00	2.65340E+03	1.79245E+02
4.56174E+01	0.00000E+00	2.69541E+00	2.74722E+03	1.70792E+02
4.61478E+01	0.00000E+00	2.69542E+00	2.93567E+03	1.62756E+02
4.66783E+01	0.00000E+00	2.69542E+00	2.91995E+03	1.55096E+02
4.72087E+01	0.00000E+00	2.67823E+00	2.99829E+03	1.36477E+02
4.77391E+01	-1.00002E+00	2.67126E+00	3.06843E+03	1.25352E+02
4.82696E+01	-1.00000E+00	2.66781E+00	3.13453E+03	1.16969E+02
4.88000E+01	5.03415E-05	2.63185E+00	3.18740E+03	8.65262E+01
4.93304E+01	0.00000E+00	2.62738E+00	3.23196E+03	7.91664E+01
4.98609E+01	0.00000E+00	2.60832E+00	3.26620E+03	6.16065E+01
5.03913E+01	0.00000E+00	2.59480E+00	3.29454E+03	5.30039E+01
5.09217E+01	0.00000E+00	3.58521E+00	3.31804E+03	3.65396E+01
5.14522E+01	-1.00004E+00	2.52063E+00	3.33641E+03	2.32502E+01
5.19826E+01	0.00000E+00	2.51769E+00	3.34725E+03	2.15724E+01
5.25130E+01	0.00000E+00	2.56641E+00	3.25822E+03	2.08931E+01
5.30435E+01	0.00000E+00	2.55619E+00	3.36225E+03	5.92945E+00
5.35739E+01	0.00000E+00	2.55632E+00	3.37741E+03	6.56492E+00

TIME	PULSC	PREC	VELT	ACET
5.41043E+01	0.00000E+00	2.55622E+00	3.37234E+03	9.08651E+00
5.46348E+01	0.00000E+00	2.55621E+00	3.37703E+03	8.65170E+00
5.51652E+01	0.00000E+00	2.54459E+00	3.37684E+03	-1.89881E+00
5.56957E+01	0.00000E+00	2.55039E+00	3.38119E+03	3.11994E+00
5.62261E+01	0.00000E+00	2.55039E+00	3.38281E+03	2.97272E+00
5.67565E+01	0.00000E+00	2.55635E+00	3.38435E+03	2.79872E+00
5.72870E+01	0.00000E+00	2.55637E+00	3.38582E+03	2.67716E+00
5.78174E+01	0.00000E+00	2.55038E+00	3.38721E+03	2.55748E+00
5.83478E+01	0.00000E+00	2.53780E+00	3.38715E+03	-8.88042E+00
5.88783E+01	0.00000E+00	2.54460E+00	3.38870E+03	-2.79422E+00
5.94087E+01	0.00000E+00	2.54459E+00	3.38725E+03	-2.65470E+00
5.99391E+01	0.00000E+00	2.54459E+00	3.38588E+03	-2.53083E+00
6.04696E+01	0.00000E+00	2.54459E+00	3.38457E+03	-2.41231E+00
6.10000E+01	0.00000E+00	2.54459E+00	3.38332E+03	-2.29903E+00

FORTRAN STOP

En la figura 5.15 aparece el mismo rodado, pero ahora con las condiciones máximas del vapor, es decir, con $VAR = 69.3 \times 10^3$, en donde se observa que el controlador de rodado también cumple con la curva. La única diferencia que existe entre estas dos figuras, es el valor que toma la presión de control, ya que cuando la presión y temperatura de el vapor son muy bajos se requiere abrir mas las válvulas de corte para poder cumplir la curva de rodado y cuando el valor de la presión y temperatura del vapor son altas, se requiere de poca apertura de la válvula.

Otra prueba más rigurosa al sistema de control, consiste en hacer variar el valor "VAR" durante el proceso de rodado. En la figura 5.16 se propone una función de variación de "VAR" la cual se le aplicará a la turbina y entonces el sistema de control se encargará de anular estas anomalías controlando la apertura de la válvula de corte. En la figura 5.17 aparece la gráfica correspondiente, la curva con el número 4 representa a "VAR", aparece además el listado de las variables que nos permite conocer su valor en un momento determinado. En la gráfica se observa que la velocidad de la turbina no se ve alterada cuando ocurre un cambio brusco de "VAR", el sistema de control cumple con la curva de rodado indicada.

PLOT EXPONENTS ONLY

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 0.000100 VERTICAL SCALE FACTOR = 5.30E-01

TIME	-1.00E103	-5.00E102	0.00E100	5.00E100	1.00E101	1.50E102	2.00E103	2.50E103	3.00E103	3.50E103	4.00E103
0.00000E+00											
5.30435E-01											
1.06087E+00											
1.59130E+00			3	2							
2.12174E+00		10	3	2							
2.65217E+00		10	3	12							
3.18261E+00		10	3	12							
3.71304E+00		01	3	2							
4.24348E+00		1	3	12							
4.77391E+00		10	3	12							
5.30435E+00		-1	-3	-2							
5.83478E+00		1	3	2							
6.36522E+00		1	3	2							
6.89565E+00		10	3	12							
7.42609E+00		10	3	12							
7.95652E+00		1	3	2							
8.48696E+00		1	32	1							
9.01739E+00		01	3	2							
9.54783E+00		1	3	12							
1.00782E+01		10	3	12							
1.06087E+01		-1	-3	-1							
1.11391E+01		01	2	3							
1.16696E+01		01	3	2							
1.22000E+01		1	3	2							
1.27304E+01		1	3	12							
1.32609E+01		10	3	12							
1.37913E+01		1	3	2							
1.43217E+01		01	3	2							
1.48522E+01		1	3	12							
1.53826E+01		10	3	2							
1.59130E+01		-1	-3	-2							
1.64435E+01		1	3	2							
1.69739E+01		1	3								
1.75043E+01		1	2	3							
1.80348E+01		1	2	3							
1.85652E+01		1	2	3							
1.90957E+01		1	2	3							
1.96261E+01		10	2	3							
2.01565E+01		1	2	3							
2.06870E+01		1	2	3							
2.12174E+01		-1	-2								
2.17478E+01		10	2	3							
2.22783E+01		1	2	3							
2.28087E+01		1	2	3							
2.33391E+01		1	2	3							
2.38696E+01		1	2	3							
2.44000E+01		10	2	3							
2.49304E+01		1	2	3							
2.54609E+01		1	2	3							
2.59913E+01		1	2	3							
2.65217E+01		-1	-2								
2.70522E+01		1	2	3							
2.75826E+01		1	2	3							
2.81130E+01		1	2	3							
2.86435E+01		1	2	3							
2.91739E+01		1	2	3							
2.97043E+01		1	2	3							
3.02348E+01		1	2	3							

3.07652E+01	1	2	3						
3.12957E+01	1	2	3						
3.18261E+01	01	2	3						
3.23565E+01	1	2	3						
3.28870E+01	01	2	3						
3.34174E+01	1	2	3						
3.39478E+01	1	2	3						
3.44783E+01	1	2	3						
3.50087E+01	1	2	3						
3.55391E+01	1	2	3						
3.60696E+01	01	2	3						
3.66000E+01	1	2	3						
3.71304E+01	1	2	3						
3.76609E+01	1	2	3						
3.81913E+01	1	2	3						
3.87217E+01	1	2	3						
3.92522E+01	1	2	3						
3.97826E+01	1	2	3						
4.03130E+01	01	2	3						
4.08435E+01	1	2	3						
4.13739E+01	10	2	3						
4.19043E+01	1	2	3						
4.24348E+01	1	2	3						
4.29652E+01	1	2	3						
4.34957E+01	1	2	3						
4.40261E+01	1	2	3						
4.45565E+01	1	2	3						
4.50870E+01	1	2	3						
4.56174E+01	1	2	3						
4.61478E+01	1	2	3						
4.66783E+01	1	12	3						
4.72087E+01	1	12	3						
4.77391E+01	1	2	3						
4.82696E+01	1	21	3						
4.88000E+01	1	21	3						
4.93304E+01	1	2	3						
4.98609E+01	01	2	3						
5.03913E+01	01	2	3						
5.09217E+01	1	2	3						
5.14522E+01	1	2	3						
5.19826E+01	1	2	3						
5.25130E+01	1	2	3						
5.30435E+01	1	2	3						
5.35739E+01	1	2	3						
5.41043E+01	1	2	3						
5.46348E+01	1	2	3						
5.51652E+01	1	2	3						
5.56957E+01	1	2	3						
5.62261E+01	10	2	3						
5.67565E+01	1	2	3						
5.72870E+01	1	2	3						
5.78174E+01	1	2	3						
5.83478E+01	1	2	3						
5.88783E+01	1	2	3						
5.94087E+01	1	2	3						
5.99391E+01	1	2	3						
6.04696E+01	1	2	3						
6.10000E+01	1	2	3						

-1.00E+03 -5.00E+02 0.00E+00 5.00E+02 1.00E+03 1.50E+03 2.00E+03 2.50E+03 3.00E+03 3.50E+03 4.00E+03

SYMBOL VARIABLE NAME

1 EX
2 PRECA
3 VELT

LIST PULSO,PREC,VELT,ACET

TIME	PULSO	PREC	VELT	ACET
0.00000E+00	1.00000E+00	1.10000E+00	3.00000E+00	-2.72727E-01
5.30435E-01	-1.12369E-07	1.46593E+00	6.64498E+01	1.97596E+02
1.06087E+00	0.00000E+00	1.47130E+00	1.70342E+02	1.97665E+02
1.59130E+00	0.00000E+00	1.47710E+00	2.74905E+02	1.97969E+02
2.12174E+00	-1.00000E+00	1.46598E+00	3.64459E+02	1.70581E+02
2.65217E+00	-1.00000E+00	1.42294E+00	4.00986E+02	6.21646E+01
3.18261E+00	-1.00000E+00	1.42582E+00	4.05620E+02	7.19673E+01
3.71304E+00	1.00000E+00	1.39579E+00	4.02599E+02	-3.66001E+01
4.24348E+00	0.00000E+00	1.42714E+00	4.02452E+02	7.66465E+01
4.77391E+00	-1.00000E+00	1.41166E+00	4.03346E+02	6.46656E-01
5.30435E+00	0.00000E+00	1.40145E+00	4.02843E+02	-3.66221E+01
5.83478E+00	0.00000E+00	1.40802E+00	4.01243E+02	-3.64767E+01
6.36522E+00	0.00000E+00	1.40213E+00	4.01140E+02	-3.64673E+01
6.89565E+00	-1.00000E+00	1.41437E+00	4.02474E+02	2.16539E+01
7.42609E+00	-1.00000E+00	1.41721E+00	4.05346E+02	3.72656E+01
7.95652E+00	0.00000E+00	1.40763E+00	4.02301E+02	-3.65801E+01
8.48696E+00	0.00000E+00	1.37220E+00	4.06477E+02	-3.65525E+01
9.01739E+00	1.00001E+00	1.40948E+00	4.00304E+02	-3.63913E+01
9.54783E+00	0.00000E+00	1.42809E+00	4.00687E+02	7.98575E+01
1.00783E+01	-1.00001E+00	1.44529E+00	4.04828E+02	1.25128E+02
1.06007E+01	8.98955E-06	1.33840E+00	4.06705E+02	-3.69746E+01
1.11391E+01	1.00001E+00	1.31745E+00	4.03755E+02	-3.67050E+01
1.16696E+01	1.00000E+00	1.40839E+00	4.00523E+02	-3.64112E+01
1.22000E+01	0.00000E+00	1.39576E+00	4.03408E+02	-3.66007E+01
1.27304E+01	0.00000E+00	1.42105E+00	3.98369E+02	5.90293E+01
1.32609E+01	-1.00000E+00	1.41236E+00	4.00916E+02	7.28359E+00
1.37913E+01	8.98955E-06	1.40258E+00	3.97956E+02	-3.61761E+01
1.43217E+01	1.00002E+00	1.40103E+00	4.05506E+02	-3.69641E+01
1.48522E+01	-2.51707E-05	1.41038E+00	4.01184E+02	-1.52507E+01
1.53826E+01	-1.00003E+00	1.49081E+00	4.40631E+02	2.04554E+02
1.59130E+01	3.23624E-05	1.49714E+00	5.56163E+02	2.03970E+02
1.64435E+01	0.00000E+00	1.50062E+00	6.57690E+02	1.95211E+02
1.69739E+01	0.00000E+00	1.50618E+00	7.64807E+02	1.97274E+02
1.75043E+01	0.00000E+00	1.51194E+00	8.71972E+02	1.95303E+02
1.80348E+01	0.00000E+00	1.53246E+00	9.80252E+02	2.11863E+02
1.85652E+01	0.00000E+00	1.52934E+00	1.08573E+03	1.93423E+02
1.90957E+01	0.00000E+00	1.53513E+00	1.19008E+03	1.98051E+02
1.96261E+01	-1.00000E+00	1.55650E+00	1.29703E+03	2.11340E+02
2.01565E+01	0.00000E+00	1.55325E+00	1.40424E+03	1.97828E+02
2.06870E+01	0.00000E+00	1.55837E+00	1.50995E+03	1.93978E+02
2.12174E+01	0.00000E+00	1.57867E+00	1.61502E+03	2.06320E+02
2.17478E+01	-1.00000E+00	1.57792E+00	1.71740E+03	1.96233E+02
2.22783E+01	0.00000E+00	1.57574E+00	1.81906E+03	1.84692E+02
2.28087E+01	0.00000E+00	1.57574E+00	1.91471E+03	1.76605E+02
2.33391E+01	0.00000E+00	1.57574E+00	2.00558E+03	1.67717E+02
2.38696E+01	0.00000E+00	1.56430E+00	2.09110E+03	1.47581E+02
2.44000E+01	-1.00000E+00	1.55605E+00	2.16457E+03	1.34100E+02
2.49304E+01	0.00000E+00	1.54250E+00	2.22750E+03	1.10543E+02
2.54609E+01	0.00000E+00	1.52355E+00	2.27774E+03	8.27730E+01
2.59913E+01	0.00000E+00	1.51193E+00	2.31682E+03	6.40239E+01
2.65217E+01	0.00000E+00	1.50034E+00	2.34291E+03	4.55975E+01

TIME	PULSO	FREC	VELT	ACET
2.70522E+01	0.00000E+00	1.49274E+00	2.36098E+03	3.28730E+01
2.75826E+01	0.00000E+00	1.48513E+00	2.37367E+03	2.00910E+01
2.81130E+01	0.00000E+00	1.48291E+00	2.38239E+03	1.58099E+01
2.86435E+01	0.00000E+00	1.47739E+00	2.38968E+03	6.19114E+00
2.91739E+01	0.00000E+00	1.47711E+00	2.39266E+03	5.46633E+00
2.97043E+01	0.00000E+00	1.47710E+00	2.39549E+03	5.19689E+00
3.02348E+01	0.00000E+00	1.47711E+00	2.39819E+03	4.95592E+00
3.07652E+01	0.00000E+00	1.47772E+00	2.40056E+03	5.75409E+00
3.12957E+01	0.00000E+00	1.47464E+00	2.39805E+03	8.38046E-01
3.18261E+01	1.00000E+00	1.46856E+00	2.40005E+03	-9.94292E+00
3.23565E+01	-7.19164E-06	1.47287E+00	2.39750E+03	-2.11256E+00
3.28870E+01	1.00002E+00	1.47126E+00	2.39499E+03	-4.66105E+00
3.34174E+01	0.00000E+00	1.47712E+00	2.39736E+03	5.05522E+00
3.39478E+01	0.00000E+00	1.47713E+00	2.39998E+03	4.82679E+00
3.44783E+01	0.00000E+00	1.46922E+00	2.39850E+03	-2.50365E+01
3.50087E+01	0.00000E+00	1.47133E+00	2.40015E+03	-5.07665E+00
3.55391E+01	0.00000E+00	1.47193E+00	2.40020E+03	-3.97073E+00
3.60696E+01	1.00003E+00	1.47299E+00	2.39552E+03	-1.72656E+00
3.66000E+01	0.00000E+00	1.47712E+00	2.39608E+03	5.17307E+00
3.71304E+01	0.00000E+00	1.47711E+00	2.39876E+03	4.91726E+00
3.76609E+01	0.00000E+00	1.47159E+00	2.40038E+03	-4.56459E+00
3.81913E+01	0.00000E+00	1.47707E+00	2.39980E+03	4.74241E+00
3.87217E+01	0.00000E+00	1.47137E+00	2.40010E+03	-4.92389E+00
3.92522E+01	0.00000E+00	1.47059E+00	2.39441E+03	-5.76154E+00
3.97826E+01	0.00000E+00	1.47776E+00	2.39446E+03	6.37823E+00
4.03130E+01	1.00005E+00	1.47490E+00	2.39450E+03	1.59917E+00
4.08435E+01	-8.62997E-05	1.49986E+00	2.39501E+03	2.54537E+01
4.13739E+01	-1.00010E+00	1.49595E+00	2.39603E+03	3.44348E+01
4.19043E+01	0.00000E+00	1.48396E+00	2.39692E+03	1.61378E+01
4.24348E+01	0.00000E+00	1.63310E+00	2.43399E+03	1.84804E+02
4.29652E+01	0.00000E+00	1.65120E+00	2.53507E+03	1.91750E+02
4.34957E+01	0.00000E+00	1.65117E+00	2.63435E+03	1.82698E+02
4.40261E+01	0.00000E+00	1.65120E+00	2.72896E+03	1.74120E+02
4.45566E+01	0.00000E+00	1.65119E+00	2.81912E+03	1.65916E+02
4.50870E+01	0.00000E+00	1.65118E+00	2.90503E+03	1.58101E+02
4.56174E+01	0.00000E+00	1.64564E+00	2.98641E+03	1.45832E+02
4.61478E+01	0.00000E+00	1.63376E+00	3.05771E+03	1.28706E+02
4.66783E+01	0.00000E+00	1.61402E+00	3.12108E+03	1.04531E+02
4.72087E+01	0.00000E+00	1.61300E+00	3.17701E+03	9.85485E+01
4.77391E+01	0.00000E+00	1.59298E+00	3.22193E+03	7.48953E+01
4.82696E+01	0.00000E+00	1.58608E+00	3.2604E+03	6.52015E+01
4.88000E+01	0.00000E+00	1.57640E+00	3.29137E+03	5.15483E+01
4.93304E+01	0.00000E+00	1.56994E+00	3.31393E+03	4.26215E+01
4.98609E+01	1.00004E+00	1.54849E+00	3.33061E+03	1.72551E+01
5.03913E+01	1.00000E+00	1.55247E+00	3.34433E+03	2.05722E+01
5.09217E+01	0.00000E+00	1.54677E+00	3.35621E+03	1.29334E+01
5.14522E+01	0.00000E+00	1.54674E+00	3.36290E+03	1.22956E+01
5.19826E+01	0.00000E+00	1.54676E+00	3.36926E+03	1.17434E+01
5.25130E+01	0.00000E+00	1.54094E+00	3.37226E+03	4.63501E+00
5.30435E+01	0.00000E+00	1.54094E+00	3.37466E+03	4.41750E+00
5.35739E+01	0.00000E+00	1.54098E+00	3.37695E+03	4.25586E+00

TIME	PULSO	FREC	VELT	ACET
5.41043E+01	0.00000E+00	1.54096E+00	3.37913E+03	4.04168E+00
5.46348E+01	0.00000E+00	1.54096E+00	3.38121E+03	3.84244E+00
5.51652E+01	0.00000E+00	1.54095E+00	3.38319E+03	3.65574E+00
5.56957E+01	0.00000E+00	1.54095E+00	3.38507E+03	3.47983E+00
5.62261E+01	-1.00000E+00	1.54094E+00	3.38687E+03	3.31350E+00
5.67565E+01	0.00000E+00	1.53531E+00	3.38613E+03	-3.37154E+00
5.72870E+01	0.00000E+00	1.53513E+00	3.38429E+03	-3.42090E+00
5.78174E+01	0.00000E+00	1.53514E+00	3.38252E+03	-3.25850E+00
5.83478E+01	0.00000E+00	1.53514E+00	3.38083E+03	-3.10427E+00
5.88783E+01	0.00000E+00	1.54094E+00	3.38410E+03	3.56119E+00
5.94087E+01	0.00000E+00	1.54093E+00	3.38594E+03	3.38594E+00
5.99391E+01	0.00000E+00	1.52829E+00	3.38521E+03	-1.19315E+01
6.04696E+01	0.00000E+00	1.54094E+00	3.38645E+03	3.34741E+00
6.10000E+01	0.00000E+00	1.54055E+00	3.38517E+03	3.00421E+00

FORTRAM STOP

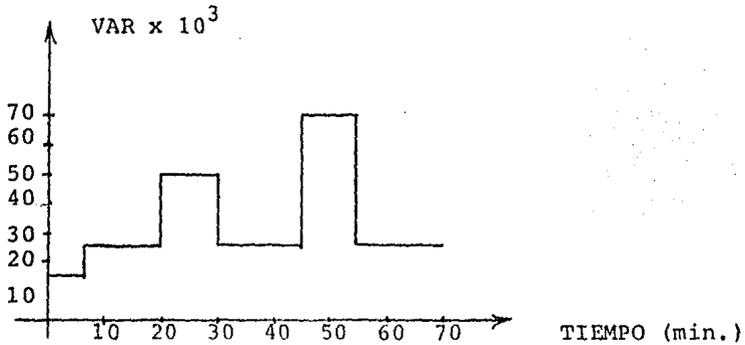


FIGURA 5.16 Función de variación de "VAR"

Ya que las curvas de velocidad obtenidas en las gráficas de las figuras 5.14, 5.15, 5.17 son iguales, podemos afirmar que el sistema de control propuesto en esta tesis realizará el rodado de la turbina como lo recomienda el fabricante -- aunque existan variaciones en la presión y temperatura del vapor. Por esta razón, para realizar las siguientes pruebas al controlador se utilizará $VAR=50 \times 10^3$.

PLOT EX,PRESA,VELT,VARH

FIGURA 5.17

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 5.30E-01

TIME	-1.00E+03	-5.00E+02	0.00E+00	5.00E+02	1.00E+03	1.50E+03	2.00E+03	2.50E+03	3.00E+03	3.50E+03	4.00E+03
0.00000E+00		2	31	4							
5.30435E-01			13	4	2						
1.06087E+00			10 3	4	2						
1.59130E+00			1	3 4	2						
2.12174E+00			10	3 4	2						
2.45217E+00			1	3 12 4							
3.18261E+00			10	3 12 4							
3.71304E+00			1	3 12 4							
4.24348E+00			10	3 12 4							
4.77391E+00			1	3 12 4							
5.30435E+00			01	3 12 4							
5.83478E+00			1	3 12 4							
6.36522E+00			1	3 2	4						
6.89565E+00			10	3 12	4						
7.42609E+00			10	3 12	4						
7.95652E+00			1	3 2	4						
8.48696E+00			1	3 12	4						
9.01739E+00			1	3 12	4						
9.54783E+00			1	3 12	4						
1.00783E+01			01	3 12	4						
1.06087E+01			1	3 12	4						
1.11391E+01			1	3 12	4						
1.16696E+01			01	3 2	4						
1.22000E+01			1	3 12	4						
1.27304E+01			1	3 12	4						
1.32609E+01			1	3 12	4						
1.37913E+01			10	3 12	4						
1.43217E+01			01	3 12	4						
1.48522E+01			10	3 12	4						
1.53826E+01			1	3 1	2 4						
1.59130E+01			1	3	4						
1.64435E+01			1	3	42						
1.69739E+01			1	3	1 4 2						
1.75043E+01			1	3	1 4 2						
1.80348E+01			1	3 1 4	2						
1.85652E+01			1	134	2						
1.90957E+01			1	1	43 2						
1.96261E+01			1	1	4 3 2						
2.01565E+01			1	1	12 3	4					
2.06870E+01			1	1	12 3	4					
2.12174E+01			1	12	3	4					
2.17478E+01			1	1	12 3	4					
2.22783E+01			1	1	12 3	4					
2.28087E+01			1	1	12 3	4					
2.33391E+01			1	1	12 3	4					
2.38696E+01			10	1	2	13 4					
2.44000E+01			1	1	2	1 4					
2.49304E+01			1	1	2	1 43					
2.54609E+01			1	1	2 1	1 4 3					
2.59913E+01			1	1	2 1	1 4 3					
2.65217E+01			10	1	2 1	1 4 3					
2.70522E+01			01	1	2 1	1 4 3					
2.75826E+01			1	1	2 1	1 4 3					
2.81130E+01			1	1	2 1	1 4 3					
2.86435E+01			1	1	2 1	1 4 3					
2.91739E+01			1	1	2 1	1 4 3					
2.97043E+01			01	1	2 1	1 4 3					
3.02348E+01			10	1	124	1 4 3					

3.07652E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	1	:	:
3.12957E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.18261E+01	-----	-----	2	-----	2	-----	3	-----	1	-----	-----
3.23565E+01	:	:	01	:	2	:	3	:	:	:	:
3.28870E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.34174E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.39478E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.44783E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.50087E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.55391E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.60696E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.66000E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.71304E+01	-----	-----	1	-----	2	-----	3	-----	1	-----	-----
3.76609E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.81913E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.87217E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.92522E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
3.97826E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
4.03130E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
4.08435E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
4.13739E+01	:	:	1	:	2	:	3	:	:	:	:
4.19043E+01	:	:	01	:	2	:	3	:	:	:	:
4.24348E+01	-----	-----	1	-----	2	-----	3	-----	1	-----	-----
4.29652E+01	:	:	1	:	1	:	2	13	:	:	:
4.34957E+01	:	:	1	:	1	:	2	3	:	:	:
4.40261E+01	:	:	1	:	1	:	2	3	:	:	:
4.45565E+01	:	:	1	:	1	:	2	3	:	:	:
4.50870E+01	:	:	10	:	:	:	2	34	:	:	:
4.56174E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
4.61478E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
4.66783E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
4.72087E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
4.77391E+01	-----	-----	1	-----	2	-----	3	-----	1	-----	-----
4.82696E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
4.88000E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
4.93304E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
4.98609E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.03913E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.09217E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.14522E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.19826E+01	:	:	01	:	2	:	:	43	:	:	:
5.25130E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.30435E+01	-----	-----	1	-----	2	-----	3	-----	1	-----	-----
5.35739E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.41043E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.46348E+01	:	:	1	:	2	:	:	43	:	:	:
5.51652E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.56957E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.62261E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.67565E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.72870E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.78174E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.83478E+01	-----	-----	10	-----	1	-----	2	-----	1	-----	-----
5.88783E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.94087E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
5.99391E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
6.04696E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
6.10000E+01	:	:	1	:	1	2	:	:	:	3	:
-1.00E+03	-5.00E+02	0.00E+00	5.00E+02	1.00E+03	1.50E+03	2.00E+03	2.50E+03	3.00E+03	3.50E+03	4.00E+03	

SYMBOL VARIABLE NAME

- 1 EX
- 2 PRECA
- 3 VELI
- 4 VARH

LIST PULSO,PREC,VAR,VELT,ACET

TIME	PULSO	PREC	VAR	VELT	ACET
0.00000E+00	1.00000E+00	1.10000E+00	1.50000E+04	3.00000E+00	-2.72727E-01
5.30435E-01	0.00000E+00	1.63962E+00	1.50000E+04	5.61888E+01	1.86532E+02
1.06087E+00	-1.00000E+00	1.70059E+00	1.50000E+04	1.61227E+02	2.00932E+02
1.59130E+00	0.00000E+00	1.72720E+00	1.50000E+04	2.66925E+02	2.00971E+02
2.12174E+00	-1.00000E+00	1.64854E+00	1.50000E+04	3.63350E+02	1.62314E+02
2.65217E+00	2.24739E-06	1.41922E+00	1.50000E+04	3.96418E+02	2.81480E+00
3.18261E+00	-1.00000E+00	1.42035E+00	1.50000E+04	4.00608E+02	4.68778E+00
3.71304E+00	5.39373E-06	1.41596E+00	1.50000E+04	4.01030E+02	-5.02355E+00
4.24348E+00	-1.00000E+00	1.43076E+00	1.50000E+04	3.97094E+02	2.18141E+01
4.77391E+00	0.00000E+00	1.41909E+00	1.50000E+04	4.00181E+02	2.19912E+00
5.30435E+00	1.00000E+00	1.41309E+00	1.50000E+04	4.00187E+02	-1.33679E+01
5.83478E+00	0.00000E+00	1.42247E+00	1.50000E+04	4.00252E+02	6.65954E+00
6.36522E+00	0.00000E+00	1.40987E+00	2.50000E+04	4.01242E+02	-3.64765E+01
6.89565E+00	-1.00000E+00	1.41317E+00	2.50000E+04	4.01405E+02	-6.41893E+00
7.42609E+00	-1.00000E+00	1.41980E+00	2.50000E+04	4.00323E+02	1.52977E+01
7.95652E+00	0.00000E+00	1.40959E+00	2.50000E+04	4.00806E+02	-3.64359E+01
8.48696E+00	0.00000E+00	1.42204E+00	2.50000E+04	4.00445E+02	2.07681E+01
9.01739E+00	0.00000E+00	1.41678E+00	2.50000E+04	4.00078E+02	6.84294E+00
9.54783E+00	0.00000E+00	1.41451E+00	2.50000E+04	4.00664E+02	-8.86511E-01
1.00783E+01	1.00000E+00	1.41202E+00	2.50000E+04	3.97087E+02	-1.16287E+01
1.06087E+01	0.00000E+00	1.43324E+00	2.50000E+04	3.98992E+02	5.09956E+01
1.11391E+01	0.00000E+00	1.41551E+00	2.50000E+04	3.99756E+02	2.76181E+00
1.16696E+01	1.00000E+00	1.40976E+00	2.50000E+04	3.96771E+02	-3.60701E+01
1.22000E+01	0.00000E+00	1.41888E+00	2.50000E+04	3.97201E+02	1.29567E+01
1.27304E+01	0.00000E+00	1.41476E+00	2.50000E+04	4.00634E+02	2.51911E-02
1.32609E+01	0.00000E+00	1.41506E+00	2.50000E+04	4.00784E+02	8.90857E-01
1.37913E+01	-1.00000E+00	1.44328E+00	2.50000E+04	4.02966E+02	5.78418E+01
1.43217E+01	1.00000E+00	1.41681E+00	2.50000E+04	3.95358E+02	7.35679E+00
1.48522E+01	-1.00000E+00	1.43317E+00	2.50000E+04	4.00973E+02	4.24923E+01
1.53826E+01	5.39373E-06	1.59143E+00	2.50000E+04	4.21361E+02	1.81667E+02
1.59130E+01	0.00000E+00	1.63419E+00	2.50000E+04	5.26123E+02	1.96643E+02
1.64435E+01	0.00000E+00	1.65700E+00	2.50000E+04	6.33219E+02	1.99052E+02
1.69739E+01	0.00000E+00	1.68011E+00	2.50000E+04	7.38857E+02	2.01174E+02
1.75043E+01	0.00000E+00	1.69746E+00	2.50000E+04	8.44697E+02	2.00633E+02
1.80348E+01	0.00000E+00	1.72253E+00	2.50000E+04	9.51756E+02	2.02108E+02
1.85652E+01	0.00000E+00	1.73807E+00	2.50000E+04	1.05737E+03	1.99573E+02
1.90957E+01	0.00000E+00	1.75362E+00	2.50000E+04	1.16344E+03	1.97750E+02
1.96261E+01	0.00000E+00	1.78466E+00	2.50000E+04	1.27066E+03	2.00489E+02
2.01565E+01	0.00000E+00	1.64481E+00	5.00000E+04	1.38735E+03	2.27709E+02
2.06870E+01	0.00000E+00	1.61639E+00	5.00000E+04	1.49449E+03	1.95911E+02
2.12174E+01	0.00000E+00	1.62767E+00	5.00000E+04	1.59719E+03	1.95506E+02
2.17478E+01	0.00000E+00	1.63377E+00	5.00000E+04	1.69816E+03	1.91067E+02
2.22783E+01	0.00000E+00	1.63953E+00	5.00000E+04	1.79782E+03	1.86434E+02
2.28087E+01	0.00000E+00	1.63960E+00	5.00000E+04	1.89438E+03	1.77691E+02
2.33391E+01	0.00000E+00	1.63956E+00	5.00000E+04	1.98440E+03	1.69295E+02
2.38696E+01	-1.00000E+00	1.65163E+00	5.00000E+04	2.07446E+03	1.70361E+02
2.44000E+01	0.00000E+00	1.60131E+00	5.00000E+04	2.15107E+03	1.23881E+02
2.49304E+01	0.00000E+00	1.59301E+00	5.00000E+04	2.21321E+03	1.11239E+02
2.54609E+01	0.00000E+00	1.56846E+00	5.00000E+04	2.26507E+03	8.48338E+01
2.59913E+01	0.00000E+00	1.55371E+00	5.00000E+04	2.30803E+03	6.70943E+01
2.65217E+01	-1.00000E+00	1.53927E+00	5.00000E+04	2.33713E+03	5.02055E+01

TIME	PULSO	PREC	VAR	VELT	ACET
2.70522E+01	1.00000E+00	1.52161E+00	5.00000E+04	2.35745E+03	2.97773E+01
2.75826E+01	0.00000E+00	1.51517E+00	5.00000E+04	2.37006E+03	2.14912E+01
2.81130E+01	0.00000E+00	1.51168E+00	5.00000E+04	2.37929E+03	1.67034E+01
2.86435E+01	0.00000E+00	1.50774E+00	5.00000E+04	2.38784E+03	1.13786E+01
2.91739E+01	0.00000E+00	1.50618E+00	5.00000E+04	2.39285E+03	9.08955E+00
2.97043E+01	1.00000E+00	1.49372E+00	5.00000E+04	2.39376E+03	-6.14102E+00
3.02348E+01	-1.00000E+00	1.62233E+00	2.50000E+04	2.39335E+03	2.03703E+01
3.07652E+01	0.00000E+00	1.56865E+00	2.50000E+04	2.39737E+03	-1.22275E+01
3.12957E+01	0.00000E+00	1.59320E+00	2.50000E+04	2.40041E+03	2.02215E+00
3.18261E+01	0.00000E+00	1.59319E+00	2.50000E+04	2.40187E+03	2.68146E+00
3.23565E+01	1.00003E+00	1.56956E+00	2.50000E+04	2.40052E+03	-1.19264E+01
3.28870E+01	0.00000E+00	1.58739E+00	2.50000E+04	2.39905E+03	-5.86603E-01
3.34174E+01	0.00000E+00	1.58738E+00	2.50000E+04	2.39875E+03	-5.63765E-01
3.39478E+01	0.00000E+00	1.58730E+00	2.50000E+04	2.39846E+03	-5.35800E-01
3.44783E+01	0.00000E+00	1.58730E+00	2.50000E+04	2.39818E+03	-5.09677E-01
3.50087E+01	0.00000E+00	1.58730E+00	2.50000E+04	2.39792E+03	-4.85152E-01
3.55391E+01	0.00000E+00	1.58738E+00	2.50000E+04	2.39767E+03	-4.61892E-01
3.60696E+01	0.00000E+00	1.58738E+00	2.50000E+04	2.39743E+03	-4.39875E-01
3.66000E+01	0.00000E+00	1.58742E+00	2.50000E+04	2.39720E+03	-3.94931E-01
3.71304E+01	0.00000E+00	1.58741E+00	2.50000E+04	2.39699E+03	-3.83523E-01
3.76609E+01	0.00000E+00	1.58740E+00	2.50000E+04	2.39678E+03	-3.70139E-01
3.81913E+01	0.00000E+00	1.58740E+00	2.50000E+04	2.39658E+03	-3.55860E-01
3.87217E+01	0.00000E+00	1.58739E+00	2.50000E+04	2.39640E+03	-3.41087E-01
3.92522E+01	0.00000E+00	1.58739E+00	2.50000E+04	2.39622E+03	-3.26327E-01
3.97826E+01	0.00000E+00	1.58739E+00	2.50000E+04	2.39605E+03	-3.11768E-01
4.03130E+01	0.00000E+00	1.58739E+00	2.50000E+04	2.39588E+03	-2.97696E-01
4.08435E+01	0.00000E+00	1.58739E+00	2.50000E+04	2.39573E+03	-2.84091E-01
4.13739E+01	0.00000E+00	1.58739E+00	2.50000E+04	2.39558E+03	-2.70974E-01
4.19043E+01	1.00004E+00	1.58666E+00	2.50000E+04	2.39626E+03	-3.76829E-01
4.24348E+01	0.00000E+00	1.98221E+00	2.50000E+04	2.43996E+03	1.68669E+02
4.29652E+01	0.00000E+00	2.08604E+00	2.50000E+04	2.53833E+03	1.93667E+02
4.34957E+01	0.00000E+00	2.08633E+00	2.50000E+04	2.63866E+03	1.84635E+02
4.40261E+01	0.00000E+00	2.08632E+00	2.50000E+04	2.73428E+03	1.75940E+02
4.45565E+01	0.00000E+00	2.08632E+00	2.50000E+04	2.82539E+03	1.67658E+02
4.50870E+01	-1.00000E+00	1.98182E+00	6.92800E+04	2.93418E+03	3.83070E+02
4.56174E+01	0.00000E+00	1.63950E+00	6.92800E+04	3.03167E+03	1.36185E+02
4.61478E+01	0.00000E+00	1.62890E+00	6.92800E+04	3.09766E+03	1.19748E+02
4.66783E+01	0.00000E+00	1.61640E+00	6.92800E+04	3.15689E+03	1.03553E+02
4.72087E+01	0.00000E+00	1.60479E+00	6.92800E+04	3.20542E+03	8.80129E+01
4.77391E+01	0.00000E+00	1.58749E+00	6.92800E+04	3.24786E+03	6.69355E+01
4.82696E+01	0.00000E+00	1.57595E+00	6.92800E+04	3.28094E+03	5.19656E+01
4.88000E+01	0.00000E+00	1.56951E+00	6.92800E+04	3.30760E+03	4.26932E+01
4.93304E+01	0.00000E+00	1.56418E+00	6.92800E+04	3.32693E+03	3.51582E+01
4.98609E+01	0.00000E+00	1.55258E+00	6.92800E+04	3.34180E+03	2.08782E+01
5.03913E+01	0.00000E+00	1.55258E+00	6.92800E+04	3.35261E+03	1.98973E+01
5.09217E+01	0.00000E+00	1.54705E+00	6.92800E+04	3.36227E+03	1.28661E+01
5.14522E+01	0.00000E+00	1.54678E+00	6.92800E+04	3.36868E+03	1.17662E+01
5.19826E+01	1.00004E+00	1.53432E+00	6.92800E+04	3.37105E+03	-3.25070E+00
5.25130E+01	0.00000E+00	1.54097E+00	6.92800E+04	3.37322E+03	4.54699E+00
5.30435E+01	0.00000E+00	1.54098E+00	6.92800E+04	3.37558E+03	4.34066E+00
5.35739E+01	0.00000E+00	1.54098E+00	6.92800E+04	3.37782E+03	4.13381E+00

TIME	PULSO	PREC	VAR	VELT	ACET
5.41043E+01	0.00000E+00	1.54098E+00	6.92800E+04	3.37996E+03	3.93761E+00
5.46348E+01	0.00000E+00	1.54098E+00	6.92800E+04	3.38200E+03	3.75133E+00
5.51652E+01	0.00000E+00	1.75014E+00	2.49990E+04	3.37307E+03	-5.54264E+00
5.56957E+01	0.00000E+00	1.77585E+00	2.50000E+04	3.37675E+03	5.29018E+00
5.62261E+01	0.00000E+00	1.77884E+00	2.50000E+04	3.38011E+03	6.25020E+00
5.67565E+01	0.00000E+00	1.77290E+00	2.50000E+04	3.38175E+03	3.57395E+00
5.72870E+01	0.00000E+00	1.77304E+00	2.50000E+04	3.38363E+03	3.46547E+00
5.78174E+01	0.00000E+00	1.77304E+00	2.50000E+04	3.38542E+03	3.30198E+00
5.83478E+01	-1.00001E+00	1.76300E+00	2.50000E+04	3.38655E+03	-1.13172E+00
5.88783E+01	0.00000E+00	1.76724E+00	2.50000E+04	3.38605E+03	6.77313E-01
5.94087E+01	0.00000E+00	1.76724E+00	2.50000E+04	3.38720E+03	6.47572E-01
5.99391E+01	0.00000E+00	1.76724E+00	2.50000E+04	3.38753E+03	6.16455E-01
6.04696E+01	0.00000E+00	1.76724E+00	2.50000E+04	3.38785E+03	5.87047E-01
6.10000E+01	0.00000E+00	1.76724E+00	2.50000E+04	3.38816E+03	5.59126E-01

FORTRAN STOP

5.42 VARIACIONES DE LA EXCENTRICIDAD Y VIBRACIONES.

Hasta este momento se han considerado la excentricidad y las vibraciones como normales, sin que afectaran al rodado. En este tema se anexa al modelo de la turbina el generador de -- excentricidad/vibraciones, la variable "DISP" , con la cual -- es posible simular el cierre de la válvula de corte en un dis paro, y el generador de temperatura diferencial. Al controla dor se le anexa una instrucción con la cual pueda disparar a la turbina, se corrige el módulo detector de temperatura di-- ferencial y el módulo detector de la excentricidad/vibracio-- nes. Todos estos cambios aparecen en el siguiente listado.


```
IF(VELT.GE.2395.)THEN
```

```
PEN=PENC  
VELF=3384.  
BAND1=1.  
BAND2=1.  
BAND3=0.  
BAND4=1.  
BAND5=0.
```

- 196 -

```
ENDIF  
ENDIF  
ENDIF
```

```
*  
*  
*  
*  
*  
*  
*
```

MODULO DETECTOR DE LA TEMPERATURA DIFERENCIAL

```
IF(TEMP.LE.TH1.OR.TEMP.GE.TH2)THEN
```

```
IF(VELT.GT.406.)THEN  
VELF=VELT  
BAND1=0.  
BAND2=0.  
BAND3=1.  
BAND4=0.  
BAND5=1.
```

```
ENDIF  
ENDIF
```

```
*  
*  
*  
*  
*  
*
```

MODULO DETECTOR DE LA EXCENTRICIDAD Y VIBRACIONES

```
IF(EXVI.GT.0.075)THEN
```

```
IF(EXVI.GE.0.075.AND.EXVI.LT.0.125)THEN  
IF(VELT.LT.2100.0.OR.VELT.GT.2200.)THEN  
VELF=VELT  
BAND1=0.  
BAND2=0.  
BAND3=1.  
BAND4=0.  
BAND5=1.
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
IF(EXVI.GE.0.125.AND.EXVI.LT.0.25)THEN
```

```
IF(VELT.LT.2100.0.OR.VELT.GT.2200.)THEN  
VELF=VELT*DECVEL  
BAND1=0.  
BAND2=0.  
BAND3=1.  
BAND4=0.  
BAND5=1.
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
*  
*  
*  
*  
*  
*  
*
```

MODULO ACOPLADOR

```
PA=PEN*(1.--(VELT/VELF)**GRADO)
```

```
*  
*  
*  
*
```


HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 6.17E-01

TIME	-1.50E+03	-1.00E+03	-5.00E+02	0.00E+00	5.00E+02	1.00E+03	1.50E+03	2.00E+03	2.50E+03	3.00E+03	3.50E+03
0.00000E+00											
6.17391E-01				0 1							
1.23478E+00				0 1							
1.85217E+00		2		0							
2.46957E+00		2		0 1							
3.08698E+00		2		0 1							
3.70435E+00		2		0 1							
4.32174E+00		2		0 1							
4.93913E+00		2		0 1							
5.55652E+00		2		0 1							
6.17391E+00											
6.79130E+00		2		0 1							
7.40870E+00		2		0 1							
8.02609E+00		2		0 1							
8.64348E+00		2		0 1							
9.26087E+00		2		0 1							
9.87826E+00		2		0 1							
1.04957E+01		2		0 1							
1.11130E+01		2		0 1							
1.17304E+01		2		0 1							
1.23478E+01											
1.29652E+01		2		0 1							
1.35826E+01		2		0 1							
1.42000E+01		2		0 1							
1.48174E+01		2		0 1							
1.54348E+01		2		0 1							
1.60522E+01		2		0 1							
1.66696E+01		2		0 1							
1.72870E+01		2		0 1							
1.79043E+01		2		0 1							
1.85217E+01											
1.91391E+01		2		0 1							
1.97565E+01		2		0 1							
2.03739E+01			2	0	1						
2.09913E+01			2	0	1						
2.16087E+01			2	0	1						
2.22261E+01			2	0	1						
2.28435E+01			2	0	1						
2.34609E+01		2		0	1						
2.40783E+01		2		0	1						
2.46957E+01											
2.53130E+01		2		0	1						
2.59304E+01		2		0	1						
2.65478E+01		2		0	1						
2.71652E+01		2		0	1						
2.77826E+01		2		0	1						
2.84000E+01			2	0	1						
2.90174E+01			2	0	1						
2.96348E+01			2	0	1						
3.02522E+01			2	0	1						
3.08696E+01			2	0	1						
3.14870E+01			2	0	1						
3.21043E+01		2		0	1						
3.27217E+01		2		0	1						
3.33391E+01		2		0	1						
3.39565E+01		2		0	1						
3.45739E+01		2		0	1						
3.51913E+01		2		0	1						
3.58087E+01		2		0	1						

3.64261E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
3.76435E+01	----	2	----	0	----	----	----	1	----	----
3.76609E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
3.82783E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
3.88957E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
3.95130E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.01304E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.07478E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.13652E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.19826E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.26000E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.32174E+01	----	2	----	0	----	----	----	1	----	----
4.38348E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.44522E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.50696E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.56870E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.63043E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.69217E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.75391E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.81565E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.87739E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
4.93913E+01	----	2	----	0	----	----	----	1	----	----
5.00087E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.06261E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.12435E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.18609E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.24783E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.30957E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.37130E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.43304E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.49478E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.55652E+01	----	2	----	0	----	----	----	1	----	----
5.61826E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.68000E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.74174E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.80348E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.86522E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.92696E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
5.98870E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.05043E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.11217E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.17391E+01	----	2	----	0	----	----	----	1	----	----
6.23565E+01	:	:	:	2	:	:	:	:	:	1
6.29739E+01	:	:	:	2	:	:	:	:	:	1
6.35913E+01	:	2	:	0	:	:	:	:	1	:
6.42087E+01	:	2	:	0	:	:	:	:	1	:
6.48261E+01	:	2	:	0	:	:	:	:	1	:
6.54435E+01	:	2	:	0	:	:	:	:	1	:
6.60609E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.66783E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.72957E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.79130E+01	----	2	----	0	----	----	----	1	----	----
6.85304E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.91478E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
6.97652E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
7.03826E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
7.10000E+01	:	2	:	0	:	:	:	1	:	:
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

-1.50E+03 -1.00E+03 -5.00E+02 0.00E+00 5.00E+02 1.00E+03 1.50E+03 2.00E+03 2.50E+03 3.00E+03 3.50E+03

SYMBOL VARIABLE NAME

1 UELT
2 EXVIA

FORTRAN STOP

FLOT VELT,TEMP

FIGURA 5.19

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 6.17E-01

TIME	-1.00E+03	-5.00E+02	0.00E+00	5.00E+02	1.00E+03	1.50E+03	2.00E+03	2.50E+03	3.00E+03	3.50E+03	4.00E+03
0.00000E+00			1	1							
6.17391E-01			0 1	1 2							
1.23478E+00			0 1	1 2							
1.85217E+00			0	1 1 2							
2.46957E+00				0 1 1 2							
3.08696E+00			0	1 2							
3.70435E+00			0	1 2							
4.32174E+00			0	1 2							
4.93913E+00			0	1 2							
5.55652E+00			0	1 2							
6.17391E+00			0	1 2							
6.79130E+00			0	1 2							
7.40870E+00			0	2							
8.02609E+00			0	2							
8.64348E+00			0	2							
9.26087E+00			0	2							
9.87826E+00			0	2							
1.04957E+01			0	2 1							
1.11130E+01			0	2 1							
1.17304E+01			0	2 1							
1.23478E+01			0	2 1							
1.29652E+01			0	2 1							
1.35826E+01			0	2 1							
1.42000E+01			0	2 1							
1.48174E+01			0	2 1							
1.54348E+01			0	2 1							
1.60522E+01			0	2 1							
1.66696E+01			0	2 1							
1.72870E+01			0	2 1							
1.79043E+01			0	2 1							
1.85217E+01			0	2 1							
1.91391E+01			0	2 1							
1.97565E+01			0	2 1							
2.03739E+01			0	2 1							
2.09913E+01			0	2 1							
2.16087E+01			0	2 1							
2.22261E+01			0	2 1							
2.28435E+01			0	2 1							
2.34609E+01			0	2 1							
2.40783E+01			0	2 1							
2.46957E+01			0	2 1							
2.53130E+01			0	2 1							
2.59304E+01			0	2 1							
2.65478E+01			0	2 1							
2.71652E+01			0	2 1							
2.77826E+01			0	2 1							
2.84000E+01			0	2 1							
2.90174E+01			0	2 1							
2.96348E+01			0	2 1							
3.02522E+01		2	0			1					
3.08696E+01		2	0			1					
3.14870E+01		2	0			1					
3.21043E+01		2	0			1					
3.27217E+01		2	0			1					
3.33391E+01		2	0			1					
3.39565E+01		2	0			1					
3.45739E+01		2	0			1					
3.51913E+01		2	0			1					

Para conocer como responde el controlador al existir excentricidad o vibraciones en la turbina, se simulará en rodado anulando el generador de temperatura diferencial, el generador de "VAR" (se utiliza $VAR=50 \times 10^3$), la gráfica de esta corrida aparece en la figura 5.18, de la figura se observa:

a) Si las vibraciones son normales el rodado continúa su proceso normal.

b) Si las vibraciones llegan a ser mayores de .075 mm de amplitud, el sistema de control mantiene la velocidad de la turbina constante hasta que disminuya su valor.

c) Si el valor de las vibraciones llega a ser mayor de .125 mm de amplitud el sistema de control baja la velocidad de la turbina hasta que su valor sea normal, a partir de entonces continúa con el rodado normal.

d) Si el valor de las vibraciones es mayor o igual a .25 mm de amplitud el sistema de control dispara la unidad.

Por lo tanto podemos asegurar que el sistema de control responde satisfactoriamente al valor que tengan la excentricidad y las vibraciones de la flecha del turbogenerador. En la simulación se trabajó con un cojinete, pero también puede ser aplicado a los siete.

5.43 VARIACIONES DE LA TEMPERATURA DIFERENCIAL.

Desactivando el generador de vibraciones y activando el generador de temperatura diferencial se simula de nuevo el rodado, en la gráfica de la figura 5.19 aparece este rodado. De la figura se observa que el sistema de control mantiene la velocidad de la turbina constante cuando el valor de la temperatura diferencial entre el vapor y el metal en la cá-

mara de impulso sale del rango de operación segura, excepto cuando la velocidad de la turbina es menor o igual a 400 r.p.m.

Como prueba final de estos parámetros, se activan: el generador de "VAR", el de excentricidad/vibraciones y el temperatura diferencial, entonces se simula otro rodado, el cual aparece en la gráfica de la figura 5.20, en donde aparece también el valor de las variables involucradas.

5.4.4 RODADOS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE HABER ESTADO PARA LA UNIDAD.

La última prueba que queda por hacer, es determinar se el sistema de control responde cuando se le indica el tiempo de haber estado parada la unidad (TPAR), para tal motivo, se simulará el rodado para TPAR = 2, 8, 60 hrs., los cuales aparecen las graficas de las figuras 5.21, 5.22, 5.23, respectivamente. De las figuras se observa lo siguiente:

i) Cuando TPAR=2,8 hrs. las gráficas son muy semejantes, es to es normal ya que la ecuación que determina estos tiempos así quedó definida (existe un tiempo mínimo de calentamiento total de 25 min.) . Además se observa que la velocidad de la turbina se detiene muy poco tiempo en 2400 r.p.m., es to sucede ya que se termina la segunda etapa de rodado y al encontrar que el tiempo de calentamiento es cero continúa con la tercera etapa del rodado.

ii) Cuando TPAR = 60 hrs, el tiempo de calentamiento total es de 36 min. aproximadamente y lo divide en la primera y segunda etapa del rodado.

Cuando la turbina ha estado parada una semana no fué posible graficar la simulación, ya que existen limitaciones con el paquete DARE P por ser demagiado tiempo. En las pruebas

y ajustes hechos al sistema de control se utilizó TPAR = 10 hrs. , de donde se observa que se realizó el cálculo adecuado del tiempo de calentamiento y fué dividido en dos partes.

Con estas pruebas podemos afirmar que el sistema de control de rodado responde satisfactoriamente al hacer el cálculo del tiempo de calentamiento.

PLOT VELT

HORIZONTAL SCALE FACTOR = 5.00E+01

VERTICAL SCALE FACTOR = 6.17E-01

TINE	-1.00E+03	-5.00E+02	0.00E+00	5.00E+02	1.00E+03	1.50E+03	2.00E+03	2.50E+03	3.00E+03	3.50E+03	4.00E+03
0.00000E+00			1								
6.17371E-01			0 1								
1.23478E+00			0 1								
1.85217E+00			0 1								
2.46957E+00			0 1								
3.08696E+00			0 1								
3.70435E+00			0 1								
4.32174E+00			0 1								
4.93913E+00			0 1								
5.55652E+00			0 1								
6.17391E+00			0	1							
6.79130E+00			0	1							
7.40870E+00			0	1							
8.02609E+00			0	1							
8.64348E+00			0	1							
9.26087E+00			0	1							
9.87826E+00			0	1							
1.04957E+01			0	1							
1.11130E+01			0	1							
1.17304E+01			0	1							
1.23478E+01			0	1							
1.29652E+01			0	1							
1.35826E+01			0	1							
1.42000E+01			0	1							
1.48174E+01			0	1							
1.54348E+01			0	1							
1.60522E+01			0	1							
1.66696E+01			0	1							
1.72870E+01			0	1							
1.79043E+01			0	1							
1.85217E+01			0	1							
1.91391E+01			0	1							
1.97565E+01			0	1							
2.03739E+01			0	1							
2.09913E+01			0	1							
2.16087E+01			0	1							
2.22261E+01			0	1							
2.28435E+01			0	1							
2.34609E+01			0	1							
2.40783E+01			0	1							
2.46957E+01			0	1							
2.53130E+01			0		1						
2.59304E+01			0		1						
2.65478E+01			0		1						
2.71652E+01			0		1						
2.77826E+01			0		1						
2.84000E+01			0		1						
2.90174E+01			0		1						
2.96348E+01			0		1						
3.02522E+01			0		1						
3.08696E+01			0		1						
3.14870E+01			0		1						
3.21043E+01			0		1						
3.27217E+01			0		1						
3.33391E+01			0		1						
3.39565E+01			0		1						
3.45739E+01			0		1						
3.51913E+01			0		1						

3.38981E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
3.64261E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
3.70435E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3.76609E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
3.82783E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
3.88957E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
3.95130E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.01304E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.07478E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.13652E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.19826E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.26000E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.32174E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4.38348E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.44522E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.50696E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.56870E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.63043E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.69217E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.75391E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.81565E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.87739E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
4.93913E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5.00087E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.06261E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.12435E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.18609E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.24783E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.30956E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.37130E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.43304E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.49478E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.55652E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5.61826E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.68000E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.74174E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.80348E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.86522E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.92696E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
5.98870E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.05043E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.11217E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.17391E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
6.23565E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.29739E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.35913E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.42087E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.48261E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.54435E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.60609E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.66783E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.72956E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.79130E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
6.85304E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.91478E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
6.97652E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
7.03826E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:
7.10000E+01	:	:	0	:	:	:	1	:	:	:	:	:	:	:

-1.00E+03 -5.00E+02 0.00E+00 5.00E+02 1.00E+03 1.50E+03 2.00E+03 2.50E+03 3.00E+03 3.50E+03 4.00E+03

SYMBOL VARIABLE NAME
1 VELT

LIST TEMP,EXVI,VAR,PREC

TIME	TEMP	EXVI	VAR	PREC
0.00000E+00	6.00000E+02	3.37000E-02	1.50000E+04	1.10000E+00
6.17391E-01	6.00000E+02	3.37000E-02	1.50000E+04	1.68742E+00
1.23478E+00	6.00000E+02	3.37000E-02	1.50000E+04	1.71315E+00
1.85217E+00	6.00000E+02	1.20400E-01	1.50000E+04	1.38202E+00
2.46957E+00	6.00000E+02	1.20400E-01	1.50000E+04	1.41656E+00
3.08596E+00	5.00000E+02	1.20400E-01	1.50000E+04	1.41656E+00
3.70435E+00	5.00000E+02	1.20400E-01	1.50000E+04	1.41656E+00
4.32174E+00	5.00000E+02	1.20400E-01	1.50000E+04	1.41602E+00
4.93913E+00	5.00000E+02	3.36993E-02	1.50000E+04	1.67857E+00
5.55652E+00	5.00000E+02	3.37000E-02	1.50000E+04	1.45661E+00
6.17391E+00	5.00000E+02	3.37000E-02	2.50002E+04	1.40787E+00
6.79130E+00	5.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.43136E+00
7.40870E+00	3.99999E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.39396E+00
8.02609E+00	4.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.39393E+00
8.64348E+00	4.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.38481E+00
9.26087E+00	4.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.41740E+00
9.87826E+00	4.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.42017E+00
1.04957E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.39827E+00
1.11130E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.40942E+00
1.17304E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.40668E+00
1.23478E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.43352E+00
1.29652E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.42423E+00
1.35826E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.39940E+00
1.42000E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.41422E+00
1.48174E+01	3.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.43327E+00
1.54348E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.39809E+00
1.60522E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.40588E+00
1.66696E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.41034E+00
1.72870E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.41533E+00
1.79043E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.41252E+00
1.85217E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.40241E+00
1.91391E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.42798E+00
1.97565E+01	2.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.41250E+00
2.03739E+01	1.00000E+02	1.20400E-01	5.00000E+04	1.40392E+00
2.09913E+01	1.00000E+02	1.20400E-01	5.00000E+04	1.43537E+00
2.16087E+01	1.00000E+02	1.20400E-01	5.00000E+04	1.39904E+00
2.22261E+01	1.00000E+02	1.20400E-01	5.00000E+04	1.42047E+00
2.28435E+01	1.00000E+02	1.20400E-01	5.00000E+04	1.41782E+00
2.34609E+01	1.00000E+02	3.36984E-02	5.00000E+04	1.52480E+00
2.40783E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	5.00000E+04	1.53233E+00
2.46957E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	5.00000E+04	1.54327E+00
2.53130E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	5.00000E+04	1.55931E+00
2.59304E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	5.00000E+04	1.55883E+00
2.65478E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	5.00000E+04	1.56999E+00
2.71652E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	5.00000E+04	1.60006E+00
2.77826E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	5.00000E+04	1.60656E+00
2.84000E+01	1.00000E+02	2.07107E-01	5.00000E+04	1.43159E+00
2.90174E+01	1.00000E+02	2.07100E-01	5.00000E+04	1.42623E+00
2.96348E+01	1.00000E+02	2.07100E-01	5.00000E+04	1.45580E+00
3.02522E+01	-2.50000E+02	2.07100E-01	2.49995E+04	1.44775E+00
3.08696E+01	-2.50000E+02	2.07100E-01	2.50000E+04	1.42850E+00

TIME	TEMP	EXVI	VAR	PREC
3.14870E+01	-2.50000E+02	2.07100E-01	2.50000E+04	1.43088E+00
3.21043E+01	-2.50000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.45176E+00
3.27217E+01	-2.50000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.45789E+00
3.33391E+01	-2.50000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.45789E+00
3.39565E+01	-2.50000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.45792E+00
3.45739E+01	-2.50000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.45789E+00
3.51913E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.73003E+00
3.58087E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.81398E+00
3.64261E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.80935E+00
3.70435E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.81042E+00
3.76609E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.81835E+00
3.82783E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.80331E+00
3.88957E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.88832E+00
3.95130E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.84503E+00
4.01304E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.81579E+00
4.07478E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.75505E+00
4.13652E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.71019E+00
4.19826E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.66724E+00
4.26000E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.64697E+00
4.32174E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.60783E+00
4.38348E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.58549E+00
4.44522E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.59391E+00
4.50696E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.50691E+00
4.56870E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.47142E+00
4.63043E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.47024E+00
4.69217E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.45851E+00
4.75391E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.47273E+00
4.81565E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.47993E+00
4.87739E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.46793E+00
4.93913E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.44884E+00
5.00087E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.47599E+00
5.06261E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.50354E+00
5.12435E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.48767E+00
5.18609E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.46436E+00
5.24783E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.46377E+00
5.30957E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.46345E+00
5.37130E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.47674E+00
5.43304E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.47753E+00
5.49478E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	6.92800E+04	1.48673E+00
5.55652E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.60639E+00
5.61826E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.59965E+00
5.68000E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.59289E+00
5.74174E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.59286E+00
5.80348E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	2.09135E+00
5.86522E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	2.10465E+00
5.92696E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	2.07233E+00
5.98870E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	2.07235E+00
6.05043E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	2.07233E+00
6.11217E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	2.03614E+00
6.17391E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	2.02514E+00
6.23565E+01	1.00000E+02	2.93800E-01	2.50000E+04	2.73533E+00

TIME	TEMP	EXVI	VAR	PREC
6.29739E+01	1.00000E+02	2.93800E-01	2.50000E+04	3.93730E+00
6.35913E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	5.23380E+00
6.42087E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	6.28939E+00
6.48261E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	7.38109E+00
6.54435E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	8.67760E+00
6.60609E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	9.74738E+00
6.66783E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.08378E+01
6.72958E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.18990E+01
6.79130E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.28765E+01
6.85304E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.39055E+01
6.91478E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.48847E+01
6.97652E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.58408E+01
7.03826E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.68567E+01
7.10000E+01	1.00000E+02	3.37000E-02	2.50000E+04	1.78820E+01

FORTRAN STOP

2.77391E+01	:	:	0	1:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
2.82174E+01	:	:	0	1:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
2.86957E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2.91739E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
2.96522E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.01304E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.06087E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.10870E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.15652E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.20435E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.25217E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.30000E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.34783E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3.39565E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.44348E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.49130E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.53913E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.58696E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.63478E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.68261E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.73043E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.77826E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.82609E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3.87391E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.92174E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
3.96957E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.01739E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.06522E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.11304E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.16087E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.20870E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.25652E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.30435E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4.35217E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.40000E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.44783E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.49565E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.54348E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.59130E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.63913E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.68696E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.73478E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.78261E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4.83043E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.87826E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.92609E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
4.97391E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.02174E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.06957E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.11739E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.16522E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.21304E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.26087E+01	-----	-----	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5.30870E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.35652E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.40435E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.45217E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
5.50000E+01	:	:	0	:	1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

-1.00E+03 -5.00E+02 0.00E+00 5.00E+02 1.00E+03 1.50E+03 2.00E+03 2.50E+03 3.00E+03 3.50E+03 4.00E+03

SYMBOL VARIABLE NAME
 1 VELT
 FORTRAN STOP

CONCLUSIONES.

El objetivo principal de esta tesis fué el diseño de un sistema de control, el cual acelera automáticamente a la turbina en el proceso de rodado de la unidad. Como solamente -- fué simulado este proceso, se hizo necesario contar con un modelo matemático el cual simula el comportamiento del turbogenerador. Para el sistema de control solo son de importancia las señales de entrada y salida, estas son:

- i) Señal de excitación a la planta o pulsos que se aplican a la turbina.
- ii) Señal de salida o la velocidad de la turbina.
- iii) Señales de protección que son algunos supervisorios.

Para modelar el turbogenerador se estudiaron todos sus elementos que intervienen en el rodado de la turbina, no son de importancia los parámetros y/o variables internas, como lo pueden ser: el flujo de vapor hacia la turbina, el par que ejerce el vapor sobre la turbina, la apertura de la válvula de corte, entre otras. Por estas razones el modelo -- del turbogenerador propuesto en esta tesis no determina directamente ninguna de estas variables, en si no es un modelo estricto, si no un sistema que se comporta semejante al turbogenerador en el proceso de rodado de la unidad.

Dichos elementos fueron divididos en seis subsistemas obedeciendo al tipo de sistema que pertenecen, siendo estos, mecánico, hidráulico, etc., de esta forma cada uno de ellos queda representado por una ecuación algebraica o diferencial (las ecuaciones son de primer grado y en el dominio del tiempo, ya que así lo requiere el lenguaje de computadora DARE P, utilizado para la simulación).

Para modelar cada subsistema se consideraron elementos lineales e invariantes en el tiempo, el aceite incomprensible, se consideró solo una turbina equivalente, etc. Los elementos que no tenían comportamiento lineal, fueron aproximados a lineales, debido a que en el proceso de rodado estos sufrían muy poca variación, tal fué el caso del coeficiente de la válvula de corte (CV), la resistencia hidráulica que presenta la válvula de copa del controlador de las válvulas de corte. En algunos casos los parámetros que tenían muy poca variación se les consideró despreciables por tener poco efecto en el comportamiento global del modelo, tal fué el caso de la variación de la presión en el paso Curtis y el valor de la inductancia de la armadura del motor del controlador de las válvulas de corte.

En el modelo del turbogenerador no fueron consideradas las válvulas de gobierno, ya que en teoría estas empiezan a cerrar en el momento en que al velocidad del rotor es de 3384 r.p.m. aproximadamente, manteniendo fija la velocidad en ese valor aún cuando se abran al 100% de su apertura las válvulas de corte. Esto no representa ningún problema para el sistema de control de rodado automático, pues si es capaz de regular la velocidad de la turbina unicamente con las válvulas de corte le resultará más fácil controlar la velocidad de la turbina cuando esta se auto-regule con las válvulas de gobierno.

Para cuando sea implementado el sistema de control en una microcomputadora bastará con cambiar la velocidad final en la tercera etapa del rodado de 3,384 r.p.m. a un valor mayor, es decir de 3,400 r.p.m., con esto la microcomputadora tratará de fijar la velocidad de la turbina en este valor, mientras las válvulas de gobierno la mantendrán fija en 3.384 r.p.m. aproximadamente, de esta forma serán abiertas las válvulas de corte al 100% y entonces la microcomputadora habrá terminado su trabajo.

Para la evaluación de las constantes y parámetros que resultaron de la deducción del modelo del turbogenerador, fué de gran ayuda registrar el rodado de la unidad 1 de la C.T.E. de Tula Hidalgo, en donde se pudo graficar la variación de algunos de estos parámetros, desafortunadamente no fué posible registrar todos los que se requerían para el modelo principalmente por la limitación del equipo y la disposición de las señales, estas fueron: la temperatura del vapor principal y la presión del vapor después de las válvulas de corte. La presión del vapor en el paso Curtis que fué graficado a una escala igual que la del vapor principal ; su valor casi no se separó de la línea de referencia, por tal razón fué despreciada su variación comparándola con el valor de la presión del vapor principal. Para evaluar el modelo, se tomó la temperatura del vapor principal de la curva de rodado típico para ese programa de rodado en particular. Con estas gráficas y con las tablas de vapor fué posible evaluar las constantes y parámetros requeridos por el modelo, para posteriormente ajustarlos con ayuda de una computadora.

Al ajustar los parámetros de la turbina, tales como: la presión de control (PREC) y la constante número 7 (CON 7) se observa que existieron algunas diferencias de la curva de velocidad registrada en el rodado real y la simulada en la computadora, en primer lugar es muy parecida la primera etapa del rodado y esto no debió de suceder, ya que en el rodado real las válvulas de gobierno no estaban al 100% de su apertura, en segundo lugar al fijar la presión de control en 1.485 Kg/cm^2 la velocidad de la turbina se elevó un poco mas de lo esperado. Esto en realidad debió de esperarse, debido a todas las consideraciones realizadas en el desarrollo del modelo, y al hacer la simulación se consideraron pulsos equivalentes, concentrados en un punto, cuando en las curvas de rodado real estos estuvieron distribuidos. A pesar de estas diferencias se considera que el modelo obtenido es adecuado pues se cumple con las características -

requeridas en este trabajo.

Naturalmente existen modelos matemáticos de turbogeneradores pero la mayoría de los que se consultaron lo describían en la operación normal y el generador con carga, utilizados para balances de energía, potencial en las turbinas, autocorrección de su frecuencia, etc., ninguno de ellos describía el sistema de control de las válvulas de corte y no describían el rodado inicial.

El sistema de control propuesto en esta tesis, fué diseñado tomando en cuenta las características particulares que presenta el turbogenerador en el proceso de rodado, así como -- también los objetivos de dicho control. Este es el tipo de caracterización del punto de ajuste en función del estado en que se encuentre el turbogenerador, pues debe cumplir la curva óptima del rodado sin esforzar o dañar la turbina. El control a desarrollar es del tipo analógico, pues aunque lo ejecute una microcomputadora y la salida sean pulsos unitarios la duración de estos es muy variable; para la entrada -- de las señales de control se requiere un convertidor analógico a digital para que puedan ser procesados por la microcomputadora. Por las características de las curvas de rodado que debe cumplir el sistema de control, en el lazo de realimentación se prefirió tener la derivada de la velocidad, y de esta manera, para formar la señal de error se compara la aceleración, por lo que el punto de ajuste solamente es constante o cero.

Los bloques y módulos que componen el sistema de control son importantes, cada uno de ellos tienen una tarea específica -- que cumplir, entre estos hay que hacer notar la función que desempeña el módulo acoplador, por medio de este es posible colocar la velocidad de la turbina en un valor deseado aún y cuando se esté comparando la aceleración en el lazo de control, además por medio de éste es -- posible hacer los cambios de aceleración suaves, ya que por

las características del rotor del turbogenerador resultará imposible hacer constante repentinamente su velocidad después de tener una aceleración sostenida.

Los ajustes realizados al sistema de control no podemos -- afirmar que son los óptimos, ya que no fué posible conocer el número de pulsos que aplicó el controlador al turbogenerador por ser estos muy pequeños, imposible de ver en las gráficas obtenidas. El valor de (N-GRADO) fué ajustado para la primera etapa del rodado, para las otras dos, principalmente para la tercera, se observa que su valor es insuficiente, pues el cambio de aceleración es muy suave. - Esto abre la posibilidad de diseñar nuevos programas que nos permitan conocer el número de pulsos aplicados, y proponer un valor adecuado de (N) para cada etapa del rodado.

La determinación de los tiempos de calentamiento que realiza el sistema de control, los hace en base a las curvas de rodado recomendadas por el fabricante y que son utilizadas por los operarios de la C.T.E. de Tula Hidalgo, pero existe otra forma de hacerlo y consiste en lo siguiente:

Con los valores de presión y temperatura del valor principal y la temperatura del metal en el paso Curtis al inicio del rodado, se consultan tablas en donde se relacionan estas variables para determinar el tiempo mínimo de calentamiento, y si en el proceso de rodado cambian las condiciones de vapor se requiere hacer de nuevo otra determinación del tiempo de calentamiento utilizando la temperatura del metal en el paso Curtis al iniciar el rodado. En sí - lo único que se pretende es igualar la temperatura del vapor y la del metal en la cámara de impulso sin aplicar esfuerzos térmicos al rotor, tomando en cuenta que la dilatación que sufra la carcasa no ponga en peligro las partes móviles de la turbina.

Los supervisorios de la turbina que son registrados por el sistema de control, fueron seleccionados ya que estos son los únicos que pueden alterar la velocidad de la turbina; las pruebas realizadas a los módulos que detectan estas variables resultaron satisfactorios, puesto que corrigen la velocidad del rotor cuando es excesivo su valor. La estructura del sistema de control, está diseñada para que en un momento dado sea posible anexar más módulos y se detecten mas supervisorios que sean importantes para la protección de la turbina y por alguna razón no fueron considerados en este trabajo.

Con las simulaciones realizadas del rodado de la turbina en la computadora podemos afirmar que el sistema de control de rodado automático propuesto en esta tesis sí cumple con los objetivos para los cuales fue diseñado, toma la velocidad de la turbina en 3 r.p.m. y la eleva a 3,384 r.p.m. aproximadamente, cumpliendo con la curva de rodado que recomienda el fabricante, tomando acciones correctivas cuando el valor de los supervisorios registrados sea excesivo.

En este trabajo se propuso que el rodado de la turbina sea de 3 r.p.m. a 3,384 r.p.m. aproximadamente y no hasta 3,600 r.p.m., esto fué debido a que se facilitó el trabajo al sistema de control al controlar unicamente las válvulas de corte, además, la ayuda que se le brinda al operario al acelerar la turbina de 3,384 r.p.m. aproximadamente hasta 3,600 r.p.m. es muy poca. De esta forma la tercera etapa del rodado empieza en 3,384 r.p.m. y se realiza con el sistema de control de las válvulas de gobierno, como se ha estado realizando en la práctica.

El sistema de control que acelera la turbina está pensado para ser implemmentado en una microcomputadora, la cual se

conectará en el interruptor que controla al motor del controlador de las válvulas de corte, registrará los preparativos del rodado y los supervisorios mencionados anteriormente y se mantendrá comunicada con el operario, el cual le indicará el inicio del rodado y tomará el mando cuando ocurra una situación no prevista en los programas de control. La forma de comunicación no se definió en este trabajo porque solo se simuló el proceso.

Las siguiente es una lista de ventajas que se obtienen al utilizar una microcomputadora en el rodado de la turbina:

a) Cualquier tipo de rodado lo ejecutará en un tiempo mínimo, ya que cumplirá con las curvas óptimas de rodado que recomienda el fabricante sin dañar el turbogenerador.

b) Evita esfuerzos térmicos y mecánicos al rotor, debido a que la aceleración que le aplica a la turbina es la recomendada por el fabricante, alargando de esta manera la vida útil de la unidad, mientras que un operario solamente la aproxima en forma gruesa.

c) Existe comunicación del operario y el circuito controlador, de esta forma el operario tiene el control sobre el rodado cuando ocurra una anomalía no prevista.

d) La microcomputadora encargada de realizar el rodado de la turbina, supervisará si los preparativos del arranque se han cumplido; de no estarlo, no se acelerará la turbina. Al estar acelerando el rotor, revisará los supervisorios que afecten la velocidad del rotor.

e) Por ser un circuito lógico programable presenta la versatilidad de adecuarse a las necesidades particulares de cada unidad. Además existe la posibilidad de ser anexado otro programa de control que realice la tercera etapa del arranque del turbogenerador.

Una de las limitaciones que presenta la microcomputadora definida de esta manera, es que no puede ajustar ningún otro elemento más que el sistema de control de las válvulas de corte, de esta manera al ocurrir una anomalía y que afecte al rodado de la turbina, la microcomputadora corrige la velocidad del rotor y espera a que el operario realice las correcciones necesarias.

En resumen, para realizar el arranque del turbogenerador -- con ayuda de una microcomputadora, como la definida anteriormente, lo ejecutan los operarios como normalmente lo han realizado, con la única diferencia de que no operan el interruptor que controla el motor del controlador de las válvulas de corte o estrangulamiento, con lo cual se obtiene un tiempo mínimo en el rodado de la turbina, ahorrando energéticos y para la unidad una vida útil mayor, pues el rodado de la turbina se ejecutará como lo recomienda el fabricante sin aplicar esfuerzos térmicos ni mecánicos al rotor.

BIBLIOGRAFIA:

- TRAINING TEXT BOOK FOR GENERAL GUIDE OF OPERATION (START UP & SHUT DOWN PROCEDURE) ON LARGE STEAM TURBINE.
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

July, 1982.

- TRAINING TEXTBOOK FOR REHEAT STEAM TURBINE
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

Aug., 1982.

- TURBINE CONSTRUCTION DETAIL
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

- TYPE XT-2-A TRANSISTORIZED AUTOMATIC SYNCHRONIZER
MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION.

- CHEMICAL PROPERTIES
ROBERT KERN

- TEORIA DE SISTEMAS Y CIRCUITOS
VICTOR GEREZ GREISER

M.A. MURRAY-LASSO

1974.

- ECUACIONES DIFERENCIALES ELEMENTALES

EARL D. RAINVILLE

TRILLAS 1976.

- INGENIERIA DE CONTROL MODERNA

KATSUHIKO OGATA

PHI, Enero, 1980.

- DARE P USER'S MANUAL Versión 4.4

JOHN V. WAIT

DE FRANCE CLARKE III

UNIVERSITY OF ARIZONA July, 1978 (Revised Aug, 1979)

- MEMOS DE OPERACION DE LA CTE DE TULA HIDALGO

- MANUAL DE OPERACION DE LA CTE DE TULA.

Gerencia General de Generación y Transmisión

Departamento de Capacitación Tula

CAPITULO I Descripción general del turbogenerador.

CAPITULO II Sistema de vapor de la turbina.

CAPITULO VIII Sistema de aceite principal del turbogenerador.

CAPITULO X Sistema de gobierno del turbogenerador.

CAPITULO XIV Parametros de operación.

CAPITULO XV Arranque y paro del turbogenerador.

- TERMODINAMICA

VIRGIL MORING FAIRES

UTHEA, 1973

- CONTROL SYSTEMS ENGINEERING

I.J. NOGRATH

M. GOPAL

JOHN WILEY AND SONS INC., 1982

- INGENIERIA TERMODINAMIACA

Reynalds/Perkins

Mc Hill.

- ISA HAND BOOK II