



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROCEDIMIENTO DE MONTAJE Y PRUEBAS  
DE LAS TURBINAS HIDRAULICAS DEL  
PROYECTO HIDROELECTRICO  
AGUAMILPA, NAY.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**I N G E N I E R O C I V I L**

**P R E S E N T A:**

**ANTONIO [GARIBAY OROZCO**

**TUTOR DE TESIS:**

**ING. HECTOR GARCIA GUTIERREZ**



**MEXICO, D. F.**

**FEBRERO DE 1995**

**FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-192/93

Señor  
**ANTONIO GARIBAY OROZCO**  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. HECTOR GARCIA GUTIERREZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

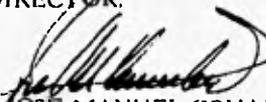
**"PROCEDIMIENTO DE MONTAJE Y PRUEBAS DE LAS TURBINAS  
HIDRAULICAS DEL P.H. AGUAMILPA"**

- I . INTRODUCCION**
- II . OBRAS DE GENERACION Y CARACTERISTICAS DE LA TURBINA**
- III . PRUEBAS DE ACEPTACION DE LA TURBINA EN MODELO  
HIDRAULICO**
- IV . PROGRAMAS DE OBRA Y PROCEDIMIENTOS DE MONTAJE**
- V . CONTROL DE CALIDAD**
- VI . PRUEBAS DE PUESTA EN SERVICIO**
- VII . CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 15 de noviembre de 1993.  
EL DIRECTOR.

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS  
JMCS/RCR\*nl

pl.

**PROCEDIMIENTO DE MONTAJE Y PRUEBAS DE LAS TURBINAS  
HIDRAULICAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA AGUAMILPA**

*A mi padre y a mi madre, mis guías mejores en el arte de sentir, de pensar y hacer. Respetuosamente, con mi agradecimiento y mi cariño eterno.*

*A Lulú y a Lucía, con el amor irremediable y la inspiración para inventarnos siempre nuevas metas y aventuras, todo mi esfuerzo.*

*A Rafael y Jorge, un detalle a su ejemplo de constancia y disciplina. A su apoyo incondicional, con cariño y admiración.*

*A mis tíos y primos, cariñosamente.  
A mis amigos, por los buenos momentos que nos ha tocado vivir.*

*A mis maestros y a la Universidad Nacional, en agradecimiento por la experiencia del manejo noble del criterio y la sensibilidad para ampliar mi visión e interpretación del mundo y orientar mi voluntad para aceptarlo ó intentar modificarlo.*

*A quienes tuvieron la amabilidad y la disposición de un poco de su tiempo para cristalizar esta empresa, gracias.*

*A la ciudad de Tepic, Nay.*

---

***INDICE***

## *INDICE*

	<b>Pags.</b>
<b>I. INTRODUCCION.</b>	<b>1</b>
<b>II. OBRAS DE GENERACION Y CARACTERISTICAS DE LA TURBINA.</b>	
II.1 Generalidades.	4
II.2 Descripción de las obras de generación de la central.	5
II.2.1 Obras de infraestructura hidráulica.	5
II.2.2 Obras de infraestructura eléctrica.	7
II.2.3 Casa de máquinas.	8
II.3 Descripción de los componentes de la turbina y sistemas auxiliares.	14
II.3.1 Partes empotradas.	14
II.3.2 Distribuidor.	27
II.3.3 Rodete.	34
II.3.4 Flecha.	34
II.3.5 Chumacera gufa.	41
II.3.6 Sello de la flecha.	41
II.3.7 Regulador de velocidad.	47
II.3.8 Sistemas auxiliares.	50
<b>III. PRUEBAS DE ACEPTACION DE LA TURBINA EN MODELO HIDRAULICO.</b>	
III.1 Objetivo de las pruebas.	53
III.2 Modelo hidráulico de la turbina.	54
III.3 Banco de pruebas.	56
III.4 Medición de parámetros principales.	61
III.4.1 Gasto.	61
III.4.2 Caída.	63
III.4.3 Velocidad de rotación.	64
III.4.4 Coeficiente de cavitación.	65
III.4.5 Temperatura del agua.	68
III.4.6 Contenido de aire en el agua.	68
III.4.7 Eficiencia del modelo.	68
III.5 Metodología de las pruebas y resultados.	69
III.5.1 Pruebas energéticas.	69
III.5.2 Pruebas de cavitación.	77
III.5.3 Pruebas de desboque.	81
III.6 Conclusiones.	84

<b>IV.</b>	<b>PROGRAMAS DE OBRA Y PROCEDIMIENTOS DE MONTAJE.</b>	
IV.1	Generalidades.	85
IV.2	Montaje de partes empotradas.	87
IV.2.1	Tubo de aspiración.	
	Segundos colados del tubo de aspiración.	93
IV.2.2	Tuberías empotradas.	96
IV.2.3	Antedistribuidor.	96
IV.2.4	Carcasa espiral.	98
	Anillo de cimentación.	111
	Forro del foso de turbina.	111
	Segundos colados de carcasa.	111
	Unión con la tubería de presión.	115
	Terceros colados de carcasa.	115
IV.2.5	Trabajos previos al montaje fino de turbina.	118
IV.3	Montaje de mecanismos.	119
IV.3.1	Generalidades y secuencia del montaje.	119
IV.3.2	Distribuidor, 1a. etapa.	121
IV.3.3	Acoplamiento flecha-rodete de la turbina.	122
IV.3.4	Distribuidor, 2a. etapa.	124
IV.3.5	Distribuidor, etapa final.	125
IV.3.6	Liberación de la flecha y acoplamiento con rotor del generador.	127
IV.3.7	Chumacera guía.	127
IV.3.8	Sello de la flecha.	128
IV.3.9	Ajuste final del conjunto turbina-generador.	128
<b>V.</b>	<b>CONTROL DE CALIDAD.</b>	
V.1	Generalidades.	131
V.2	Antecedentes de las fallas detectadas en los antedistribuidores.	132
V.3	Programas de pruebas y ensayos.	134
V.4	Procedimientos de reparación.	135
V.5	Prueba hidrostática de carcasa-antedistribuidor.	141
V.6	Conclusiones.	148
<b>VI.</b>	<b>PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO.</b>	
VI.1	Introducción.	151
VI.2	Programa de pruebas de puesta en servicio.	152
VI.2.1	Pruebas previas de los sistemas auxiliares del turbogenerador.	152
VI.2.2	Pruebas con agua muerta ó en condiciones hidrostáticas.	152
VI.2.3	Ensayos mecánicos con máquina girando en vacío.	152

VI.2.4 Pruebas eléctricas del generador con excitación auxiliar y definitiva.	153
VI.2.5 Primera sincronización y pruebas con la unidad sincronizada.	154
VI.2.6 Pruebas con equipo para operación como condensador síncrono.	154
VI.2.7 Inspección final y entrega para operación comercial.	154
VI.3 Pruebas de eficiencia y potencia en el prototipo.	154
VI.3.1 Objetivo.	154
VI.3.2 Condiciones de prueba.	155
VI.3.3 Preparativos para la prueba.	156
VI.3.4 Métodos de medición.	156
VI.3.5 Cálculo de resultados.	161
VI.3.6 Comparación de los valores garantizados y con los obtenidos escalando el modelo de la turbina.	163
VII. <i>COMENTARIOS FINALES.</i>	165
<i>APENDICE</i>	168
<i>BIBLIOGRAFIA.</i>	176

---

**CAPITULO I**

## **I. INTRODUCCION**

**El presente trabajo intenta describir de manera general el procedimiento de montaje de las turbinas hidráulicas tipo Francis en la casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, así como la obra civil necesaria para este fin. Se resume esquemáticamente el funcionamiento de la turbomáquina y se presentan las pruebas de aceptación del diseño en modelo, así como las pruebas de aceptación y funcionamiento en el prototipo.**

**El interés por realizar este trabajo nace de tres razones principales:**

- 1.- La elaboración de un documento de caracter teórico-práctico que pueda ser utilizado como material de consulta, lo mismo por estudiantes (en las áreas de hidrodinámica, turbomáquinas, similitud dinámica, procedimientos constructivos, y control de calidad), que por los profesionistas involucrados en trabajos semejantes en Centrales Hidroeléctricas ya sean ingenieros civiles ó mecánicos.**
- 2.- Los cambios actuales que está viviendo la C.F.E. en lo que respecta a la participación de los inversionistas privados tanto en el diseño como en la ejecución de la obra civil y la obra electromecánica en proyectos hidroeléctricos en particular.**
- 3.- La problemática especial que se tuvo que enfrentar durante el proceso de montaje y la fuerte interacción que en todo momento tuvieron la obra civil y la obra electromecánica en el desarrollo de los trabajos del programa de obra.**

Sin duda alguna la razón principal que da lugar al trabajo es la presentación ante la comunidad universitaria de un documento actual y vigente que muestre al alumno interesado una visión que vaya un poco más allá de lo teórico. Que complemente lo que él aprende a nivel del diseño, por ejemplo, en la clase de turbomáquinas y que le permita además sensibilizarse de la organización y la tecnología necesaria para realizar el montaje de una turbina hidráulica. Como alumno de la carrera de Ingeniería Civil, generalmente siempre tenemos la visión práctica y global de lo que representa la construcción de edificios, viviendas, carreteras, cortinas de presas, túneles, etc. pero muy pocas veces tenemos la oportunidad de visualizar otro tipo de obras civiles importantes y más específicas como las asociadas al montaje de una turbina hidráulica, ni tampoco nos imaginamos como se instala una máquina de éste tipo a pesar de que entendemos perfectamente como funciona y cuáles son los criterios generales para su diseño, quizá en este caso por que sentimos ó pensamos que escapa a los alcances de nuestra profesión. No creo que sea así, considero más bien que lo que escapa son los procedimientos y criterios necesarios para fabricar los elementos que la componen por que involucra técnicas especiales de la metalurgia. Los puentes, los edificios, etc. se diseñan y se construyen casi siempre "in situ", salvo los elementos prefabricados. Las turbinas se construyen en las fábricas y talleres, después se montan, pero éste montaje bien puede realizarlo el Ingeniero Civil auxiliado por ciertas técnicas de la especialidad mecánica.

Con la finalidad de desarrollar los temas en una secuencia ilustrativa y cronológica que considero adecuada el documento se encuentra estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo II se hace una breve presentación de las obras de generación del proyecto y se ubica el lugar de la casa de máquinas en éste contexto. Se muestra el conjunto de la turbina describiéndose cómo y bajo que condiciones de diseño se realiza la transferencia de energía hidráulica-mecánica-eléctrica. Para ello se desglosan los componentes de la máquina, su función específica, características geométricas y mecánicas.

En la medida que ha sido posible y en un intento por ofrecer una visión más completa del tema, en el documento se ha incluido además de la parte práctica, una parte teórica-experimental en donde se exponen las pruebas efectuadas en modelo hidráulico en los laboratorios del fabricante de la turbina. Se presentan las bases, los alcances, metodologías y resultados de pruebas de eficiencia, potencia, cavitación, variaciones de presión, etc. de la turbina. (Capítulo III).

El capítulo IV contiene los programas de obra civil y electromecánica en las diferentes fases del montaje, así como una descripción detallada de las actividades realizadas durante el mismo, de cada uno de los componentes de la turbomáquina, los recursos utilizados, rendimientos de mano de obra y programas de detalle de estas actividades.

La trascendencia que tuvo el seguimiento de las especificaciones técnicas para la adecuada realización de los trabajos y el cumplimiento del programa, así como las fallas detectadas en los antedistribuidores de las turbinas, de las que no se tenía antecedentes en máquinas similares en nuestro país justifica el capítulo V de este documento: Control de Calidad, en donde se discuten

**los mecanismos implementados por el fabricante, el montador y el cliente (CFE), para garantizar el comportamiento satisfactorio de los componentes del sistema durante su operación.**

**Con la finalidad de revisar los trabajos de montaje y ajustar los componentes de la turbina y sus sistemas auxiliares, antes de la generación comercial de electricidad, se realizan las pruebas de Puesta en Servicio de la máquina. Así mismo y para verificar los valores mínimos garantizados ofrecidos por el fabricante en cuanto a eficiencia y potencia de la turbina, se llevan a cabo pruebas ya durante su operación comercial, estos temas son tratados en el capítulo VI.**

**Finalmente en el capítulo VII se anotan las conclusiones desprendidas de los temas tratados. Además el lector encontrará un apéndice en el que se incluye la información más relevante del proyecto, datos de diseño, volúmenes de obra, etc.**

---

***CAPITULO II***

## **II. OBRAS DE GENERACION Y CARACTERISTICAS DE LA TURBINA.**

### **II.1 Generalidades.**

Ante la necesidad cada vez más apremiante de satisfacer la demanda de energía eléctrica en nuestro país, la Comisión Federal de Electricidad tomó la decisión en el año de 1988 de construir el Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, sobre el cauce del río Santiago en el Estado de Nayarit. El proyecto contempla la instalación y puesta en servicio de tres unidades generadoras de 320 MW cada una, es decir, una potencia instalada de 960 MW. Los estudios hidrológicos para el aprovechamiento realizados en ésta zona datan del año de 1950 y asociado a las condiciones de gasto medio anual y caída disponible en la zona de la boquilla de la presa, así como del factor de planta determinado para el aprovechamiento, se eligieron tres turbinas tipo Francis para realizar la transferencia de energía.

En el mismo año de 1988 la Comisión inició por administración directa las obras de desvío del río (dos túneles sección herradura de 16m. de diámetro y 1100 m. de longitud), transfiriéndose al año siguiente a la empresa Ingenieros Civiles Asociados, ganadora de la licitación para construir toda la obra civil de la Central, (Cortina, vertedor, obra de toma, casa de máquinas y subestación).

Por primera vez, bajo la modalidad "llave en mano", la Comisión Federal de Electricidad realizó el concurso en el año de 1990 para el suministro total: ingeniería, fabricación, transporte, montaje, supervisión, pruebas y puesta en servicio de los componentes electromecánicos para el proyecto, (turbinas, generadores, transformadores de potencia, subestación, grúas viajeras, compuertas en vertedor, obra de toma y galería de oscilación, etc.). Dicho suministro fué asignado a una asociación de empresas alemanas, austríacas, rusas y mexicanas en lo que se refiere a fabricación y a la empresa Techint, S.A. (italo-argentina-mexicana) para realizar el montaje de todos estos componentes en la Central.

## **II.2 La obra de generación.**

Desde un punto de vista funcional, las obras que forman el Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa se pueden dividir en:

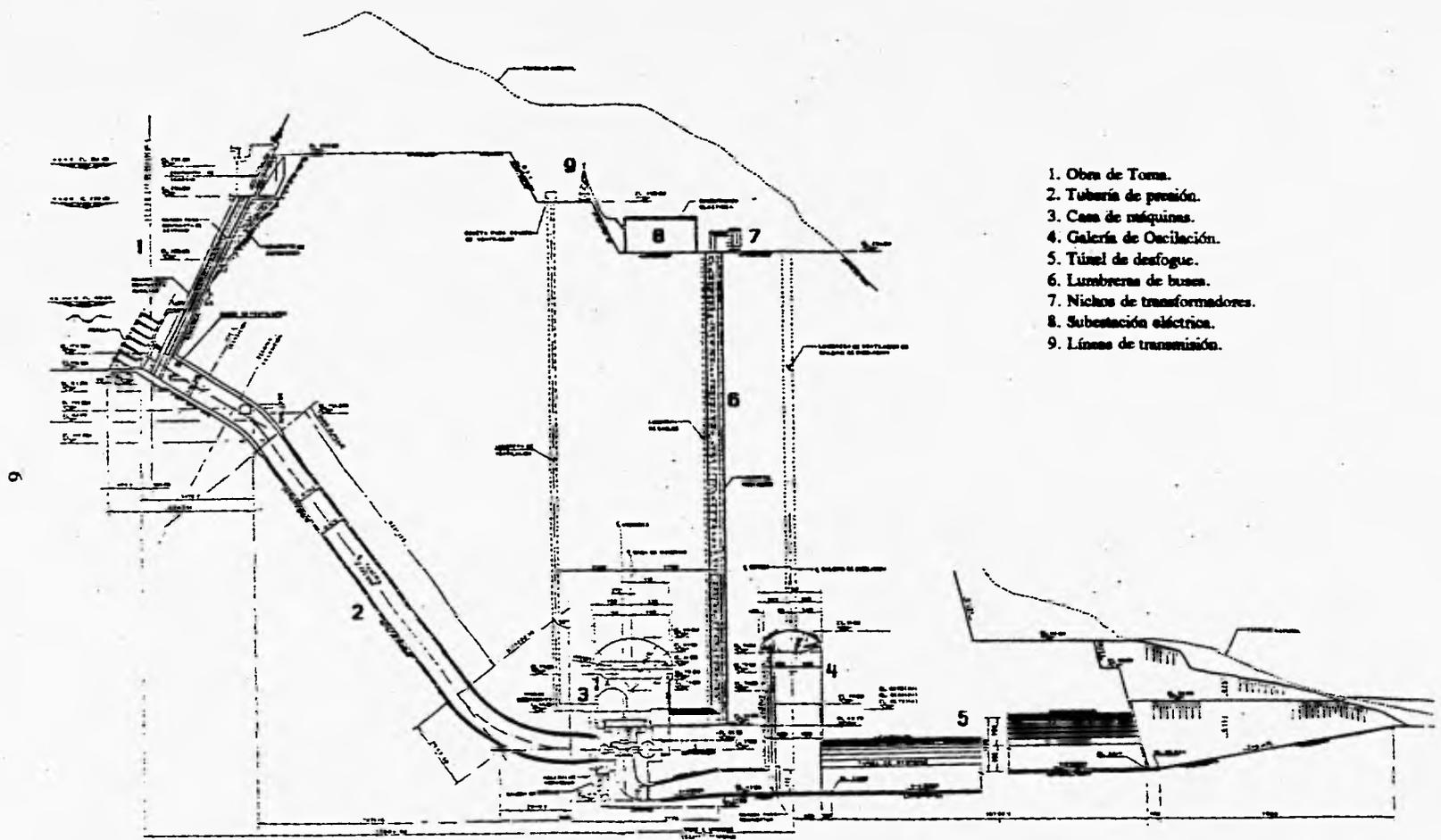
- A. Obras de desvío.
  - Túneles de desvío del río.
  
- B. Obras de contención.
  - Cortina.
  - Atagúa aguas arriba.
  - Atagúa aguas abajo.
  
- C. Obras de excedencias.
  - Vertedor.
  
- D. Obras de generación.

En la fig. II.1 se muestra un esquema de la obra de generación de la central, en donde se destacan y enumeran las partes y sistemas que la componen, a saber:

### ***II.2.1 Obras de infraestructura hidráulica.***

#### **a) Obra de Toma.**

Está formada por un canal de llamada (elev. 170.0), tres bocatomas (una por unidad) que varían a través de una transición gradual de sección rectangular (5.80m x 7.40m) en la entrada a sección circular con diámetro igual a 7.40 m. para unirse con la tubería de presión. Edificio de control y rampas con rieles para el deslizado de compuertas de servicio y auxiliar.



1. Obra de Toma.
2. Tubería de presión.
3. Casa de máquinas.
4. Galería de Oscilación.
5. Túnel de desfogue.
6. Lumberas de buses.
7. Nichos de transformadores.
8. Subestación eléctrica.
9. Líneas de transmisión.

FIG. II.1 OBRAS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL.

**b) Tubería de presión.**

Se trata de tres túneles independientes, uno para cada unidad excavados en roca con una longitud de 136m., desnivel de 111m. y revestidos con blindaje de acero de 7.40m. de diámetro y espesor de placa de 1 1/2", diseñado para conducir un gasto máximo de 250 m<sup>3</sup>/seg. Ante la presencia de fenómenos transitorios como golpe de ariete, el espesor de la placa, que está empacada en concreto, está diseñada para absorber los esfuerzos provocados por la sobrepresión, por lo que no existe alguna estructura adicional para resistir dichos efectos.

**c) Galería de Oscilación.**

En la galería de oscilación se realiza el desfogue de los tres tubos de aspiración de las turbinas. Mide 87m. de longitud, 16.3 m. de ancho y 49.5m. de alto. De manera similar a la obra de toma, la galería cuenta con un edificio en donde se alojan las compuertas de aislamiento del desfogue. Estas compuertas son de sección rectangular de 7.6m x 5.47m y obturan la entrada de agua del cauce hacia la máquina para mantener en seco la unidad. Son dos compuertas por turbina.

**d) Túnel de desfogue.**

El caudal que ha sido turbinado y desfogado en la galería de oscilación, regresa al cauce del río a través de un sólo túnel de desfogue, para las tres unidades. Excavado en roca, con sección herradura de diámetro 16m, y altura de 17.2m, tiene una longitud de 390 m. y está completamente revestido de concreto con espesor de 60 cm y acabado liso. Para lograr la sumergencia de diseño de las turbinas, el túnel tiene una pendiente positiva de 0.02356% hasta el canal de salida en donde la pendiente varía a 0.1538% alcanzando en la elev. 63.00 la plantilla del lecho del río en la salida del túnel.

**II.2.2 Obras de infraestructura eléctrica.**

**a) Lumbreras de buses.**

Estas lumbreras comunican la casa de máquinas, (elev. 64.00) con la subestación (elev. 205), tienen 141m. de altura y diámetro de 5.40m., revestidas de concreto reforzado. En ellas se alojan los buses ó conductores de fase aislada que llevan la corriente inducida en el estator del generador hasta los transformadores en la subestación. Hay un bus por cada fase y tres buses en cada lumbrera. (La generación es trifásica).

**b) Nichos de transformadores.**

Los nichos ó mamparas son plataformas con rieles y muros de concreto que alojan a cada uno de los nueve transformadores monofásicos de 125 MVA de la central. Cada uno de los nichos cuenta con un sistema de diluvio para protección en caso de incendio y un sistema de drenaje.

**c) Subestación.**

El proyecto hidroeléctrico cuenta con una subestación de llegada de 115 kv para servicios de la central, que se alimenta de la subestación de la cd. de Tepic, una subestación de 13.8 kv que es la tensión propiamente de servicio en la planta y la subestación de salida (ó de generación) de 400 kv que está conectada a los nueve transformadores de 125 MVA. Las tres subestaciones se encuentran dentro de edificios, pues son del tipo encapsuladas (SF6) lo que permite tener pequeñas distancias entre fases, ahorrando espacio, montándolas y operando dentro de un recinto cerrado.

**II.2.3 La Casa de Máquinas, (infraestructura hidráulica y eléctrica).**

La casa de máquinas de la Central (fig. II.2) se encuentra alojada en caverna dentro de la montaña. Se trata de un galería de 134m de longitud, 24m de ancho y altura de 50m, con techo de bóveda, excavada en roca de buena calidad. El volumen de excavaciones ejecutado fué de 110,000 m<sup>3</sup>. En el corte longitudinal y la planta mostrados en las figuras II.3a y II.3b se observan los tres fosos excavados de la elev. 39.25 a la 52.75, para alojar los tubos de aspiración de las turbinas, que conectan a su salida con la galería de oscilación. Los volúmenes excavados en cada foso fueron del orden de los 4,500 m<sup>3</sup>.

En la fig. II.4, se presenta el programa general de excavaciones y tratamientos en roca de la casa de máquinas, en donde se resume el procedimiento constructivo hasta la excavación del foso de la unidad y los primeros colados del tubo de aspiración. Es en éste entorno donde comienza el programa de montaje de la turbina que se describe íntegro en el capítulo IV de este trabajo.

Además de la obra civil relativa a las excavaciones y tratamiento de roca, en casa de máquinas se hacen los trabajos de armado de columnas y traveses de acero para montar las grúas viajeras, se acondiciona el recinto de la playa de montaje, que es el lugar en donde se hacen todos los trabajos preparativos para el armado de turbinas, generador y demás equipo de casa de máquinas. Durante las etapas de colados en la galería, se construyen las salas de operación de los distintos equipos, piso de operación de turbina, piso de generador, sala de baterías, sala de la turbina auxiliar, sala de los equipos para operación de la unidad como condensador síncrono, etc. en todas ellas se alojan tableros de medición y control, así como electroductos, cables y sistemas auxiliares del turbogenerador (fig. II.2).

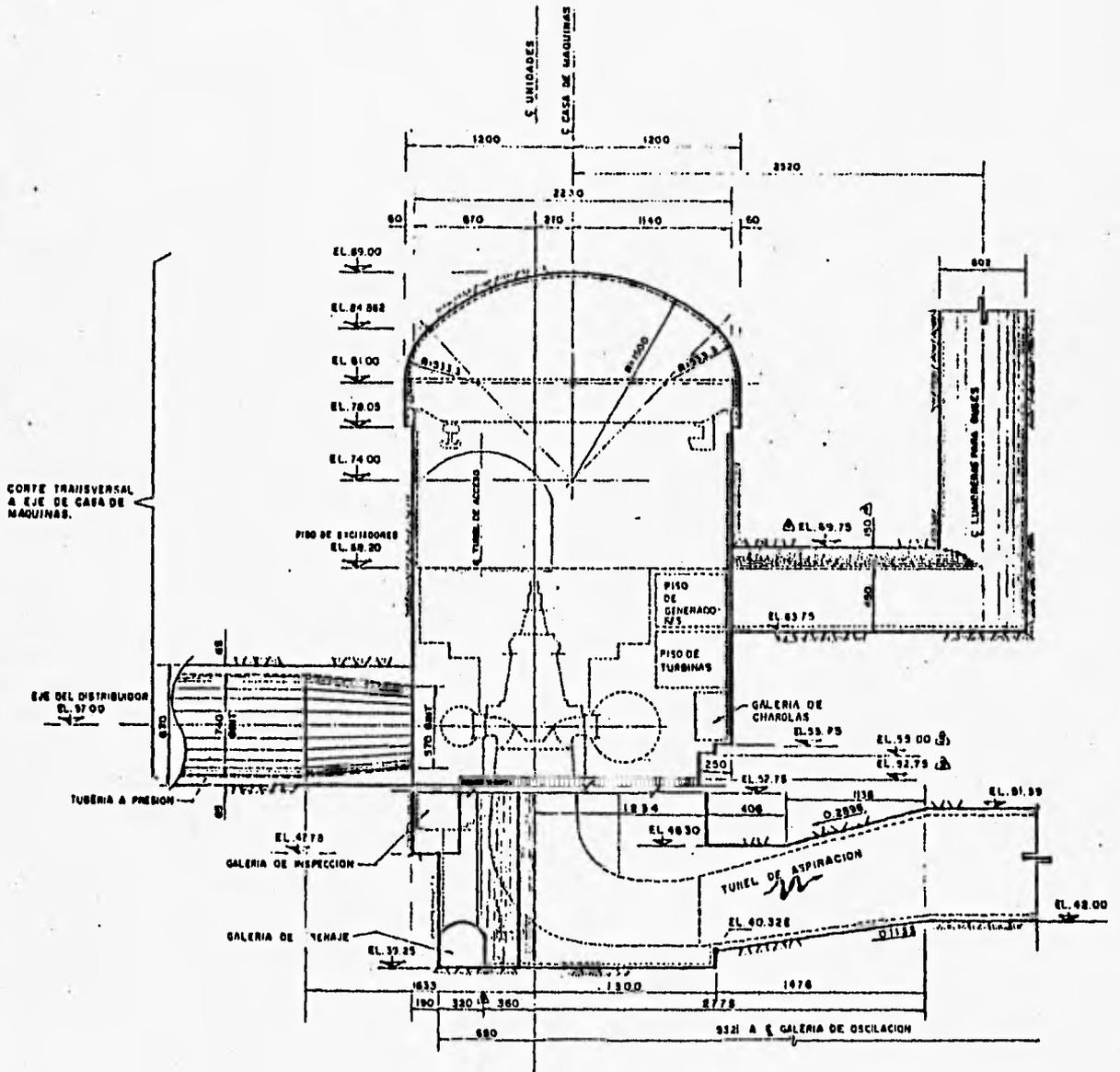


FIG. II.2 CORTE TRANSVERSAL DE CASA DE MÁQUINAS.

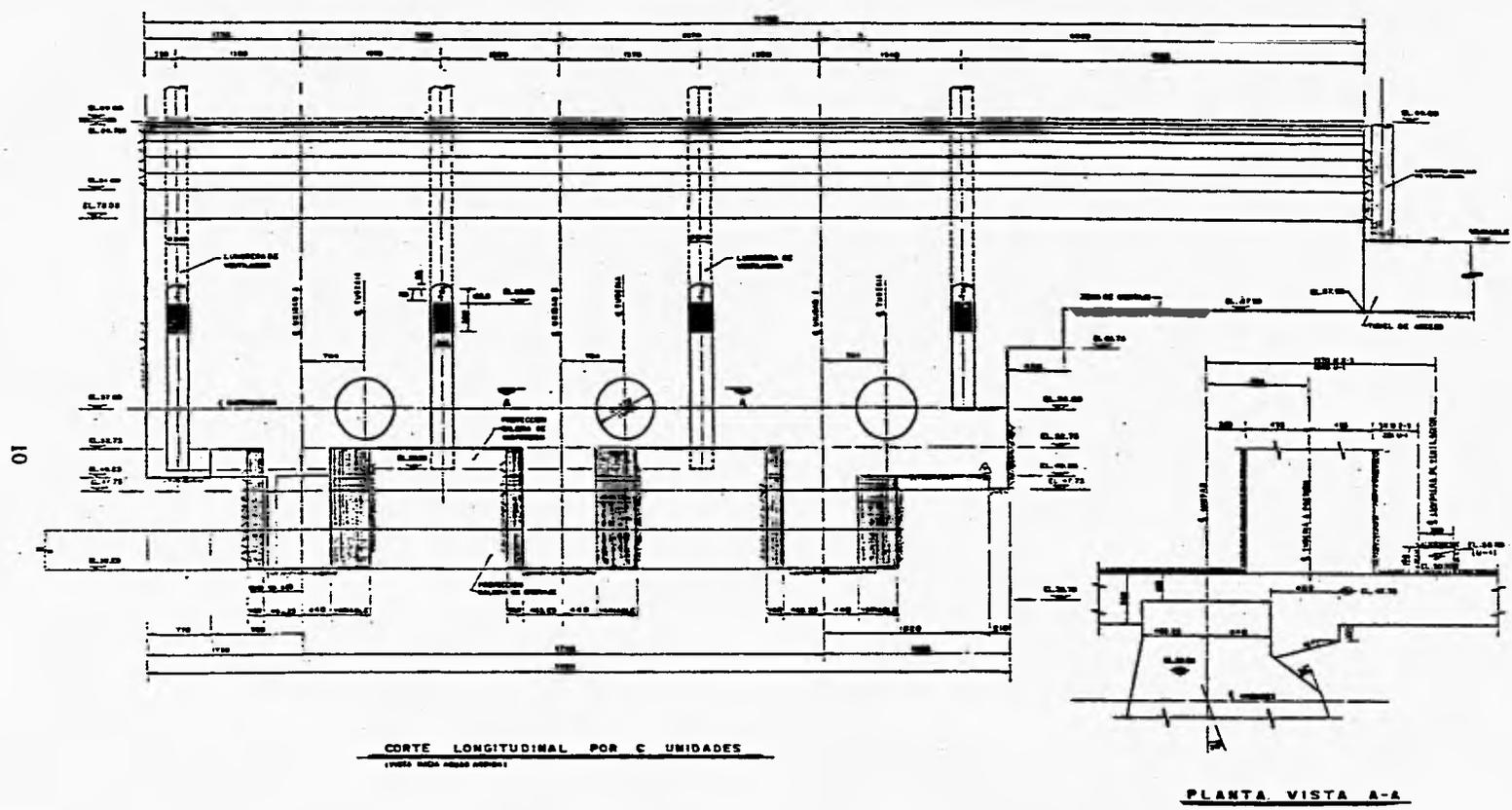
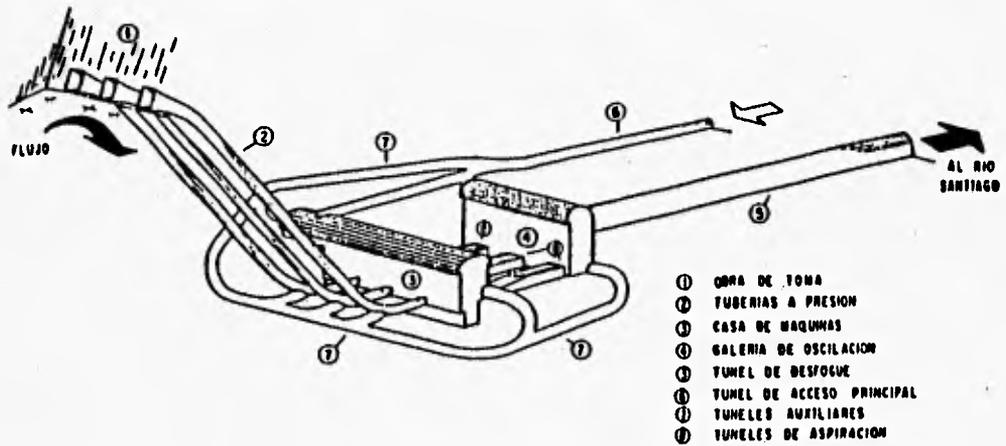


FIG. II.3A CORTE LONGITUDINAL DE CASA DE MÁQUINAS.





## COMPLEJO SUBTERRANEO-ISOMETRICO



- ① OBRA DE TOMA
- ② TUBERIAS A PRESION
- ③ CASA DE MAQUINAS
- ④ GALERIA DE OSCILACION
- ⑤ TUNEL DE DESFOQUE
- ⑥ TUNEL DE ACCESO PRINCIPAL
- ⑦ TUNELES AUXILIARES
- ⑧ TUNELES DE ASPIRACION

## RESUMEN DE LAS ETAPAS DE EXCAVACION

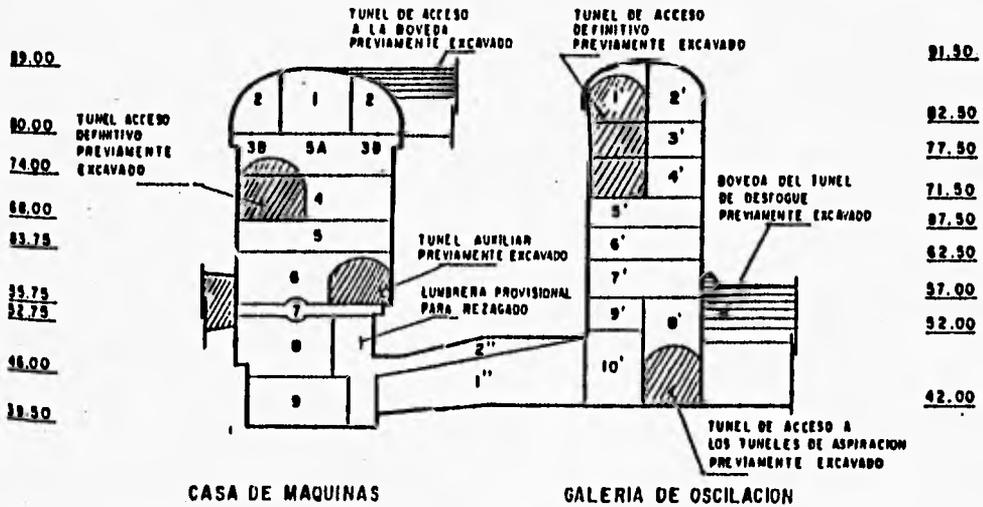


FIG. II.4B ETAPAS DE EXCAVACIONES EN CASA DE MÁQUINAS.

### II.3 Descripción de la turbina y sistemas auxiliares.

En la fig. II.5a y II.5b se presentan una vista en planta y un corte de los conductos hidráulicos de la turbina (partes empotradas), y en la fig. II.6 se observa un medio corte del turbogenerador en donde se destacan los mecanismos ó componentes finos de la turbina. Todo el conjunto que aparece en dichas figuras se puede clasificar como se indica a continuación:

#### **1.- Partes empotradas.**

- a) Carcasa espiral
- b) antedistribuidor
- c) anillo de cimentación
- d) forro del foso de la turbina
- e) tubo de aspiración
- f) tuberías embebidas.

#### **2.- Distribuidor.**

- a) Anillo ó escudo inferior
- b) álabes móviles y chumaceras
- c) tapa ó escudo superior
- d) sistema de mando.

#### **3.- Rodete.**

#### **4.- Flecha.**

#### **5.- Chumacera guía.**

#### **6.- Sello de la flecha.**

#### **7.- Regulador de velocidad.**

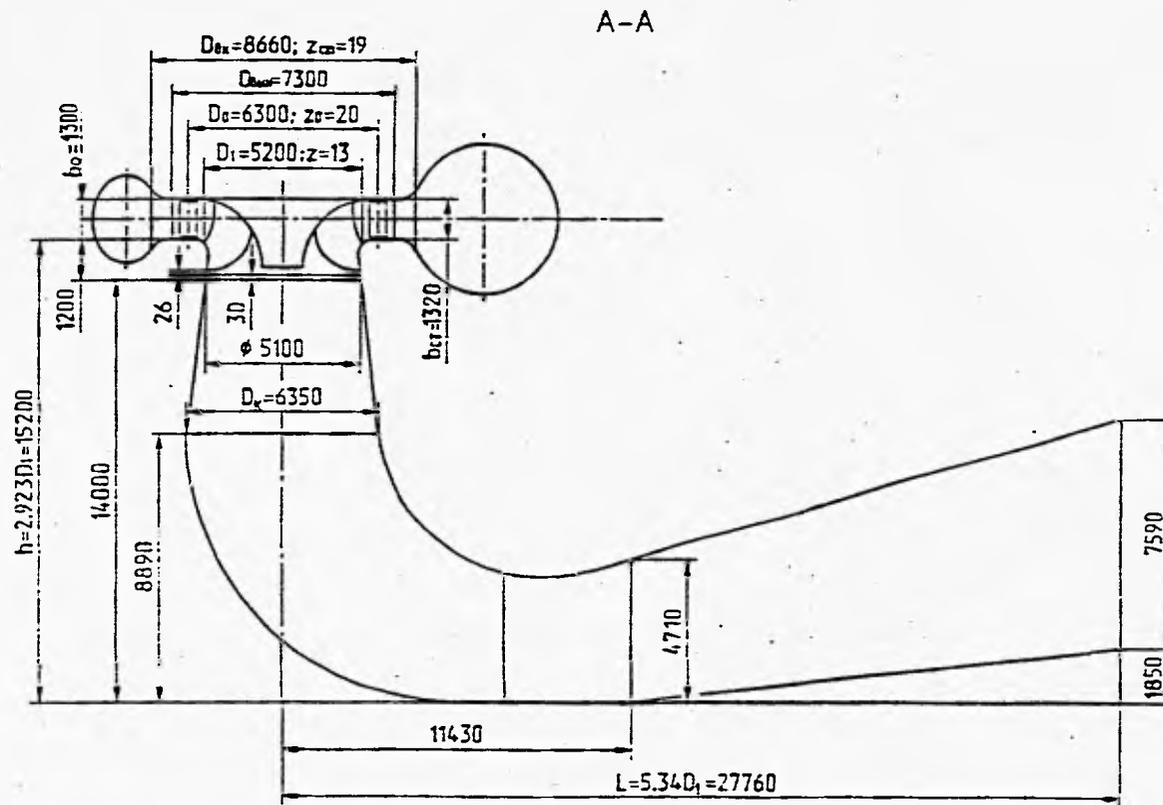
#### **8.- Sistemas auxiliares.**

#### **1.- Partes empotradas.**

##### **a) Carcasa espiral.**

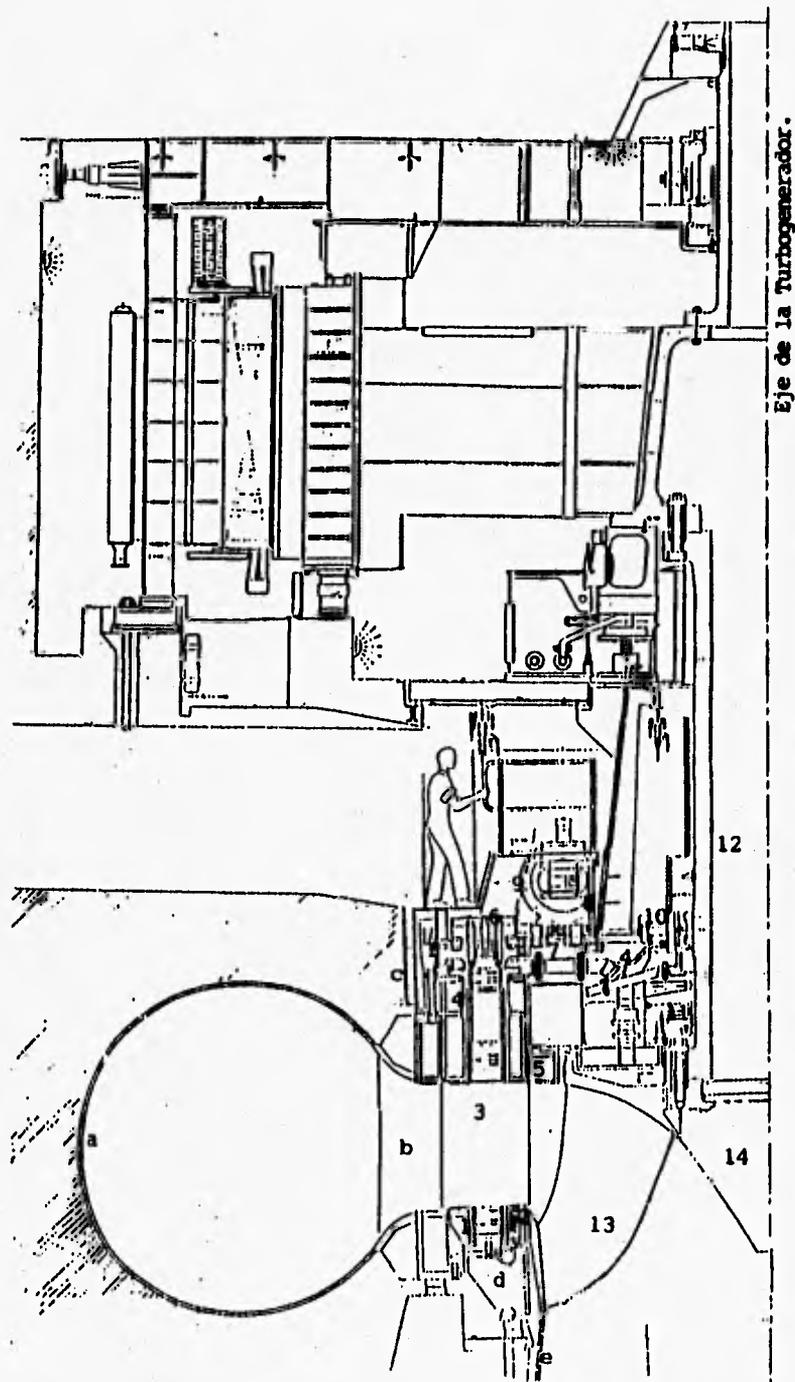
La cámara espiral cumple con la función de llevar hasta el antedistribuidor repartiendo a todo su alrededor el caudal que viene de la tubería de presión, para que se distribuya uniformemente el gasto entre álabes fijos del antedistribuidor antes de entrar al rodete de la turbina.





Z = No. de álabes fijos ó móviles.

FIG. II.5B CORTE LONGITUDINAL DEL PASAJE HIDRAÚLICO DE LA TURBINA.



Eje de la Turbogenerador.

- I. Partes empotradas.**
- a. Carcasa espiral.
  - b. Antivibrador.
  - c. Perro del freno.
  - d. Anillo de elevación.
  - e. Cazo superior tubo espiralado.
  - f. Tubos empotrados.
- II. Mecanismos.**
- 1. Anillo de correa inferior.
  - 2. Anillo de desgaste inferior.
  - 3. Anillo móvil.
  - 4. Brazo superior de tapa.
  - 5. Anillo de desgaste superior.
  - 6. Levas.
  - 7. Biela.
  - 8. Anillo de mando.
  - 9. Servomotor.
  - 10. Chumacera guía.
  - 11. Bello de la flecha.
  - 12. Flecha.
  - 13. Rodete.
  - 14. Cazo de vórtice.

FIG. II.6 CORTE LONGITUDINAL DEL CONJUNTO TURBINA (MECANISMOS) Y GENERADOR.

La carcasa está formada por 25 gajos ó virolas de sección transversal "C", de placa de acero grado ASTM-A202 de 1 3/8" de espesor que se ensamblan en sitio y que de acuerdo a la facilidad de su transporte a obra se determinó su grado de preensamble en fábrica. Tiene un peso de 171 toneladas y una longitud de 35 m. que se desarrollan en un ángulo horizontal de 342° alrededor del diámetro del antedistribuidor, con el que se suelda en campo para formar un conjunto. Aguas arriba, la carcasa se une a la tubería de presión a través de una transición cónica que reduce el diámetro de 7.40 m. de la tubería a 5.70 m. a la entrada de la carcasa.

La carcasa está diseñada para resistir por sí sola los esfuerzos de tensión producidos por la presión del agua en su interior (16 kg/cm<sup>2</sup>), para tal efecto está provista a lo largo de toda su superficie de atiesadores transversales auxiliares que se sueldan a las bridas superior e inferior del antedistribuidor y abrazan la carcasa para rigidizar el conjunto.

*b) Antedistribuidor.*

Su función principal es repartir uniformemente alrededor del rodete el gasto conducido por la carcasa espiral, dando además el direccionamiento adecuado ó el ángulo de entrada al flujo, de tal forma que éste se adapte al perfil de los álabes del rodete. Para ello cuenta con 19 álabes fijos fabricados de acero de baja aleación que se encuentran soldados a los anillos superior e inferior que forman las bridas del antedistribuidor. Debido a su peso, (110 ton) y a sus dimensiones, se fabricó en cuatro secciones a 90° para ser ensambladas en obra a través de pasadores con tuercas en sus empalmes, (fig. II.8).

Desde el punto de vista estructural, el antedistribuidor es la pieza más importante de la turbina, ya que a través de él se descargan los pesos de todo el distribuidor, flecha-rodete, chumacera de carga y un gran porcentaje del peso del rotor del generador, ya que en su parte superior se acopla con el escudo ó tapa superior de la turbina. En su parte inferior se une al anillo de cimentación.

*c) Anillo de cimentación.*

Está fabricado en acero al alto carbono ASTM-A516 y en dos secciones para su transporte a obra. Se acopla interiormente a la brida inferior del antedistribuidor y se ajusta con el cono superior del tubo de aspiración para hermetizar el foso de la unidad en ésta zona. Este anillo cumple con la función de dar apoyo al anillo ó escudo inferior de la turbina. Tiene un peso de 19.6 ton.

*d) Forro del foso de la turbina.*

El forro es una camisa cilíndrica de acero de 14 mm. de espesor y peso de 11.6 ton. que tiene

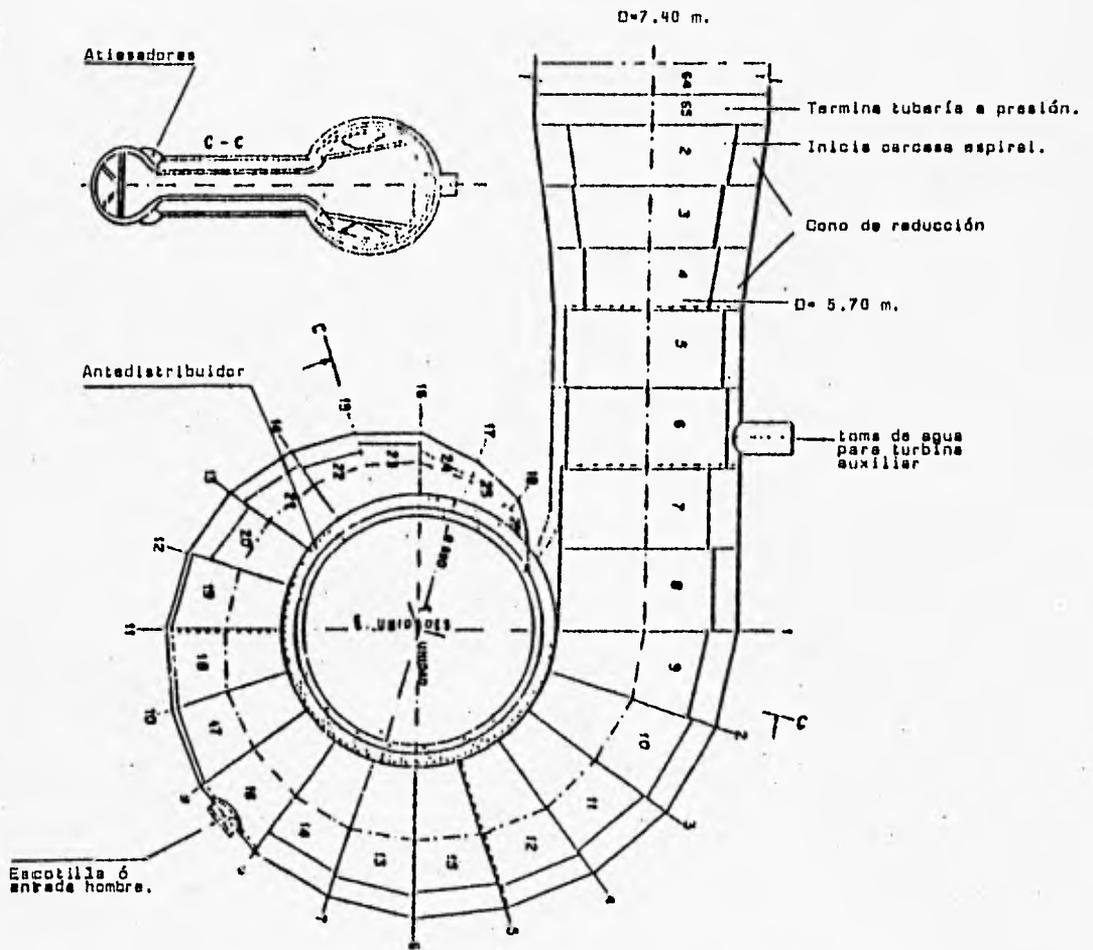


FIG. II.7 CARCASA ESPIRAL.

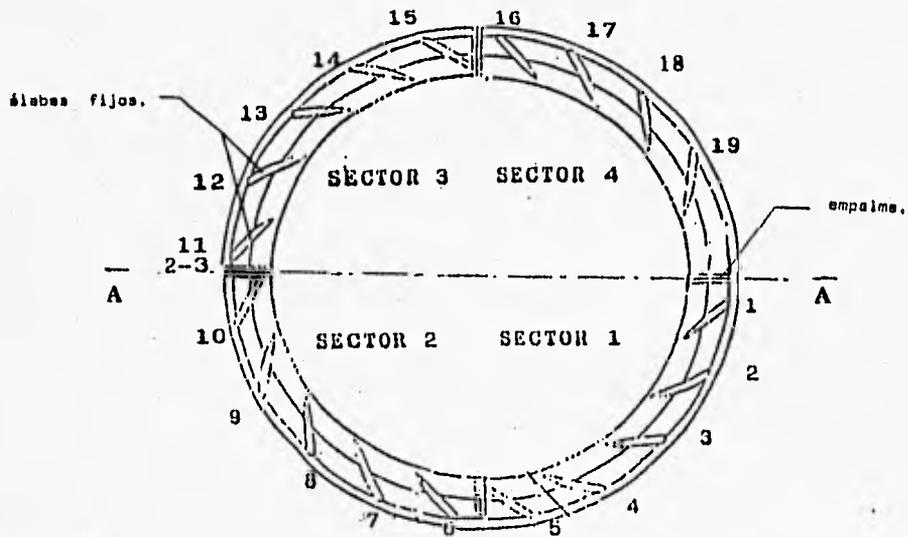
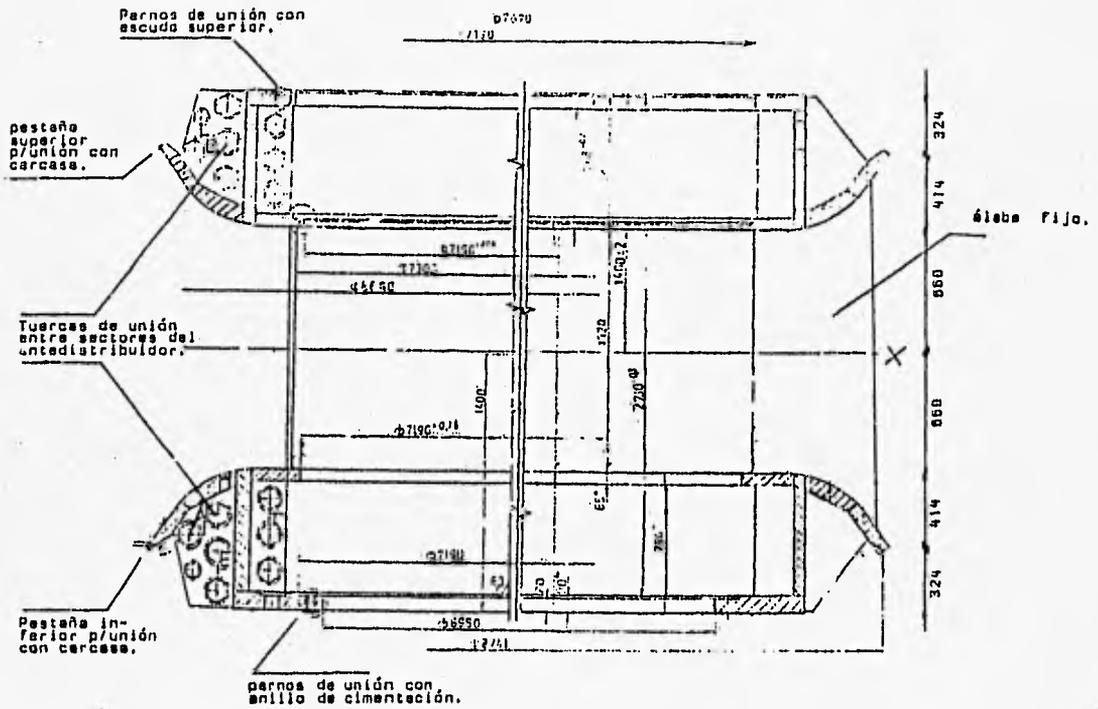


FIG. II.8 ANTEDISTRIBUIDOR.

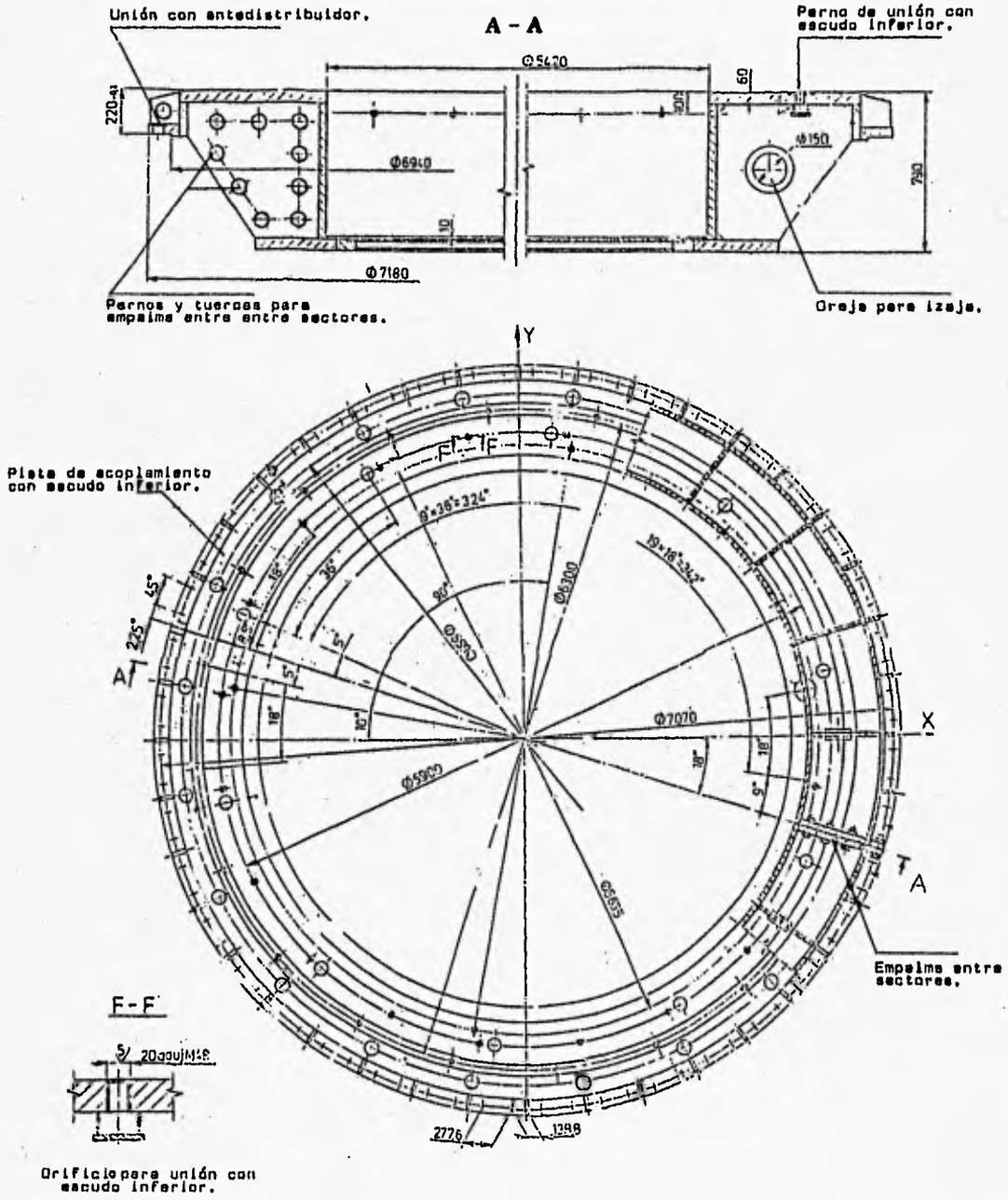


FIG. II.9 ANILLO DE CIMENTACIÓN.

la doble función de servir como cimbra para colar el foso de los mecanismos de turbina quedando ahogado en el concreto y permitiendo por otra parte, instalar fácilmente todas las tuberías que se empotran en ésta zona y que van a los pisos de operación del turbogenerador. Este revestimiento no está diseñado para resistir las solicitaciones producidas por el concreto durante su colado, por lo que necesita troquelarse interiormente cuando se realizan los mismos. El forro está provisto de dos huecos, en donde se necesita cimbra especial, pues en ellos se alojan los servomotores del distribuidor.

*e) Tubo de aspiración.*

El tubo de aspiración ó succión cumple con la función de desfogar hacia la galería de oscilación el gasto que ya ha pasado por el rodete (gasto turbinado). Se llama de succión por que recupera parte de la energía cinética del agua al crear una zona de vacío y .

En la fig. II.11 se observan los componentes del tubo: cono superior, cono inferior, codo y nariz.

El cono superior es propiamente la junta de ajuste entre el tubo de aspiración y el anillo de cimentación de la turbina, entre ambos hermetizan el foso de la unidad en ésta zona. El cono inferior tiene un diámetro de entrada de 5.40m y un diámetro de salida de 6.35m para conectarse con el codo. Dispone también de una escotilla ó acceso hombre similar al de carcasa.

A través del codo, el flujo cambia de dirección vertical a horizontal variando de sección circular a su entrada a sección rectangular en la salida para conectar con la nariz. La nariz divide la salida del codo en dos ramales de desfogue de sección rectangular de 7.6m x 5.47m que llevan el gasto a la galería de oscilación.

Todos los componentes del tubo de aspiración, al igual que la carcasa espiral son de fabricación mexicana. El espesor de placa promedio es de 14 mm, acero ASTM-A-36 transportada a obra en 27 piezas para su ensamble en sitio.

*f) Tuberías empotradas.*

Son todas las tuberías que se instalan paralelamente al montaje de turbina y que quedan embebidas en el concreto durante las etapas de colados. Se clasifican en:

- tuberías de drenaje.
- tuberías de admisión de fluidos de los sistemas auxiliares de turbina.
- tuberías de instrumentación y señalización.

La tabla de la fig. II.12 contiene los principales sistemas de tuberías que apoyan a la turbina durante su operación.

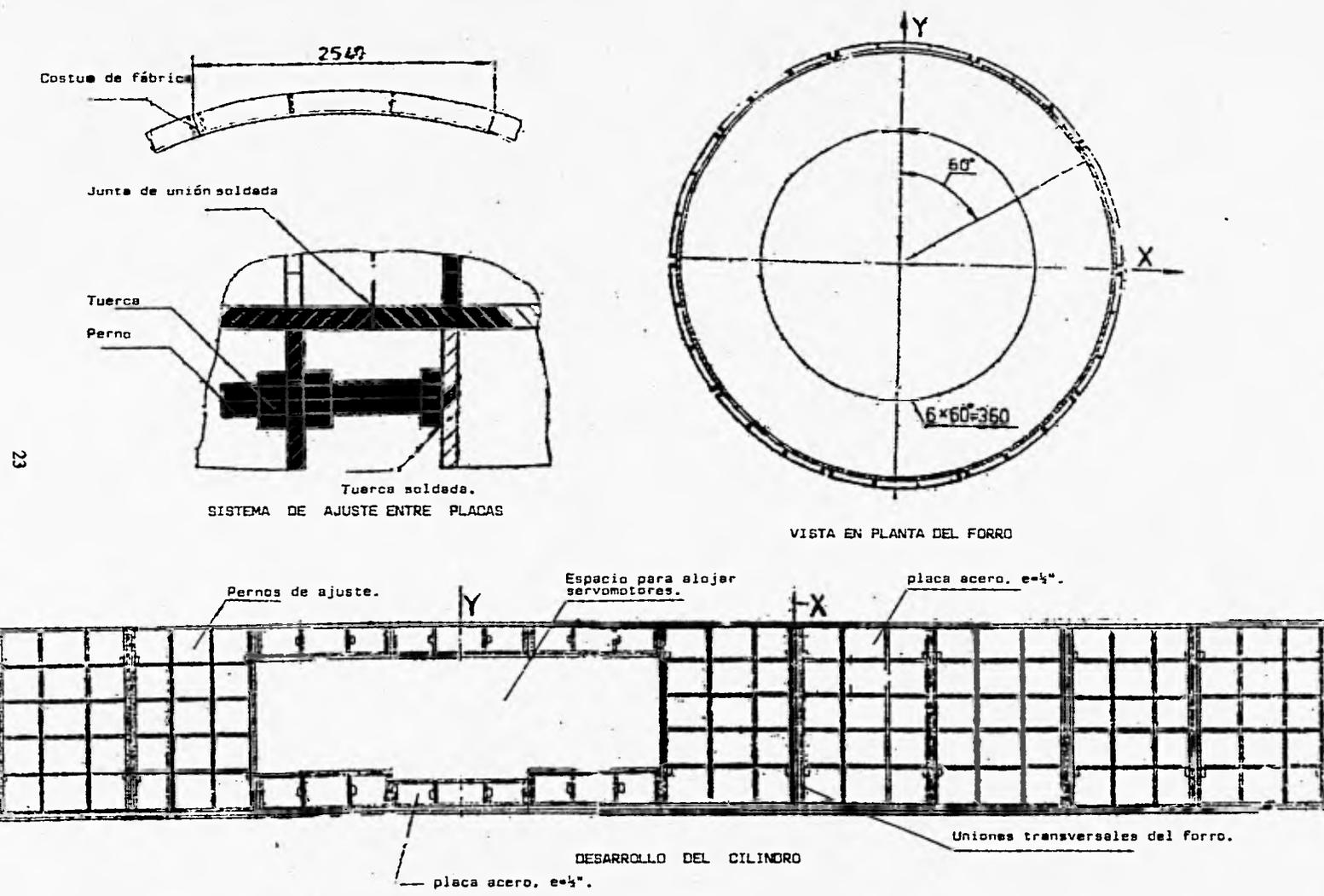


FIG. II.10 FORRO DEL FOSO DE TURBINA.

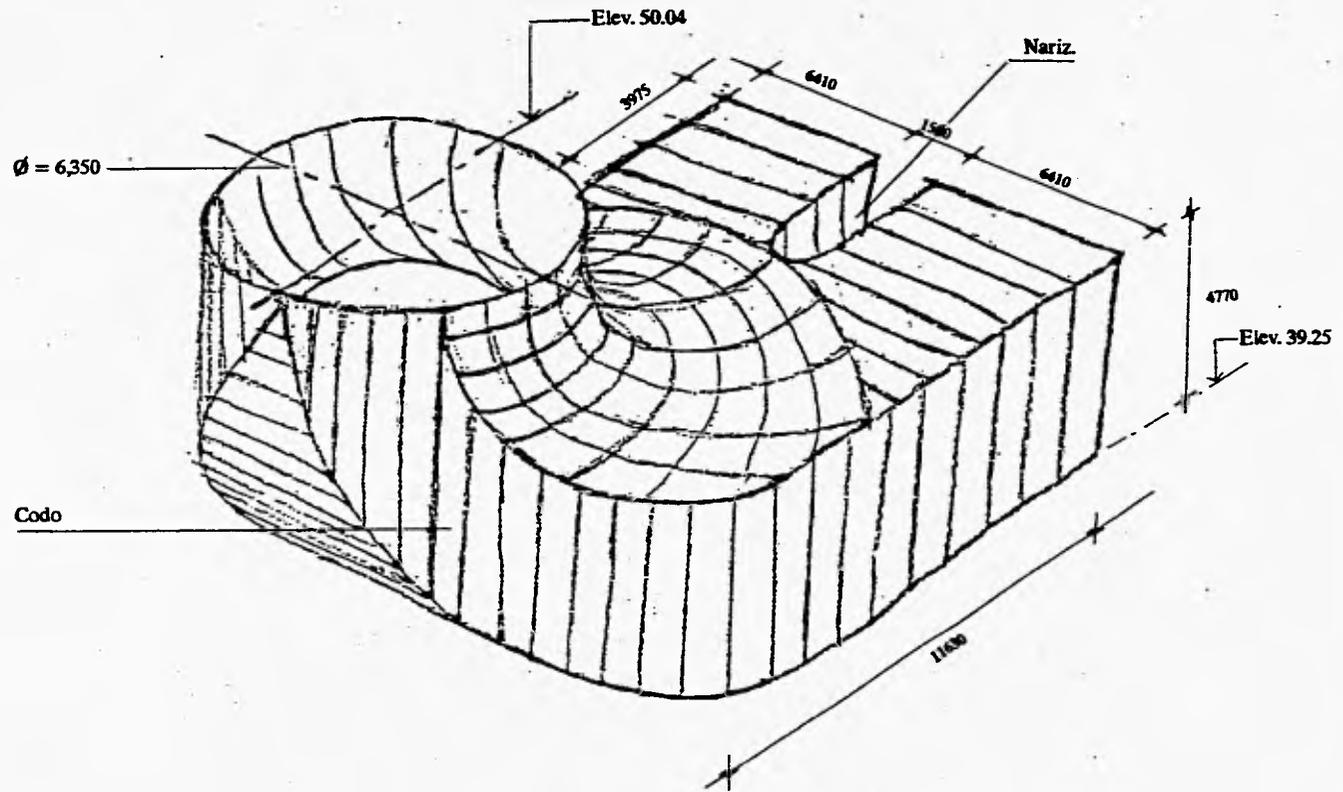


FIG. II.11A CODO Y NARIZ DEL TUBO DE ASPIRACIÓN.



No.	Uso	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Cantidad	Conexiones	
					de	a
1	Drenaje del tubo de aspiración.	426	11	1	Tubo de aspiración	Galería de drenaje
2	Instrumentación de tubo de aspiración.	38	2.5	4	Cono inferior	Tablero local de turbina.
3	Medición de pulsaciones de presión en T/A.	38	2.5	4	Cono superior.	Tableros de medición.
4	Medición de gasto.	38	2.5	5	Carcasa espiral.	Tablero de medición de gasto de turbina.
5	Instrumentación de carcasa.	38	2.5	4	Entrada carcasa espiral.	Tablero local de turbina.
6	Medición de pulsaciones de presión en la carcasa espiral.	38	3.5	1	Entrada carcasa espiral.	Tablero local de turbina.
7	Drenaje de la tapa superior de la turbina.	219	8	1	Tapa de turbina	Galería de drenaje
8	Tubos de vaciado de fugas de agua.	108	7	10	Perímetro de la zona rodete-distribuidor.	Colector de drenaje de fugas de agua.
9	Colector de drenaje de fugas de agua.	325	8	1	Perímetro de la zona rodete-distribuidor.	Perímetro de la zona rodete-distribuidor.
10	Vaciado final de fugas de agua.	159	8	2	Colector de fugas zona rodete-distribuidor.	Codo del tubo de aspiración.
11	Descarga de los vistagos inferiores de los álabes móviles.	57	3.5	2	Escudo inferior.	Cono del tubo de aspiración.
12	Suministro de aceite a chumaceras.	89	6	2	Piso de turbina.	Tanque de chumaceras.
13	Tubo para tuberías de aceite desde chumacera guía a enfriadores de turbina.	219	8	1	Chumacera guía inferior.	Enfriadores de turbina.
14	Tubo para tuberías desde el foso de turbina a la unidad de recolección de fugas.	219	8	1	Foso de turbina.	Unidad de recolección de fugas.
15	Para inyección de aire operando la unidad en régimen de potencia particular.	159	8	1	Piso de turbina.	Foso de turbina.
16	Admisión de aire del tanque para arranque de turbina en régimen C.S.	108	7	2	Piso de turbina.	Foso de turbina.
17	Admisión de agua con laberinto superior en régimen C.S.	89	6	1	Piso de turbina.	Foso de turbina.
18	Admisión de agua para sello de la flecha de turbina.	57	3.5	1	Piso de turbina.	Foso de turbina.
19	Tubo para cableado eléctricos.	273	7	1	Zona tablero local turbina	Foso de turbina.

FIG. II.12 TUBERÍAS EMPOTRADAS DE LOS SISTEMAS AUXILIARES DE LA TURBINA.

## **2. Distribuidor.**

### **a) Anillo ó escudo inferior.**

Esta estructura sirve de apoyo a los álabes móviles del distribuidor. Es un anillo fabricado en dos secciones cuya superficie superior se empata con la superficie de entrada del antedistribuidor y se sujeta en su parte inferior a través de arandelas, al anillo de cimentación. En el corte A-A, de la fig. II.13 se observan las partes que lo componen. En la parte central del anillo, se encuentran veinte nichos que son los que reciben a los vástagos inferiores de cada uno de los álabes móviles. Estos nichos están provistos de bujes (cilindros huecos ó camisas) removibles de acero, de material más suave que el álabe, con la finalidad de que sean ellos los que sufran el desgaste producto de la fricción entre metales al girar el vástago del álabe, por lo que el diseño contempla la sustitución de éstas camisas cuando así se requiera. Los nichos están provistos también de ranuras en su parte superior en donde se acoplan unos empaques circulares ó sellos elásticos para evitar que el agua penetre dentro del mismo.

Sobre la parte superior del anillo, se coloca un recubrimiento de acero inoxidable que se sujeta a aquél, con arandelas y que es removible, ya que también se desgasta como consecuencia del giro de la cara inferior de la paleta del álabe.

Sobre la cara interior del escudo, se acopla su anillo de desgaste inferior. Una vista en corte de éste anillo (fig. II.13b) muestra el perfil ranurado que tiene el mismo, a través del cual circula agua para disminuir la fricción y el desgaste entre éste y el anillo de desgaste inferior del rodete. Estos dos anillos se desgastan como consecuencia del giro del rodete en su operación normal y más aún en su operación en seco, como condensador síncrono (motor), teniendo también que ser sustituidos con el tiempo.

### **b) Alabes móviles.**

La regulación del gasto de entrada al rodete es una función del régimen de operación del turbogenerador y se hace a través de veinte álabes móviles, situados enfrente de los claros del antedistribuidor entre álabe fijo y álabe fijo del mismo. Para ello los álabes directrices giran alrededor de su eje en un rango de 0° a 36° (de la posición totalmente abiertos a la posición totalmente cerrados). El claro máximo entre paletas de álabes correspondiente a la posición totalmente abiertos es de 40 cm. La hermeticidad en la posición de cierre se logra con el ajuste fino de las superficies de contacto entre paletas adyacentes y con el asentamiento adecuado de las caras inferiores y superiores del álabe con los recubrimientos inoxidables de desgaste del escudo inferior y superior.

Fundidos en una sola pieza de acero inoxidable resistente a la cavitación (ASTM-A743), están formados por una paleta de forma fuselada y dos vástagos superior largo e inferior corto que se





acoplan a los escudos respectivos. El peso de cada álabe es de 3 ton.

Para girar, los álabes disponen de un cojinete superior que se encuentra alojado en los nichos del escudo superior de turbina y de unas levas a las cuáles se acoplan los vástagos superiores de álabes a través de tornillos y arandelas. Las levas posteriormente se enlazan con las bielas del sistema de mando que es el responsable de transmitir simultáneamente a los veinte álabes el par de giro que transmiten los servomotores cuando el regulador de velocidad de la turbina manda a éste una orden de apertura ó cierre del distribuidor.

*c) Tapa de turbina ó escudo superior.*

- De manera análoga al escudo inferior, esta estructura sirve de apoyo a los vástagos superiores de los álabes móviles. Cuenta también con veinte nichos grandes en donde además de los vástagos, se alojan los bujes removibles, los sellos y los cojinetes de apoyo que transmiten el giro a los álabes.

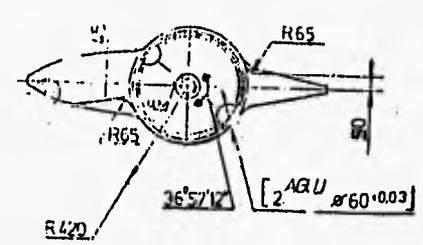
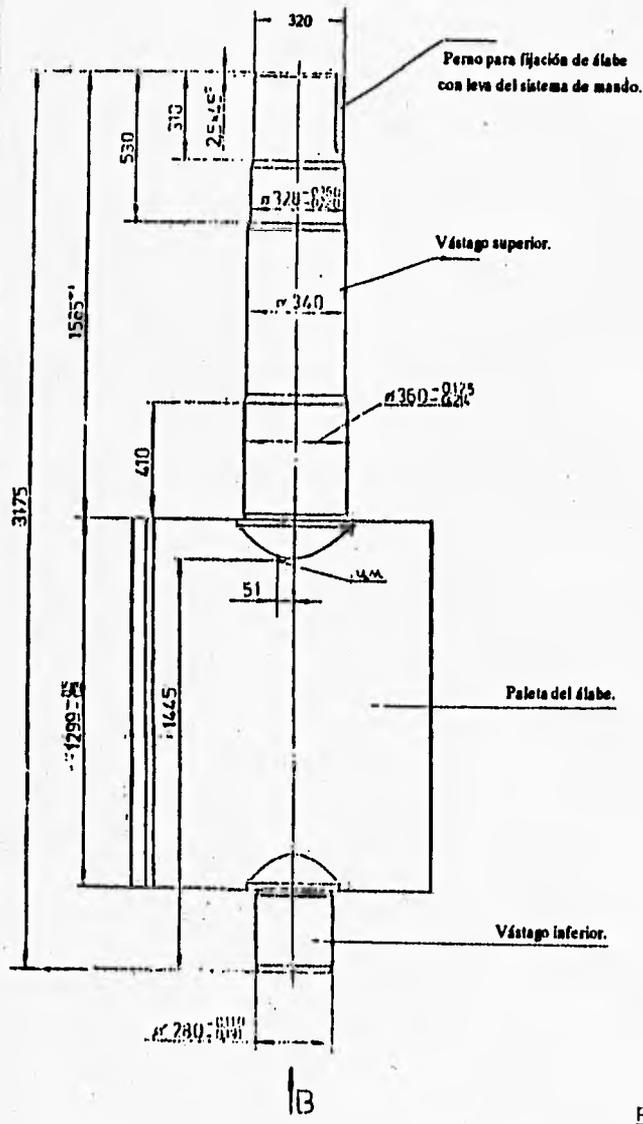
En la fig. II.15 se presenta un corte del escudo superior. La diferencia estructural que existe con el escudo inferior radica en las funciones adicionales que tiene la tapa de turbina:

- Es el apoyo del sistema de la chumacera de carga del generador, y por tanto transmite hacia el antedistribuidor éste peso además de un porcentaje del peso del rotor.
- El escudo dispone de una pista sobre la que se apoya y gira el anillo de mando del sistema de regulación de la turbina.
- Sobre el se apoya el sistema de la chumacera guía de turbina.
- Se apoya también el sistema del sello de la flecha.
- Recibe un empuje hidráulico vertical hacia arriba consecuencia del flujo en la zona del rodete, ya que cumple la función de evitar el paso del agua hacia la zona del generador.

Está fabricado en dos secciones y en tres niveles de superficies planas horizontales acopladas entre sí a través de 12 placas de refuerzo que rigidizan el conjunto. Estas placas tienen unas perforaciones en su parte central por las que pasan y se distribuyen algunas tuberías dentro del foso. La superficie intermedia del escudo se empata con la superficie de entrada del antedistribuidor y se sujeta con el mismo en su brida superior a través de arandelas.

En la pista inferior del anillo, se coloca un recubrimiento de acero inoxidable que se sujeta a aquél, con arandelas y que es removible, ya que también se desgasta como consecuencia del giro de la cara superior de la paleta del álabe.

Sobre la cara interior del escudo, se acopla su anillo de desgaste superior, con características similares al de desgaste inferior, ya que ésta es también una zona de fricción con el anillo de desgaste superior del rodete. Estos dos anillos se desgastan también como consecuencia del giro del rodete, teniendo que ser sustituidos con el tiempo.



Vista B

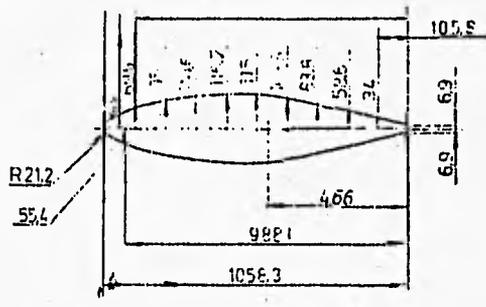
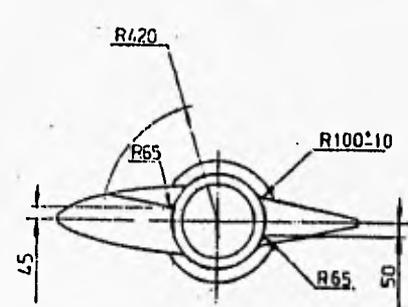


FIG. II.14 ALABES MÓVILES DEL DISTRIBUIDOR.



Para garantizar la hermeticidad del foso hacia la zona del generador, la tapa está provista de un sello elástico que se aprieta contra la brida superior del antedistribuidor.

*d) Sistema de mando.*

Es el sistema de la turbina que se encarga directamente del movimiento de apertura y cierre de los álabes directrices del distribuidor. Esta formado por:

1. Servomotores.
2. Anillo de mando.
3. Bielas y levas.

A una señal del regulador de velocidad de la turbina, los vástagos de los dos servomotores se retraen ó extienden respectivamente, provocando un giro del anillo de mando sobre su propio eje. Este movimiento se transmite a las veinte bielas, que en uno de sus extremos se conectan con el anillo, y en el otro se sujetan a la palanca de las levas, formando una articulación que transmite a los álabes directrices el par torsor para el cierre ó apertura del distribuidor.

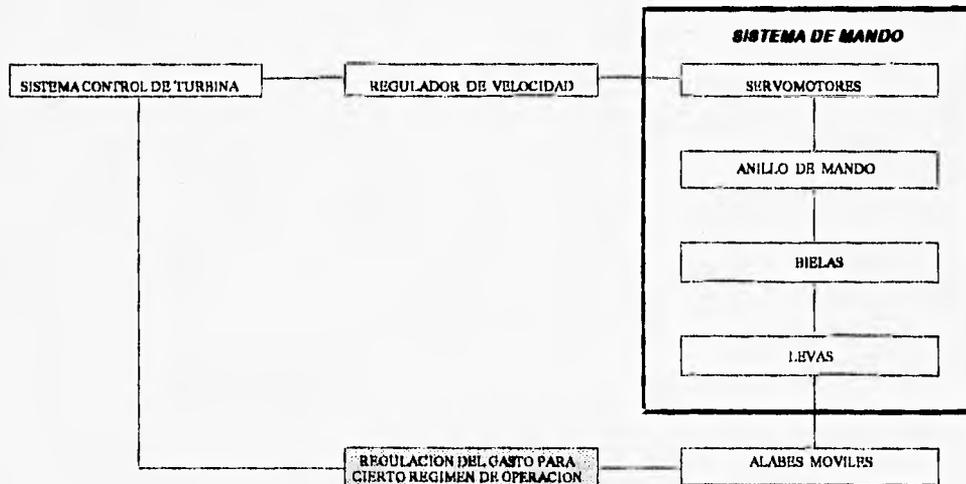


FIG. II.16 DIAGRAMA DE FLUJO DE OPERACION DEL SISTEMA DE MANDO.

El anillo está formado por dos bridas inferior y superior. La primera está provista de 20 pasadores cilíndricos donde se acoplan las bielas (el otro extremo de las bielas se acopla con la palanca de levas). Sobre la base del anillo se encuentran unas muescas maquinadas para el acoplamiento con las pistas de giro del escudo superior. En su brida superior el anillo dispone de dos orejas diametralmente opuestas, en donde a través de un pasador (cilindro de acero), se acopla éste con cada uno de los vástagos de los servomotores. En la fig. II.16 se presenta el esquema del funcionamiento del sistema de mando y en la fig. II.17, se presentan las partes que lo componen.

Cada servomotor de la turbina trabaja con un pistón, que en conjunto con el otro provoca un par torsor que actúa sobre el anillo de mando. Estos pistones tienen una carrera dentro y fuera del cuerpo del servomotor que garantiza siempre el movimiento de apertura y cierre total de los álabes. Los pistones se desplazan con ayuda del sistema oleodinámico de inyección de aceite del regulador de velocidad, que suministra el fluido a una presión que varía entre los 60 y los 120 kg/cm<sup>2</sup>. Esta presión es función de la carga hidráulica que se debe vencer para cerrar los álabes. El peso de cada servomotor es de 11.5 ton.

### **3. Rodete.**

Está formado básicamente por tres piezas: corona banda y 13 álabes fijos, (fig. II.18), fabricados en acero inoxidable ASTM- A-743. La corona tiene dos bridas interior y exterior que cuentan con barrenos a través de los cuales se une el rodete con su cono de vórtice y con la flecha de la turbina respectivamente. El cono cumple con la función de ocupar el hueco ó espacio que generaría un vórtice formado por el flujo al entrar simultáneamente entre los álabes del rodete variando además su dirección 90° a una velocidad considerable. El cono evita así la formación de un vacío.

La corona también tiene en su parte superior una serie de barrenos que se utilizan para inyectar aire comprimido a la zona de los álabes cuando la turbina opera como condensador síncrono (motor). Estos mismos barrenos sirven durante la operación normal para aliviar la presión ó empuje del agua filtrada en la parte superior del rodete. Alrededor de la corona y de la banda se acoplan dos anillos de desgaste que son los que quedan de cara a los anillos fijos de desgaste inferior y superior de los escudos de la turbina.

Los álabes fijos del rodete están unidos a la corona y a la banda con soldadura, cada junta es trabajada individualmente en fábrica y perfilada según el diseño de la pieza.

### **4. Flecha.**

El eje de la turbina está fabricado en tres piezas (brida superior, cuerpo y brida inferior), en acero ASTM-A668 y unidas con soldadura de fábrica para su transporte a obra en una sola





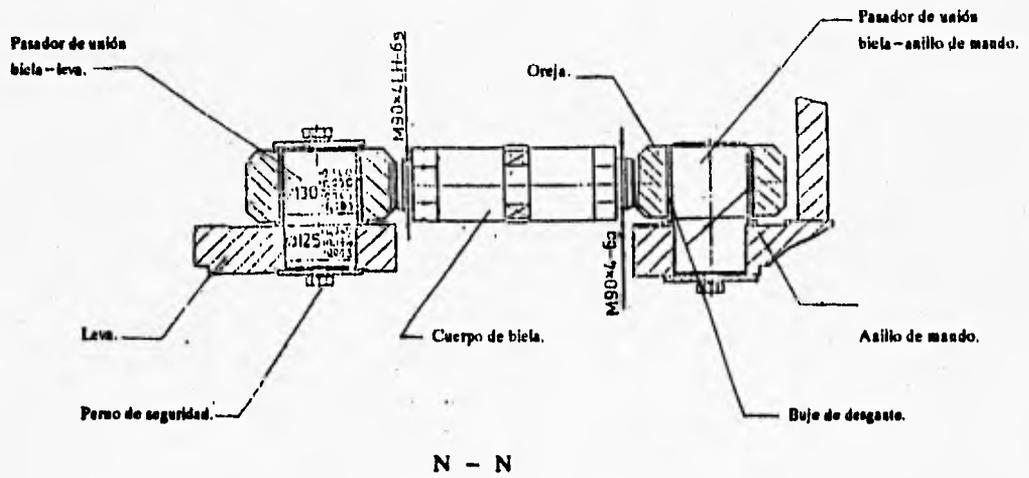
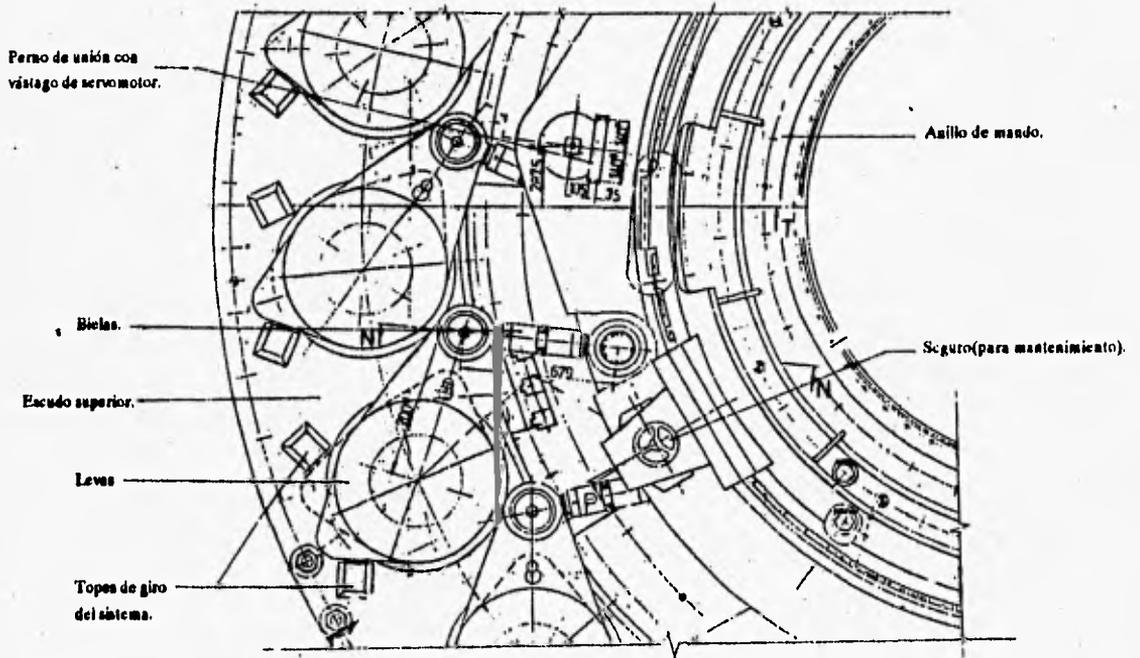


FIG. II.17C ANILLO DE MANDO, BIELAS Y LEVAS.

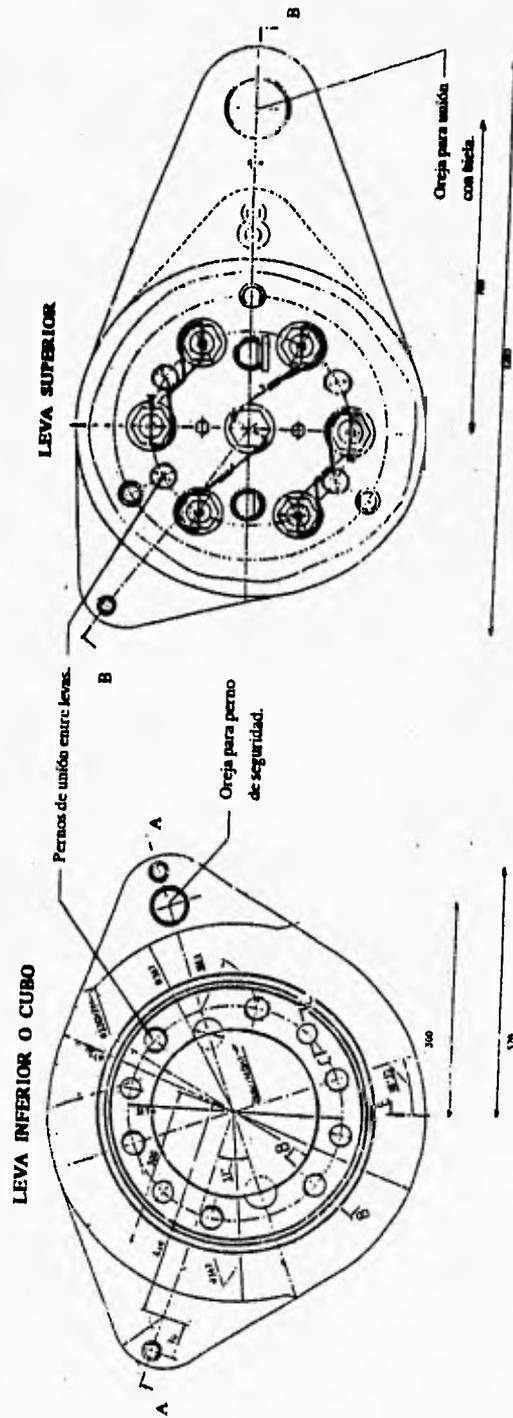
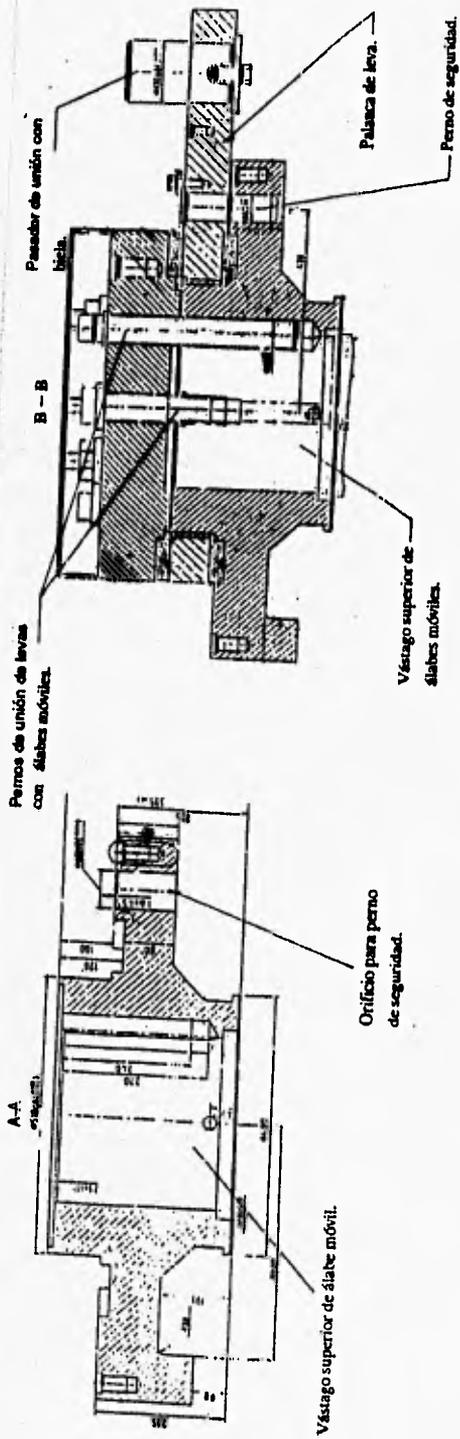


FIG. II.17D LEVAS.

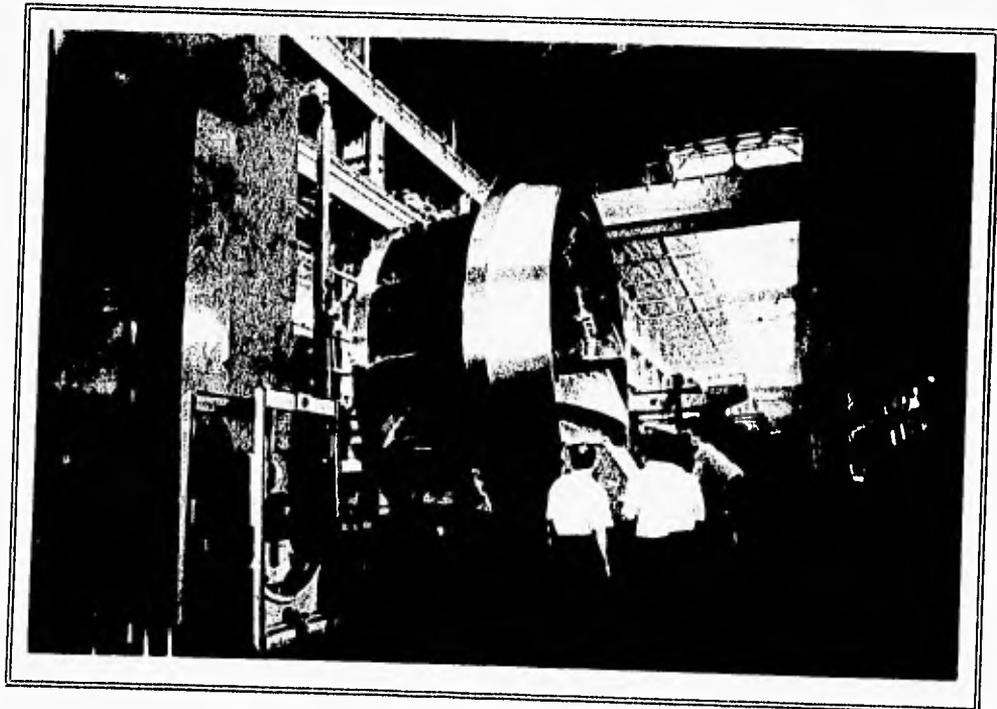
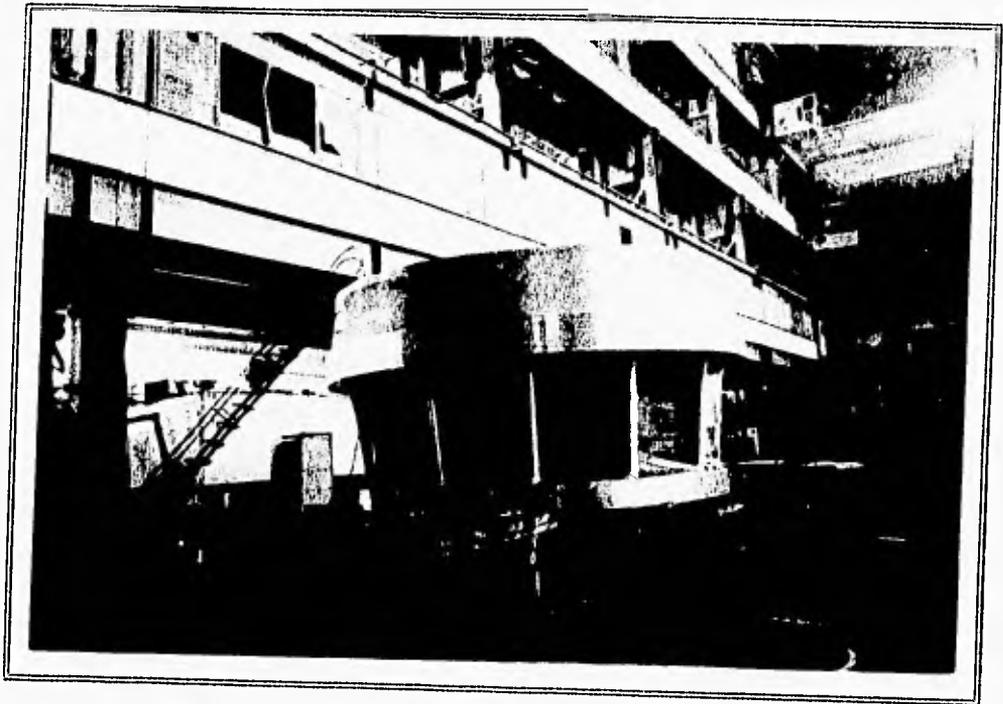


FIG. II. 13A RODETE EN PROCESO DE FABRICACION.



pieza. Es del tipo hueca, cilíndrica de 6.12 m de altura, diámetro exterior de 1.60 m e interior de 1.25 m, es decir, tiene un espesor de placa de 17.5 cm. En su parte inferior y superior dispone de dos bridas (fig. II.19) a través de las cuales se une por medio de pernos, con el rodete y con el rotor del generador respectivamente.

En la parte inferior, se observa que la flecha varía ligeramente de diámetro exterior, aumentando dos centímetros en la zona donde apoyan los segmentos de la chumacera guía. En ésta parte la flecha recibe un tratamiento de pulido adicional para obtener una superficie perfectamente lisa y con la curvatura exacta que permita adaptar en campo cada uno de los segmentos a su geometría. Para lograrlo, la flecha después de ser rolada y soldada longitudinalmente en fábrica, se tornea dando la geometría y los detalles que se anotan en la fig. II.19 Abajo de ésta superficie la flecha cuenta con una pequeña pestaña a donde se aloja el tanque de aceite de la chumacera guía.

### **5. Chumacera guía .**

Con la finalidad de evitar desplazamientos laterales de la flecha cuando ésta gira durante la operación de la turbina, se instalan dos chumaceras ó cojinetes en la parte inferior y superior del eje, que abrazan a éste restringiendo la vibración del conjunto. Por el lugar geométrico que ocupan en la flecha, la inferior se considera parte de la turbina y la superior como parte del generador.

La chumacera guía inferior consta principalmente de 12 segmentos (fig. II.20) que son los que se apoyan directamente sobre el cuerpo de la flecha, anillo de apoyo de los segmentos, sistema de lubricación de los segmentos (tanque de aceite, tuberías de admisión y salida de aceite, tuberías de evacuación de vapores de aceite, medidores, etc) y un anillo de apoyo de todo el conjunto que a su vez descansa sobre el escudo superior de la turbina. Como se ve en el corte A-A de la fig. II.20, la estructura de la chumacera trabaja prácticamente en cantiliever.

La superficie de cada uno de los segmentos de la chumacera que está en contacto con el cuerpo de la flecha, tiene un recubrimiento de metal babbit (aleación de acero y estaño) que procura una superficie suave que es tratada en campo para adaptar lo más perfectamente posible ambas superficies, de tal forma que el segmento se adapte a la curvatura del tronco de la flecha (rasqueteado de los segmentos). La chumacera, además trabaja ahogada en aceite permitiendo la lubricación necesaria entre metales.

### **6. Sello de la flecha.**

La fig. II.21 presenta una vista en planta y un corte de la estructura circular que forma el sistema de sellado de la flecha. En el detalle de la fig. II.21b se observa que una parte de la estructura está unida al escudo superior de la turbina y la otra está unida a la brida inferior de

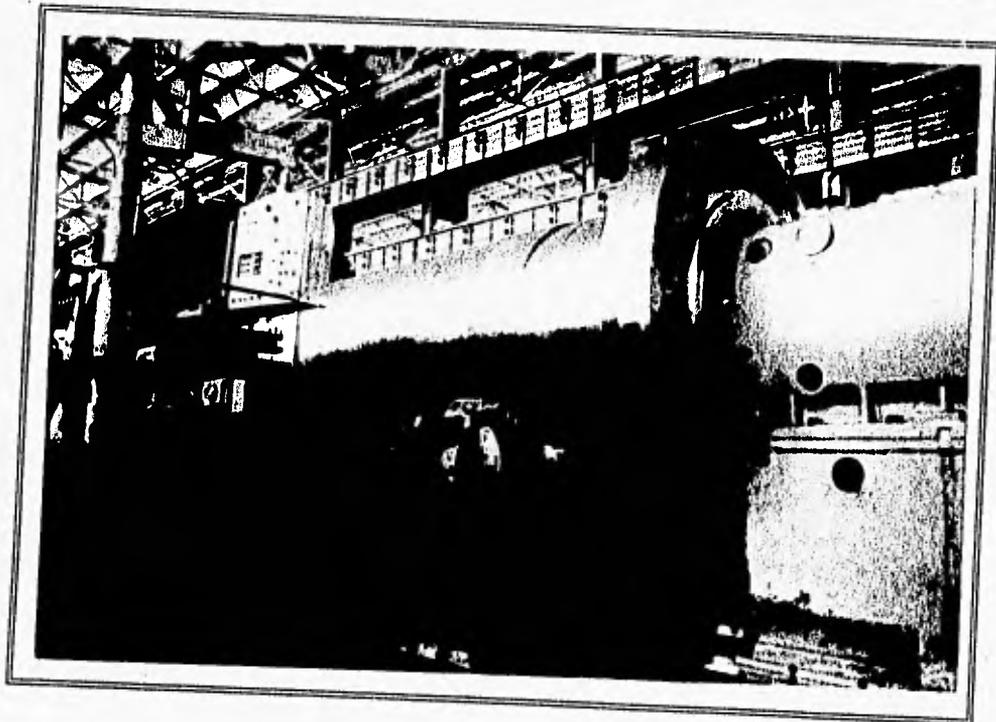
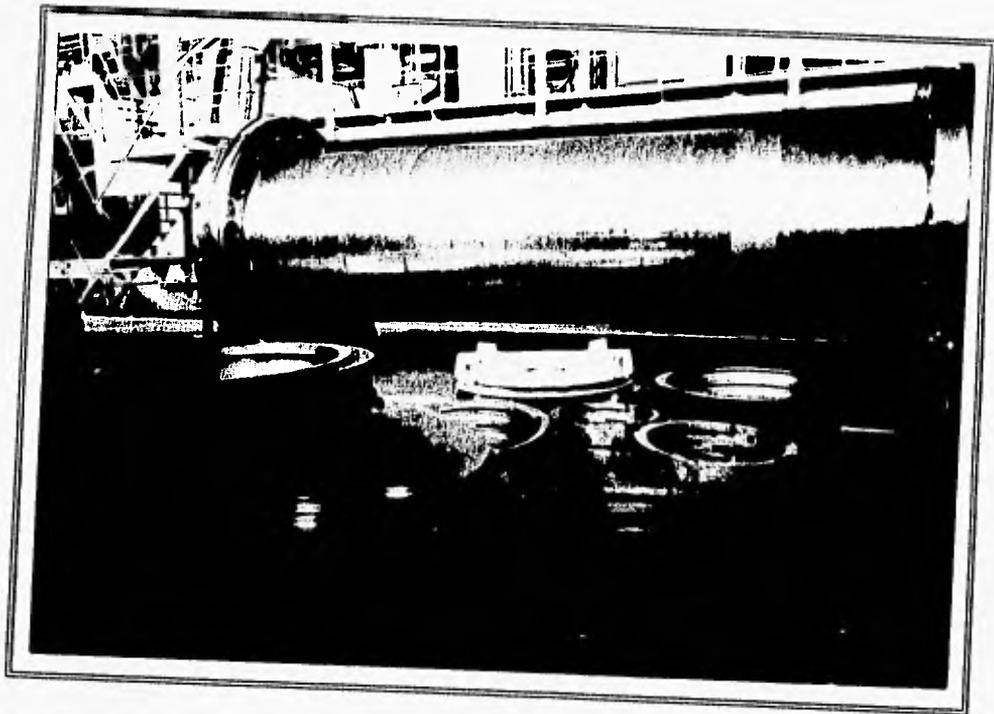
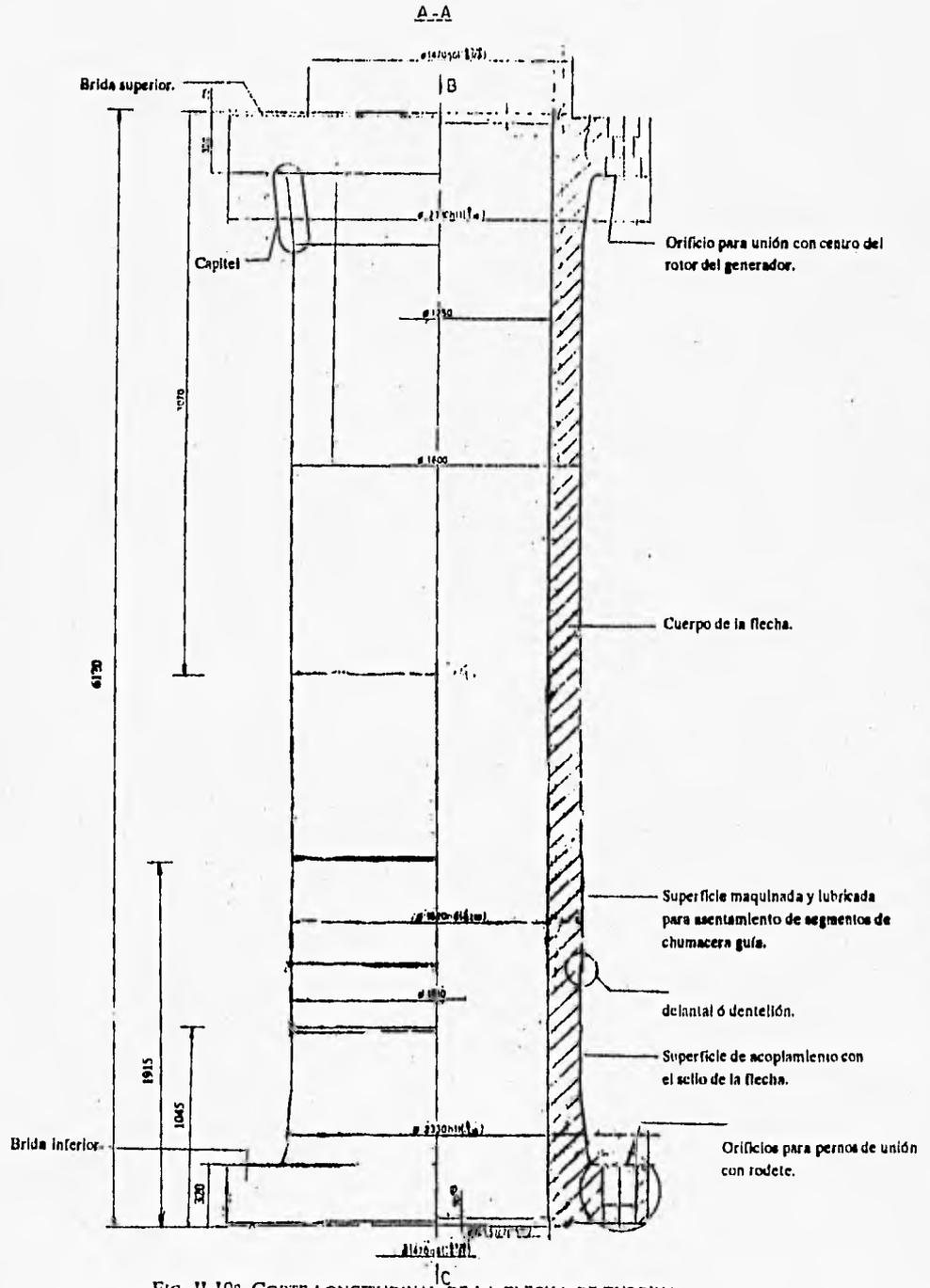


FIG. II.19A FLECHA EN PROCESO DE FABRICACION.



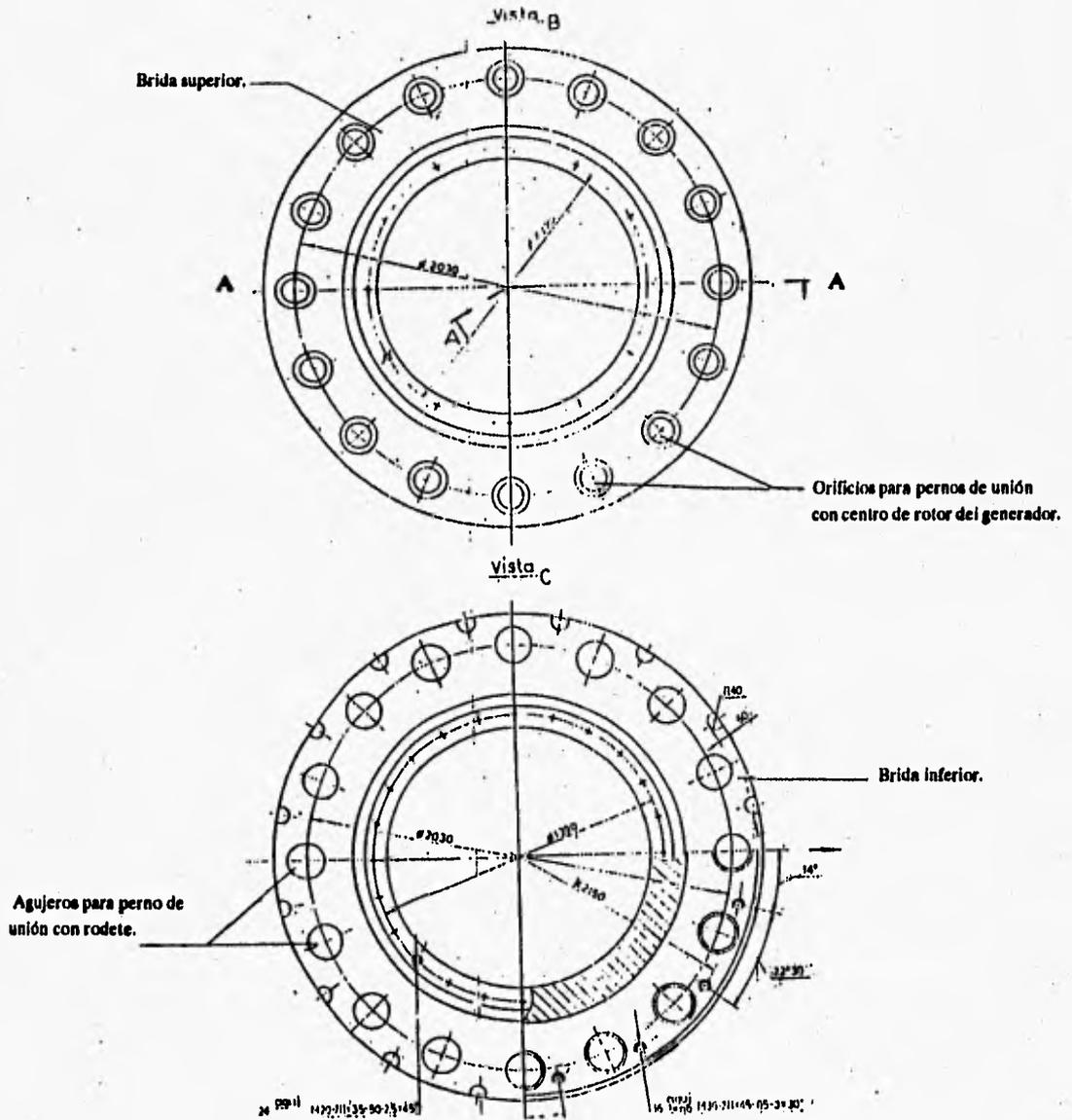


FIG. II.19c BRIDA SUPERIOR E INFERIOR DE LA FLECHA.

Esquema de ubicación de los segmentos.

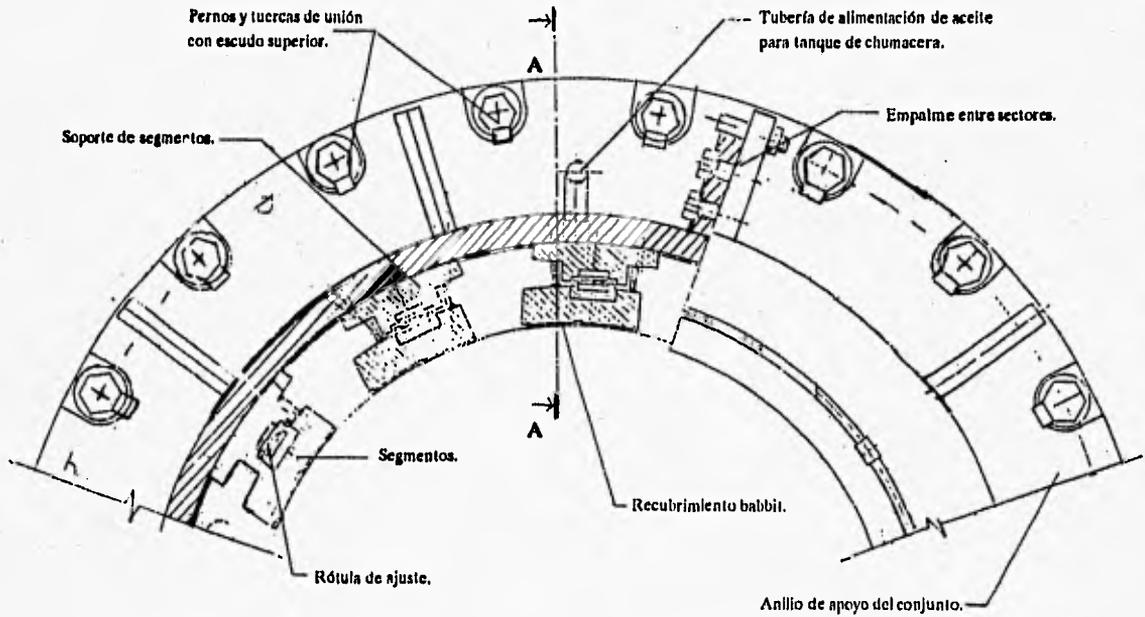
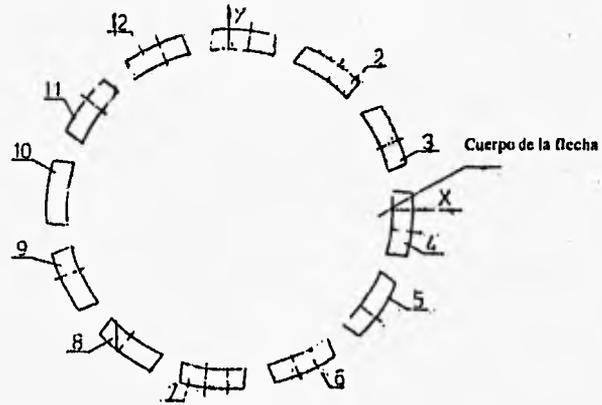
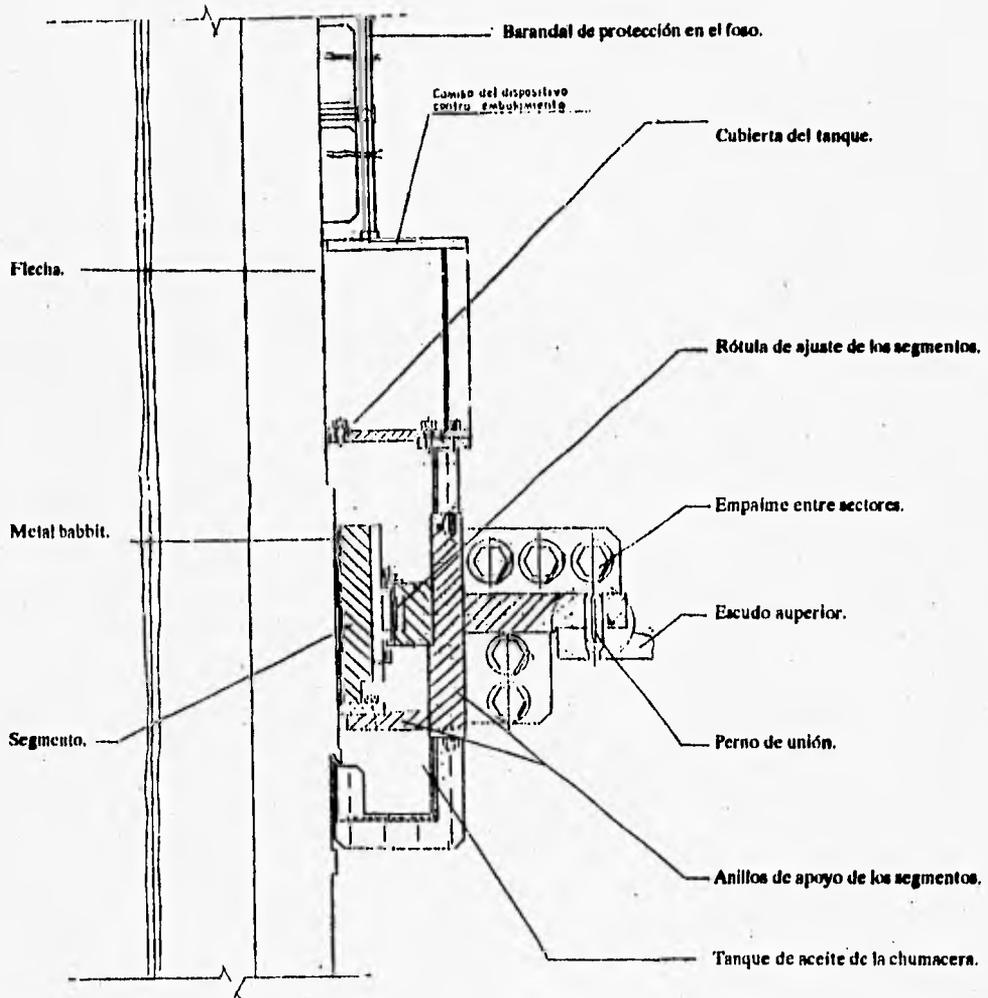


FIG. II.20A VISTA EN PLANTA DE LA CHUMACERA GUÍA.



A - A

FIG. II.20b CORTE TRANSVERSAL DE LA CHUMACERA GUÍA.

la flecha, por lo que el sello se compone de una parte fija y otra parte móvil que gira junto con el eje. El espacio ó hueco existente entre ambas partes (punto A) es de 1.5 mm, sin embargo por este espacio circula el agua que proviene de la parte superior del rodete hacia la parte superior del sistema de sello. Para disminuir el flujo en esta zona se utiliza un sistema de sello neumático: la tubería (1) inyecta aire a presión al émbolo elástico (2) provocándole un desplazamiento frontal hasta que topa con la placa en rotación del otro lado del hueco. Este sello no es totalmente hermético pero disminuye de manera notable el gasto que pasa hacia la parte superior de la estructura.

Este gasto es controlado en la zona de sellado definitivo (punto B) formada por dos anillos de grafito acoplados a la parte inferior y móvil de la estructura de sellado. Sobre los anillos descansa una placa fija prensa-sello que tiene la posibilidad de desplazarse verticalmente y ajustarse siempre al desgaste que sufre la superficie de grafito, pues esta zona es la frontera superior entre partes fijas y en rotación. Para lograr esto la parte fija dispone de un sistema a base de resortes que empujan permanentemente la placa prensa-sello contra los anillos de grafito. Cuando los anillos, como consecuencia del rozamiento con la placa presentan cierto grado de deterioro se pueden remplazar ajustándose nuevamente la altura de la placa prensa-sello. Adicionalmente en esta zona y en medio de los anillos se acopla una cuña flexible (3) que se aprieta contra estos cuando se inyecta aire a presión por la tubería (4).

Aún en el caso de que por alguna razón se fugase agua en esta zona hacia la parte superior del conjunto, existe todavía una unidad de recolección de fugas (5), que canaliza hacia el exterior el agua filtrada.

### **7. Regulador de velocidad.**

El regulador de velocidad ó gobernador hidráulico de la turbina es el sistema encargado de ordenar las rutinas y las acciones a realizar para establecer un cierto régimen de operación de la máquina. Durante la operación normal de ésta, el regulador vigila en todo momento la velocidad de rotación del turbogenerador y por medio de los álabes del distribuidor regula el gasto de entrada al rodete si hay variaciones de consumo de energía con la finalidad de mantener constante la velocidad nominal de rotación (150 rpm), garantizando siempre la misma frecuencia de generación (60 Hz).

Para cumplir con esta función y otras más, el regulador cuenta con un sistema automático de retroalimentación por medio del cual recibe información de los diferentes tableros y de la computadora central de la planta, la procesa, varía cierta condición de operación si es necesario, al hacerlo se registran éstos cambios en los tableros locales de donde posteriormente vuelve a adquirir información sobre el estado en que se encuentran los componentes de la turbina y las características de la generación y sus principales parámetros asociados.

Entre otras, sus funciones principales son:

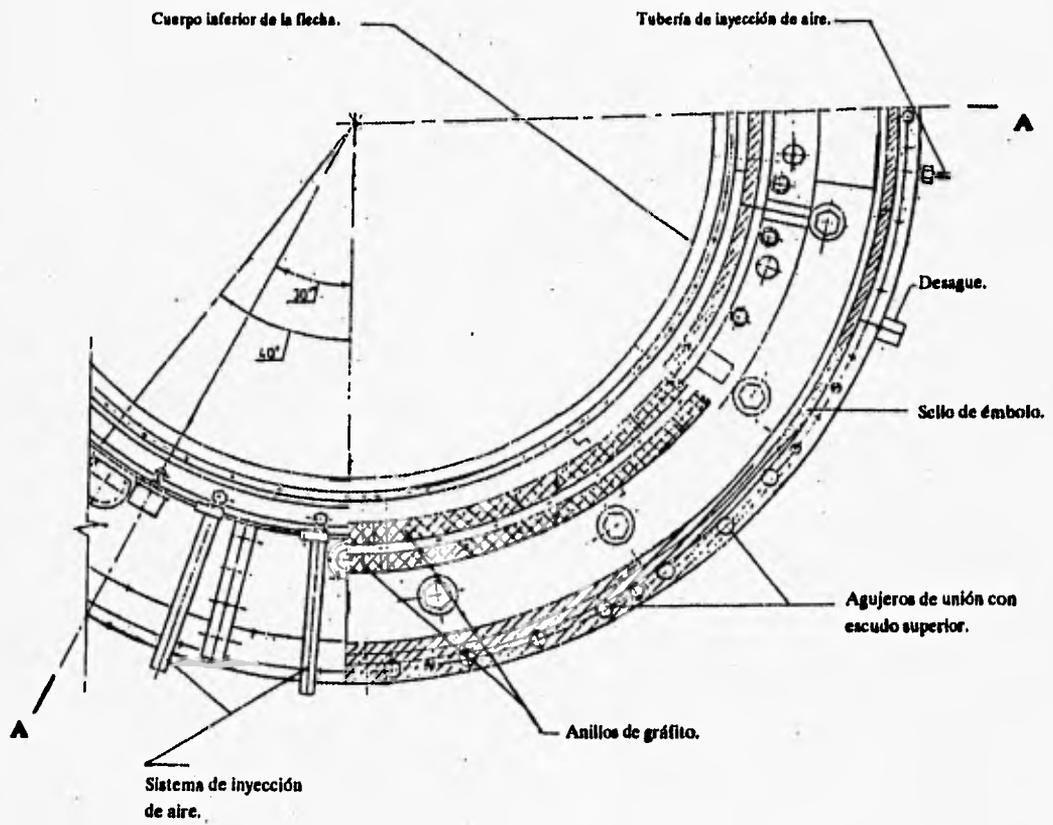


FIG. II.21A VISTA EN PLANTA DEL SELLO DE LA FLECHA.

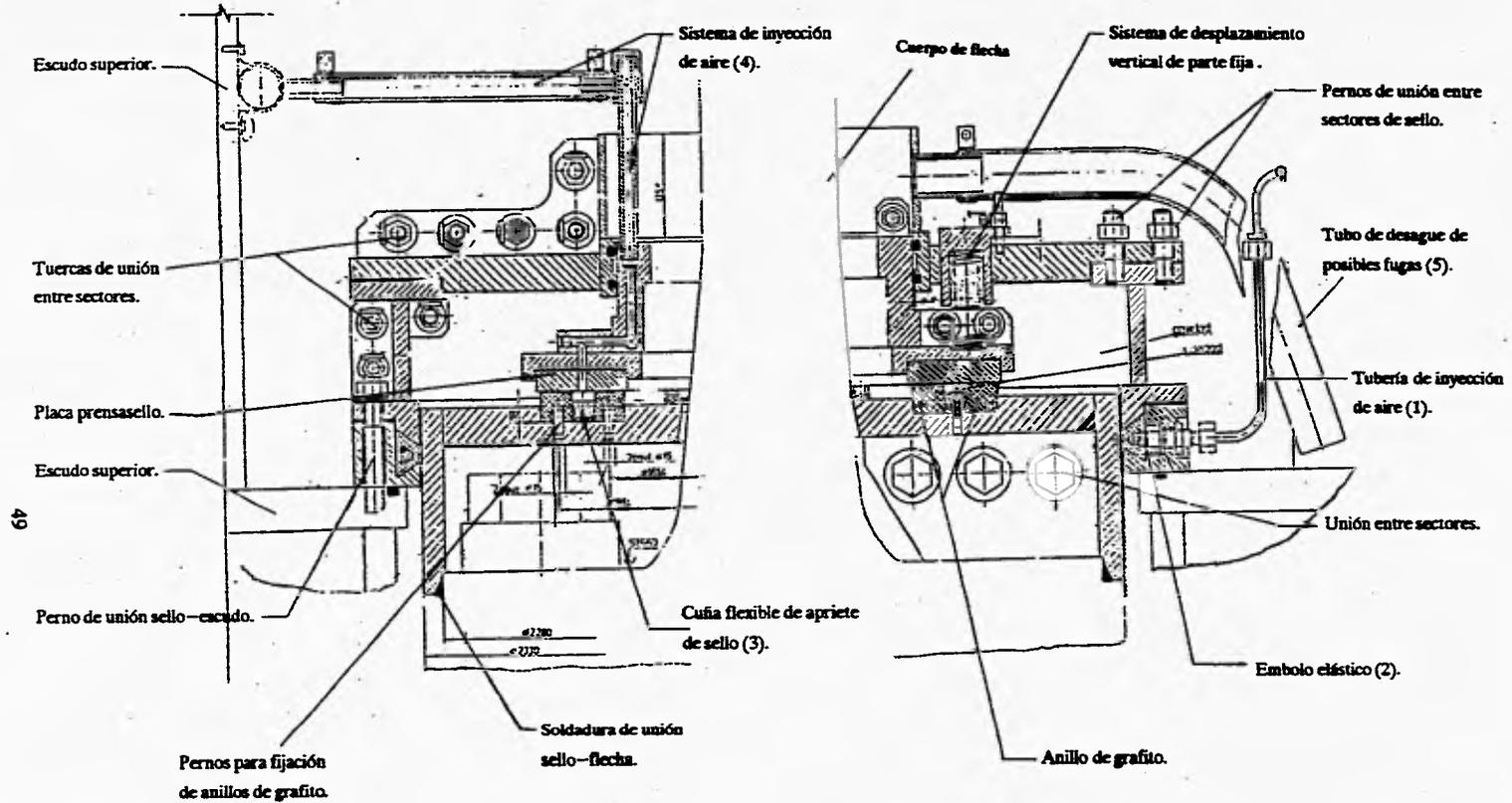


FIG. II.21B CORTE TRANSVERSAL DEL SISTEMA DE SELLO DE LA FLECHA.

- Arranque y paro de la turbina.
- Bombeo de aceite a presión a los servomotores para abrir y cerrar los álabes del distribuidor.
- Suministro del aire comprimido para el sistema de sellado de la flecha.
- Activa las válvulas de entrada de aire comprimido a la turbina correspondientes para la operación de la turbina como condensador síncrono y controla éste régimen de operación.
- Activa las válvulas de entrada de aire en la zona del rodete durante la operación normal para evitar la cavitación.
- Activa las válvulas para cierre de emergencia del distribuidor (ante un rechazo de carga).

Los componentes principales del regulador son:

**a. Sistema electrónico:**

- Sistema de control, (autómata).
- Tableros de instrumentación y de mando manual.

**b. Sistema mecánico:**

- Tanque colector de aire-aceite.
- Compresor de aire.
- Bombas de aceite.
- Sistema de enfriamiento de aceite.
- Tuberías y válvulas de distribución de fluidos.

Características principales de operación:

- Presión de aceite de operación máxima: 60 bar.
- Caudal de bomba de aceite: 613 lt/min.
- Volumen de aceite disponible: 1,408 lts.
- Tiempos de mando:
  - Cierre de paletas directrices: 11 seg.
  - Apertura de paletas directrices: 13 seg.

**8. Sistemas auxiliares.**

Son los sistemas que trabajan conjuntamente con el turbogenerador apoyando a cada uno de los componentes para su correcto funcionamiento. Entre todos ellos los principales son:

- Sistemas de drenaje de agua.
- Sistema de agua de enfriamiento.
- Sistema de agua de servicio.
- Sistema de suministro de aceite.



**FIG. II.22 REGULADOR DE VELOCIDAD EN EL PISO DE TURBINAS DE CASA DE MAQUINAS.**

- Sistema de inyección de aire.
- Sistema de ventilación.
- Sistema de alumbrado.

**Todos ellos estan formados por un conjunto de tuberfas, válvulas, filtros, bombas, etc. que se controlan desde los tableros locales.**



### **III. PRUEBAS DE ACEPTACION EN MODELO.**

#### **III.1 Objetivo de las pruebas.**

La entidad Científica Industrial "TURBOATOM" diseña y fabrica las turbinas hidráulicas tipo Francis para el proyecto hidroeléctrico Aguamilpa. Para verificar los valores de potencia, eficiencia, coeficientes críticos de cavitación, velocidad de desboque, etc. garantizados por el proveedor, en el contrato celebrado con la Comisión Federal de Electricidad se previó la ejecución de pruebas en modelo. Estas pruebas se llevaron a cabo en la Cd. de Jarkov, Ucrania en los laboratorios de pruebas hidráulicas del fabricante. En este capítulo se excluyen otro tipo de pruebas e investigaciones que se realizaron en el modelo, tales como pulsaciones de presión, variaciones en el torque de la flecha, momentos de torsión en los álabes directrices, empuje axial del rodete, etc., por quedar fuera del alcance de los objetivos del trabajo.

En apego a las Normas Internacionales, el modelo de la turbina hidráulica fué ensayado conforme a las especificaciones de la sección No. 7 del Código Internacional de Pruebas en Modelo de Turbinas Hidráulicas y para llevar a cabo las mismas se realizaron las siguientes actividades:

1. Análisis de la metodología de las pruebas.
2. Construcción del modelo, control y verificación de la geometría de los conductos hidráulicos.

3. Inspección del banco de pruebas en donde se montó el modelo.
4. Verificación y calibración de los dispositivos de medición.
5. Pruebas energéticas, cavitación, desboque, etc.
6. Elaboración e interpretación de resultados.

### III.2 Modelo hidráulico de la turbina.

Tomando como base el dimensionamiento de diseño del rodete del prototipo, la escala del modelo de ensayo de la turbina fué elegida en base a la similitud geométrica del rodete del prototipo con el del modelo. Con  $D_m = 460$  mm los componentes restantes del modelo fueron fabricados como los homólogos del prototipo en la escala:

$$\delta = \frac{D_m}{D_p} = \frac{460}{5200} = \frac{1}{11300} \quad (3.1)$$

El diámetro elegido para el rodete aseguró la posibilidad de fabricar los conductos hidráulicos como cámara espiral y tubo de aspiración del modelo con la exactitud requerida (fig. III.1), permitiendo obtener los números de Reynolds recomendados en el Código IEC a caída de pruebas de turbinas de más de 1.6 m.

$$Re \geq D_s \sqrt{(2gHn)} \frac{1}{\nu} \geq 0.451 \sqrt{(2 \times 9.81 \times 1.6)} (1.006 \times 10^{-6})^{-1} \geq 2.5 \times 10^6 \quad (3.2)$$

#### Características del modelo.

El modelo consta de cámara espiral, antedistribuidor, distribuidor, rodete, tubo de aspiración, flecha y un sistema de rotación que hace las veces de los mecanismos del turbo-generator del prototipo.

La cámara espiral, que sirve además como un elemento soporte para los otros componentes del modelo, es una estructura de metal soldada y provista de bridas superior e inferior y nervios de refuerzo. Mediante la brida superior la carcasa se sujeta con el armazón del banco de pruebas. La sección de entrada de la carcasa espiral se une con la tubería de presión del banco mediante un tubo de acrílico del mismo diámetro. Dentro del caracol se encuentra el antedistribuidor soldado, compuesto por sus anillos superior e inferior y sus álabes fijos.

Como en el prototipo, el distribuidor del modelo comprende 20 álabes móviles, pero su accionamiento es manual. La escala de apertura del distribuidor está graduada en 2.5 mm, en un rango que va de 0 a 55 mm. Para medir el momento de torsión se colocaron tensosensores en doce de las paletas directrices.

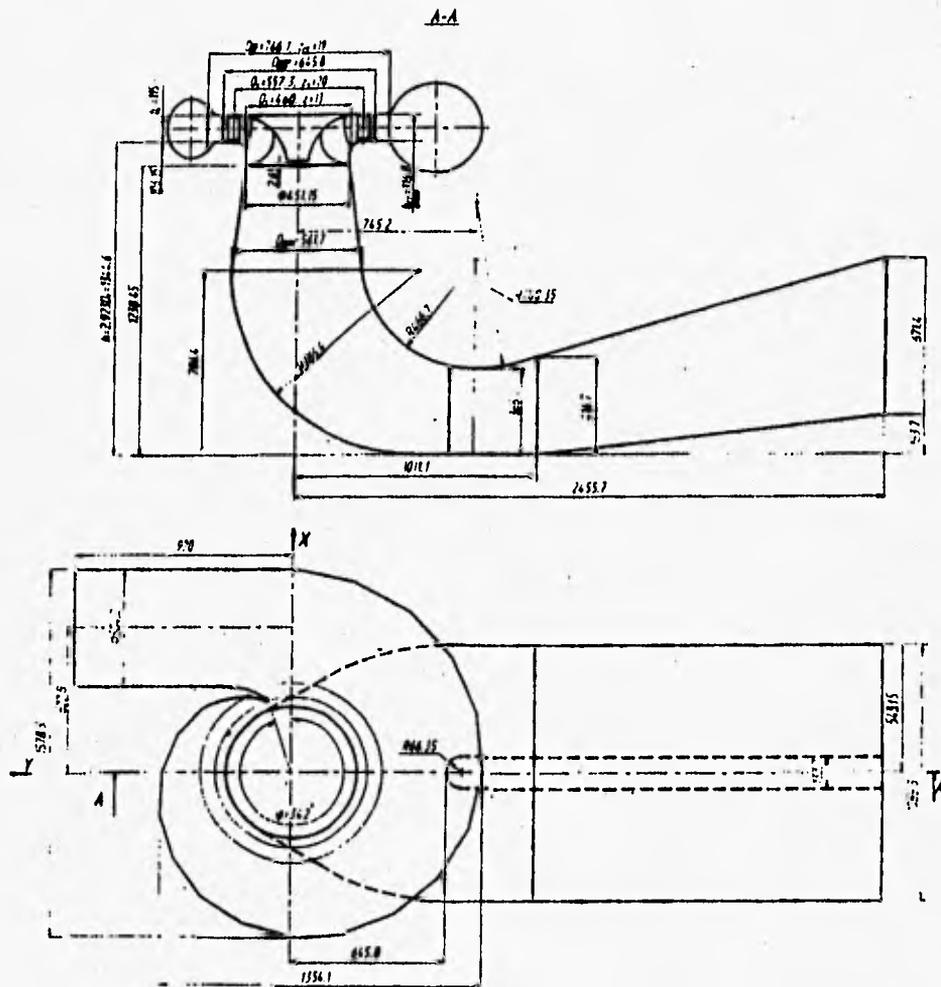


FIG. III.1 DIMENSIONES DEL PASAJE HIDRÁULICO DEL MODELO.

El rodete tiene 13 álabes perfilados de igual forma que el prototipo y que se sujetan a la corona y la banda por medio de tornillos y soldadura.

El tubo de aspiración consta de un cono de acrílico y un codo cuya sección varía homológicamente a la del prototipo (de redonda a rectangular con pila intermedia ó nariz en la zona horizontal). La conexión transparente de la tubería de presión a la cámara espiral, el cono transparente del tubo de aspiración y las ventanas en la tapa superior de la turbina y en el codo del tubo de aspiración permiten examinar el flujo de agua tanto en la entrada de los componentes de la turbina, como en su salida observando además los problemas de cavitación en el rodete.

La flecha se ubica dentro de un cuerpo que se apoya en la brida del caracol. Su soporte superior consta de dos cojinetes de bola: uno radial esférico y el otro de empuje. El dispositivo para medir el empuje axial que actúa sobre el rodete se ubica en el mismo soporte. La chumacera guía sirve de soporte inferior, hecha en forma de buje, de teflón y metal funciona simultáneamente como sello hidráulico. Mediante una junta elástica la flecha se une con la flecha del motor generador.

Con la finalidad de reducir la carga sobre los componentes del modelo, la tubería de presión y el tubo de aspiración se unen con los tanques del banco de pruebas por medio de bujes compensadores elásticos. La influencia de las pérdidas de frotamiento en los discos del sistema de rotación del modelo y las fugas a través del sello de la flecha y la banda del rodete en la eficiencia del modelo no se consideraron. Más adelante se trata sobre la consideración de las pérdidas mecánicas en los soportes de la flecha del modelo.

La turbina hidráulica en modelo tiene la resistencia y rigidez necesarias para que pueda ser ensayada a una caída de más de 16 m., es segura en su funcionamiento y se pueden realizar pruebas de todo tipo. La vista general del modelo y su instalación en el banco de pruebas se muestran en las figuras III.2 y III.3.

### III.3 Banco de pruebas.

El banco de pruebas es un dispositivo hidro-mecánico utilizado para realizar pruebas energéticas, de cavitación y de otros tipos sobre modelos de bombas y turbinas hidráulicas que tienen rodetes hasta de  $D_m = 600$  mm. La capacidad operacional del banco, la posibilidad de mantener largo tiempo regímenes estables, así como su sistema de instrumentación y calibración de equipo permiten obtener características precisas de los modelos de máquinas hidráulicas. Cuenta además con un sistema automático de mediciones y procesamiento de datos para la elaboración de resultados.

Los parámetros principales de operación del banco son los siguientes:

- |  |  |
|--|--|
| - caída máxima.                                | $H_{m\acute{a}x} = 100$ m.                 |
| - gasto, correspondiente a $H_{m\acute{a}x}$ . | $Q = 1.4$ m <sup>3</sup> /s.               |
| - gasto máximo.                                | $Q_{m\acute{a}x} = 2.8$ m <sup>3</sup> /s. |

57

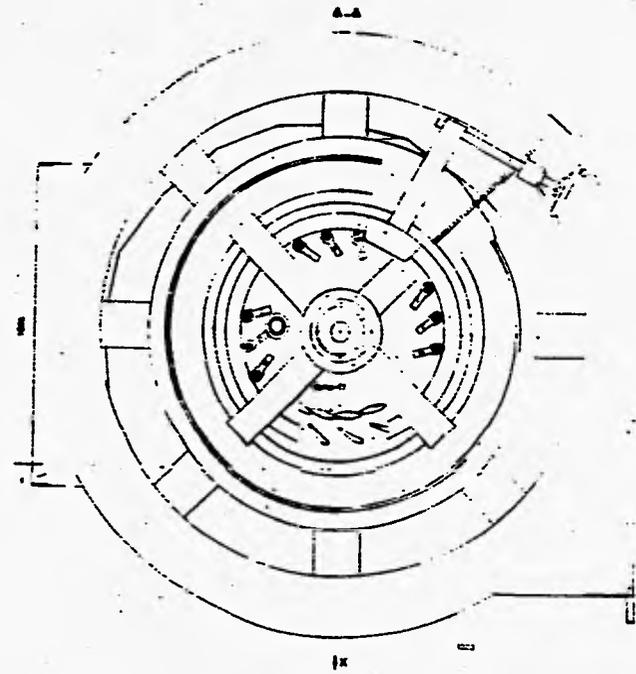
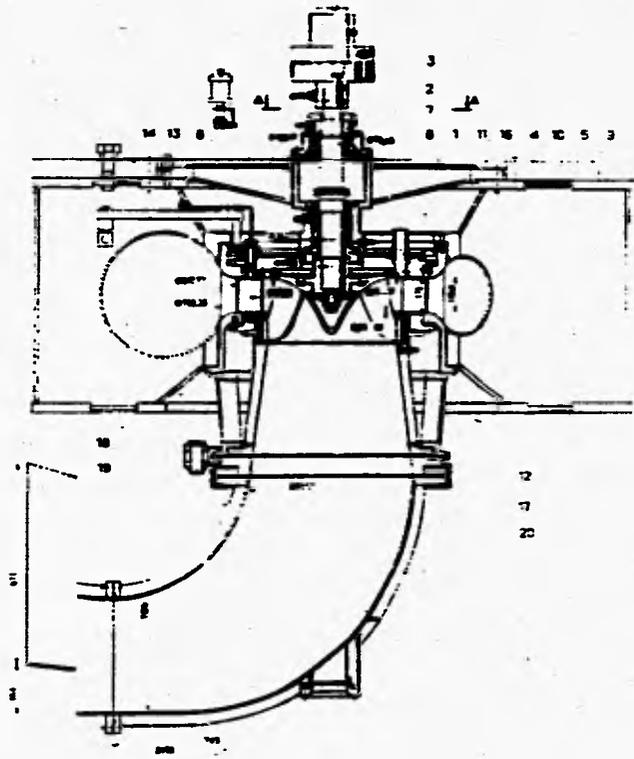
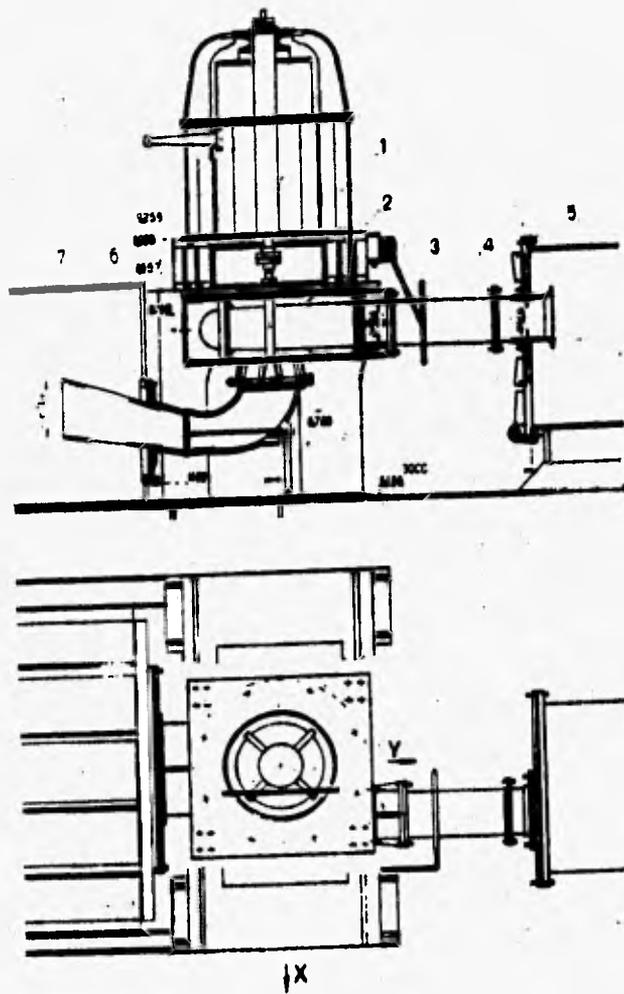


FIG. III.2 MECANISMOS DE LA TURBINA EN MODELO.



- |                          |                            |
|--------------------------|----------------------------|
| 1. Generador de frenado. | 4. Tubería de presión.     |
| 2. Bastidor.             | 5. Tanque de aguas arriba. |
| 3. Apoyo.                | 6. Tanque de aguas abajo.  |

FIG. III.3 INSTALACIÓN DEL MODELO DE TURBINA EN EL BANCO DE PRUEBAS.

- caída, correspondiente a  $Q_{\text{máx}}$ .  $H = 50 \text{ m.}$
- potencia de frenado.  $P = 500 \text{ kw.}$
- volumen de agua dentro del banco  $V = 350 \text{ m}^3.$

La circulación del agua se realiza con ayuda de dos bombas centrífugas que suministran el agua hacia el modelo a través de un tanque reabsorbedor, una tubería de presión y un medidor de gasto. Después de pasar por el modelo el agua va al tanque de aguas abajo y a través de la tubería de descarga regresa a la zona de bombeo. (Fig. III.4).

Los equipos básicos del banco de pruebas están situados en dos niveles de piso y aislados del edificio del laboratorio de pruebas para evitar la transmisión de vibraciones. En el nivel inferior están ubicadas las bombas, compuertas, tanque de reabsorción de aire y regulador de presión. En el nivel superior se encuentran los medidores de flujo, la tubería de presión y la instalación del modelo.

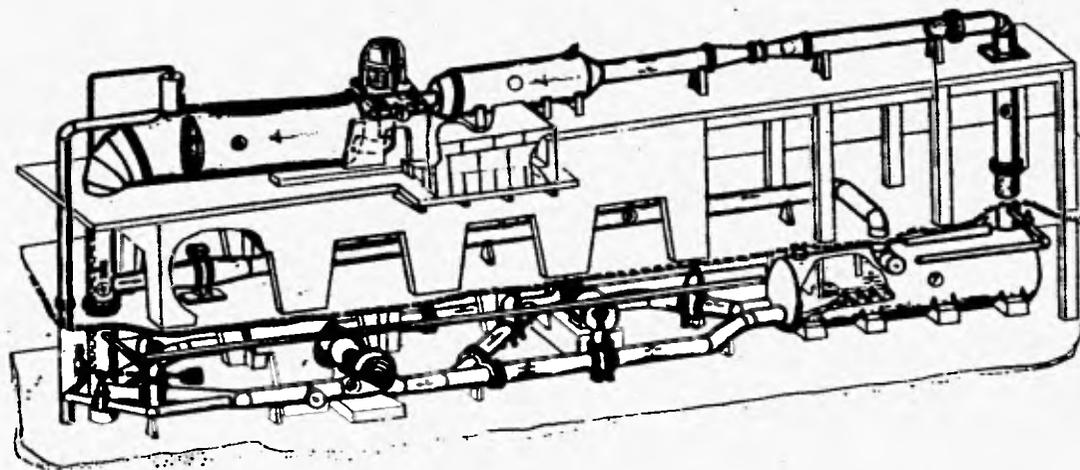
Con el propósito de crear condiciones de estabilidad para la medición de procesos de cavitación está instalado un tanque para disolución de aire. Con él se asegura la disolución del aire desprendido durante las pruebas de cavitación. Las condiciones de pruebas correspondientes al valor prefijado del factor de cavitación se crean mediante evacuación ó inyección de aire al espacio sobre el nivel del agua dentro del tanque de restitución.

Para la medición del gasto, el banco está equipado con tubos Venturi de distintos calibres que se montan en función del tipo y dimensión del modelo. En la parte central del tubo está montado un medidor de gasto electromagnético cuyas lecturas se comparan periódicamente para disminuir los errores en las mediciones.

El banco está equipado con dos bombas centrífugas de 700kw cada una y un motor-generador de corriente continua de 500 kw que funciona como freno en ensayos de modelos de turbinas hidráulicas, y como motor en ensayos de bombas. El sistema de válvulas y tuberías permite conectar las bombas por separado, en serie y en paralelo.

El modelo a probar se ubica en una plataforma especial entre el tanque de aguas arriba y el de restitución y puede desplazarse longitudinal y transversalmente para garantizar un posicionamiento adecuado.

Junto al banco, se encuentra una cabina de control donde están reunidos todos los dispositivos e instrumentos para el control del proceso de pruebas, visualización y registro de parámetros. Se trata de un complejo de medición y cómputo que permite poner el modelo en el régimen de ensayo y según la orden, realizar automáticamente las mediciones de todos los parámetros de ese régimen de prueba. Además se calculan los resultados de las mediciones según las ecuaciones prefijadas y se entregan los resultados en pantalla y en impresora. Este sistema funciona a través de transductores de frecuencias conectados en distintos puntos del modelo. En la cabina también se encuentran todos los controles para arrancar y detener las bombas, motor-generador, bombas de vacío, compuertas y válvulas.



- |                                     |                        |
|-------------------------------------|------------------------|
| 1. Bloque del modelo.               | 6. Bomba centrífuga.   |
| 2. Generador de frenado.            | 7. Reabsorbedor.       |
| 3. Tanque de aguas abajo.           | 8. Tubería de presión. |
| 4. Tubería de vaciado.              | 9. Caudalímetro.       |
| 5. Tubería auxiliar de calibración. | 10. Tanque expansor.   |

FIG. III.4 ESQUEMA DEL BANCO DE PRUEBAS Y UBICACIÓN DEL MODELO.

### III.4 Medición de los parámetros principales para realizar las pruebas.

Al realizar las pruebas energéticas, de cavitación y de desboque sobre modelos de máquinas hidráulicas se deben medir los siguientes parámetros:

- gasto de agua a través del modelo.	$Q_v$ , m <sup>3</sup> /s
- caída disponible.	$H_n$ , m
- par torsor sobre eje del modelo.	$T$ , kgf.m
- velocidad de rotación.	$n$ , min <sup>-1</sup>
- presión absoluta en tanque de restitución	$P_a$ , m.c.a.
- temperatura del agua.	$t$ , °C
- contenido total de aire en el agua.	$\alpha$ , %

#### a) Medición del gasto.

El caudal de agua que pasa a través del modelo es medido con un tubo Venturi y un medidor de gasto electromagnético montado en la parte central de dicho tubo. La presión diferencial en la zona del estrangulamiento, necesaria para conocer el gasto, se mide por medio de un transductor y un manómetro de mercurio en donde se lee la deflexión  $\Delta h$  (caída de presión) provocada por la variación en la presión de una sección a otra. El gasto que pasa por el Venturímetro se calcula con la expresión:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{(2g\Delta h) \left( \frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)} \quad (3.3)$$

donde:

- $C_d$  - Coeficiente que toma en cuenta la pérdida de energía entre las secciones de medición y depende de la relación de áreas de las secciones y hasta cierto límite del número de Reynolds.
- $A_2$  - Área de la sección del estrangulamiento del tubo.
- $\Delta h$  - Diferencia de niveles en el manómetro de mercurio.
- $\gamma_m$  - Peso específico del mercurio.
- $\gamma$  - Peso específico del agua.

El número de Reynolds se calcula automáticamente con el valor de la temperatura y la viscosidad cinemática del agua correspondiente y el diámetro del tubo en la sección 2 de estrangulamiento.

Para calibrar los dispositivos de medición, el agua después de pasar por el tubo Venturi, pasa a un tanque medidor. Durante todo el tiempo de llenado del tanque se efectúa la comprobación

constante de las lecturas en el tubo y del medidor electromagnético. Conociendo el tiempo de llenado del tanque hasta cierto nivel predeterminado y calculando el volumen de agua correspondiente a ese nivel, y con el peso específico a la temperatura de prueba, se calcula el peso del agua vertida (G).

Entonces los caudales ponderado y volumétrico se determinan respectivamente como:

$$Q_g = G/T \text{ y } Q_v = V/T \quad (3.4),(3.5)$$

Según los resultados de la calibración para el tubo Venturi se calcula el coeficiente de caudal ( $\alpha$ ), partiendo de la relación:

$$\alpha = Q_g/P_q \quad (3.6)$$

donde:

$P_q$  - Presión diferencial medida en las secciones del tubo.

Para el medidor de gasto electromagnético el coeficiente de proporcionalidad (K) se calcula según:

$$K = Q_v/F \quad (3.7)$$

donde:

F - Señal de salida en Hertz.

El error de calibración del Venturímetro lo constituyen el error de calibración del tanque medidor y el error en la determinación de la función  $Q_g = \alpha\sqrt{P_q}$ . El error se calcula según la fórmula:

$$f_q = \pm\sqrt{(f_g^2 + f_\alpha^2)} \quad (3.8)$$

El cálculo del error límite relativo de la función  $Q_g = \alpha\sqrt{P_q}$ , realizado por el método de los mínimos cuadrados según las desviaciones de los valores de  $\alpha$ , mostró que el error mencionado no excede del +/- 0.28% con probabilidad del 95%. El error de calibración del tanque medidor está determinado igual a +/- 0.1%. Entonces el error límite medio de medición del gasto es igual a:

$$f_q = \pm\sqrt{(0.1^2 + 0.28^2)} = \pm 0.3\%$$

**b) Medición de la caída,  $H_n$ .**

La caída disponible se determina como la diferencia de la energía específica total del flujo a la entrada y a la salida de la turbina del modelo.

$$H_n = \left( \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right) \quad (3.9)$$

$$H_n = (P_1 - P_2) / \gamma + Z_1 - Z_2 + (V_1^2 - V_2^2) / 2g$$

sustituyendo las expresiones:

$$h_p = (P_1 - P_2) / \gamma + Z_1 - Z_2, \text{ y} \quad (3.10)$$

$$h_v = (V_1^2 - V_2^2) / 2g \quad (3.11)$$

La ecuación de la energía adquiere el siguiente aspecto:

$$H_n = h_p + h_v \quad (3.12)$$

donde:

$h_p$  - caída de potencial, m.

$h_v$  - caída de velocidad (cinética), m.

En el modelo, la presión diferencial ( $P_1 - P_2$ ), se determina mediante la medición directa con ayuda de un transductor diferencial de variación de presión. La caída cinética se calcula según las velocidades medias del flujo correspondiente al régimen en cuestión, en las secciones de entrada y salida según la ecuación:

$$h_v = (V_1^2 - V_2^2) / 2g = \frac{Q^2}{2g} \times \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) = K_v \cdot Q^2 \quad (3.13)$$

donde :

- $Q_v$  - Gasto volumétrico del modelo, m<sup>3</sup>/seg.  
 $A_1, A_2$  - Area de las secciones de entrada y salida del modelo, m<sup>2</sup>.  
 $K_v$  - Coeficiente de la velocidad de caída, s/m.

El error en la determinación de la caída disponible comprende los errores en la obtención de "hp" y "hv". El error en "hp" depende principalmente de la clase de transductor y se determina por medio de la cantidad necesaria de calibraciones para obtener un buen resultado medio estadístico. El tratamiento de los resultados de las calibraciones demostró que el error medio cuadrático de la medición de "hp" en el rango de variación de la caída disponible  $H_n = 16$  a 20 m, no es mayor de +/- 0.15 % del valor medido.

El error de determinación de "hv" depende del error en la determinación del gasto y de la medición de las áreas  $A_1$  y  $A_2$ . De acuerdo con el cálculo, su valor es significativamente menor que el error en la obtención de "hp", por lo que el error en la medición de la caída disponible "fh", se acepta igual a +/- 0.15 %.

*c) Medición de la velocidad de rotación.*

La velocidad de rotación de la turbina se mide con ayuda de un tacogenerador que tiene 120 pares de polos y la frecuencia de sus impulsos está relacionada con la velocidad de rotación de la flecha de turbina por la siguiente expresión:

$$F = \frac{nz}{60} = n \frac{120}{60} = 2n, [Hz]. \quad (3.14)$$

donde:

- $n$  - velocidad de rotación de la flecha.  
 $z$  - número de polos del tacogenerador.

El número de impulsos (N), generados por el tacogenerador durante el lapso de lectura ( $t=30$  seg.), es igual a:

$$N = t.F \quad (3.15)$$

entonces:

$$n = \frac{N \cdot 1}{2 \cdot t} = \frac{N}{60}, [\text{min}^{-1}] \quad (3.16)$$

El error total de medición de la velocidad de rotación se determina como:

$$f_n = \pm \left( \Delta t + \frac{1}{N} \right) \cdot 100\% \quad (3.17)$$

donde :

$\Delta t$  - error límite de la programación del tiempo, igual a  $\pm 1 \times 10^{-6}$  seg.

$1/N$  - error posible en la determinación de la cantidad de impulsos, causado por la discordancia entre el comienzo del impulso y el lapso de lectura.

El error máximo tendrá lugar a la velocidad de rotación mínima, que durante las pruebas tipo es de aproximadamente 500 r.p.m., es decir:

$$f_n = \pm \left( 1 \times 10^{-6} + \frac{1}{500} \times \frac{1}{60} \right) \cdot 100\% = \pm 0.003\%$$

d) *Medición de las magnitudes necesarias para determinar el coeficiente de cavitación.*

Como sabemos, el valor del coeficiente de cavitación se determina según la fórmula:

$$\sigma = (h_a - a - h_{va}) \cdot \frac{1}{h_n} \quad (3.18)$$

donde:

$h_a$ : caída equivalente a la presión absoluta en el plano de la sección de salida de la turbina en la elevación de la instalación del transductor. (Pa/g).

$a$ : diferencia entre las elevaciones de la sección de control aceptada del rodete y del detector de la presión absoluta.

$h_{va}$ : caída equivalente a la presión de vaporización a la temperatura real.

El esquema de ubicación del detector de presión absoluta y de la lectura del "hs" respecto al punto de control del rodete, se presenta en la fig. III.5.

La presión absoluta (Pa) se mide con ayuda de un transductor de frecuencias. La parte sensible del transductor la forman dos cápsulas, unidas entre sí con una cuerda vibrante. Una de las cápsulas se encuentra al alto vacío, mientras que la otra está unida a través de un vaso separador, con el tanque de restitución. La diferencia de presiones en las cápsulas determina el desplazamiento recíproco de las mismas y correspondiente a este desplazamiento hay un cambio en la frecuencia de oscilaciones de la cuerda vibrante. El incremento de la frecuencia de la señal de salida del detector durante las pruebas de cavitación es de hasta Hz y la calibración del detector se efectúa con ayuda de un manómetro de presión absoluta. Según las calibraciones efectuadas, el error del detector dentro del rango de trabajo de carga no es de más de +/- 0.0025 kg/cm<sup>2</sup>.

La caída (hva), equivalente a la presión de vaporización a la temperatura real, se determina según la planilla VI del anexo I de la publicación No. 193 del Código Internacional de Pruebas en Modelo de Máquinas Hidráulicas. Con un error probable de medición de la temperatura del agua de 0.5 °C, el error en la determinación de "hva" será de +/- 0.008 m.

Debido a que el error de medición de la altura de instalación del detector de presión absoluta respecto al punto de control del rodete "a" y los errores en la determinación de la presión de vaporización "hva" y del peso específico del agua " " son magnitudes insignificantes se pueden menospreciar. Entonces el error de la determinación de "σ" se calcula con la ecuación siguiente:

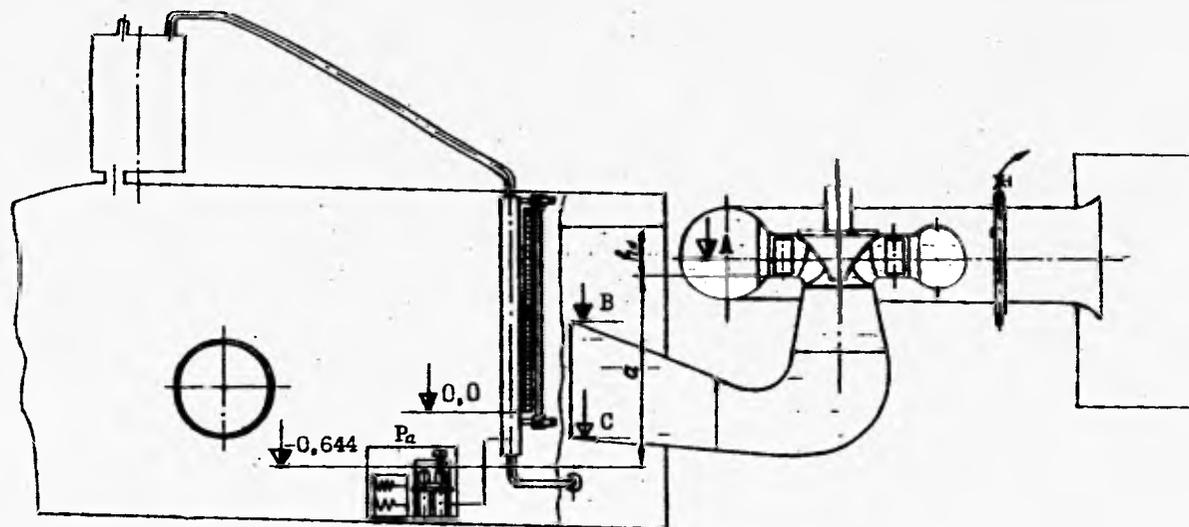
$$f_{\sigma} = \mp \sqrt{(f_{pa}^2 + f_h^2)} \quad (3.19)$$

El valor del error relativo de la medición de Pa cambia en función de su valor absoluto. Con el error absoluto igual a +/- 0.0025 kg/cm<sup>2</sup>, los valores del error relativo (fpa) contra la carga dentro del rango de trabajo de las mediciones se muestran en la siguiente tabla :

Pa (kg/cm <sup>2</sup> )	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ΔPa (kg/cm <sup>2</sup> )	0.0025								
fpa (%)	1.25	0.84	0.62	0.50	0.42	0.36	0.32	0.28	0.25

TABLA III.1

Por lo tanto, el error de la determinación del coeficiente de cavitación, en el rango de mediciones prefijado, estará dentro de los límites:



67

FIG. III.5 ESQUEMA DE UBICACIÓN DEL DETECTOR DE PRESIÓN ABSOLUTA Y DE "HS" RESPECTO A LA SECCIÓN DE CONTROL DEL MODELO.

$$f_a = \pm\sqrt{(1.25 \dots 0.25)^2 + 0.15^2} = 1.26 \dots \pm 0.3 \% \quad (3.20)$$

*e) Medición de la temperatura del agua.*

Antes de comenzar las pruebas, se mide la temperatura del agua en el sistema con ayuda de un termómetro de mercurio graduado a 0.1 °C en un intervalo de 0 a 50 °C. El termómetro está instalado permanentemente en el banco de pruebas. El valor de la temperatura del agua es transmitido a la memoria de la computadora que calcula el peso específico del agua y la presión de vaporización. Si durante las pruebas la temperatura del agua cambia en más de 0.5 °C, en la computadora se introduce automáticamente el nuevo valor.

*f) Medición del contenido de aire en el agua.*

Durante las pruebas de cavitación el contenido total de aire en el agua del sistema se controla y mantiene constante a un nivel predeterminado. La medición se realiza por el método de Van-Slike, dividiendo la mezcla agua-aire al alto vacío y midiendo la presión del aire extraído con ayuda de un manómetro de mercurio. El instrumento se calibra de acuerdo a un método volumétrico. La relación de los volúmenes de la muestra agua-aire se mantiene igual a 10:1. El contenido relativo del aire  $\alpha$ , se determina como la relación entre el volumen del aire extraído, reducido a condiciones normales y el volumen de la muestra de agua, es decir:

$$\alpha = \frac{V_{aire}}{V_{agua}} \times \frac{\Delta P_{aire}}{hg} \times 100, [\%] \quad (3.21)$$

*Error en la determinación de la eficiencia del modelo.*

El error en la medición de características del modelo se compone de los errores individuales en las mediciones de ciertos parámetros. Todos los dispositivos de medición del banco se someten a la calibración en el lugar de su instalación. Según los resultados de la calibración, se calculan los errores límites de las mediciones. Conforme a la evaluación presentada anteriormente en cada caso, el error posible de medición de algunos parámetros durante las pruebas es:

- de la velocidad de rotación	$f_n = \pm 0.003 \%$
- del torque en la flecha	$f_t = \pm 0.15 \%$
- de la caída	$f_h = \pm 0.15 \%$
- del gasto	$f_q = \pm 0.30 \%$

En el caso de la presión absoluta el error es  $\Delta P_a = \pm 0.0025 \text{ kg/cm}^2$

El error límite en la determinación de la eficiencia se calcula a través de los errores individuales en la medición de los cuatro primeros parámetros según la ecuación recomendada en el Código IEC.

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{(f_n^2 + f_i^2 + f_h^2 + f_q^2)} \quad (3.22)$$

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{0.003^2 + 0.15^2 + 0.15^2 + 0.3^2} = \pm 0.367\%$$

Entonces el error en la determinación de la eficiencia del modelo se acepta igual a +/- 0.35%

La ecuación que define la eficiencia del modelo es la siguiente:

$$\eta_m = (T.n.\pi) / (\gamma.Qv.hn.30) \quad (3.23)$$

### III.5 Metodología de las pruebas y resultados.

Las distintas pruebas sobre los modelos de turbinas hidráulicas se efectúan de acuerdo con la metodología especificada en las recomendaciones del Código IEC. En este apartado se presentan la pruebas energéticas (eficiencia y potencia), pruebas de cavitación y pruebas de desboque.

#### *a) Pruebas energéticas.*

##### Metodología de prueba.

Las pruebas energéticas se llevaron a cabo con el fin de verificar los valores garantizados por el fabricante respecto a la eficiencia y la potencia de la turbina a distintas aperturas del distribuidor y las velocidades, que corresponden a las caídas fijas del aprovechamiento hidroeléctrico. Estas pruebas se efectúan en condiciones de no cavitación, es decir, al nivel de restitución abierto, altura de succión (sumergencia) de  $h_s = -0.7$  m. y caída en el rango de 16 a 17 m.

Para comenzar con la prueba, se fija el régimen acordado, que se caracteriza por los valores de velocidad reducida ( $n'i$ ) y gasto específico ( $Q'i$ ), se ajusta la abertura apropiada del distribuidor y la velocidad de rotación del rodete. Después de estabilizar el régimen, cuando la variación de la velocidad no supera +/- 0.05%, se da la orden de arranque y las señales de los

transductores empiezan a llegar a los dispositivos de recepción de la computadora. Al cabo de 30 segundos la medición termina automáticamente, se efectúa el promedio de las señales acumuladas y el cálculo de los parámetros correspondientes del régimen. El tratamiento siguiente de los resultados se realiza según las dependencias principales citadas:

$$\text{velocidad reducida : } n'i = n \cdot \frac{D_1}{\sqrt{hn}} \quad (3.24)$$

$$\text{gasto específico : } Q'i = Q/(D_1^2 \cdot \sqrt{hn}) \quad (3.25)$$

$$\text{eficiencia : } \eta = (T \cdot \omega) / (\gamma Q v h n) \times 100\% \quad (3.26)$$

$$= (T \cdot 2\pi \cdot n) / (\gamma \cdot Q v \cdot h n \cdot 60) \times 100\%$$

donde :

$T$ [kg.m],  $n$ [min-1],  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>],  $h_n$ [m],  $Q$ [m<sup>3</sup>/seg]

$$\text{potencia específica : } P'i = P / (D_1^2 \cdot h_n \cdot \sqrt{hn}) = \gamma \cdot Q'i \cdot \eta / 102 \quad (3.27)$$

Según los resultados de éstos cálculos se dibujan los gráficos  $nm = f(n'i, Q'i, P'i, A_o)$ , que son la base para calcular las características del prototipo y evaluar el cumplimiento de las especificaciones de la oferta del fabricante.

## Resultados.

Para realizar las pruebas se eligieron los siguientes regímenes:

1.  $n'i = 63.20$  min-1 con variación de " $A_o$ " de 18 hasta 30 mm.
2.  $n'i = 64.75$  min-1 con variación de " $A_o$ " de 17 hasta 30 mm.
3.  $n'i = 71.30$  min-1 con variación de " $A_o$ " de 17 hasta 30 mm.

Los resultados obtenidos en las mediciones se presentan en la tabla III.2 y III.3, en donde se observa que las eficiencias del modelo superan a las garantizadas en un rango de 0.3 - 2.0 % para  $n' = 62.30$  y  $71.30$ , y en un rango de 0.0 y 0.7 % para  $n'i = 64.75$  min-1.

De acuerdo con esto el cálculo de las características de eficiencia para el prototipo,  $[nm =$

f(Q'i)], fué realizado con la expresión:

$$\eta_p = \eta_m + \Delta_\eta \quad (3.28)$$

donde:

$$\Delta_\eta = (1 - \eta_{n\max}) \cdot [1 - (D_m^1/5) \cdot \frac{1}{D_p} \cdot (H_m^1/10) \cdot \frac{1}{H_p}] \quad (3.29)$$

El valor máximo de la eficiencia del modelo en los rangos de los regímenes estudiados fué de **93.5 %** a  $n' = 71.30 \text{ min}^{-1}$  y  $Q'i = 710 \text{ lts/seg}$ .

sustituyendo en :

$$\Delta_\eta = (1 - 0.935) \cdot [1 - (0.46^1/5) \cdot \frac{1}{52} \cdot (16^1/10) \cdot \frac{1}{1451}] = 3.28\%$$

La corrección de la eficiencia se aceptó igual para todos los regímenes y caídas de prueba.

La potencia del prototipo se calcula como:

$$P = g \cdot D_1^2 \cdot H \sqrt{H} \cdot Q'i \cdot \eta_p \quad (3.30)$$

La eficiencia y potencia del prototipo calculadas en base a los resultados de las pruebas y a los valores calculados para el modelo se comparan con los valores garantizados en las tablas III.2 y III.3 y en las figuras III.6, III.7 y III.8.

Se observa que el valor máximo de la eficiencia es igual a **96.85 %** y supera al garantizado en **1 %**. Los valores de la eficiencia y gastos aseguran la potencia de garantía a todas las caídas posibles de operación.

En conformidad con las especificaciones IEC, la eficiencia media pesada se determina para la caída de diseño y se calcula según la fórmula:

$$\eta_g = (2E70 + 4E80 + 5E90 + 4E100) \frac{1}{15} \quad (3.31)$$

Cargas m	Potencia %	Potencia MW	Eficiencia del prototipo		Q'í
			$\eta$ garantizada	$\eta$ de prueba	
<b>H=157.3</b>	100	368.0	94.90	95.65	735
	90	331.2	94.75	96.85	660
	80	294.4	93.25	95.75	594
	70	257.6	90.60	92.65	531
	60	220.8	87.70	89.65	471
	50	184.0	—	85.00	409
<b>H=145.1</b>	100	325.0	95.70	96.10	729
	90	292.5	95.70	96.50	653
	80	260.0	94.75	95.30	588
	70	227.5	92.25	93.15	527
	60	195.0	88.70	90.25	466
	50	162.5	—	86.20	407
<b>H=119.7</b>	100	239.0	95.50	96.70	711
	90	215.1	94.50	96.00	645
	80	191.2	92.70	94.55	582
	70	167.3	90.60	92.80	519
	60	143.4	88.00	90.70	455
	50	119.5	—	87.90	391

TABLA III.2 VALORES DE EFICIENCIA ESCALADOS DEL PROTOTIPO.

$H_n$ , (m)	$P_{m\acute{a}x}$ , (Mw)	$P_i$	$n_i$ (min-1)	$Q_i$ (l/s)	$A_o m$ (mm)	$A_o p$ (mm)	$\eta_m$ (%)	$\eta_p$ (%)	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)	$F_s$	$K$	$n_p$ desboque (min-1)
157.3	368	6,662	62.30	735	30.3	342.5	92.4	95.6	249.3	0.066	1.97	275.5
145.1	325	6,644	64.75	729	30.3	342.5	92.9	96.1	237.5	0.061	2.30	264.6
119.7	239	6,522	71.30	711	30.0	339.0	93.5	96.7	210.3	0.045	3.78	240.4

Tabla III.3 PARÁMETROS PRINCIPALES DEL MODELO Y PROTOTIPO DE LA TURBINA.

$H_n = 1573 \text{ m.}$

$n_i = 623 \text{ min}^{-1}$

$\eta (\%)$

74

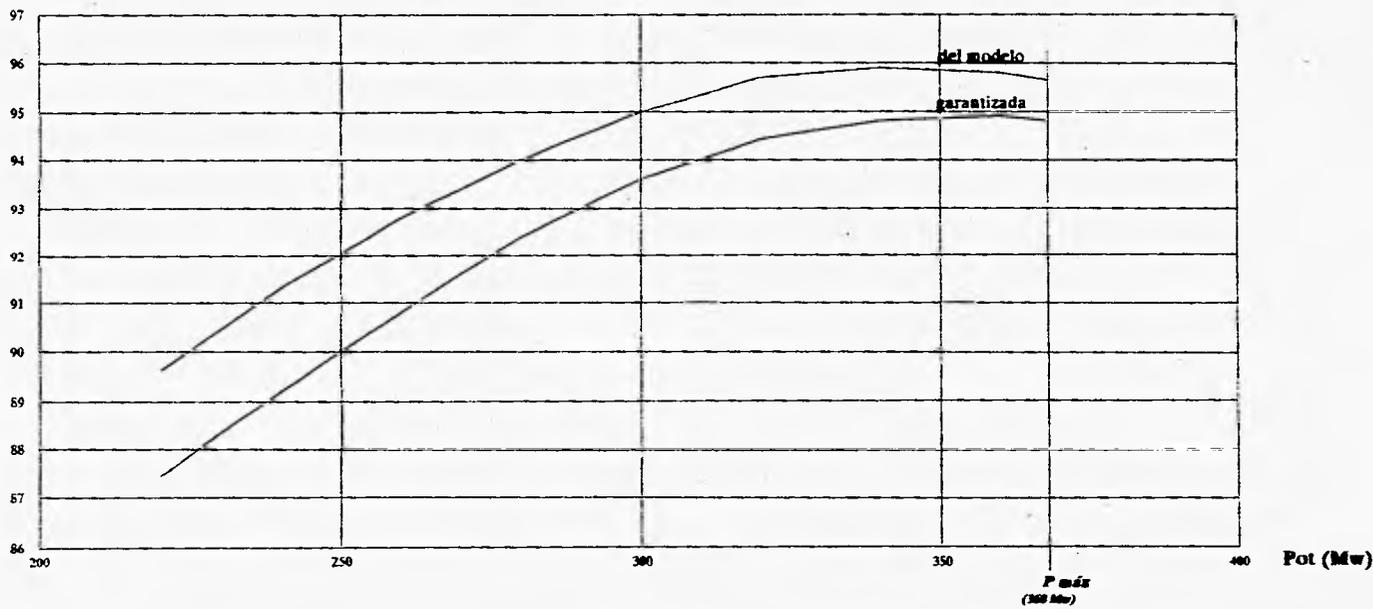


FIG. III.6 GRÁFICA COMPARATIVA DE EFICIENCIA Y POTENCIA DEL MODELO ESCALADA AL PROTOTIPO Y LA GARANTIZADA.

$H_n = 145.1 \text{ m.}$

$n'i = 64.75 \text{ min}^{-1}$

$\eta (\%)$

75

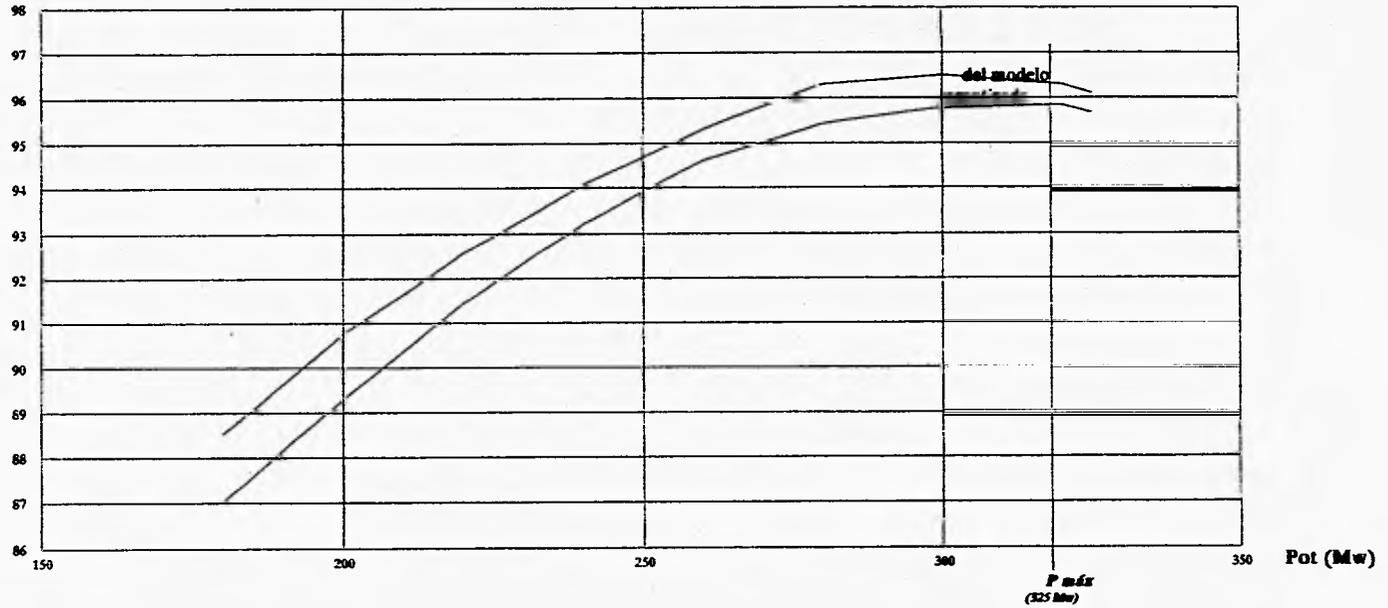


FIG. III.7 GRÁFICA COMPARATIVA DE EFICIENCIA Y POTENCIA DEL MODELO ESCALADA AL PROTOTIPO Y LA GARANTIZADA.

$H_n = 119.7m.$

$n_i = 71.30 \text{ min}^{-1}$

76

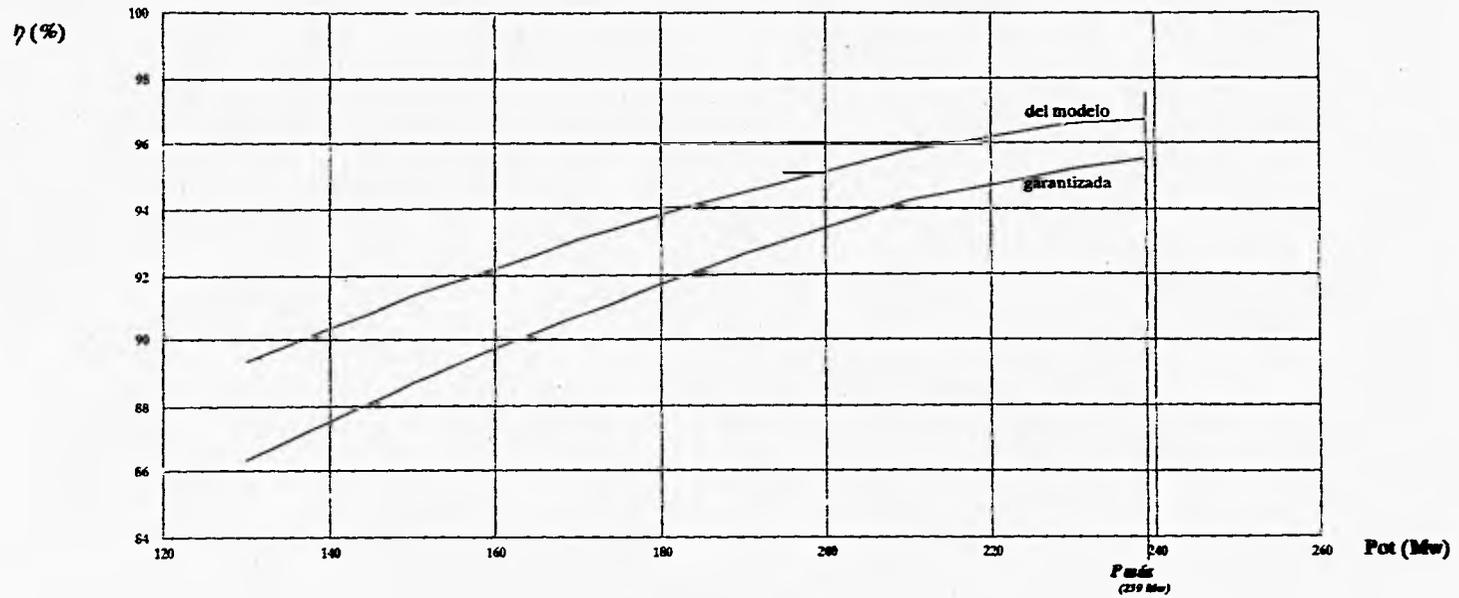


FIG. III.8 GRÁFICA COMPARATIVA DE EFICIENCIA Y POTENCIA DEL MODELO ESCALADA AL PROTOTIPO Y LA GARANTIZADA.

donde:

E70, E80, E90, E100 - valores de eficiencia bajo las cargas de 70, 80, 90 y 100 % respectivamente de la potencia nominal a la caída de diseño, es decir, % de 325 MW.

$$\eta_g = [2(93.2)+4(95.3)+5(96.6)+4(96.2)] \frac{1}{15} = 95.6\%$$

Este valor de la eficiencia media pesada supera el valor garantizado en 0.6%.

#### *b) Pruebas de cavitación.*

##### **Metodología de prueba.**

Estas pruebas se realizaron con el fin de determinar los coeficientes críticos de cavitación para diferentes regímenes dentro del rango de cargas de operación y bajo la carga más grande, a  $n^i = 62.3 \text{ min}^{-1}$ . Las caídas de prueba en el modelo acordadas fueron de 16 a 22 m, en función del régimen, para alcanzar las condiciones de variación de eficiencia, sin cambiar el valor de sumergencia "hs".

Antes de las pruebas el contenido de aire diluido en el agua se reduce hasta un valor que va de 0.8% a 1.0% y el régimen a controlar se ajusta a las condiciones iniciales sin cavitación. Luego de manera discreta, baja el valor de la presión absoluta en el tanque de restitución y, respectivamente, se reduce el coeficiente de cavitación de la unidad hasta los regímenes de la cavitación desarrollada, los cuales tienen como rasgo característico la disminución de la eficiencia en más del 1.0%. Así se mantiene constante la velocidad y la caída en el modelo.

En cada punto elegido para la prueba, se miden y se calculan los parámetros energéticos y el coeficiente de cavitación " $\sigma$ " según la ecuación (3.18).

Como referencia para el cálculo del coeficiente de cavitación fué acordado el plano horizontal que pasa a través del anillo inferior del distribuidor y como coeficientes de cavitación característicos fueron aceptados los siguientes valores:

- |                   |  |
|-------------------|--|
| $\sigma_a$        | Sigma alta, en el punto inicial de la zona sin cavitación.           |
| $\sigma_{planta}$ | Corresponde a las condiciones concretas de cavitación del prototipo. |
| $\sigma_s$        | Sigma crítica, según el Código IEC.                                  |

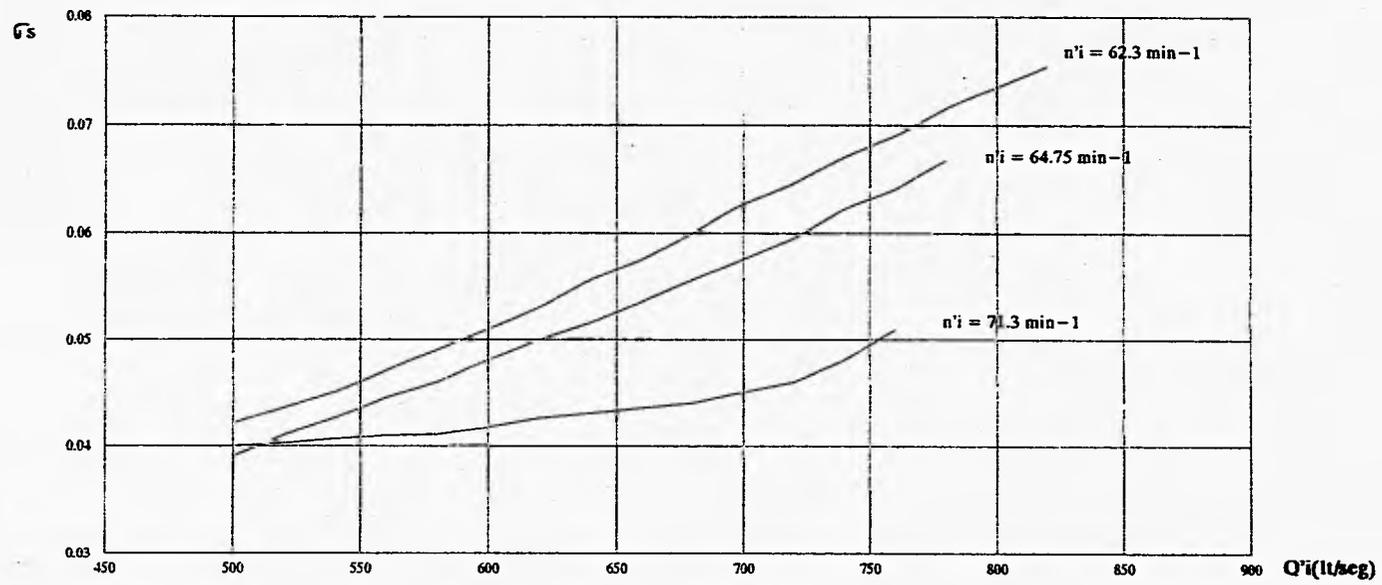


FIG. III.9 VALORES CRÍTICOS DEL COEFICIENTE DE CAVITACIÓN.

**Resultados.**

Los resultados de las pruebas se presentan en los gráficos de  $Q'i = f(\sigma)$ , en los cuales se observan los valores críticos del coeficiente de cavitación. (Fig. III.9).

Del análisis de los resultados se desprende que el rodete elegido en la etapa de diseño de la turbina tiene buenas cualidades de cavitación operando dentro del rango adecuado de caídas. Las relaciones de trabajo de la máquina, ( $n = f(\sigma)$ ) se caracterizan por la estabilidad de la eficiencia en todo el intervalo de variaciones del coeficiente de cavitación, desde sigma alta hasta sigma s, prácticamente. Esta ley se expresa claramente en la zona de las cargas máximas, que permite determinar el margen de seguridad anticavitatoria y restringir a valores pequeños la erosión del material por éste fenómeno.

Para evaluar los márgenes reales de seguridad anticavitatoria se realizaron los cálculos de sigma planta que se determinan con los niveles de sumergencia de la turbina según se operen una, dos ó las tres unidades.

De acuerdo con las gráficas gasto turbinado-niveles del río en el desfogue, operando una, dos y tres máquinas las elevaciones son 66.7, 67.6 y 68.3 m. respectivamente. Estas elevaciones son constantes a todas las caídas. El eje central del distribuidor se encuentra en la elevación 57.0 m., entonces los valores esperados de sumergencia serán igual a -9.7, -10.6 y -11.3 m. Los coeficientes de cavitación de la central hidroeléctrica (sigma planta), adecuados a las alturas de succión ó sumergencia citadas se calculan según la expresión:

$$\sigma \text{ planta} = \frac{hb - hs - hva + bo/2}{Hn} \quad (3.32)$$

donde:

bo/2 - ajuste de "hs" al nivel de referencia común de pruebas en modelo, (plano horizontal de anillo inferior del distribuidor).

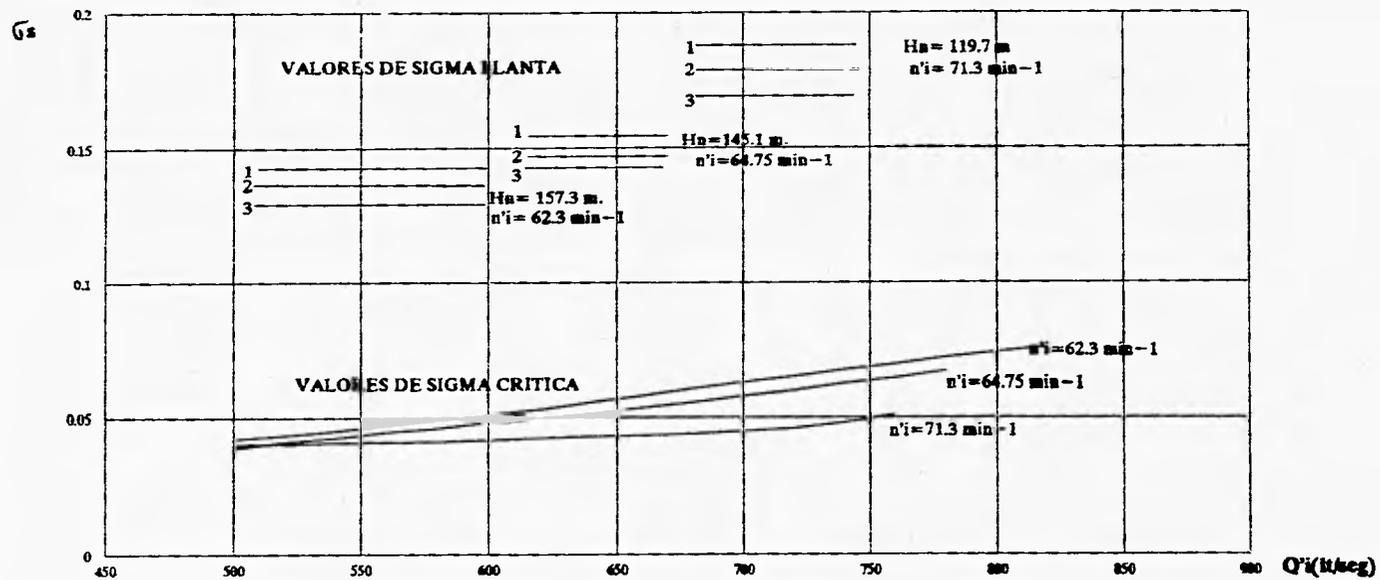
Calculados de esa manera, los valores de sigma planta, operando 1, 2 y 3 unidades bajo tres caídas en la central son los siguientes:

<i>Hn</i> (m)	<i>sigma</i> <i>planta uno</i>	<i>sigma</i> <i>planta dos</i>	<i>sigma</i> <i>planta tres</i>
157.3	0.129	0.135	0.140
145.1	0.140	0.146	0.151
119.7	0.170	0.117	0.183

TABLA III.5

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

08



Los valores de sigma planta obtenidos se muestran en la fig. III.10, y se comparan con los valores de cavitación  $\sigma_s = f(Q't)$  hechas durante las pruebas del modelo. En las gráficas se ve que el margen de seguridad anticavitatorio suficiente se asegura por la altura de sumergencia que existe durante la operación de una sola unidad en cualquier régimen operacional. La magnitud de éste margen calculado como  $k\sigma = \sigma_{\text{planta}}/\sigma_s$ , en el punto de mayor aproximación de  $\sigma_s$  y  $\sigma_{\text{planta}}$ , es de  $k\sigma = 1.9$ . Para otras caídas el margen es aún mayor llegando a ser hasta de 4.0

### *c) Pruebas de desboque.*

#### Metodología de prueba.

Con la finalidad de verificar la velocidad y el gasto de la turbina hidráulica durante el desboque de la misma, fueron elegidos los regímenes a ensayar con aberturas del distribuidor desde  $A_o = 5$  mm hasta  $A_o = 35$  mm que corresponde a la abertura máxima en escala del distribuidor del prototipo. Durante las pruebas, la caída fué restringida en 8 m. como prevención de la resistencia del rodete y del cono transparente del tubo de aspiración. La medición de la velocidad de rotación del rodete se realiza con el valor del momento de frenado sobre la flecha del modelo muy próximo a cero. Para asegurar esta condición, la flecha recibe un impulso adicional, producido por el motor-generator, para equilibrar completamente las pérdidas mecánicas y de ventilación del rotor.

En la mayoría de los casos las pruebas se llevan a cabo en condiciones de no cavitación, es decir, a sigma alta, y con aperturas pequeñas del distribuidor cuando la velocidad es pequeña. También se efectúan las mediciones a distintos valores de sigma establecida que corresponden a ciertas condiciones de cavitación de la Central Hidroeléctrica.

La característica de desboque se determinan en todo el rango de las aberturas del distribuidor, con intervalos de 5mm. En cada punto de cierto régimen, la medición y el cálculo se efectúan de manera análoga a la de las pruebas de cavitación. En base a los resultados de las pruebas se grafican las relaciones  $n'i, Q'i = f(A_o)$ , y la relación  $n'i = f(t)$  a  $A_o = \text{constante}$ .

#### Resultados.

Los resultados de las pruebas se presentan en las gráficas de la fig. III.11 y fig. III.12 donde están marcadas las aberturas del distribuidor que aseguran las potencias nominales a las caídas estipuladas para la central hidroeléctrica.

De las características presentadas se deduce que dentro del rango examinado de las aberturas de distribuidor el valor máximo de la velocidad de desboque a escala fué para  $A_o = 35$  mm y es de 119.7 min<sup>-1</sup>. Este valor se presenta con sigma alta, pero a juzgar por las mediciones hechas durante las pruebas de control en  $A_o = 30$  mm el paso a sigma planta aumenta la velocidad de desboque en 1.2 min<sup>-1</sup>. Es por esto por lo que el valor máximo posible de la velocidad de desboque reducida puede alcanzar 120.9 min<sup>-1</sup>. La velocidad máxima de desboque del prototipo, que corresponde a los datos arriba indicados, tendrá lugar a la caída máxima y será igual a:

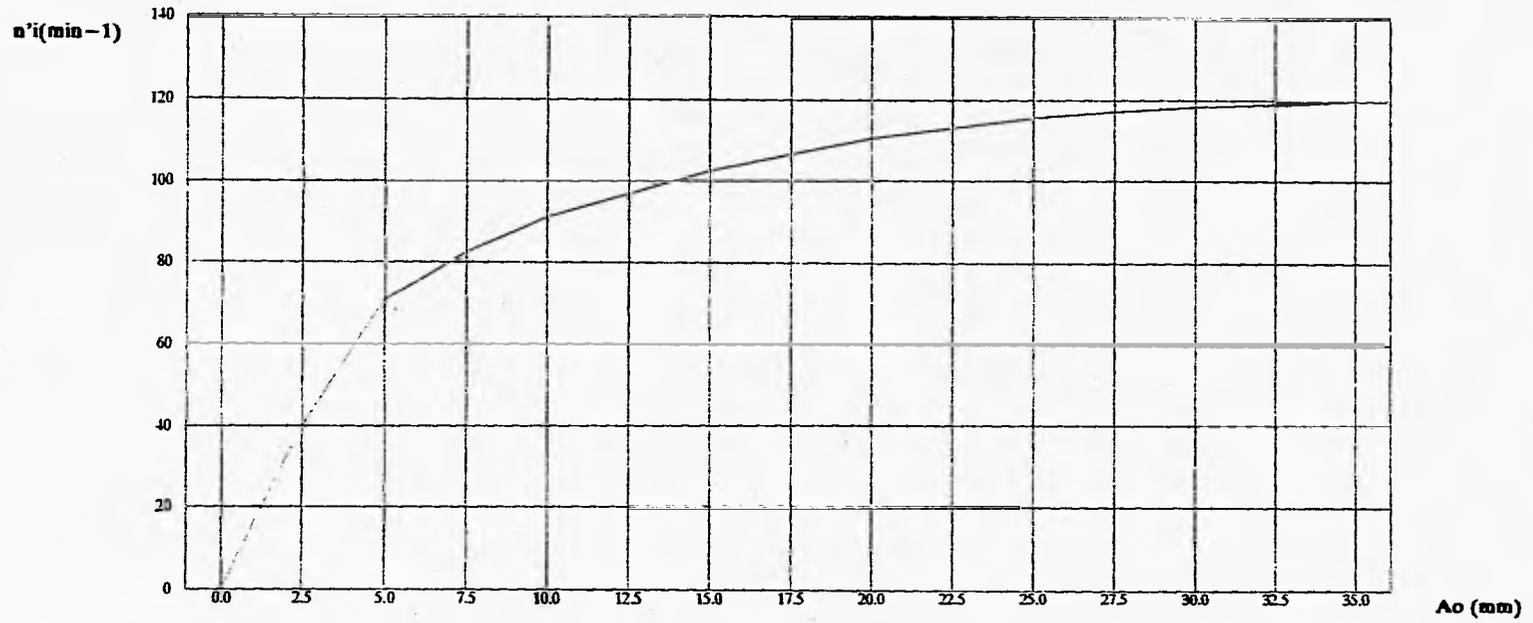


FIG. III.11 GRÁFICA DE APERTURA DEL DISTRIBUIDOR VS. VELOCIDAD ESPECÍFICA EN EL MODELO.

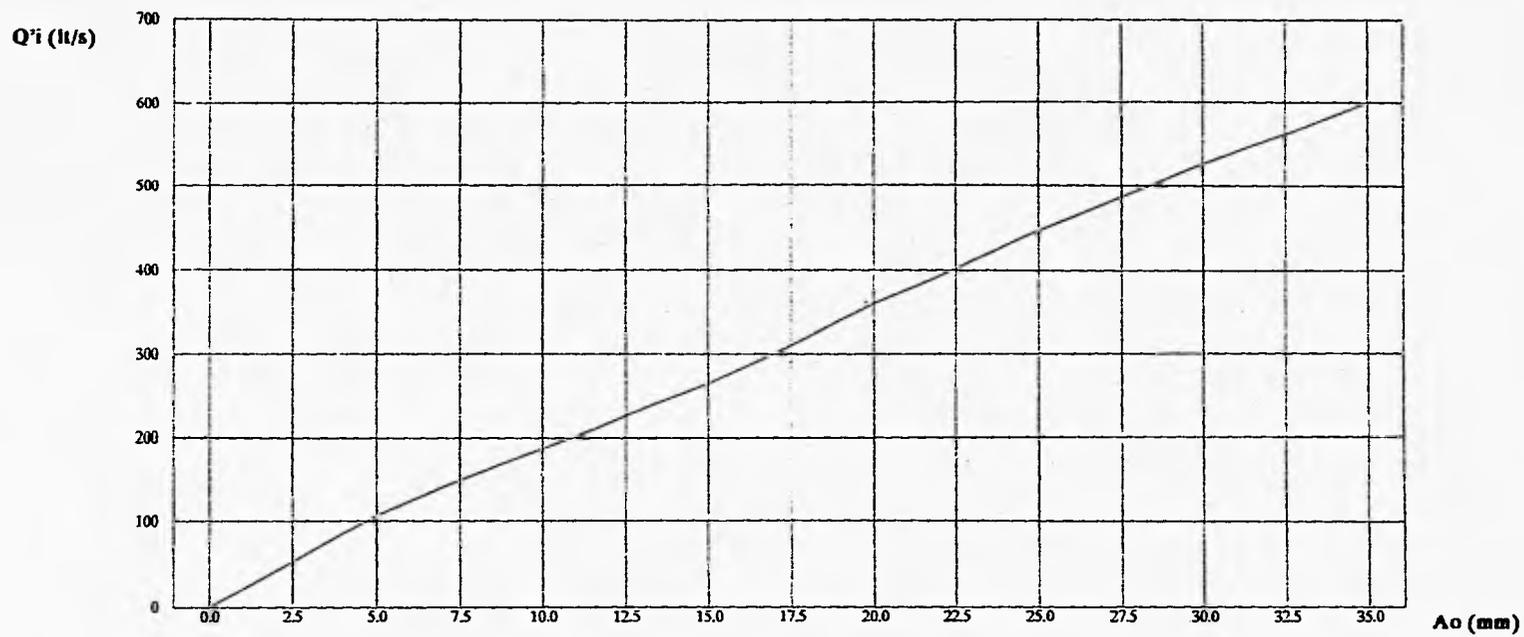


FIG. III.11 GRÁFICA DE APERTURA DEL DISTRIBUIDOR VS. GASTO ESPECÍFICO EN EL MODELO.

$$n.p. \text{ desboque} = \frac{120.9 \cdot \sqrt{157.3}}{5.2} = 291.6 \text{ min-1} \quad (3.33)$$

A causa de las pérdidas por fricción en los soportes del rotor y las pérdidas de ventilación en el generador la velocidad de desboque disminuye entre un 3 y 5 %, por lo que el valor real, a  $H_{m\acute{a}x}$  será de:

$$n \text{ desboque} = (0.95 - 0.97) 291.6 = 280 \text{ min-1} \quad (3.34)$$

El valor presente es menor que el garantizado que es de 297 min-1.

### III.6 Conclusiones.

Conforme a las especificaciones técnicas, las pruebas en modelo del pasaje de agua de la turbina para la Central Hidroeléctrica de Aguamilpa, se llevaron a cabo de acuerdo con las Recomendaciones del IEC (publicaciones 193 y 193A). Las pruebas mostraron que las cualidades energéticas y de cavitación de la turbina hidráulica son superiores a las garantizadas por el proveedor.

Tanto a caída máxima como mínima, los valores individuales obtenidos para la eficiencia superan el nivel de garantía, y a caída de diseño coinciden. La eficiencia del modelo en su valor óptimo es igual a 93.6%. Los valores de la eficiencia máxima y media ponderada del prototipo, conforme al cálculo escalado del modelo, son de 96.7% y 95.6% y superan los valores garantizados en la oferta técnica en 1% y 0.6% respectivamente. A todas las caídas se aseguran los valores dados de la potencia. Estos resultados deberán coincidir ó ser muy parecidos a los que arrojen las pruebas de eficiencia y potencia ya en el prototipo después de la instalación de la unidad.

Los valores crítico, reportados del coeficiente de cavitación ( $\sigma_s$ ) son mejores que los garantizados en la oferta, y en todos los regímenes son mucho menores que los valores de  $\sigma$  planta asegurados de acuerdo con la sumergencia real de la máquina. La existencia de éste margen amplio de seguridad anticavitatorio permite estimar unas condiciones muy satisfactorias de trabajo del prototipo y hace suponer que la erosión del material por cavitación será muy pequeña.



#### **IV. PROGRAMAS DE OBRA Y PROCEDIMIENTO DE MONTAJE.**

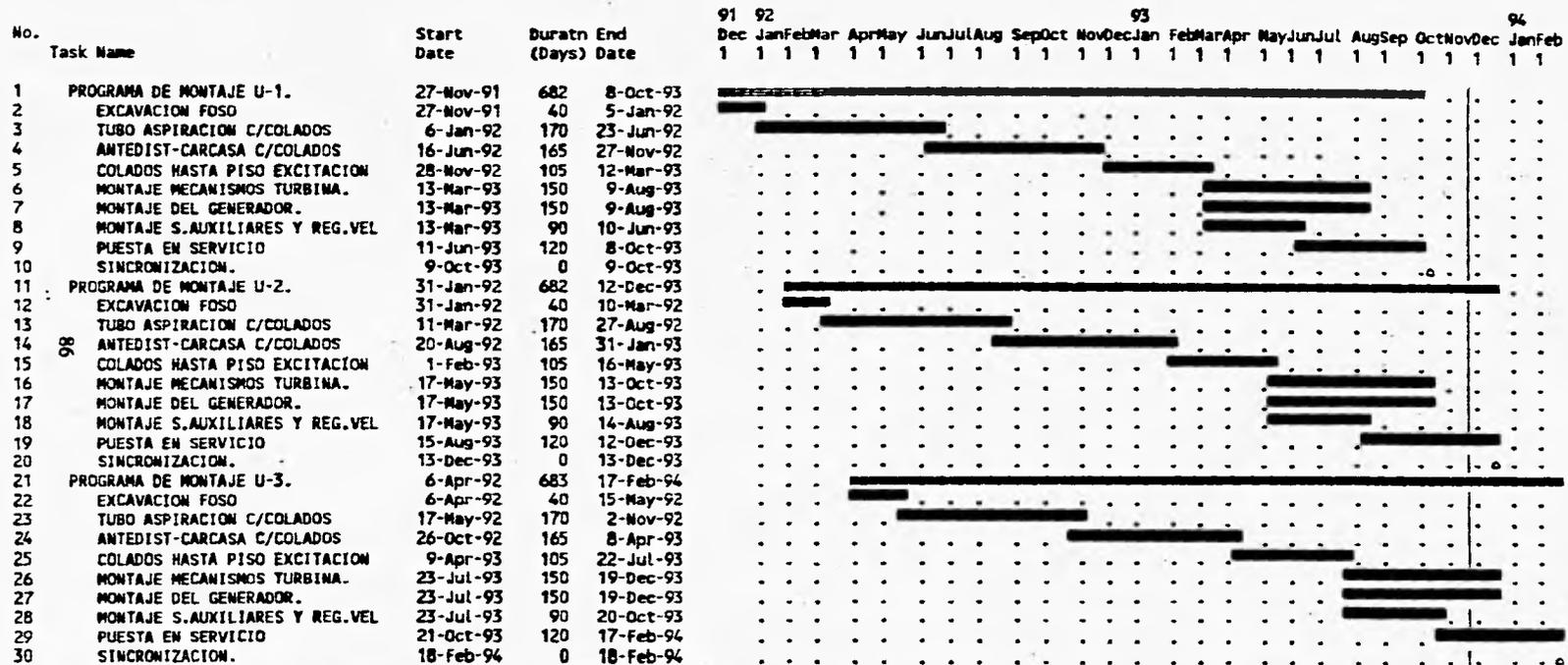
##### **IV.1 Generalidades.**

En el presente capítulo se exponen los programas, medios y recursos, así como la tecnología utilizada para realizar eficazmente el montaje de las turbinas.

El programa inicial de actividades considera un plazo de 22 meses para la ejecución de los trabajos, desde el montaje del tubo de aspiración hasta el montaje final de mecanismos de turbina, incluyendo las etapas de colados de partes fijas (tubo de aspiración, carcasa espiral y foso de turbogenerador hasta piso de excitadores). En la fig. IV.1 se presenta el programa contractual de montaje y obra civil de casa de máquinas. Se observa en éste programa que existe un defasamiento para el inicio de actividades en las unidades y consecuentemente en las fechas de sincronización de las mismas. Este defasamiento obedece al procedimiento de excavaciones en la galería y a la optimización de recursos tanto de obra civil como de obra mecánica, ya que en la interacción de una y otra para eregir el conjunto hay trabajos exclusivos de un área con duración de varias semanas que dejarían inactivos algunos grupos de trabajo en caso de que el montaje en las tres unidades fuese simultáneo.

También se observa en el programa que para cada unidad existen dos etapas bien definidas en el proceso de montaje de la turbina limitadas por el evento llamado "colados hasta el piso de excitación". La primera de ellas comprende desde el montaje del tubo de aspiración hasta los

PROYECTO HIDROELECTRICO AGUAMILPA.  
 PROGRAMA DE MONTAJE DE TURBOGENERADORES, U-1, U-2 Y U-3.  
 ARCHIVO: PROG-123.5TD



[Solid bar] Detail Task    [Dashed bar] Summary Task    [Dotted bar] Baseline  
 [Bar with dots] (Progress)    [Bar with dashes] (Progress)    [Bar with arrows] Conflict  
 [Bar with spaces] (Slack)    [Bar with lines] (Slack)    [Bar with dots] Resource delay  
 Progress shows Percent Achieved on Baseline    [Triangle] Milestone  
 ----- Scale: 9 days per character -----

TIME LINE Gantt Chart Report, Strip 1

FIG. IV.1 PROGRAMA CONTRACTUAL DE MONTAJE.

colados mencionados y básicamente agrupa a las actividades de paylería y soldadura de placas. Esta fase se caracteriza por que casi todo el trabajo se realiza "in situ" (en el foso) por lo que, de acuerdo con el diseño y el procedimiento de construcción se tiene una gran interacción con la obra civil en una cadencia cíclica de actividades de colados-montaje-colados.

La segunda etapa es marcadamente de armado y montaje de componentes finos. Esta fase se caracteriza por que además de la realización de los trabajos de montaje en el foso de la turbina, se tiene una gran actividad en la zona de playa de montaje, en donde se verifican, se detallan y se ensamblan los elementos. Es una etapa en donde el montaje se lleva a cabo con una rigurosa precisión y tolerancias mínimas.

Estas dos etapas que se describen a continuación, se conocen respectivamente como "montaje de partes empotradas ó fijas" y "montaje de mecanismos".

#### IV.2 Montaje de partes empotradas.

Un diagrama del procedimiento de montaje en ésta fase, se presenta en la fig. IV.2 describiéndose a continuación cada etapa del proceso. En este capítulo no se han incluido las actividades correspondientes a la prueba hidrostática de carcasa que aparece en el procedimiento mencionado por considerar más conveniente su inserción dentro del capítulo V para los fines del trabajo.

##### *IV.2.1 Montaje del tubo de aspiración.*

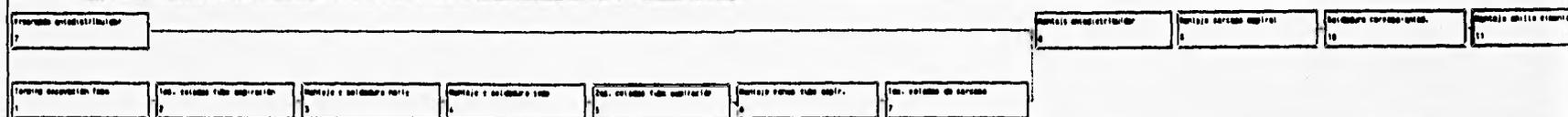
Concluidas las excavaciones en roca del foso de la turbina a la elev. 39.50, la obra civil realiza los primeros colados del tubo de aspiración. Estos colados estabilizan el corte en la roca y dejan el recinto en condiciones de comenzar con el montaje. Las paredes del foso se anclan en algunos puntos para ayudar con el armado de parrillas de acero en paredes y piso. A este armado se ligan las placas que quedarán embebidas en el concreto y sobre las cuáles posteriormente se apoyan los gatos y soportes auxiliares para el armado en sitio del tubo de aspiración, razón por la cual la obra civil al terminar las excavaciones del foso debe dar al montador las referencias topográficas para establecer físicamente conforme a diseño, los ejes x, y y z de cada unidad. Es importante determinar exactamente dichos puntos, ya que ellos son en todo momento la referencia para prácticamente todo el montaje de la máquina.

En la fig. IV.3 se presenta una planta y un corte en la zona del foso con la geometría de los primeros colados y se observa además la disposición de placas embebidas y las estructuras de concreto adicionales que sirven como apoyo guía de la nariz del tubo de aspiración. Estas son pequeñas columnas con placas de acero embebidas en su extremo para fijar a ellas con soldadura las placas del tubo.

OBJETO: SIMULACION DE MONTAJE.  
 DESCRIPCION DE MONTAJE DE PARTES MONTAJES DE TURBINA.

ANEXO: 00007.010

ORDEN DE PARTES:



100 LINE PART Diagram Report, Serie 1

100 LINE PART Diagram Report, Serie 2

100 LINE PART Diagram Report, Serie 3

FIG. IV.2 SECUENCIA DE MONTAJE DE PARTES

ESTADO UNIDOS ESTADISTAS								
1	2	3	4	5	6	7	8	9

ESTADO UNIDOS ESTADISTAS

ESTADO UNIDOS ESTADISTAS

ESTADO UNIDOS ESTADISTAS

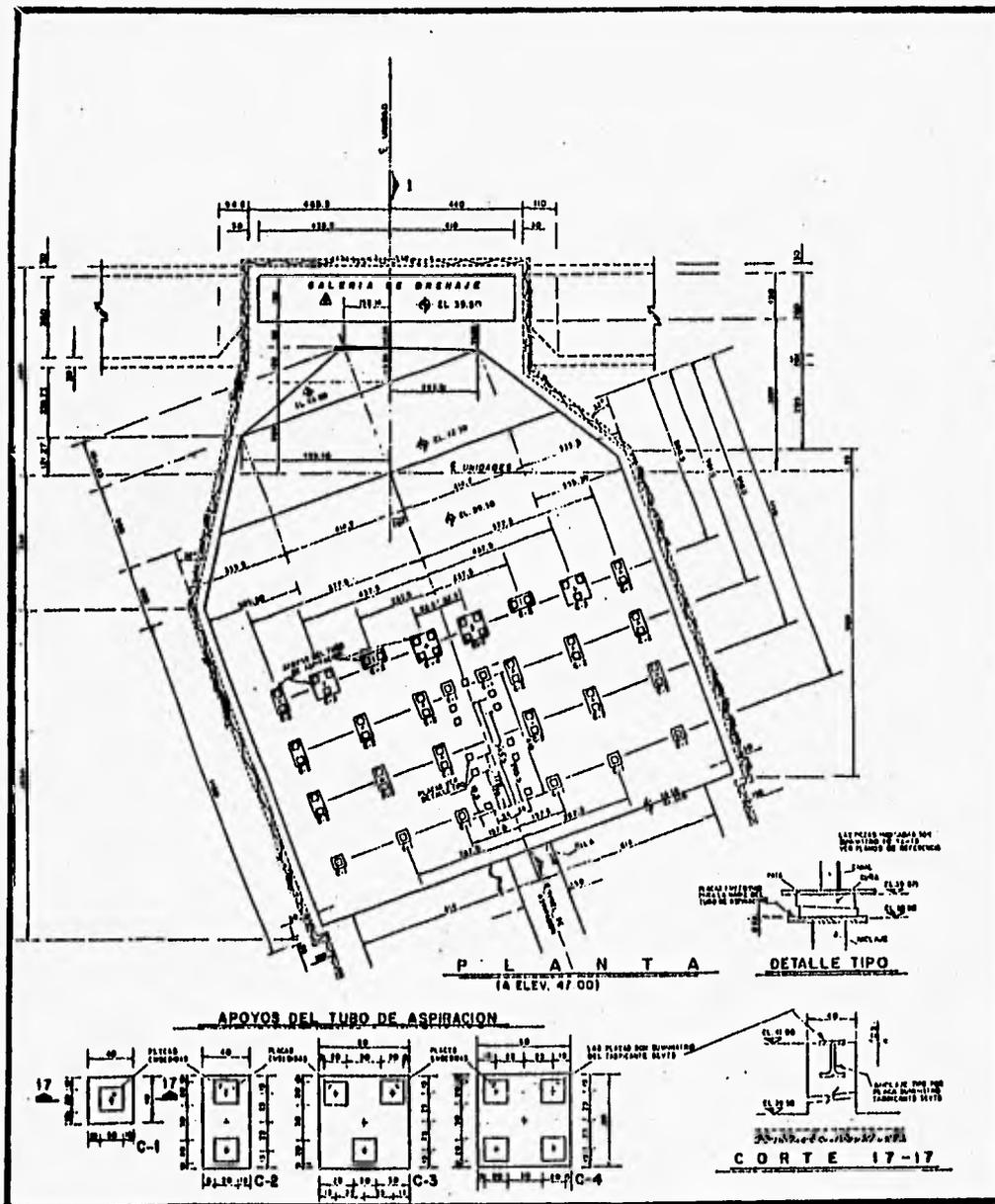


FIG. IV.3A PRIMEROS COLADOS DEL FOSO DEL TUBO DE ASPIRACION.

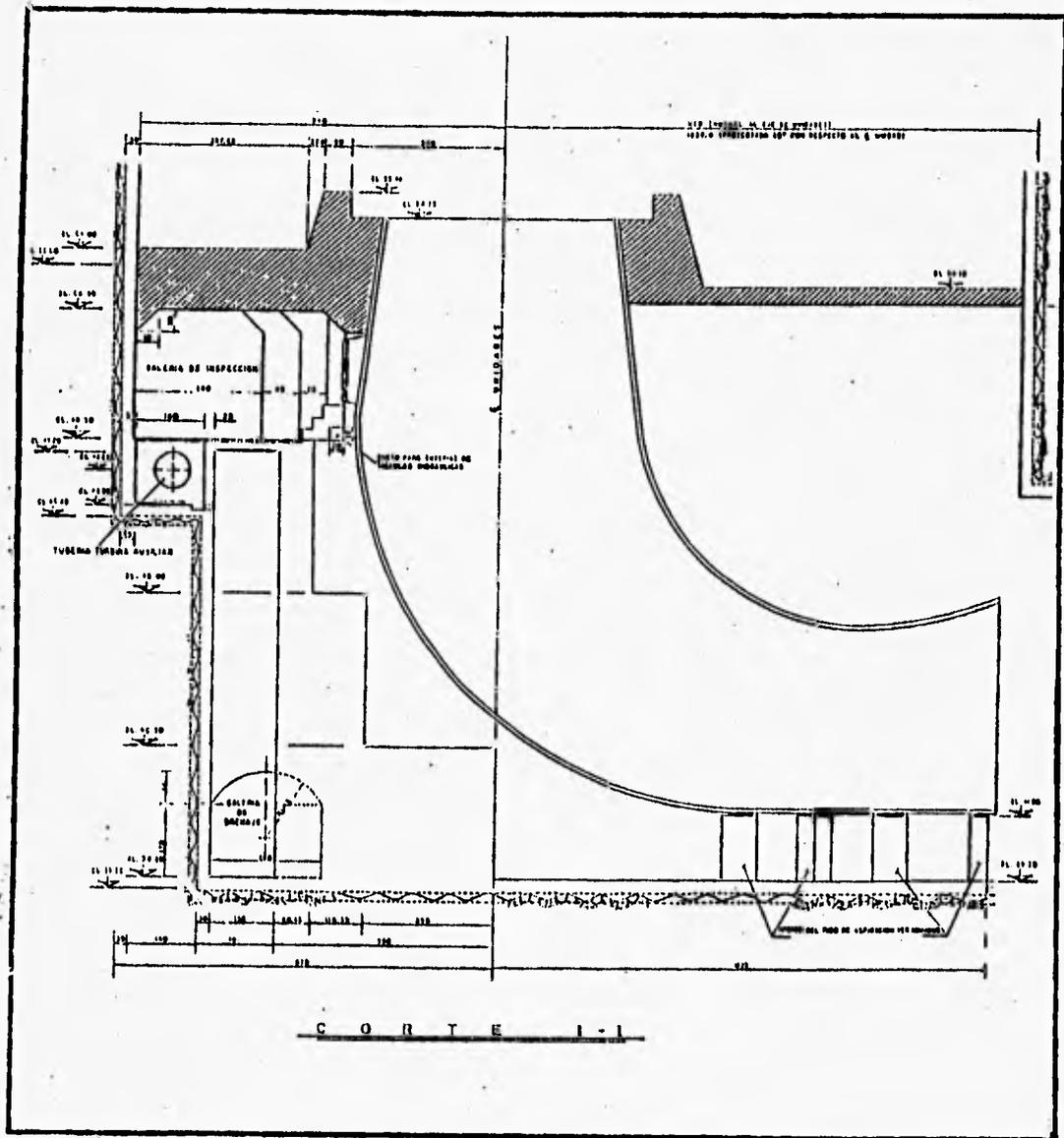


FIG. IV.3B

#### **IV.2.1.1 Montaje del codo.**

Antes de iniciar el montaje en sitio se deben checar nuevamente las posiciones de las partes fijas al recibir la zona, para corroborar que durante el colado no hubo alteraciones en las posiciones de las placas colocando los dispositivos topográficos de alineación y nivelación en el piso del codo. Una vez revisada la posición, las secciones de placa que conforman el codo se acercan hasta la zona de montaje con ayuda de la grúa viajera. En éstas maniobras es muy importante tener cuidado de estrobar las piezas de manera que no se altere su geometría, ya que si así sucede se puede retrasar el trabajo por la necesidad de conformar posteriormente las placas en sitio.

De acuerdo con la secuencia mostrada en la fig. IV.4a se inicia la instalación del blindaje del codo con las placas que forman el piso uniéndolas entre sí mediante los pernos que traen de fábrica centrando, nivelando y alineando con las referencias topográficas dadas por el constructor de obra civil y se puntean con soldadura. Se marcan las posiciones de los gatos de apoyo en la parte interna de los sectores del piso para corregir la disposición de los soportes del dispositivo previsto para ensamblar y centrar el revestimiento del codo, después se instala la tubería de drenaje del tubo de aspiración. Cuando se tiene fija la parte del piso y en su correcta posición se colocan las paredes sosteniéndolas con apoyos laterales por la parte exterior y se ajusta la tubería de drenaje tapándola provisionalmente por los extremos. Después se colocan las placas que forman la parte superior sosteniéndolas con apoyos internos y cuidando siempre que la sección corresponda a la geometría de diseño. Se comprueban los centros y la geometría del codo incluyendo las secciones de entrada y salida y se corrigen si es necesario por medio de los dispositivos, topes con cuñas y tirantes, para tener los centros y secciones correctas a las cotas indicadas, cuidando estar dentro de las tolerancias permitidas por el fabricante.

#### **IV.2.1.2 Armado de la nariz.**

Con la finalidad de ganar tiempo al montaje, mientras se realizan los primeros colados del tubo de aspiración es factible realizar un prearmado de las partes que forman la nariz del tubo. Este prearmado se puede hacer en patios exteriores a casa de máquinas y posteriormente trasladar a sitio toda la pieza. Una vez armada y soldada se traslada a casa de máquinas y se monta en sitio con ayuda de la grúa viajera, se nivela y alinea según los requerimientos del codo del tubo en el desfogue del mismo, que ya ha sido instalado y después se fija a sus partes embebidas mediante anclas y tirantes checando la posición y las tolerancias especificadas.

#### **IV.2.1.3 Soldadura del codo.**

Una vez que han sido montadas y punteadas las secciones del codo se procede a soldar todas las juntas tomando en cuenta los siguientes preparativos:

- a) Calificación de soldadores (arco manual) según normas ASME para el tipo y espesor

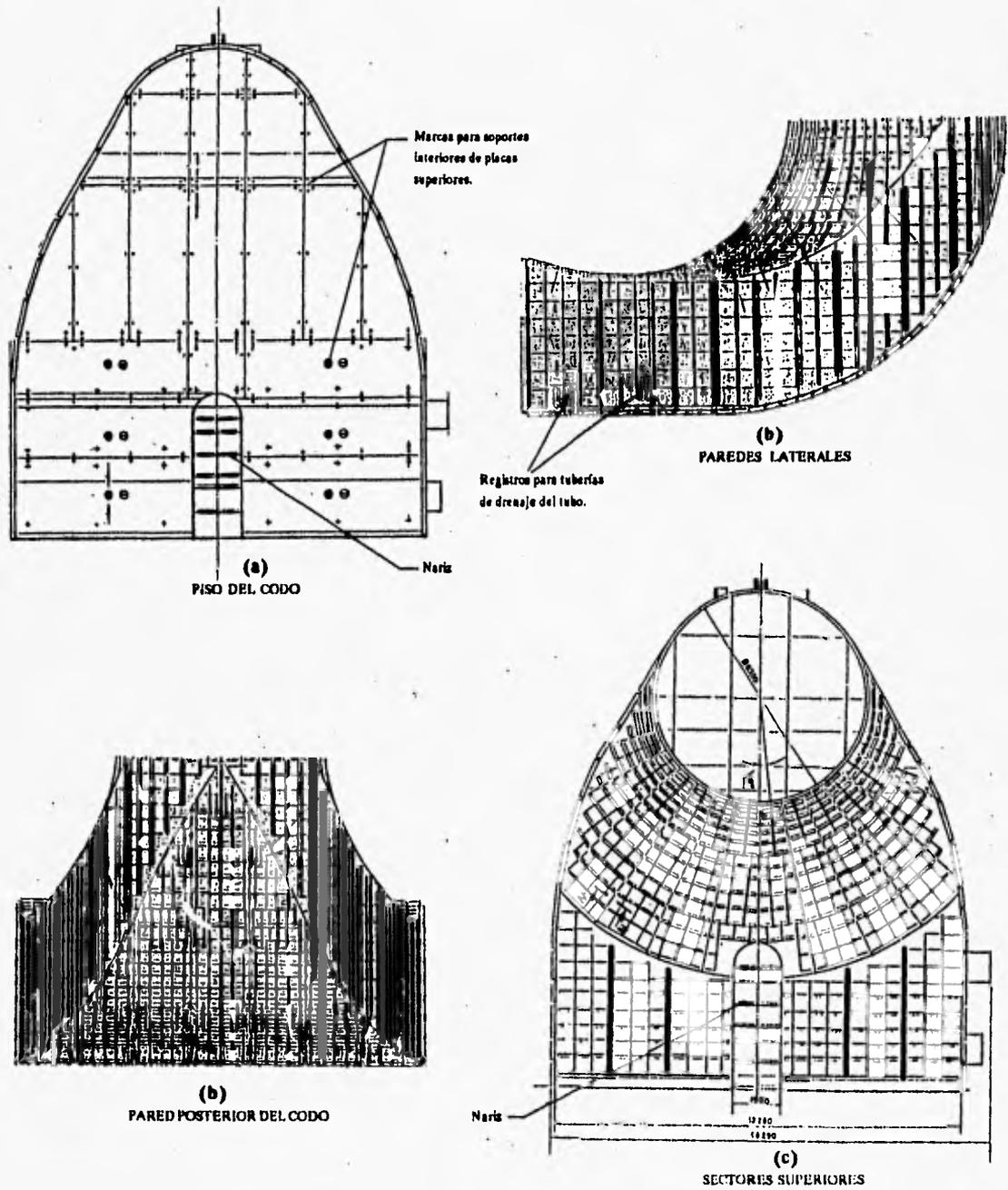


FIG. IV.4A SECUENCIA DE ENSAMBLE DEL CODO DEL TUBO DE ASPIRACIÓN.

N - N

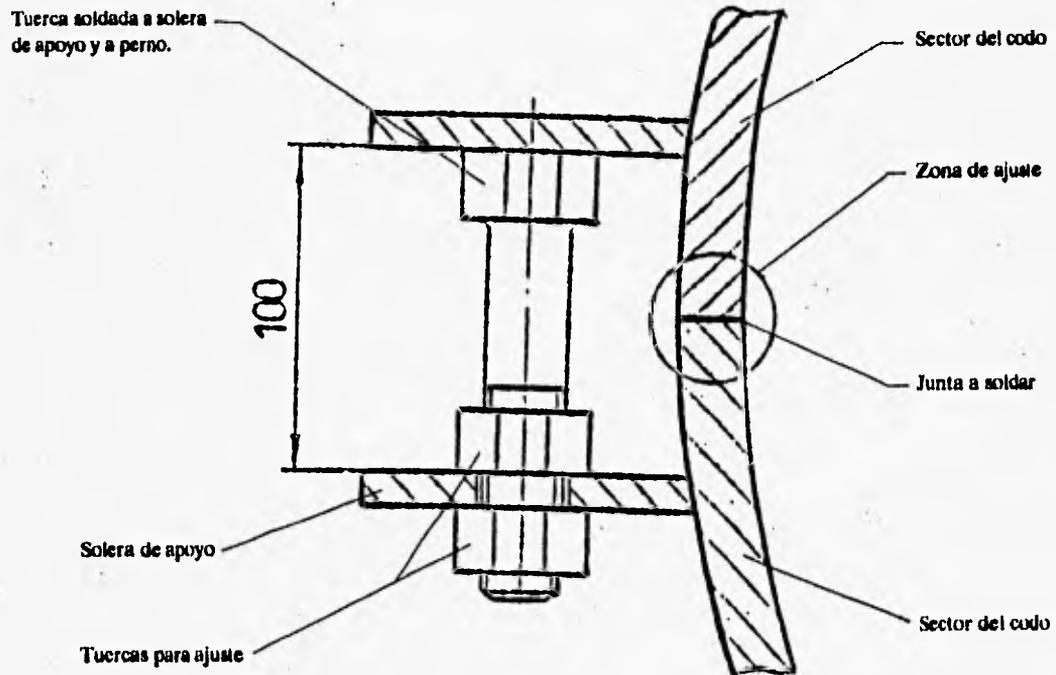


FIG. IV.4b PERNOS DE UNIÓN ENTRE PLACAS.

de la soldadura a efectuar por parte de la empresa montadora.

b) Calificación y aceptación del procedimiento de soldadura propuesto por la empresa montadora por parte del fabricante.

c) Preparativos en el foso y blindaje tales como andamios provisionales.

El procedimiento de soldadura a seguir es el siguiente:

a) Limpieza de biseles de placas con disco abrasivo.

b) Verificación y en su caso reparación de biseles para que el espacio entre las 2 placas sea de 3 y 6 mm cortando con equipo oxicrotante y afinando con disco abrasivo ó rellenando con soldadura según sea el caso.

c) Precalentamiento a 50 °C y verificación de la temperatura con crayones térmicos.

d) Fondeo con soldadura 7018 de 3 mm diam. y limpieza con escoriador neumático ó cincel.

e) Pasos subsecuentes de relleno con soldadura 7018 de 4.5 mm a 6 mm y limpieza con escoriador neumático o cincel entre cada paso.

f) Inspección con líquidos penetrantes 20%

g) Cordón de vista y limpieza con escoriador neumático ó cincel cuidando de que el borde de este no rebase los 3 mm del plano de la superficie interior.

h) Inspección visual 100%

Las juntas se pueden iniciar simultáneamente en los sectores del piso y paños laterales del codo, dejando para el final las uniones de los sectores superiores. Los 300 kg de soldadura de la pieza se pueden aplicar en 15 días aproximadamente con tres brigadas de soldadores aproximadamente.

A la vez que se va terminando la soldadura se comprueba la geometría del codo y las juntas soldadas procediendo a colocar tirantes exteriores al blindaje anclados al concreto del foso y troquelando interiormente el codo para que el blindaje pueda resistir las fuerzas generadas por la presión del concreto en la etapa de colados del tubo. Adicionalmente en toda la superficie exterior del codo se sueldan anclas pequeñas a cada 30 cm, en ambas direcciones con la finalidad de ligar a ellos el acero de refuerzo del armado del tubo y aumentar la adherencia con el concreto.

Cuando se ha terminado completamente la soldadura y la inspección de las juntas, se realiza un levantamiento general de la estructura y se verifica su configuración, cuidando que se guarden las tolerancias indicadas por el fabricante. En este momento la obra civil recibe el codo del tubo y la nariz para realizar los segundos colados de los mismos.

#### IV.2.1.4 Segundos colados del tubo de aspiración.

La disposición del acero de refuerzo mostrada en la fig. IV.5 nos da idea de la magnitud de

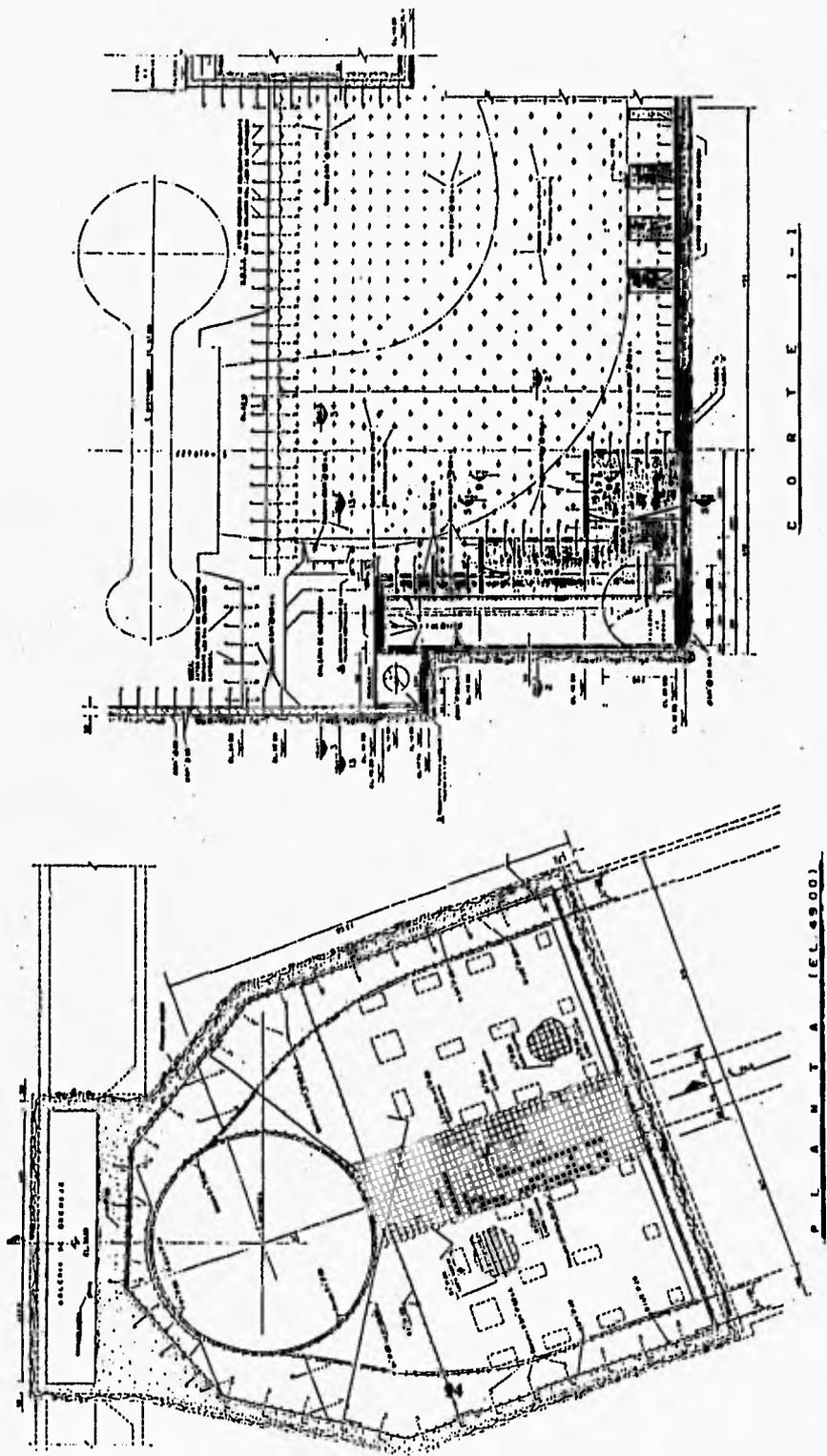


FIG. IV.5 SEGUNDOS COLADOS DEL TUBO DE ASPIRACION.

las fuerzas actuantes causadas por la presión del agua en ésta zona y por las cargas estáticas que se transmiten. El segundo colado de tubo de aspiración se efectúa siguiendo las instrucciones del proveedor de la turbina en cuanto al número de etapas y altura de cada alzada de concreto, vigilando topográficamente la posición del centro y elevaciones en los puntos indicados en el registro del protocolo de control de calidad.

Después del colado y curado del mismo se anotan los datos en un registro, como protocolo de recepción del mismo y se proceden a soldar las tapas de los agujeros en el tubo que sirvieron para vibrar el concreto durante el colado.

#### IV.2.1.5 Instalación del cono inferior y superior del tubo de aspiración.

El cono inferior puede ser preensamblado en los patios exteriores de casa de máquinas, mientras se llevan a cabo los segundos colados del tubo de aspiración. Posteriormente se traslada a sitio para su montaje. En el proceso de preensamble se unen los sectores que forman el cono y se da la forma geométrica adecuada atornillando verticalmente los sectores dejándolos sin soldar. Una vez que se recibe el codo del tubo de aspiración ya embebido en el concreto de los segundos colados se procede a ajustar la parte superior conociendo ya las dimensiones reales del cono, cortando el sobrematerial del primero, después se prepara el bisel y se colocan "sietes y setas" a cada 30° en el codo para ajustar las secciones con cuñas. Cuando esto se logra se checa la nivelación, el centrado y la geometría de la sección de entrada al cono (ajustándola hasta que esté dentro de las tolerancias especificadas), después se procede a soldar las uniones verticales diametralmente opuestas controlando siempre las deformaciones que sufra la pieza al aplicarle el calor de la soldadura. Una vez terminadas las uniones verticales se suelda la junta horizontal con soldadores ubicados diametralmente opuestos para controlar la variación de nivel en la parte superior de la pieza (cono) y se revisan las soldaduras según la norma ASME. Al terminar, se presenta el cono superior, previamente ensamblado y soldado, para hacer el ajuste necesario con la parte superior del cono inferior. Ya trazado el corte para ajuste, se retira y se hace éste preparando además el bisel para su unión. Después se coloca nuevamente en su sitio, checando el centrado y se efectúa la unión horizontal de los conos inspeccionando la soldadura. Finalmente se colocan tirantes y troqueles exteriores e interiores para rigidizar la estructura durante la etapa de colados finales del tubo de aspiración.

#### IV.2.1.6 Colados del cono del tubo de aspiración y bases de antedistribuidor-carcasa.

Estos colados marcan el final de la primera etapa de montaje de la turbina, que es la que se refiere a la infraestructura asociada al desfogue del agua que ha sido turbinada. Quedando únicamente pendiente lo relativo a los tratamientos posteriores de inyección de contacto y consolidación placa-concreto en las zonas de difícil acceso en donde el concreto no rellenó espacios, para lo cual se barrenan las placas y se inyecta concreto fluido a presión garantizando el completo empaque de la estructura. También se marca el inicio de una segunda etapa de

montaje ya que en el mismo colado se construyen los cimientos del antedistribuidor y la carcasa espiral. Estos cimientos se presentan en la fig. IV.6, donde destaca la geometría del apoyo del antedistribuidor y la disposición en planta de las columnas cortas que dan apoyo a la carcasa. Ambos sistemas están diseñados para resistir las cargas gravitacionales y dinámicas que se pueden generar durante y después del montaje y las transmiten al concreto reforzado del tubo de aspiración. De ahí la naturaleza de los armados que se presentan.

#### *IV.2.2 Tuberías empotradas.*

Las diferentes tuberías empotradas se instalan de acuerdo a las etapas de colados y al montaje de los elementos donde éstas se conectan, uniendo elementos aislados hasta tener tuberías completas según diseño, cuidando siempre cumplir con los requisitos indicados del proveedor de la turbina. Todas las tuberías se limpian y se preparan para su montaje y una vez montadas se tapan temporalmente para protegerlas del concreto en las etapas de colado. Algunas de ellas se someten a presiones mayores a las de condiciones de trabajo como prueba de las soldaduras efectuadas. (Ver cap. II).

#### *IV.2.3 Montaje del antedistribuidor de la turbina.*

El montaje del antedistribuidor en su sitio se realiza una vez que la obra civil termina los colados del cono del tubo de aspiración y los cimientos y bases para el antedistribuidor y carcasa. Mientras estos colados terminan, el antedistribuidor se arma en la playa de montaje de casa de máquinas ya que debido a su peso ya completo no es posible armarlo en patios exteriores. En la obra sólo es posible levantarlo completo con la grúa viajera de 405 T.

Cada sector se coloca individualmente estrobado de tres puntos para tener la posibilidad de hacer la maniobra con la pieza nivelada colocándola sobre las cuñas dispuestas previamente en unas bases fijas temporales en el piso de playa de montaje. Después de colocar la primera pieza y hacer los ajustes necesarios para su nivelación, se coloca el siguiente cuarto de antedistribuidor para unir bridas mediante los pernos aún sin apretar y así sucesivamente la tercera y cuarta pieza. Cuando se tienen las cuatro piezas del antedistribuidor en playa de montaje se procede a nivelar todo el conjunto en función de sus bridas superior e inferior y checando la excentricidad de la circunferencia. Se debe tener especial cuidado en que los empalmes de la pieza queden perfectamente paralelos en todos sus puntos para evitar esfuerzos y tensiones después de apretar los pernos en las uniones. Finalmente se realiza el apriete siguiendo las instrucciones del supervisor de fábrica, dándoles el torque requerido. Una vez apretados los pernos se procede a afinar nuevamente la alineación y nivelación según el diseño.

Cuando los colados de las bases están terminados y se ha alcanzado la resistencia adecuada del concreto, se procede a instalar el antedistribuidor en su sitio y a fijarlo a su cimiento mediante espárragos formados a su brida inferior. El izaje del antedistribuidor se lleva a cabo

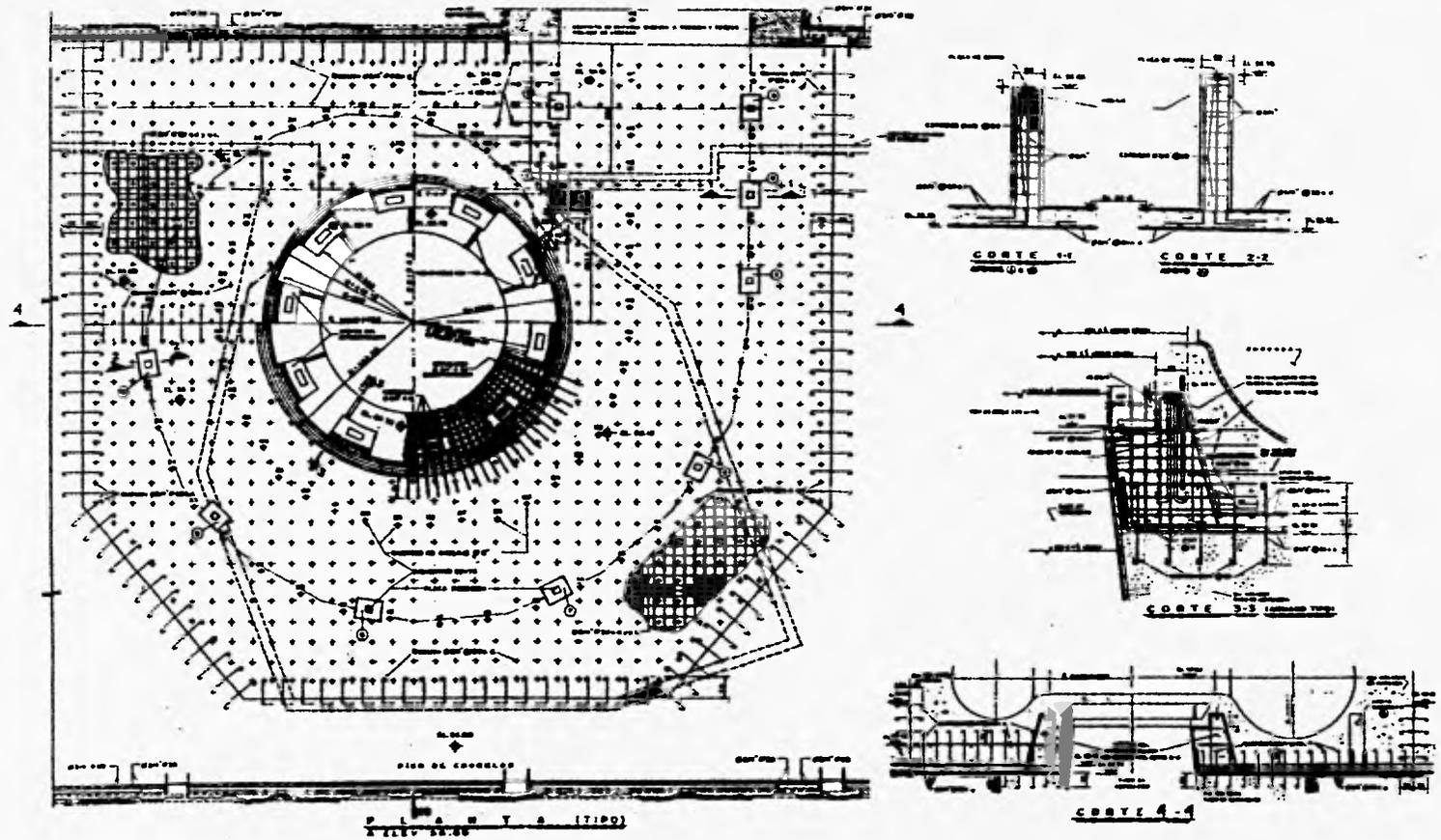


FIG. IV.6 PRIMEROS COLADOS DE ANTEDISTRIBUIDOR-CARCASA ESPIRAL.

estrobándolo en 4 puntos interiores del anillo, para ello la pieza trae de fábrica unas orejas soldadas que permiten realizar la maniobra con un buen margen de seguridad. Se levanta con la ayuda de la grúa de 405 T. y se desplaza hasta su sitio, descendiendo lentamente y quedando suspendido a unos cuantos centímetros sobre su base para centrarlo correctamente respecto a los ejes "x" y "y" de la unidad. La maniobra se realiza con una brigada de topografía y de montaje colocada alrededor del foso para controlar en todos sus puntos la pieza. Ya centrado, el antedistribuidor desciende totalmente sobre su base y se apoya sobre unas cuñas y los espárragos, por medio de los cuales se ajusta el centrado y se nivela a la cota de diseño toda la pieza (fig. IV.7). Terminados estos trabajos que suelen llevar dos ó tres días se sueldan los empalmes con soldadores distribuidos en forma simétrica siguiendo el procedimiento según la norma ASME para aplicaciones de inspección y por último se checa y ajusta en caso de ser necesario la posición del conjunto fijándolo con soldadura posteriormente a las cuñas, espárragos y barras.

#### *IV.2.4 Montaje en sitio de la carcasa espiral.*

Dentro del proceso de montaje de la turbina, la carcasa espiral es el componente que consume el mayor número de horas hombre de trabajo (15,000-20,000) en su armado en sitio y en sus pruebas correspondientes de control. Todo el proceso puede dividirse en seis etapas, a saber:

1. Ensamble del caracol.
2. Soldadura del caracol.
3. Soldadura carcasa-antedistribuidor.
4. Prueba hidrostática.
5. Segundos colados de carcasa.
6. Despresurización de carcasa y montaje del manguito de unión (secciones No. 2 a 6 de carcasa) con la tubería de presión.

##### *IV.2.4.1 Ensamble del caracol.*

Cuando se ha terminado la alineación y nivelación del antedistribuidor se presentan en él las secciones que forman las virolas de carcasa de acuerdo con la secuencia mostrada en la fig. IV.8. Con ésta secuencia de montaje se busca equilibrar en todo momento las cargas a que se somete el antedistribuidor para disminuir las desnivelaciones del mismo. Por otra parte es posible realizar el montaje simultáneamente en casi los 342° grados del caracol. Para ello se definen claramente cuatro zonas de montaje:

- I. Es la zona de arranque del montaje (a), con la secuencia de virolas No. 26,25,24,23,22,21 y 20, delimitada por el espacio para la sección de ajuste No. 19. El sentido de ensamble es

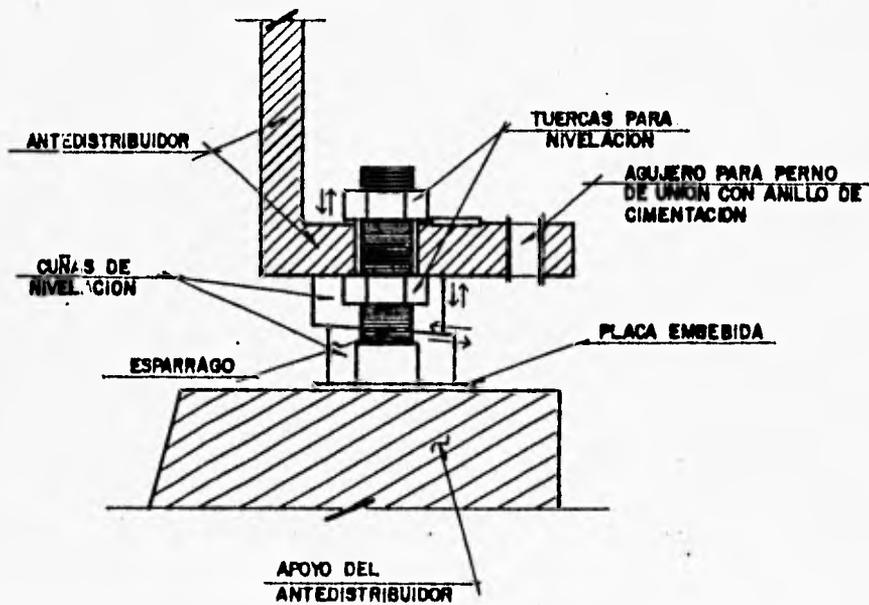
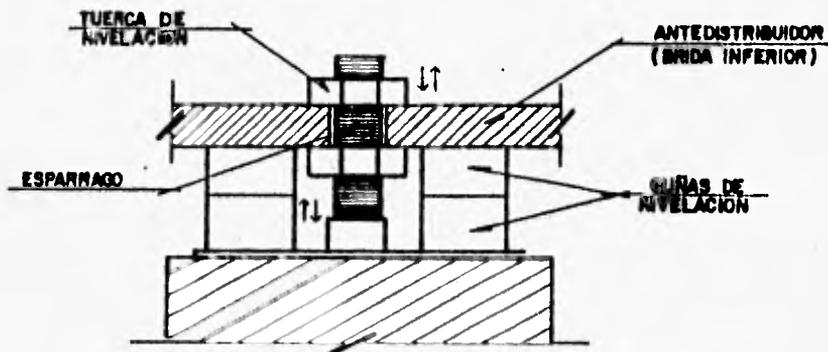


FIG. IV.7 NIVELACION DEL ANTEDISTRIBUIDOR.

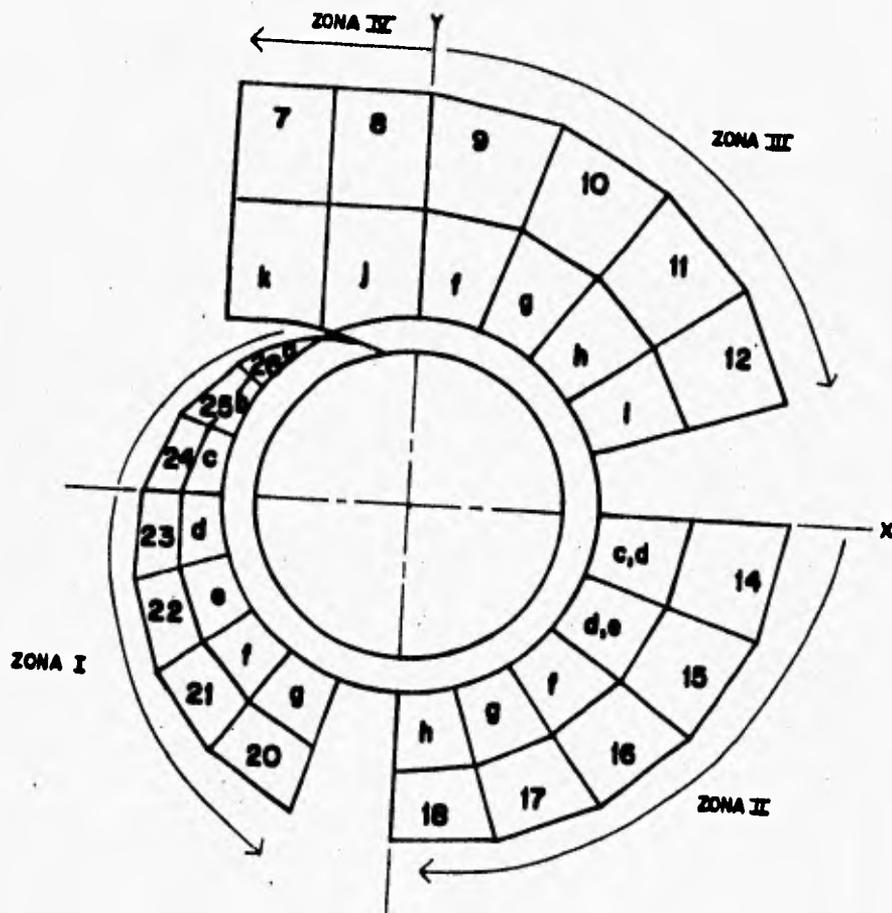


FIG. IV.8 SECUENCIA DE MONTAJE DE CARCASA.

contrario al giro de las manecillas del reloj.

II. Simultáneamente al montaje de la pieza 24 en la zona I, se comienza a montar la virola No. 14 en la zona II, con la secuencia 14,15,16,17 y 18 en el sentido de las manecillas del reloj, buscando la simetría mencionada en la distribución de cargas. Esta zona la delimitan las dos secciones de ajuste de carcasa que se montan hasta el final.

III. Los trabajos en ésta zona arrancan en tercer lugar y van desde la virola No. 9 con la secuencia 9,10,11 y 12.

IV. Finalmente se completa el montaje, (quedando pendientes las secciones de ajuste No. 13 y 19) con las secciones de entrada a la carcasa 8 y 7.

En la fig. IV.8, está marcada con letras la secuencia de montaje; la numeración corresponde a las secciones desde la entrada de carcasa a la terminación del pasaje hidráulico de la misma. El orden de ensamble establecido, si bien no evita desviaciones en el centrado y nivelado del antedistribuidor, sí reduce de manera importante los trabajos finales de ajuste, una vez que ha sido terminada la soldadura de toda la carcasa. En cada zona de montaje, especialmente en la I, es muy importante verificar la posición de la primera virola, ya que de ella depende la correcta posición también de las demás. Todo el procedimiento de ensamble debe cumplir con las siguientes especificaciones:

1. Las luces ó separaciones en los empalmes para la unión entre virolas y para la unión virolas-antedistribuidor, no deben exceder de 3 mm.
2. El ensamble de cada siguiente virola se realiza después de soldar totalmente las costuras longitudinales (en el caso de las virolas que vienen de fábrica en dos ó tres placas y que así fueron bajadas a su posición).
3. Las juntas ó soldaduras de unión de las secciones de carcasa se realizan en la secuencia siguiente:
  - a) Soldadura de las juntas longitudinales. (Unión de las partes de virolas en una sola).
  - b) Soldadura de las juntas radiales. (Unión de las virolas para formar la carcasa).
  - c) Las secciones 19 y 13, de ajuste, se montan después de la soldadura de todas las costuras longitudinales y radiales, cuando las deformaciones térmicas del conjunto han cesado. Después se soldan.
  - c) Soldadura de las juntas circulares. (Unión de las virolas al antedistribuidor).

Establecida la secuencia de trabajos, el montaje en sitio de cada virola se realiza de manera

sencilla, con la ayuda de la grúa viajera y los dispositivos de izaje que tienen soldados las secciones. La fig. IV.9a muestra un arreglo típico de los elementos auxiliares de refuerzo y sujeción para transporte y maniobras. Estos elementos rigidizan y evitan deformaciones de las placas de acero durante su izaje y montaje.

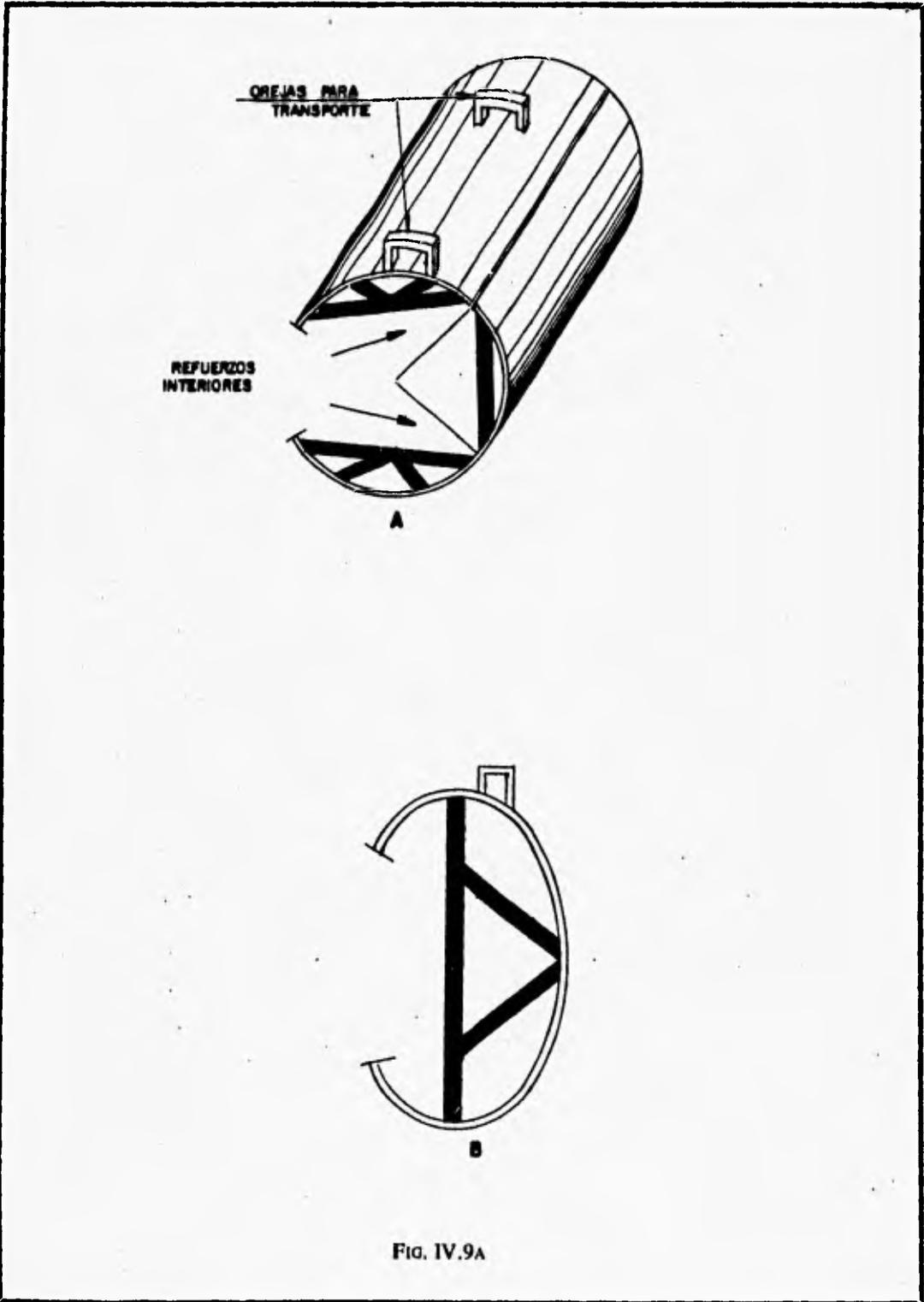
Previo al izaje de cada virola se colocan en el piso (elev. 53.15) los gatos y tensores necesarios para ajustar la pieza a la altura de proyecto. El centro de cada sección de carcasa debe coincidir con el eje horizontal del distribuidor. (fig IV.9b). Una vez colocados y preparadas las bases para soportar la virola, ésta es trasladada con la grúa a su posición y recibida por los soportes principales de concreto reforzado. Una vez abajo y sin retirar la grúa, la pieza se centra, se nivela con ayuda de los gatos y tensores, y además se conforma y se ajusta con las bridas superior e inferior del antedistribuidor y con la virola adyacente procurando cumplir con las separaciones entre placas especificada, cuidando la geometría de diseño. En caso de existir sobrematerial, éste se corta. En relación a la curvatura de la placa, es importante vigilar la unión de las secciones, en las cuáles se utilizan "sietes" y cuñas para conformar los lados adyacentes de las dos secciones en cuestión.

#### IV.2.4.2 Soldadura de la carcasa.

En cuanto el avance de armado lo permita y con acuerdo del supervisor del fabricante se puede iniciar la soldadura de placas para conformar virolas (soldadura longitudinal). Dadas las dimensiones que alcanzan las virolas más grandes de la carcasa, fué necesario transportarlas en segmentos circulares de placa y hacer su unión en campo. Una secuencia de unión adecuada de éstas placas se presenta en la fig. IV.10a. Ya ensamblada y punteada la pieza, con dos grupos de soldadores (soldador y ayudante), uno situado en el punto de arranque "A" y soldando en dirección de "B". El otro grupo con arranque en "D" hasta alcanzar el punto "C". Ambos grupos trabajando en forma simultánea, de tal forma que el calentamiento en las placas por efecto de la soldadura sea lo más simétrico posible.

Siguiendo el mismo procedimiento se realizan todas las costuras longitudinales de las virolas que están conformadas por dos ó tres placas. Cuando éstas están terminadas entonces se puede comenzar con la unión de virolas (soldaduras radiales ó circunferenciales) para conformar todo el caracol. La fig. IV.10b muestra el procedimiento utilizado para realizar ésta junta.

Comenzando simultáneamente la soldadura en las juntas diametralmente opuestas (1), con dos grupos de trabajo, uno en la dirección de "A" a "B" en la superficie exterior (bisel externo) de la cámara y otro de "D" a "C" sobre la superficie interior (bisel interno). Las costuras (2) pueden realizarse simultáneamente a las (1). Las flechas indican la superficie y la dirección en la que se realiza la junta. Terminadas éstas uniones, el grupo de trabajo en (1) realiza las soldaduras (3), y el grupo en (2) se pasa a hacer las uniones en (4). Análogamente a las soldaduras longitudinales, éste procedimiento contribuye a regular y controlar las deformaciones térmicas de las placas y aprovecha eficientemente la mano de obra.



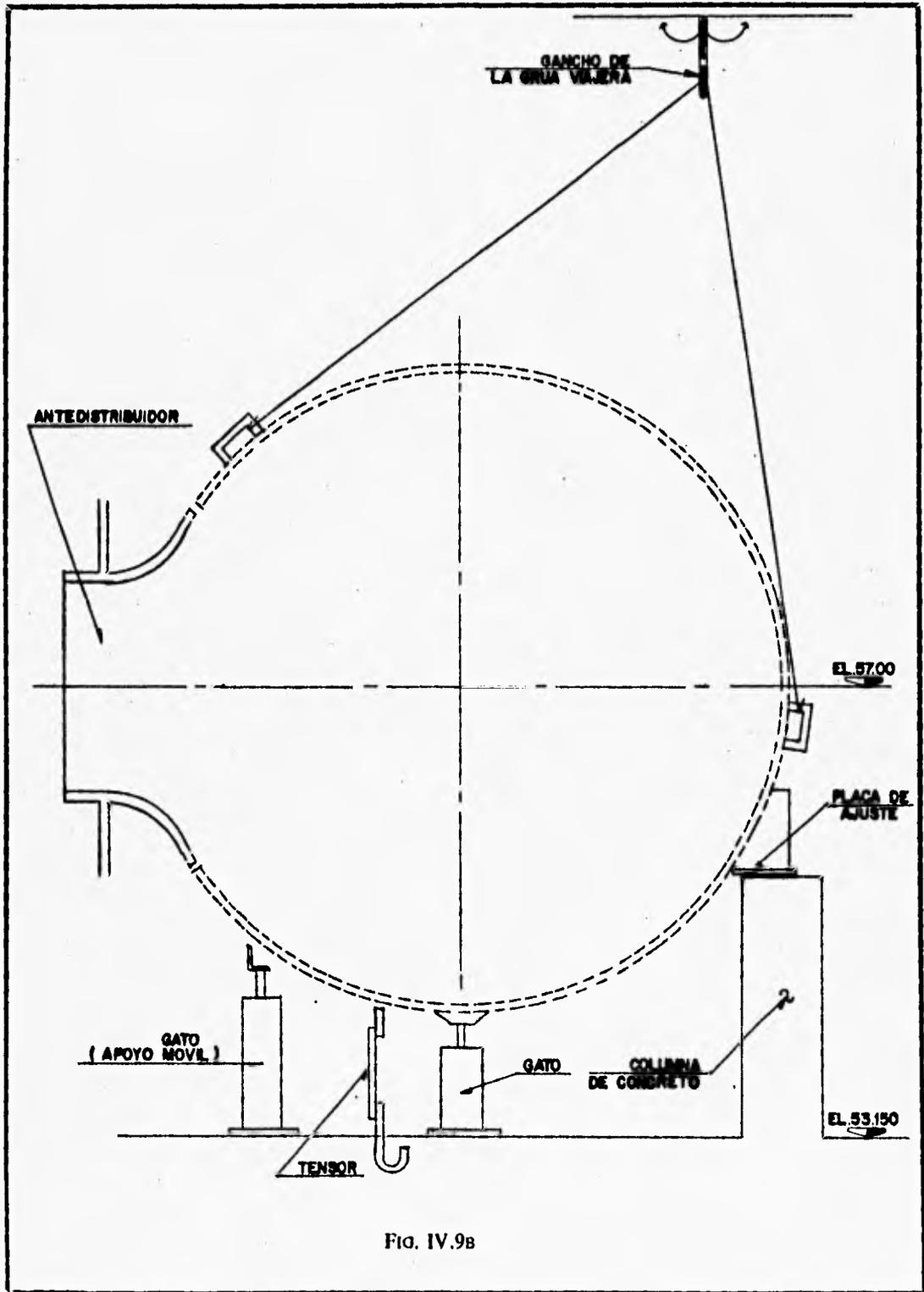


FIG. IV.9B

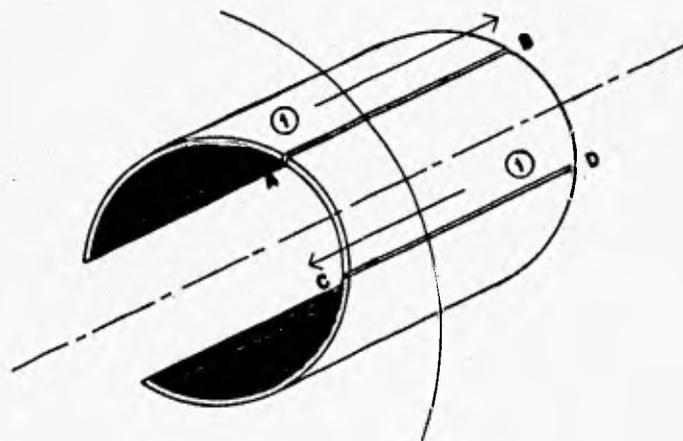
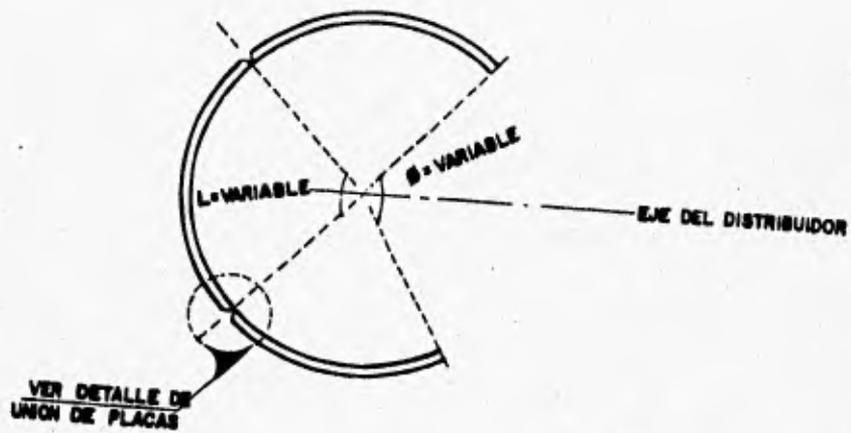


FIG. IV. 10A JUNTAS LONGITUDINALES DE VIROLAS.

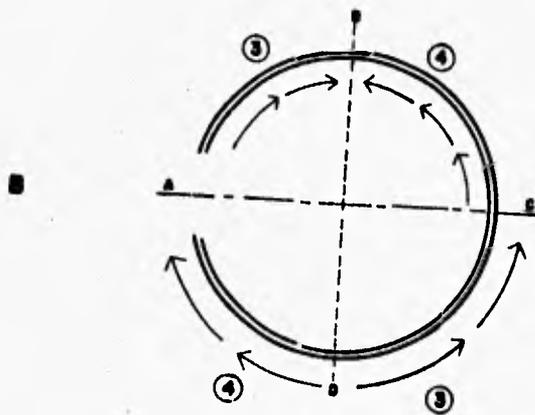
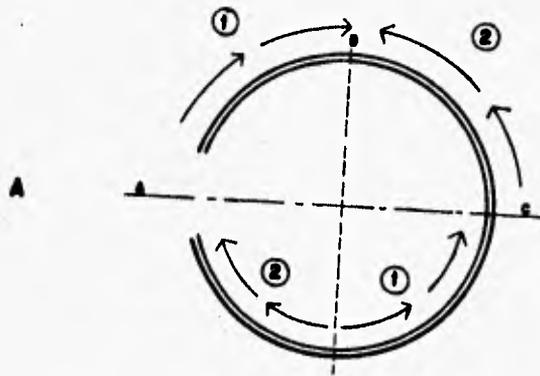


FIG. IV.10b JUNTAS RADIALES ENTRE VIROLAS.

Una vez finalizados los trabajos de soldadura radial de las secciones de carcasa, de la No. 7 a la No. 26, excepto secciones 19 y 13, y después de que como consecuencia del montaje y la soldadura, las deformaciones térmicas de la estructura han cesado, se procede a hacer un levantamiento de la geometría que tienen los espacios destinados a las secciones de ajuste del caracol (19 y 13). Hasta éste momento, la estructura del conjunto vista en planta es la siguiente:

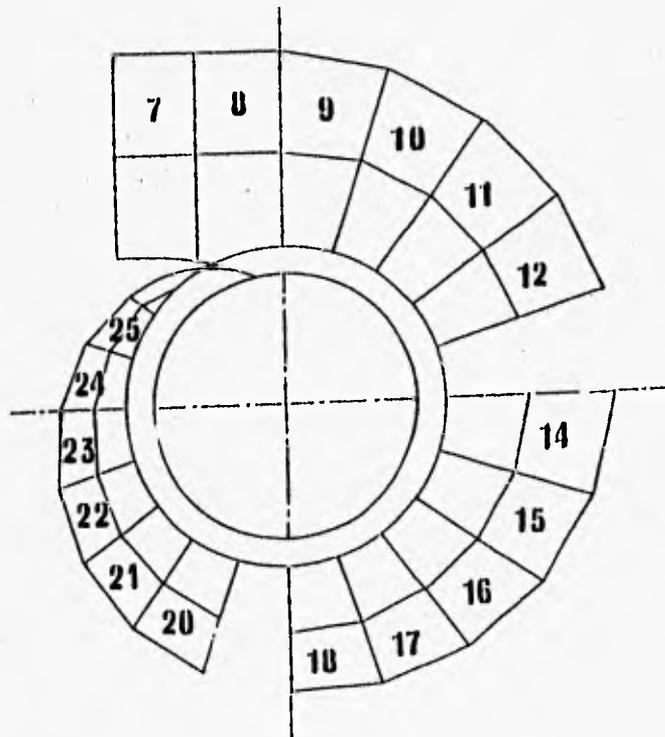


FIG. IV.11

Estas secciones están fabricadas con exceso de material, de tal modo que pueden ser recortadas y adaptadas en campo, de acuerdo con las necesidades de espacio y ajuste de la carcasa espiral, compensando y absorbiendo los posibles errores en el resto del montaje. El procedimiento de montaje y soldadura es similar al descrito anteriormente.

#### IV.2.4.3 Soldadura de unión carcasa-antedistribuidor.

De especial cuidado resultó ser esta junta para las partes empotradas de turbina de las máquinas de Aguamilpa. En el capítulo V se abordan los detalles técnicos del control de calidad asociado a las costuras de fábrica del antedistribuidor y costuras de campo con la carcasa. Respecto al procedimiento utilizado para llevar a cabo la soldadura de unión, la fig. IV.12 hace alusión a la secuencia de trabajo seguida para controlar satisfactoriamente las deformaciones, expansiones y contracciones del material de la carcasa y del antedistribuidor. Se puede realizar la junta hasta con ocho grupos de trabajo, cuatro en el anillo superior y cuatro en el anillo inferior del antedistribuidor, comenzando en los puntos A,B,C,D y A',B',C' y D' según la secuencia indicada en la fig. IV.12. Obsérvese que el calentamiento de la estructura siguiendo ésta secuencia, es en todo momento simétrico respecto a los tres ejes coordenados. Sin embargo resulta interesante destacar que el calor generado en las zonas de entrada del flujo en la carcasa (aguas arriba), es menor que al final de la cámara, puesto que las virolas más grandes son capaces de disipar mayor cantidad de calor en su superficie por contar con mayor área y volumen de material.

Durante todo el proceso de soldadura es muy importante controlar la horizontalidad del anillo superior del antedistribuidor para corregir en función de ello la aplicación de calor y alterar lo menos posible la geometría de la brida superior, ya que posteriormente a ella se adapta el tapón cilíndrico para prueba hidrostática de carcasa y después la tapa superior de la turbina. De otra forma la pieza se tiene que someter a un maquinado para corregir la planicidad y excentricidad de la circunferencia.

Cabe aclarar que desafortunadamente ésta soldadura tuvo deficiencias en su aplicación, tanto en el precalentamiento y postcalentamiento de placas como en el manejo de electrodos convirtiendo la regulación de la temperatura y el control en los niveles de esfuerzos residuales en la soldadura en el problema clave para llevar a buen fin y en buen tiempo el montaje de toda la turbina, puesto que no se siguieron oportunamente las normas ASME especificadas para este tipo de instalaciones. (Ver cap. V).

Terminadas todas las soldaduras de la carcasa-antedistribuidor se colocan los nervios ó atiesadores de la cámara espiral que se empalman con los anillos superior e inferior del antedistribuidor (fig. IV.13), se ajustan en sitio y se sueldan para proceder con la prueba hidrostática.

Finalmente y con miras a realizar el ensayo hidrostático de carcasa se deben cortar todos los elementos auxiliares de transporte y apoyo para el ensamble y soldadura de placas tanto en el interior como en el exterior de la cámara, amolando perfectamente los lugares en donde se aplicó soldadura provisional, hasta lograr una superficie lisa. Además todas las tuberías que se conectan a la carcasa, como desagüe, tuberías para dispositivos de medición, etc. así como la entrada hombre, deben ser preparadas en sitio. Con soplete se hacen las perforaciones a la placa y posteriormente se acoplan las tuberías respectivas y la puerta hermética de la escotilla.

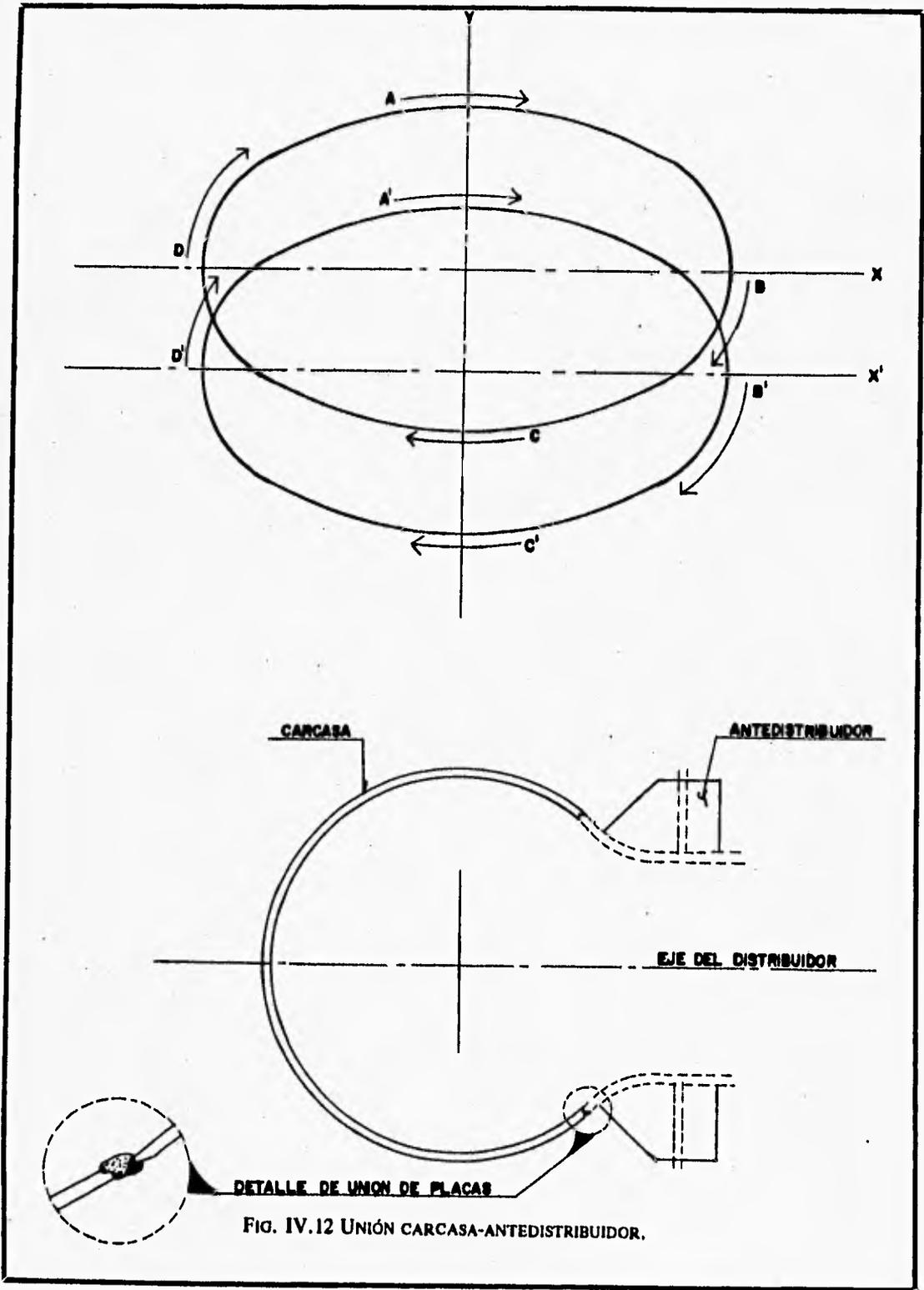
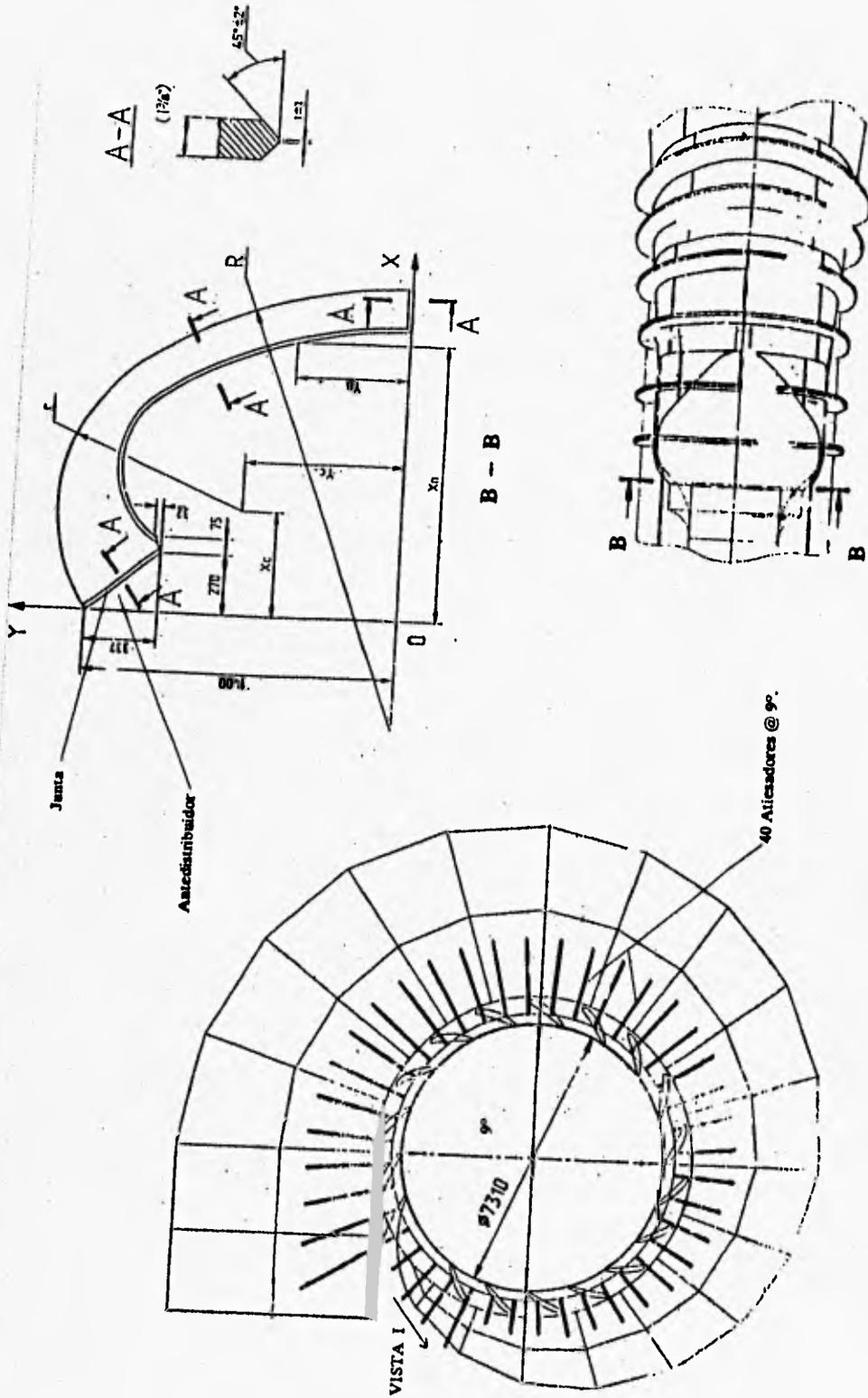


FIG. IV.12 UNIÓN CARCASA-ANTEDISTRIBUIDOR.



VISTA I

FIG. IV.13 ATESADORES DE LA CARCASA ESPIRAL.

#### Montaje del anillo de cimentación.

Mientras se terminan los trabajos en la carcasa espiral, el anillo se ensambla en la playa de montaje ó en algún lugar cercano al foso donde pueda ser manejado con la grúa uniendo las dos partes que lo forman a semejanza del antedistribuidor mediante pernos y tuercas. Después cuando se han terminado los trabajos de soldadura en el antedistribuidor, se introduce al foso y se coloca en la brida inferior del mismo, centrando y nivelando según diseño y después fijándolo, pintando posteriormente la zona que quedará en contacto con agua. Por último se comprueba la posición horizontal de la brida del anillo, ya que sobre ella descansará provisionalmente la tapa cilíndrica para prueba hidrostática.

#### IV.2.4.4 Prueba hidrostática de carcasa-antedistribuidor.

Esta prueba se describe íntegra en el capítulo V secc. 5.

#### IV.2.4.5 Segundos colados de carcasa-antedistribuidor y montaje del forro del foso.

Después de finalizada la prueba hidrostática de carcasa y cuando se han verificado las condiciones de hermeticidad en la misma, se reduce la presión del agua en su interior hasta cero, y se retira el instrumental de medición de las deformaciones, así como provisionalmente, el equipo de bombeo instalado para el ensayo y se comienza la colocación de acero de refuerzo longitudinal y radial alrededor de toda la cámara espiral y el antedistribuidor. En la fig IV.14 se observa un detalle de las características del armado en la zona. La cantidad de acero está determinada por las grandes cargas que se transmiten y con las cuáles se hizo el diseño estructural. Dichas cargas se presentan en la fig. IV.15.

Es importante destacar que al colocar el acero de refuerzo, éste se debe desligar completamente de las placas que forman la carcasa, ya que ella está diseñada para que en condiciones de trabajo se dilate libremente y en condiciones de reposo no transmita cargas al concreto. Es por ello que al realizarse los colados, la cámara se vuelve a presurizar (con la presión de trabajo) y se mantiene así los días necesarios hasta que el concreto adquiere su resistencia. Por ésta razón toda la superficie exterior de la carcasa debe dejarse libre de elementos que pudieran estar soldados a ella, tales como varillas, sietes y cuñas de ajuste, etc. esmerilando todas las imperfecciones y dejando una superficie lo más lisa posible, ya que de ejecutarse el colado sin eliminarlas, éstas pueden actuar como puntos de concentración de esfuerzos en la placa cuando la carcasa se dilata en condiciones de trabajo.

Paralelamente al proceso de habilitación y colocación de acero, se arma y se coloca en sitio el forro del foso de la turbina que queda ahogado, al igual que las tuberías empotradas, en los segundos colados de carcasa. El revestimiento del foso de la turbina puede ser armado en sitio

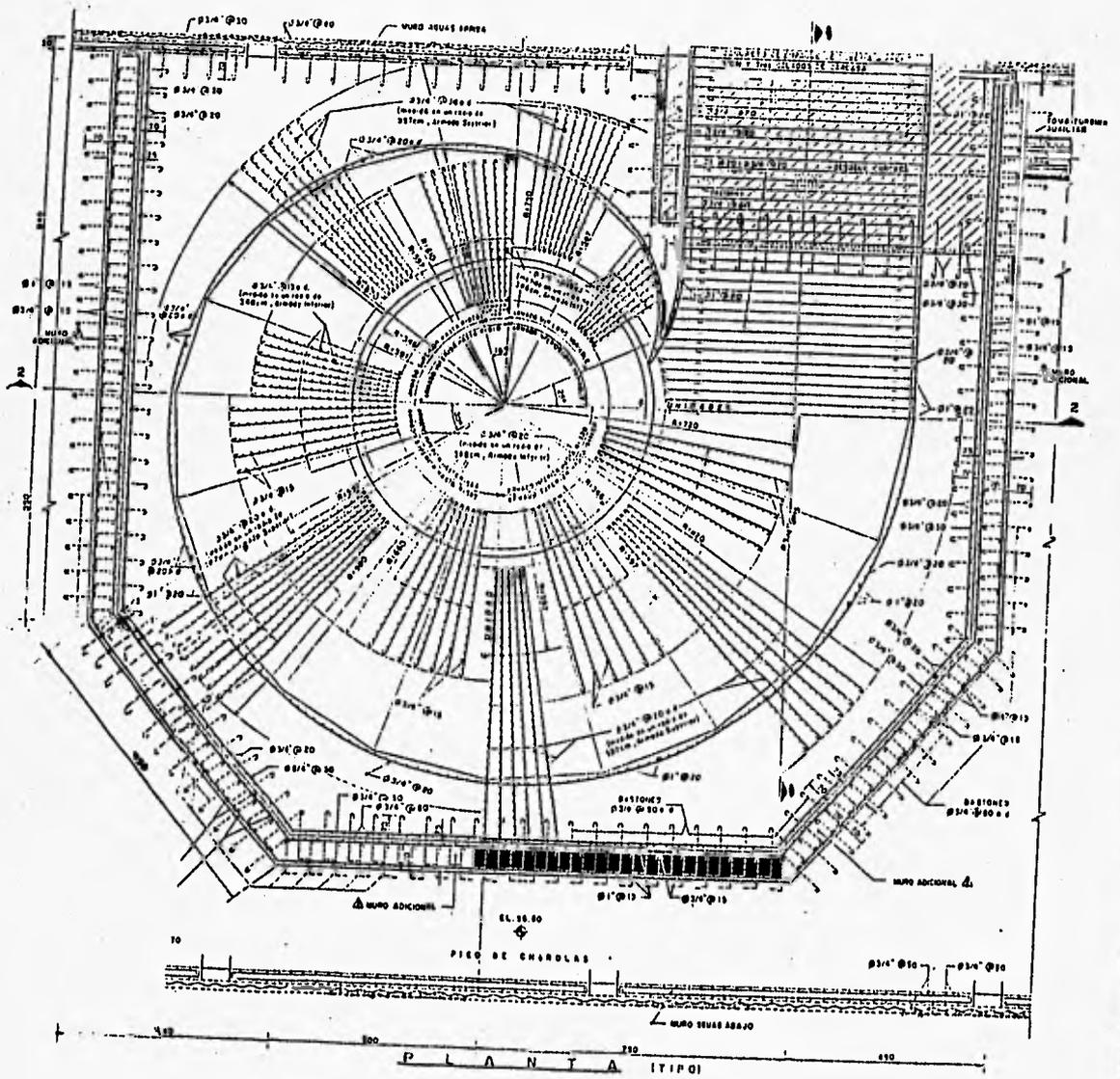


FIG. IV.14A SEGUNDOS COLADOS DE CARCASA-ANTEDISTRIBUIDOR.

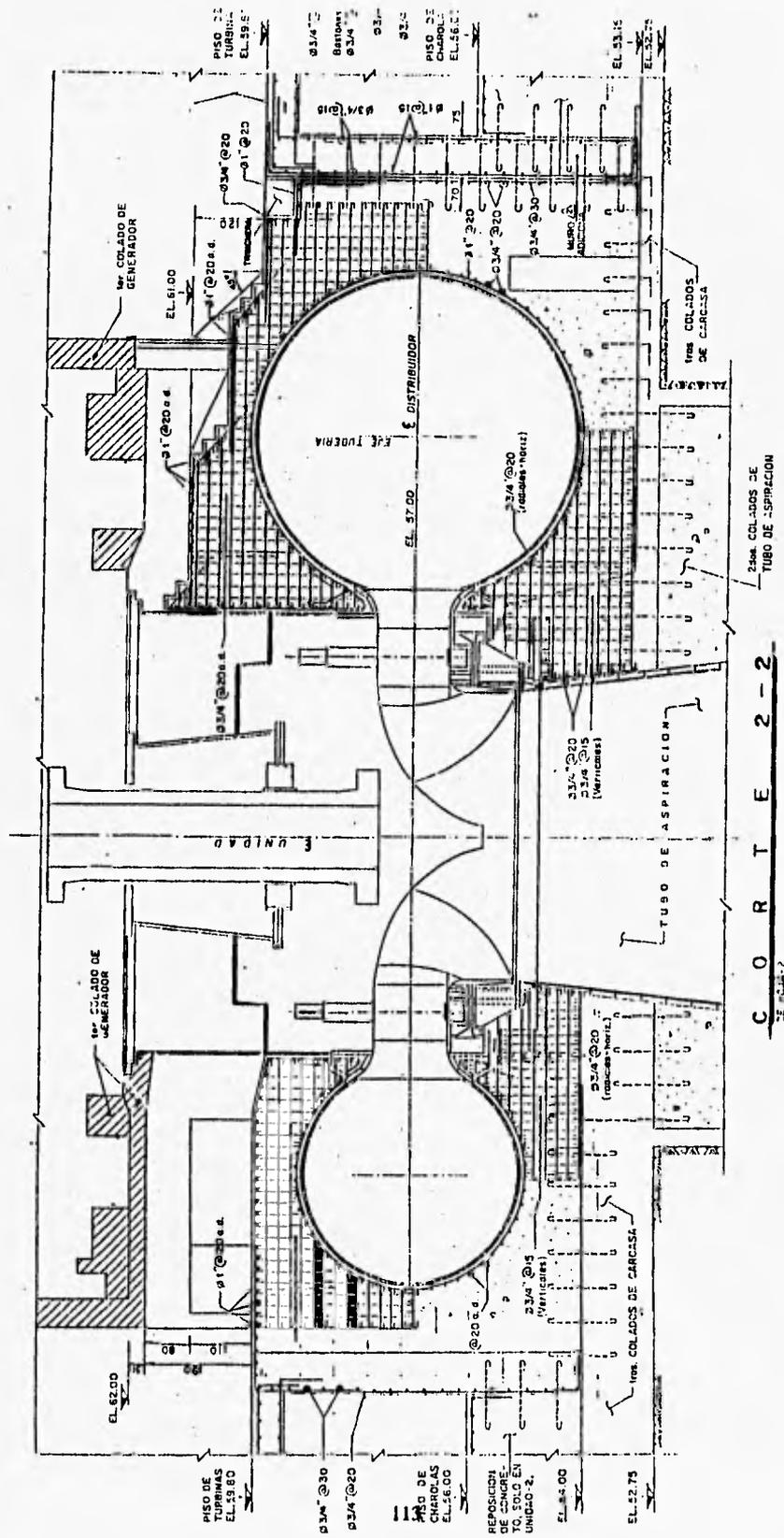


FIG. IV.14B.

<b>Carga</b>	<b>Peso (ton)</b>	<b>Presión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Peso del antedistribuidor.</b>	<b>190</b>	
<b>Peso del anillo de cimentación.</b>	<b>22.8</b>	
<b>Peso de la carcasa espiral.</b>	<b>240</b>	
<b>Peso del rotor de la turbina.</b>	<b>170</b>	
<b>Peso del distribuidor.</b>	<b>200</b>	
<b>Empuje hidráulico axial en el rodete.</b>	<b>700</b>	
<b>Empuje hidráulico en la tapa de turbina.</b>	<b>-390</b>	
<b>Peso del agua en el antedistribuidor.</b>	<b>40</b>	
<b>Peso del agua en la carcasa.</b>	<b>650</b>	
<b>Presión en carcasa espiral.</b>		<b>16.50</b>
<b>Pulsaciones de presión en carcasa espiral.</b>		<b>0.50</b>
<b>Presión en el tubo de aspiración, abajo del rodete.</b>		<b>0.75</b>
<b>Presión en el codo del tubo de aspiración.</b>		<b>3.00</b>
<b>Pulsaciones de presión en el tubo de aspiración.</b>		<b>0.50</b>
<b>Esfuerzo en el concreto durante rechazo de carga con sismo.</b>		<b>6.00</b>
<b>Esfuerzo en el concreto en zona brida superior antedistribuidor. *</b>	<b>20</b>	
<b>Esfuerzo en el concreto en zona brida inferior antedistribuidor. *</b>	<b>75</b>	

\* Durante rechazo de carga con sismo.

FIG. IV.15 CARGAS QUE SE TRANSMITEN AL CONCRETO EN ZONA ANTEDISTRIBUIDOR-CARCASA.

ó prearmado en patios y montado posteriormente durante el habilitado de acero en la carcasa. Al prearmarlo se traza una circunferencia guía en el piso, se acoplan y se arman las piezas que forman el cilindro. Para ajustar los empalmes se utiliza un sistema tornillo-tuerca (fig IV.4b). Una vez ajustado y cuidando su configuración geométrica se realiza la soldadura de las juntas verticales. Antes de su transporte a sitio se rigidiza su interior con tirante y barras de acero.

Ya en sitio, el forro se monta en el anillo superior del antedistribuidor junto a los barrenos para acoplamiento de la tapa superior. Se centra respecto a los ejes "x" y "y" del foso y se realiza la soldadura del anclaje perimetral del forro con el acero de refuerzo de los segundos colados de carcasa. Es importante que en el momento del colado en la zona del foso, el forro esté debidamente troquelado en su interior ya que se pueden presentar deformaciones en su estructura debido al empuje del concreto. Cuando el revestimiento está instalado y antes de los colados en ésta zona, se deben trazar y hacer los barrenos y agujeros para las tuberías empotradas en ésta zona, correspondientes al sistema de agua de enfriamiento, inyección de aire para la operación como condensador síncrono, inyección de aceite, iluminación del foso, etc. Finalmente se instalan las bridas para unir con las tuberías y se sueldan al forro.

Es conveniente recalcar que los segundos colados se llevan a cabo hasta la sección No. 7, antes del tapón cónico de prueba hidrostática ya que en la zona de entrada, aguas arriba, se realiza un tercer colado, posterior a la despresurización de carcasa y a la unión con la tubería de presión (fig. IV.17).

Debido a las temperaturas que se pueden desarrollar en el concreto por el volumen de los segundos colados, es necesario ejecutarlos en etapas y además de tal forma que no sufra desnivelaciones el conjunto antedistribuidor-carcasa por el empuje del concreto. En la fig. IV.16 se muestra la altura de las dos alzadas de concreto en la zona, donde se ve que la primera llega a tener contacto con la placa de la cámara aún en la sección de menor diámetro. La segunda alzada envuelve completamente la cámara y da pauta para que por un lado se comiencen los colados del foso del generador y por otro, después de alcanzar su resistencia el concreto, se despresurize la carcasa, se corte el tapón cónico y se haga la unión de ésta con la tubería de presión (fig. IV.17).

#### IV.2.4.6 Despresurización de carcasa y unión con la tubería de presión.

Cuando el concreto de los segundos colados ha alcanzado el 80% de su resistencia como mínimo, se puede bajar nuevamente la presión en la cámara y retirar los tapones cónico y cilíndrico que se utilizaron en el ensayo, a fin de proceder a montar las secciones y el cono de unión con la tubería de presión. Antes del empaque de la carcasa y por limitaciones de espacio en la casa de máquinas, los conos (secciones de carcasa 2,3 y 4) así como la virola No. 5 se alojaron en su sitio en el túnel de la tubería de presión. El procedimiento inicial señalaba que al término de los segundos colados y después de retirar el tapón cónico, se preparaba el área para el montaje de conos y virolas comenzando el montaje y soldadura con la sección No. 6 y

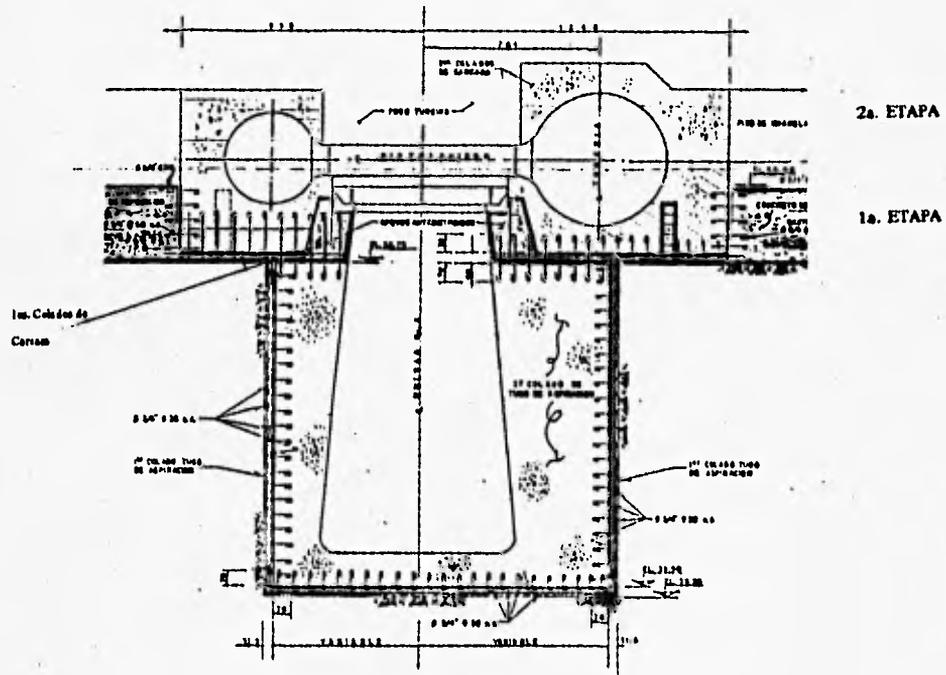


FIG. IV.16 ETAPAS DE COLADOS DE CARCASA ESPIRAL.

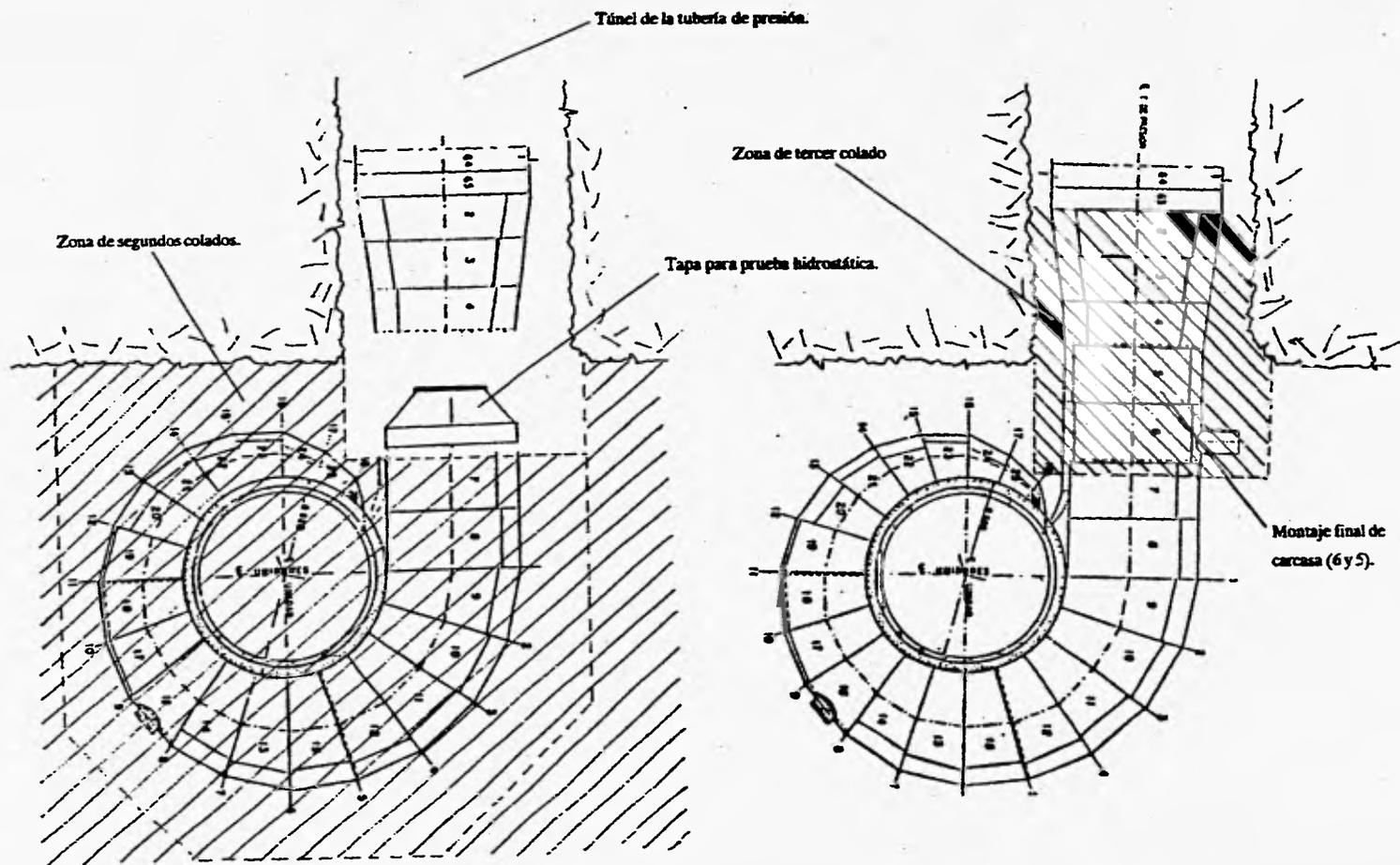


FIG. IV:17 SEGUNDOS Y TERCEROS COLADOS DE CARCASA.

la secuencia 5, 4, 3, 2 para hacer el cierre con la tubería de presión. La tecnología de ésta junta es especial, debido a las características que debe cumplir la soldadura de dos placas de acero diferentes. Debido al atraso en el montaje de la unidad que ocasionaron las reparaciones en el antedistribuidor, se decidió variar el procedimiento para recuperar parte del atraso. Dicha variación consistió en el montaje y soldadura de los conos 2, 3 y 4, incluyendo el empate a la tubería de presión, así como el montaje de la sección No. 5 con soldadura al cono No. 4. Todo ésto realizado durante la prueba hidrostática y el empaque de la carcasa. Terminados los colados, se realizó el montaje de la virola No. 6, soldándola primero a la No. 7 y haciendo el cierre final con la sección No. 5. Cabe señalar que no es recomendable intentar ganar más tiempo en el programa colando los conos antes de terminar la soldadura, ya que de ésta forma se tiene una mayor área de disipación de esfuerzos cuándo ésta se lleva a cabo.

Terminada la unión con la tubería de presión, se llevan a cabo los terceros colados de carcasa, ó segunda etapa de los segundos colados quedando totalmente empacada en concreto la misma y dando fin al montaje de las partes empotradas de la turbina.

#### *IV.2.5 Trabajos previos al montaje fino de la turbina.*

Como consecuencia de las elevadas temperaturas a las que estuvo expuesta la estructura del antedistribuidor durante la ejecución de la soldadura de unión con la carcasa y durante la reparación de los defectos en el metal (ver cap. V), se presentaron deformaciones permanentes en las bridas superior e inferior del mismo, tanto en su planicidad como en su excentricidad (diámetros), que estaban fuera de las tolerancias recomendadas por el fabricante. Por éste motivo fué necesario llevar a cabo un procedimiento de maquinado manual de dichas bridas consistente en pasar por las caras superior e inferior un esméril para rebajar las partes en donde el calor ocasionó una elongación permanente del material. Se coloca un compás en el centro de la pieza para corregir las excentricidades de la circunferencia hasta alcanzar la de diseño, y al mismo tiempo se revisa la planicidad con ayuda de un nivel mecánico de precisión, rebajando las zonas en donde se hace necesario un ajuste del plano teórico de las bridas. Es muy importante alcanzar las condiciones precisas de diseño ya que de ello depende el centrado posterior del anillo inferior y de la tapa superior del distribuidor de la turbina. El trabajo fué de mucho detalle, consumió casi 30 días (1,200) llevándose a cabo al despresurizar la carcasa y retirar la tapa cilíndrica de prueba hidrostática.

Al término del maquinado de las bridas del antedistribuidor y en su caso del anillo de cimentación, y durante los terceros colados de carcasa, es posible comenzar con los tratamientos de recubrimiento anticorrosivo en la superficie interior de la cámara espiral, antedistribuidor y tubo de aspiración. La especificación que rige la aplicación de recubrimientos es la CFE-85001 y 85002. Las partes en contacto con agua se pintan con una solución a base de alquitrán de hulla. El procedimiento es como se indica:

1. Sand-blasteo de toda la superficie utilizando granalla de acero, verificando el perfil

de anclaje (rugosidad), sobre la superficie. (3mm aprox.).

2. Limpieza completa de la superficie.

3. Aplicación neumática de pintura en dos capas de 200 micras c/u.

En éste proceso es importante controlar la presión del aire a la salida del equipo sand-blast, ya que se pueden presentar deficiencias en el perfil obtenido. Dicho perfil garantiza la adecuada adherencia del recubrimiento con el metal. Respecto al recubrimiento, es importante controlar la humedad relativa ambiente cuando éste se aplica y terminarlo para poder iniciar el montaje de los mecanismos de turbina.

La fig. IV.18 presenta las características de los recubrimientos especiales que debe llevar las diferentes partes de las turbinas, según la especificación de CFE mencionada.

### IV.3 Montaje de mecanismos.

#### *IV.3.1 Generalidades y secuencia del montaje.*

El montaje comprende el ensamble en sitio de los siguientes componentes:

1. Distribuidor.
2. Flecha y rodete.
3. Chumacera guía y sello de la flecha.
4. Sistema de suministro de agua, aceite, aire y accesorios.
5. Sistema del regulador de velocidad, tuberías y accesorios.
6. Liberación de flecha para recibir el rotor.

Las condiciones de avances de obra para que puedan iniciar las actividades de montaje de los mecanismos de turbina deben ser por lo menos las siguientes:

1. La obra civil de casa de máquinas debe estar terminada hasta el piso de excitadores, (foso del generador construido).
2. Los componentes tubo de aspiración, antedistribuidor y carcasa espiral ya deben tener su recubrimiento anticorrosivo.

#### **Trabajos preparativos para montaje.**

El lugar para llevar a cabo la limpieza y preparativos para montaje de los mecanismos, es la playa de montaje de casa de máquinas. Estos trabajos preparativos consisten principalmente en el desempaque de los embalajes de fábrica de los equipos, limpieza de componentes delicados

DESCRIPCION	LIMPIEZA PREVA	PRIMARIO	No. CAPAS	ESPEJOR (#)	APLICACION	ACABADO
Partes en contacto con agua.	Preparación con abrasivo a presión, a metal casi blanco. (Sand-blast).	Alquitrán de hulla.	2 (esperación ó brocha)	200	en sitio	-
Placas de apoyo embebidas en concreto.	Limpieza superficial simple.	lechada de cal.	1 (brocha)	-	en sitio	-
Partes en contacto con aire.	A base de fricción con esmeril, lijadoras, etc.	Cromato de zinc alquitrán óxido.	2 (esperación ó brocha)	30	en sitio	-
Partes con superficies maquinadas.	Limpieza superficial simple.	Orgánico de Zinc.	1 (esperación)	50	taller	Epoxipoli- amido.
Superficies de acoplamiento maquinadas.	Limpieza superficial simple.	Película protectora soluble, (grasa).	1	-	taller	-
Partes en acero resistente a la corrosión ó inoxidable expuesta al aire.	Limpieza superficial simple.	Capa protectora de plástico.	1	-	taller	-

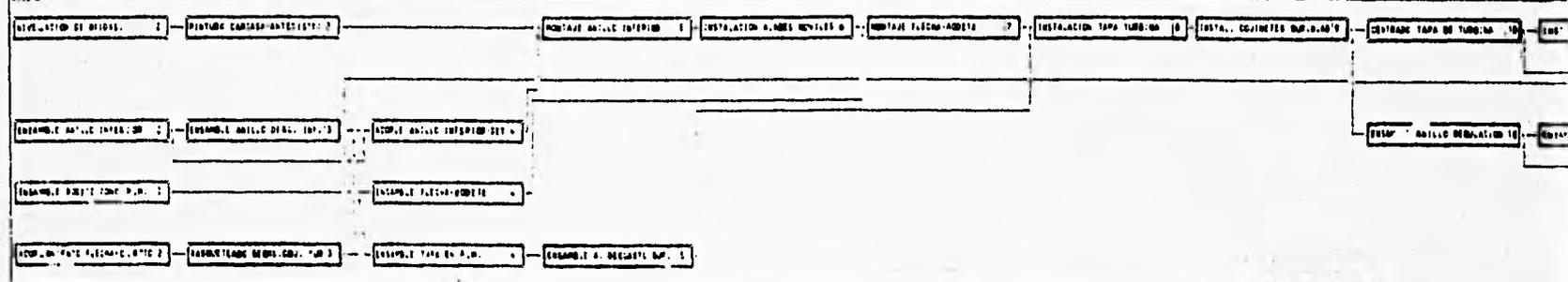
FIG. IV.18 RECUBRIMIENTOS ESPECIALES PARA PARTES DE TURBINA.

PROYECTO TECNOLÓGICO A.S. S.A.  
 Documento de Montaje de Reparación de Turbina.

APRO: VLS: MSL: TES: STC

Fecha: 15 de Septiembre 1993.

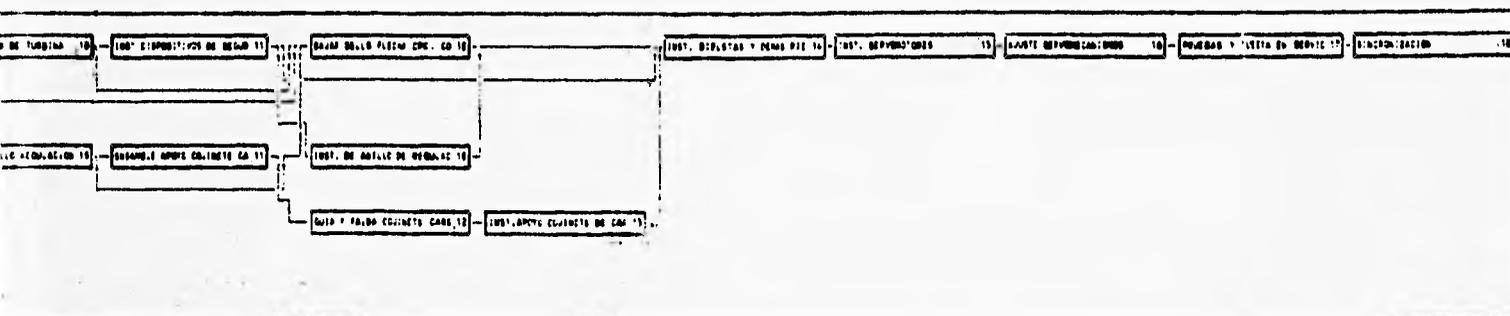
ORDEN



ORDEN

ORDEN

FIG. IV.19 SECUENCIA DE MONTAJE



... 10 11 12 13 14 15 16 17

... 10 11 12 13 14 15 16 17

SECUENCIA DE MONTAJE DE MECANISMOS DE TURBINA.

de gran peso y/o volumen y preparación de las piezas para la maniobra de montaje en sitio colocándoles orejas y/o dispositivos para su manejo cuando es necesario. Se habilitan estrobos de capacidad y dimensiones necesarias, se identifican y remarcan si es necesario, las marcas de fábrica para su correcta posición y se colocan bases provisionales de madera ó metal para descansar los componentes de cada pieza.

El montaje se realiza de acuerdo con la siguiente secuencia:

#### **IV.3.2 Distribuidor, 1a. etapa.**

En playa de montaje se desempacan y limpian los siguientes componentes del distribuidor:

- a) Piezas que forman el anillo inferior incluyendo pernos de acoplamiento y sellos.
- b) Bujes inferiores de álabes móviles.
- c) Recubrimiento inoxidable del anillo inferior con tornillería.
- d) Anillo de desgaste inferior con tornillería.
- e) Alabes móviles y bujes superiores con tornillería.

Con ayuda de un compás y revisando los empalmes de las dos secciones que los forman, se ensamblan y nivelan en playa de montaje el anillo inferior y el anillo de desgaste inferior, éste último así como los componentes b) y c) se acoplan al anillo inferior después de armado para conformar un sólo conjunto.

Simultáneamente a éstos trabajos de ensamble, en el foso de la unidad se hacen las siguientes preparativos:

- a) Armado de la plataforma de inspección en el tubo de aspiración, que no es otra cosa que un andamio en el foso para revisar los ajustes del montaje del anillo inferior y del rodete.
- b) Instalación de un compás con apoyos en lugares firmes independientes al antedistribuidor con el centro de giro ajustado al centro real de la unidad.

Cuando éstas actividades están terminadas, se traslada el anillo inferior ya vestido al foso de la turbina sobre el anillo de cimentación, centrándolo y nivelándolo con ayuda del compás y nivel de precisión, instalando la tornillería de sujeción. Posteriormente se montan en los nichos, los álabes móviles en posición de cierre para calibrar la luz entre las superficies de contacto de álabe con álabe. Se ajustan los sellos elásticos en los bujes inferiores, así como el recubrimiento inoxidable del anillo inferior y se revisa la luz entre las superficies adyacentes de giro del anillo y los álabes.

Entre tanto, en la playa de montaje se debe desempacar, limpiar y armar el escudo ó tapa

superior de la turbina, acoplándole el anillo de desgaste superior y aplicando posteriormente el recubrimiento anticorrosivo en las superficies perimetrales (donde va el sello elástico para evitar el paso del agua hacia la parte superior del foso).

#### ***IV.3.3 Acoplamiento flecha-rodete de la turbina.***

En paralelo con los trabajos del párrafo anterior, en playa de montaje pueden ser desempacados y limpiados el centro del rotor del generador, el cono de vórtice del rodete, el rodete y la flecha de la turbina.

La cara exterior de la corona y banda del rodete deben de pulirse perfectamente, a fin de obtener la distancia indicada entre ellas y los anillos de desgaste. Se verifican después las planicies de las bridas de unión con la flecha y con el cono de vórtice, eliminando las posibles abolladuras que puedan existir ocasionadas por el manejo y transporte de la pieza. Terminados éstos trabajos se realiza el acoplamiento rodete-cono. Mientras tanto se deben ejecutar los trabajos siguientes en el cuerpo de la flecha:

a) Rasqueteado y asiento de los cojinetes de la chumacera guía inferior. Esta actividad se lleva a cabo con la flecha acostada y consiste en deslizar cuantas veces sea necesario los segmentos de la chumacera sobre la superficie de la flecha, en la zona donde apoyan, a fin de adaptar la curvatura y el asiento (área de contacto entre placas), "rasqueteando" con gubias los posibles sobrantes de metal babbit en la cara interna del segmento para lograr el asiento adecuado. Todo ello se realiza con las superficies lubricadas en aceite.

b) Terminado el rasqueteado de todos los segmentos, la flecha se levanta y se coloca en posición vertical con su brida superior, sobre el centro del rotor del generador, es decir, de cabeza, para verificar la coincidencia de los barrenos de acoplamiento entre uno y otro. Esta rectificación se debe hacer en campo por que el fabricante del generador no es el fabricante de turbina y es en éstos barrenos donde ambos sistemas se unen. La inclinación del eje no debe exceder de 0.02 mm/m.

c) Después de la rectificación de barrenos, se levanta la flecha, se retira el centro del rotor (para comenzar con su armado) y se voltea, con el dispositivo de giro especial, descansándola en el piso.

b) Se arma y suelda en la flecha el delantal del tanque de chumacer guía.

d) Se instala sobre la brida inferior el collar con los sectores del sello de la turbina.

Al termino de los trabajos previos en el rodete y en la flecha, se hace el acoplamiento entre uno y otro, haciendo coincidir los barrenos de ambas bridas y verificando la planicidad en las



FIG. IV.20 ACOPLAMIENTO FLECHA-RODETE, CONJUNTO LISTO PARA BAJAR A SU POSICION.

mismas para realizar el empalme adecuado con los tornillos de unión.

Por otro lado, en el foso, cuando los trabajos de centrado y nivelación del anillo inferior, anillo de desgaste inferior y colocación de álabes está terminado se retira el compás y se monta el conjunto flecha-rodete con ayuda de la grúa de 405 T, apoyándolo temporalmente sobre unas calzas de acero en el anillo de cimentación, en la zona del ajuste con el cono superior del tubo de aspiración. Se levanta un poco de las calzas para centrarlo con respecto al anillo de desgaste inferior y se nivela auxiliándose con nivel mecánico de precisión sobre la brida superior de la flecha cuidando cumplir con las tolerancias admisibles. Es importante resaltar que el rodete, después de la verificación de su posición, debe quedar 25 mm por debajo de la cota de diseño (apoyado en las calzas) ya que posteriormente cuando se hace el acoplamiento definitivo en sitio de la flecha con el rotor del generador y al apretar los espárragos de unión entre ellos, se levanta todo el conjunto rodante de la turbina ésta distancia ajustando a la cota final de diseño.

#### *IV.3.4 Distribuidor 2a. etapa.*

##### **Calibración preliminar del conjunto.**

Cuando el conjunto rodante de la turbina está nivelado y centrado, y la tapa superior está armada en playa de montaje, ésta última se coloca sobre la brida superior del antedistribuidor, sin sus sellos elásticos. Se colocan los bujes superiores de los álabes móviles y se hace un centrado definitivo del conjunto (anillo inferior, anillo de desgaste inferior, anillo de desgaste superior, rodete-flecha y tapa superior), teniendo especial cuidado de que los bujes superior e inferior de los álabes móviles sean colineales y permitan a éstos un libre giro no existiendo obstrucciones entre las partes superiores e inferiores de los mismos álabes con la superficie superior del anillo inferior y la superficie inferior de la tapa superior respectivamente.

Cuando se tiene el centrado definitivo se anotan las dimensiones reales de las luces ó espacios existentes entre:

	<u>Valores límite.</u>
anillo inferior - antedistribuidor	0.3 a 0.35mm
anillo de desgaste inferior - rodete	2 a 2.5 mm
anillo de desgaste superior - rodete	1.5 a 2 mm
álabes móviles - anillo inferior	0.8 a 1.4 mm
álabes móviles - tapa superior	0.5 a 1.0 mm
tapa superior - bridas del anted. (vertical).	0.3 a 0.35mm

Después de las calibraciones y mediciones anteriores y una vez que se cumplan con las holguras especificadas por el fabricante, se procede a efectuar la perforación y rimado de barrenos cónicos para las marcas que sirven de guías entre el anillo inferior - antedistribuidor y la tapa superior - antedistribuidor. Estas marcas son básicas, ya que posteriormente durante la operación de la unidad, cada vez que se tengan que levantar éstos componentes para el

mantenimiento de la máquina, se puedan volver a colocar en su posición original. También se marca sobre la banda superior del antedistribuidor el agujero para el drenaje del agua en ésta zona.

Una vez que los pasadores cónicos para guías fueron probados y marcados debidamente, se retira la tapa superior para ejecutar los siguientes trabajos en sitio:

- a) Soldar en la banda superior del antedistribuidor la brida del drenaje del agua.
- b) Ajuste de álabes móviles (si es necesario sacarlos y trabajarlos en playa de montaje).

En playa de montaje a la tapa superior se le deben colocar, los sellos elásticos, el anillo de mando ó de regulación, tanque de aceite de la chumacera guía inferior, y accesorios menores, así como sujetarle provisionalmente el anillo de desgaste superior con su sello.

Finalmente se realiza el montaje definitivo de álabes móviles (si fué necesario), montaje definitivo del conjunto de tapa superior, anillo de mando y anillo de desgaste superior en sitio, centrando este último y promediando la luz que exista con el rodete para la fijación final del conjunto al antedistribuidor.

#### *IV.3.5 Distribuidor, etapa final.*

La parte final del montaje del distribuidor es la que corresponde al montaje de los sistemas de apertura y cierre de los álabes móviles, (servomotores, bielas y levas).

En playa de montaje se inspeccionan los servomotores, desmontando sus tapas para revisar la carrera de los pistones, controlando el apriete de las tuercas que los sujetan y lubricando las superficies de trabajo con aceite para turbina. Terminada ésta revisión mecánica se preparan para trasladarlos y colocarlos en su sitio en los nichos del forro del foso de la turbina. También se desempacan, limpian y arman las levas que accionan los álabes móviles y se prepara la tornillería para su montaje definitivo.

Durante el ajuste preliminar del conjunto se logró la completa colinealidad entre bujes superior, intermedio e inferior de los álabes móviles, así como su libertad de giro. En ésta etapa del montaje se vuelven a comprobar, posicionando posteriormente todo el conjunto del distribuidor (álabes móviles) en posición de cierre, checando (ajustando si es necesario una vez más), el asiento que existe entre álabes contiguos para lograr el sello del distribuidor como lo indican las especificaciones del fabricante. Después se colocan las levas y las bielas entre éstas y el anillo de mando fijando provisionalmente con topes soldados en posición de cierre. El ajuste de las bielas se hace en sitio maquinando rondanas con espesores que se determinan durante su ensamble.

Los servomotores ya montados y fijos en su sitio, se unen al anillo de mando (con los álabes

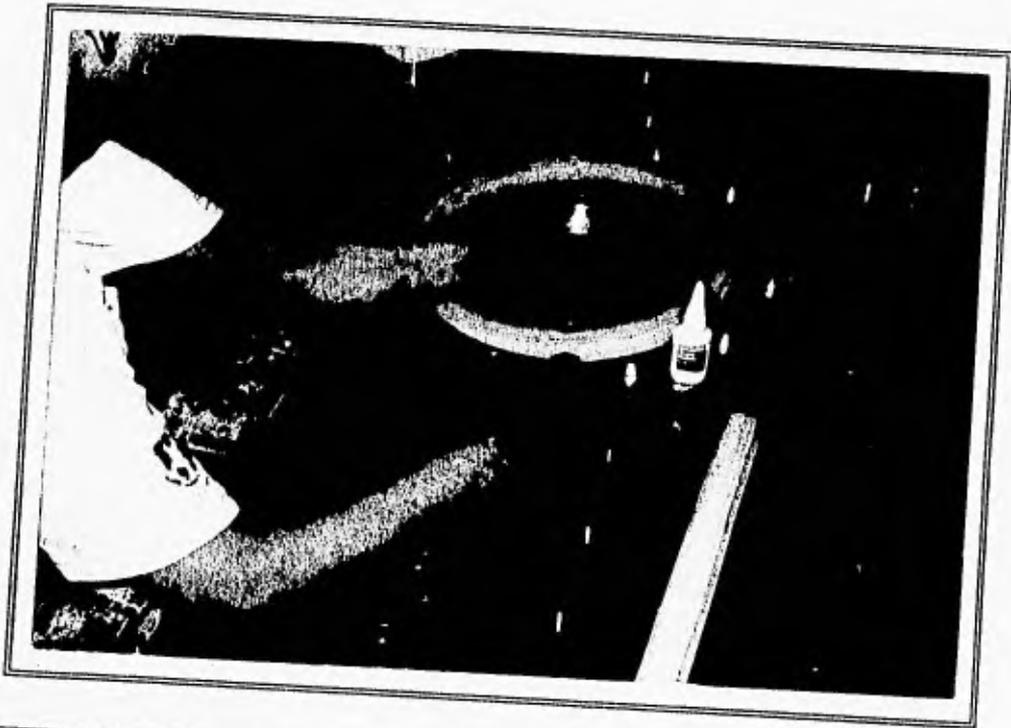


FIG. IV.21 PREPARACION DE SELLO DE COJINETE INFERIOR Y MONTAJE DE ALABE MOVIL.

móviles ya articulados con levas y bielas), a través de sus pistones en posición de cierre, por lo que los pistones de los servomotores deben estar en posición extrema (contra los topes).

#### Ajuste final del distribuidor.

Cuando se tiene el conjunto álabes móviles, bielas, anillo de mando y servomotores articulados en posición de cierre, se riman los pernos de seguridad entre buje de leva y eje de álabe móvil (en cada uno de los álabes móviles), para lograr la posición definitiva de las dos piezas, procediendo posteriormente a atomillarlos y fijarlos definitivamente, retirando los topes soldados que se usaron provisionalmente.

A éstas alturas del montaje en el foso, debe estar casi terminado el montaje en los pisos exteriores de turbina, de todas las tuberías, válvulas, filtros, tanques, compresores, etc. de los sistemas auxiliares: agua de servicio, agua de enfriamiento, aire de servicio, sistemas de drenaje, sistemas de ventilación, sistemas de suministro de aceite, etc. incluyendo todo el sistema eléctrico, (tableros locales, tableros de servicio auxiliares, etc.). Así mismo, el avance en el montaje del regulador de velocidad de la turbina debe ser significativo y con vistas a iniciar las pruebas de puesta en servicio de la unidad.

#### *IV.3.6 Liberación de la flecha y acoplamiento del rotor del generador.*

Cuando se concluyen las actividades de montaje de la segunda etapa del distribuidor, se hace un chequeo final al centrado y nivelación de la flecha, fijando provisionalmente los accesorios de los conjuntos de sello y chumacera guía de turbina en su posición definitiva, liberando la flecha para que le sea acoplado el rotor del generador. Esta maniobra debe ser ejecutada cuando el avance en el montaje de la turbina y en el montaje del generador son los adecuados. Previo al acoplamiento deben estar instalados sobre la tapa superior de turbina, el soporte de la chumacera de carga, la chumacera de carga (con su tanque, el sistema de inyección de aceite y demás accesorios) el estator del generador y gatos de frenado del rotor del generador en sitio. El acoplamiento se ejecuta con un procedimiento basado en las instrucciones acordadas por los fabricantes de turbina y generador y se realiza con ayuda de una viga diseñada especialmente para la maniobra y acoplada a las dos grúas viajeras de casa de máquinas, pues el peso del rotor del generador ya armado y de los accesorios de maniobra es de casi 800 ton.

#### *IV.3.7 Chumacera Guía.*

El montaje de la chumacera guía de la turbina se ejecuta en tres etapas.

La primera se realiza durante los trabajos preliminares en la flecha, descritos anteriormente, consistente en el rasqueteo de los segmentos conforme a la flecha.

La segunda es el armado ya en sitio de los componentes fijándolos provisionalmente de acuerdo a las calibraciones obtenidas durante los trabajos de ajuste para liberar la flecha.

La tercera etapa es el ajuste y fijación definitiva de la chumacera guía y sus accesorios después del acoplamiento de flecha-rotor, y después de haber girado todo el turbogenerador para ajustar en forma definitiva los segmentos (cojinetes) de la chumacera guía a la posición final de la flecha.

#### ***IV.3.8 Sello de la flecha.***

Similarmente al montaje de la chumacera guía, el montaje del sello de la flecha de la turbina, ubicada entre la tapa superior y brida inferior de la flecha se ejecuta en tres etapas:

La primera consiste en el armado del sistema sobre la brida inferior de la flecha en playa de montaje antes de acoplarla al rodete.

La segunda es el completamiento del sistema sobre la tapa superior de la turbina durante los trabajos de ajuste y antes de terminar la chumacera guía.

La tercera etapa es de ajuste final y pruebas de sellado después de girar el turbogenerador completo (con el rotor del generador ya acoplado) para la calibración final de la luz entre el sello y la flecha, anotando las dimensiones requeridas en el registro de mediciones correspondiente.

#### ***IV.3.9 Ajuste final del conjunto turbina-generador.***

Esta etapa final de montaje del turbogenerador incluye los siguientes trabajos:

1. Limpieza química de tuberías de los diferentes sistemas.
2. Llenado de aceite del sistema de lubricación e inyección realizando el flushing ó recirculación de aceite a través de tanques y tuberías para eliminar humedad e impurezas.
3. Conexiones de la máquina al sistema de operación como condensador síncrono y al regulador de velocidad.
4. Se realiza también toda la instrumentación fina del turbogruppo integrándose una unidad con los tableros de operación.
5. Se pintan todas las superficies exteriores y las tuberías con los colores correspondientes según el fluido que manejen.
6. El generador se completa con el sistema de excitación estático, se coloca la tapa superior del turbogenerador y se hacen las conexiones finales de las bobinas del estator a los buses ó conductores de fase aislada y al neutro.
7. Se hace el apriete definitivo con el torque recomendado entre el rotor y la flecha de la turbina levantándose conjuntamente el rodete, se retiran de este sus calzas y se posiciona ligeramente



FIG. IV.22 VISTAS DEL FOSO DE TURBINA (ARRIBA: ANTES DE ACOPLAR EL ESCUDO SUPERIOR, ABAJO: LIBERACION DE LA FLECHA PARA ACOPLAR TURBINA CON GENERADOR .

abajo de su nivel de proyecto, ya que durante la operación normal de la máquina y como consecuencia tanto de la inyección de aceite a presión a través de los segmentos de la chumacera de carga para el levantamiento del rotor como del empuje hidrostático axial que actúa sobre el rodete, se produce el levantamiento que deja en su cota de diseño el conjunto rodete-flecha-rotor. Por este motivo es necesario vigilar también y ajustar la posición de los segmentos de las chumaceras guías de la flecha para garantizar que sus superficies de contacto maquinadas y tratadas manualmente a detalle coincidan sobre el cuerpo pulido de esta.

Cuando se han realizado estos ajustes finales, se han terminado las conexiones del generador a los buses y de estos a transformadores y subestación eléctrica, habiéndose también integrado todos los sistemas auxiliares del turbogenerador a éste, se dan por concluído los trabajos de montaje dando paso a las pruebas de puesta en servicio de todo el sistema.



FIG. IV.23 ACOPLAMIENTO TURBINA-GENERADOR.



## **V. CONTROL DE CALIDAD.**

### **V.1 Generalidades.**

La importancia de obtener calidad en el proceso de construcción y montaje de los sistemas de generación eléctrica ha sido siempre un punto de especial cuidado para la C.F.E. Durante muchos años la misma Comisión al efectuar por administración directa la construcción de sus centrales, fué también responsable del aseguramiento de la calidad de sus propios trabajos. Desde ésta perspectiva, ella estableció sus parámetros, directrices y acciones para garantizar calidad, siempre respecto a la normativa internacional. Al asignar la C.F.E., bajo la modalidad "llave en mano", el suministro completo (diseño, fabricación, transporte, montaje, supervisión y puesta en servicio) de los componentes electromecánicos del Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, sus sistemas implementados para asegurar la calidad tuvieron que adecuarse, sin variar su filosofía, a las nuevas formas de contratar las obras públicas. Bajo éste modelo, la responsabilidad del contratista es total; él mismo es responsable de la supervisión de su trabajo y de su sistema de aseguramiento de calidad, que debe ser compatible en sus fines, no necesariamente en sus medios, con el utilizado por la C.F.E. (Especificación CFE L0000-42).

Ante éste nuevo panorama, las Auditorías de Calidad son el instrumento más eficaz por medio del cual la C.F.E., sin realizar una supervisión ejecutiva de campo, puede evaluar si las actividades encaminadas a obtener productos con calidad y sus resultados cumplen con las

disposiciones preestablecidas y si éstas son implantadas eficazmente, siendo las adecuadas para alcanzar los objetivos. Una Auditoría de Calidad no es más que un examen sistemático ó una fotografía que revela como se están llevando ó como se llevaron a cabo determinados procesos.

En relación al montaje de las unidades turbogeneradoras, el control del aseguramiento de la calidad presenta dos aspectos igualmente importantes:

- a) De él depende que los valores de eficiencia garantizados por el diseñador de la máquina y evaluados con las pruebas en modelo, sean alcanzados durante la operación de la planta.
- b) Garantizar la integridad estructural del conjunto durante su vida útil.

Para ilustrar la necesidad de la implementación inicial de un Manual de Aseguramiento de Calidad que sea rector de todas las actividades a desarrollar en un proceso (llámese construcción, fabricación, servicio, etc.), en éste capítulo se expone el caso de los antedistribuidores y carcasa espiral de las turbinas de la Central de Aguamilpa, que por sus características permite visualizar técnica y económicamente el impacto de la falta de un control adecuado. Técnicamente por que en el capítulo se presentan los antecedentes, las evaluaciones y las medidas correctivas de las deficiencias que se señalan y económicamente por que se ilustra el defasamiento en los programas de obra y en consecuencia en las fechas de sincronización de los turbogeneradores y los costos asociados tanto a éste defasamiento como a las medidas correctivas, por la falta de control.

#### V.2 Antecedentes de las fallas en los antedistribuidores.

Durante el proceso de aplicación de la soldadura circunferencial entre el antedistribuidor y carcasa de la U-1, por la parte superior interior del antedistribuidor se detectó una porosidad casi en la unión de las secciones 3 y 4 del mismo (fig. V.1). Al limpiar la zona porosa con arcair se descubrió una grieta en la soldadura de fábrica de aproximadamente 62 cm de longitud. Se detectó una segunda grieta durante el proceso de radiografiado de la junta circunferencial de una magnitud de 74 cm, detectada también con ultrasonido a una profundidad de 6 cm. aproximadamente. Se descubrió una tercera fisura de 15 cm. de longitud en la pieza de transición superior en el sector 2 unión 2 al estar ampliando el bisel de sello entre sectores. Durante el proceso de radiografiado de la junta circunferencial se fueron sumando fisuras de menor tamaño, lo cual provocó un análisis de todo el proceso de soldadura y de las posibles causas que estaban provocando las grietas mencionadas.

Sin realizar propiamente una auditoría de calidad, la C.F.E. analizó el manual de montaje y control de calidad de la carcasa, así como el procedimiento de soldadura, el cual se detectó que



FIG. V.1 POROSIDADES DETECTADAS EN SOLDADURA.

no estaba siendo aplicado en su totalidad ante la falta de supervisión de la compañía montadora encontrándose las siguientes deficiencias:

- a) Falta de precalentamiento adecuado de las placas a soldar.
- b) El diámetro de electrodo utilizado en la soldadura no era el descrito en el procedimiento (1/8" ó 5/32").
- c) Los electrodos utilizados no se sometieron a un proceso de secado completo antes de su utilización.
- d) Falta de martilleo a las soldaduras para relajación de esfuerzos.
- e) No se llevó un control del voltaje y amperaje utilizado en las soldaduras.

Por otra parte se procedió a evaluar con radiografías y ultrasonido las condiciones del antedistribuidor de la U-3 previo a su montaje en sitio para verificar la sanidad del material recibido de fábrica. Esta pieza no había estado expuesta a procesos de soldadura en campo, sin embargo se encontraron los siguientes defectos:

- a) Grietas
- b) porosidad interna
- c) inclusión de escoria
- d) falta de fusión del metal
- e) falta de penetración de la soldadura
- f) socavados internos (entre cordones).

Todos éstos defectos están sancionados como rechazables por el código ASME, sección VIII, división I, lo que demostró además una falta de supervisión y control de calidad durante el proceso de fabricación de las piezas. Se detectó también que existían cordones de soldadura demasiado cercanos entre sí, así como cruces de soldadura que el código ASME indica que deben ser radiografiados, y/o relevados de esfuerzos según el caso, cuyas evidencias no fueron presentadas por el fabricante.

En resumen, la falta de control de la temperatura durante el proceso de soldadura en campo y la mala calidad de las soldaduras efectuadas en fábrica provocaron los agrietamientos mencionados en los puntos anteriores por lo que se tomó la decisión de llevar a cabo una auditoría de calidad y una revisión a detalle de todas las uniones soldadas de los tres antedistribuidores al 100% antes y después de la soldadura de campo para poder asegurar la calidad de éstos materiales.

### V.3 Programa de pruebas y ensayos.

El Laboratorio de Pruebas y Ensayos de Materiales de la C.F.E. fué la entidad encargada de llevar a cabo la auditoría de calidad y las pruebas a los antedistribuidores y carcasas espirales.

Para ello se elaboró un programa de pruebas no destructivas en las tres unidades (fig. V.2) que cubrió completamente las necesidades de evaluación de éstos componentes de la turbina. Adicionalmente a éste programa y ante la preocupación de encontrar otro tipo de problemas en el suministro de equipos se instrumentaron una serie de acciones inmediatas para la supervisión del Sistema de Control de Calidad del fabricante y de la compañía montadora, consistente básicamente en:

- Auditorías y testificación de pruebas de equipos en fábrica.
- Auditorías de los equipos recibidos en obra.
- Auditorías de los procesos de montaje.

Las pruebas básicas que se realizaron en los antedistribuidores de las tres unidades consistieron en el análisis del 100 % de la estructura de la pieza, encontrándose un promedio de 300 fallas por unidad entre porosidades y grietas en el metal y soldadura cuyas dimensiones estaban fuera de tolerancia, por lo que por un momento se cuestionó sobre la conveniencia de aceptar la reparación de la pieza ó definitivamente rechazarla solicitando una reposición, anulando así toda posibilidad de cumplir con los tiempos del programa para el montaje, pero asegurando por otra parte, la integridad del componente más importante de la turbina desde el punto de vista estructural, ya que debido a los esfuerzos por vibración a que se somete la unidad durante su operación se pueden presentar ampliaciones de las fallas que ocasionen desprendimientos de álabes fijos del antedistribuidor, (puesto que éstas fueron las zonas más dañadas) ó desnivelación seria de la chumacera de carga y por tanto la destrucción del rotor del generador. Adicionalmente se corroboró la falta de un seguimiento estricto del sistema de aseguramiento de calidad, tanto del fabricante como del montador y de común acuerdo entre cliente y proveedores de la turbina, se tomó la decisión de diseñar un procedimiento de reparación que cumpliera con la normativa internacional y utilizara tecnología de punta sometiendo las piezas a exámenes y controles parciales de cada reparación efectuada para garantizar la sanidad del elemento.

#### V.4 Procedimientos de reparación.

El procedimiento para la reparación de los defectos fué diseñado con apego estricto a los requerimientos del código ASME, secc. VIII, apéndices 6 y 8 y de acuerdo con la siguiente secuencia:

##### a) Clasificación de los defectos.

Antes de evaluar la magnitud de los defectos, el procedimiento indica que se deben marcar y registrar todas las imperfecciones que tienen cualquiera de sus dimensiones mayor a 1/16 de pulgada (1.6 mm), sean éstos poros ó grietas. De todas las superficies controladas se deben

**PROGRAMA DE PRUEBAS A LOS ANTEDISTRIBUIDORES U-1, U-2, U-3  
DEL P.H. AGUAMILPA**

PRUEBA	UNIDAD	NOVIEMBRE DE 1992														
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
<i>Inspección Visual.</i>	U-1															
	U-2															
	U-3															
<i>Radiografía.</i>	U-1															
	U-2															
	U-3															
<i>Ultrasonido.</i>	U-1															
	U-2															
	U-3															
<i>Partículas Magnéticas.</i>	U-1															
	U-2															
	U-3															
<i>Medición de durezas.</i>	U-1															
	U-2															
	U-3															
<i>Metalografía.</i>	U-1															
	U-2															
	U-3															
<i>Esfuerzos residuales.</i>	U-1															
	U-2															
	U-3															

FIG. V.2 PROGRAMA DE PRUEBAS.

eliminar todas las grietas detectadas y las porosidades que excedan de 3/16 de pulgada.

b) Reparación de los defectos superficiales.

Los defectos superficiales se eliminan ó reducen hasta un tamaño que esté dentro de tolerancias. La eliminación de éstos defectos se realiza por capas, aplicando en cada paso pruebas de partículas magnéticas, tintas penetrantes e inspección visual. Cuando la profundidad máxima de la falla no excede 2 mm, no se requiere soldadura posterior para hacer la reparación. Basta con rebajar las superficies contiguas a la falla, de acuerdo con la fig. V.3, asegurando una pendiente suave, no mayor de 1/10.

c) Reparación de defectos mayores.

Esta reparación se realiza abriendo la superficie de la placa con disco abrasivo. (Fig V.4). Los extremos de las fisuras mayores detectadas deben de marcarse perforándose con un taladro y broca de pequeño diámetro para evitar que por el estado de tensión en el material la grieta se haga más grande. No es conveniente abrir la superficie de la placa con arc-air por que el calor aplicado (considerablemente mayor que usando esmeril), también hace crecer la grieta.

La separación se realiza por capas y controlando mediante inspección visual, y defectoscopia magnética. En algunos casos, cuando la falla no es pequeña se puede utilizar el arc-air, amolando el acero oxidado y carbonificado hasta el brillo metálico. El espesor de la capa a eliminar no debe ser menor de 2 mm. La abertura de los defectos puede realizarse tanto del lado exterior como del lado interior del antedistribuidor.

Al terminar con las aberturas en las fallas, la eliminación total de los defectos es controlada mediante inspección visual exterior, con ayuda de pruebas de partículas magnéticas ó con tintas penetrantes y radiografía. Cuando ya no existe defecto se debe levantar un acta donde se refleja la ausencia del mismo.

d) Soldadura de relleno de los sitios reparados.

Antes de comenzar con la soldadura de relleno de las reparaciones, todos los soldadores que en ella intervienen deben de ser calificados de acuerdo al código ASME, secc. IX. Respecto al material de aporte, éste debe ser el mismo que se emplea para la soldadura de campo (electródos AWS E7018), 3.2 mm y 4.0 mm. Antes de usar los electródos, se deben secar a una temperatura de 250° +/- 15°C durante dos horas. Al término del tiempo los electródos se entregan a los soldadores directamente y deben de guardarse en el lugar de trabajo dentro de los portaelectródos manuales.

La tecnología y los parámetros del régimen de soldadura deben ser detallados para cada reparación en lo particular, y en lo general todas las aberturas deben ser clasificadas en dos

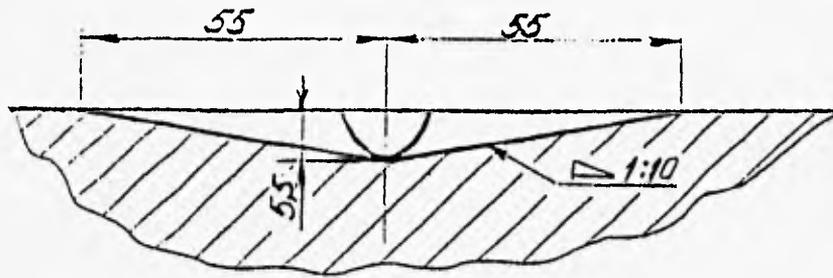


FIG. V.3 ELIMINACIÓN DE FALLAS MENORES.

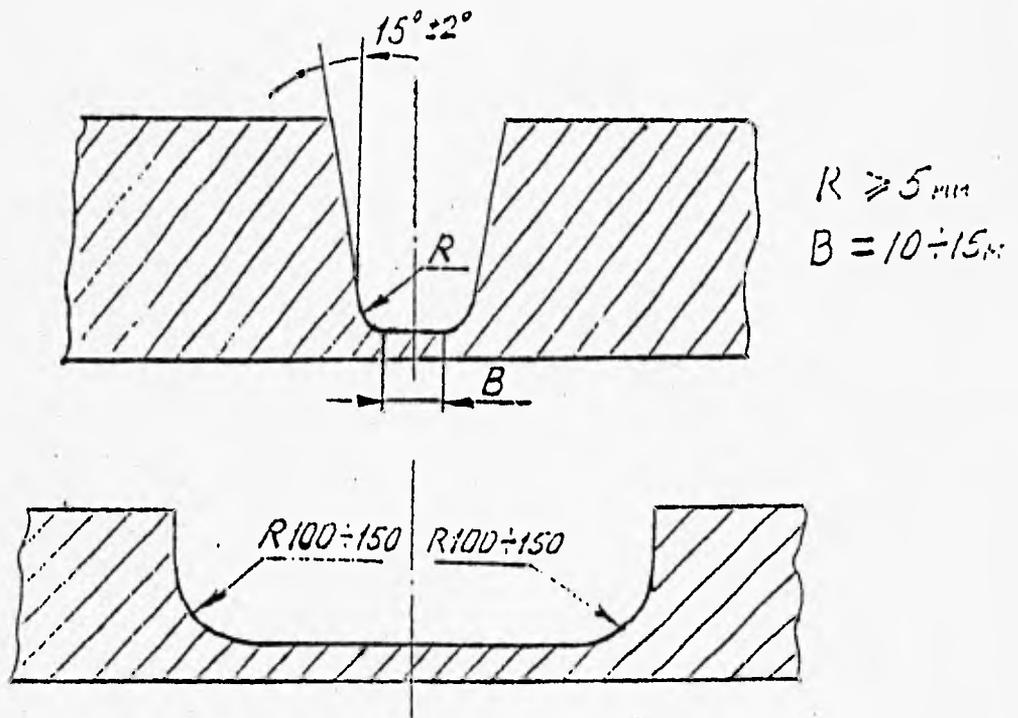


FIG. V.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS ABERTURAS DE PLACA PARA REPARACION.

grupos, en función de su profundidad:

- Aberturas con profundidad menor de 36 mm que se sueldan en plena conformidad con los requerimientos del código ASME, Sección VIII.
- Aberturas con profundidad mayor de 36 mm que deben soldarse empleando procedimientos especiales, que aseguren un nivel aceptable de las tensiones residuales después de la soldadura, sin emplear el tratamiento térmico posterior.

Ya sea que las aberturas se clasifiquen en uno u otro grupo, se debe hacer una limpieza total de la superficie a rellenar, eliminando escorias, óxidos, aceite y humedad.

La soldadura de todas las reparaciones se realiza en dos etapas (fig. V.5). En la primera etapa se realiza el revestimiento de la separación depositando en su fondo y sobre las paredes una capa de soldadura de 0.04 mm. En la segunda etapa se suelda totalmente la sección de la abertura. Entre el revestimiento previo (primera etapa) y la soldadura total (segunda etapa) se pueden realizar interrupciones que no se limiten por el tiempo. Después de realizar el relleno no es necesario llevar a cabo un reposo térmico.

Cada cordón depositado en todas las aberturas, excepto en la última capa, debe cincelarse con martillo neumático, para disminuir las tensiones del metal.

En el caso de la soldadura de las aberturas mayores de 36 mm de profundidad se deben realizar según el procedimiento de "cordón de tratamiento térmico" ó de medio cordón. Cada cordón depositado debe tener una altura máx. de 0.04 mm. En los casos en que ésta medida sea mayor, el cordón depositado debe ser rebajado con disco abrasivo, hasta la dimensión indicada. Al asegurar ésta medida de los cordones de soldadura, cada cordón inferior será calentado por el cordón superior hasta una temperatura de aproximadamente 600 °C, asegurando una disminución considerable de las tensiones de soldadura.

#### *Régimen térmico de la soldadura.*

La soldadura debe realizarse con precalentamiento y calentamiento acompañante de 100-150 °C. El control de la temperatura de pre y post calentamiento se realiza cada 10 minutos con ayuda de un termopar de contacto y un lápiz térmico registrándose en un protocolo.

Al terminar la soldadura completa de la abertura, el tramo reparado a un ancho de 300 mm alrededor de la abertura se somete a un reposo térmico, es decir a un postcalentamiento hasta la temperatura de 100-150 °C, manteniéndola durante 12 hrs. Con ésta medida se asegura:

- Se mantiene el nivel relativamente bajo de tensiones residuales directamente después de la soldadura.

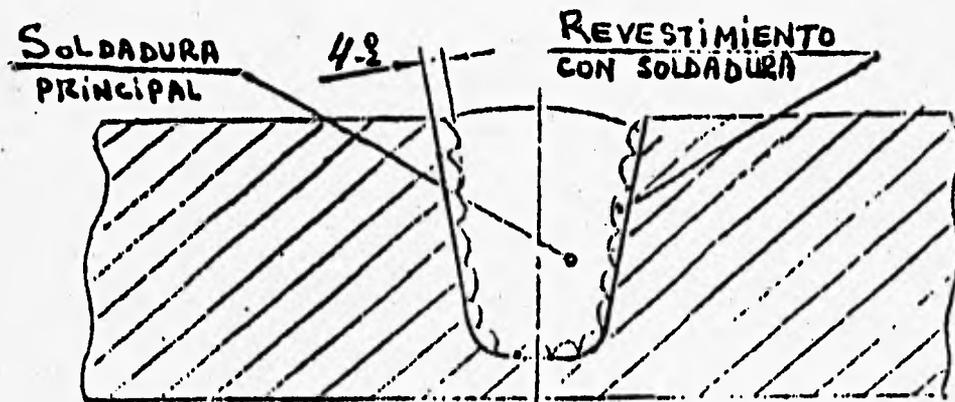


FIG. V.5 ETAPAS DE RELLENOS DE SOLDADURA DE LAS REPARACIONES.

- Se disminuyen los picos máximos de las tensiones residuales.

Para la verificación del procedimiento de soldadura de las reparaciones cuya profundidad excede de 36 mm, sin el posterior tratamiento térmico, se debe soldar una muestra de control. Esta probeta se ensaya mecánicamente y los resultados en la misma determinan la calidad de los rellenos efectuados.

e) Control después de las reparaciones:

Todos los defectos reparados se someten a una inspección rigurosa, 100% de radiografiado, control con ultrasonido, partículas magnéticas e inspección visual. Todas las empresas interesadas levantan un protocolo de reparación en donde se debe reflejar la calidad de los trabajos realizados. El control definitivo de la calidad de todas las juntas soldadas y las reparaciones efectuadas en el antedistribuidor y carcasa espiral se realiza mediante la prueba hidrostática.

V.5 Prueba hidrostática de carcasa-antedistribuidor.

El control y la aceptación definitiva de todos los trabajos de montaje y soldadura de la carcasa-antedistribuidor se realiza a través de una prueba hidráulica en la que se somete a la estructura a una presión igual a 1.5 veces (2.37 MPa), la presión normal en condiciones de trabajo (1.57 MPa). La prueba es sencilla, pero importante ya que con ella se verifican todas las uniones soldadas y se detectan las deformaciones que puede alcanzar la carcasa debido a la presión del agua. Todo ello garantiza el comportamiento adecuado del conjunto. A continuación se describen los dispositivos necesarios para llevar a cabo la prueba y se resume la metodología de la misma.

a) Montaje de tapas provisionales de prueba.

Para poder llenar con agua la estructura y posteriormente someterla a presión, es necesario obturar la entrada aguas arriba de la carcasa y las entradas a los álabes del antedistribuidor. Esto se logra con un tapón cónico de acero que va soldado a la sección No. 7 de carcasa (sección de entrada) y un tapón cilíndrico también de acero, en el interior del antedistribuidor obturando los espacios entre álabes fijos. Este último tapón no es soldado, se atornilla y sella contra el anillo de cimentación.

La tapa cónica se coloca primero ya que va soldada interior y exteriormente, al término de la prueba y después de que ha alcanzado la resistencia el concreto de los segundos colados de

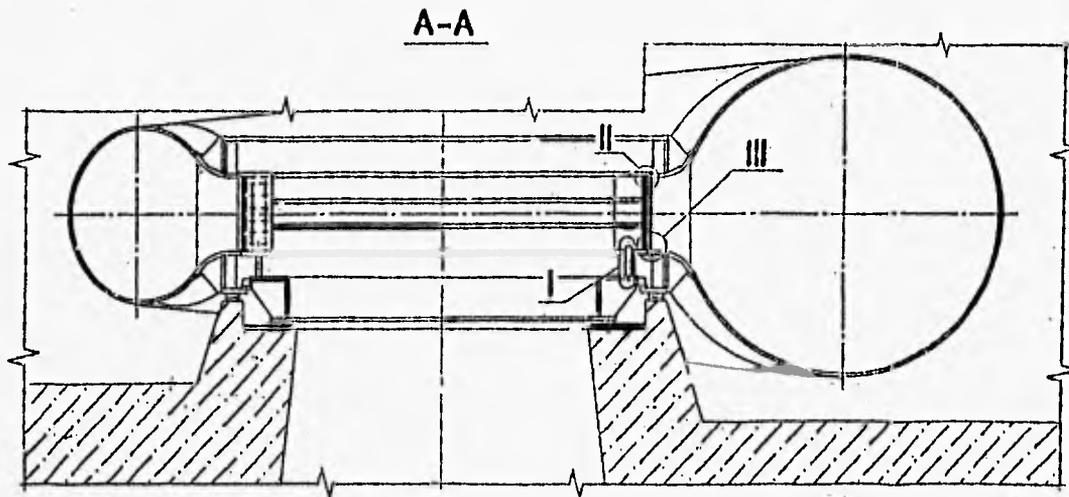


FIG. V.6 POSICIÓN DE LA TAPA CILÍNDRICA PARA PRUEBA HIDROSTÁTICA.

carcasa, se corta y se retira para hacer la unión con la tubería de presión. La soldadura de la tapa aunque es temporal, también se controla y se verifica por el método de tintas penetrantes, ya que se debe garantizar el perfecto comportamiento de la misma durante la prueba. En las fig. V.6 y V.7 se presenta la posición de los tapones para prueba hidrostática.

La tapa cilíndrica se coloca al final, se atornilla y se aprieta en su parte inferior con el anillo de cimentación y en su parte superior con la brida del antedistribuidor. Además se inserta un sello circular de goma (22mm diámetro), que se acomoda y se aprieta entre las placas de acero sellando perfectamente la unión. Debido a las deformaciones que sufren las bridas del antedistribuidor al hacer la soldadura con la carcasa, es posible que la tapa cilíndrica tenga que ajustarse y adicionalmente el sello tenga que ser cuidadosamente montado para hermetizar la cámara. Una vez ajustado éste se aprieta definitivamente y se prepara la carcasa para su llenado con agua.

#### b) Equipo de bombeo.

El equipo de bombeo, está constituido por dos bombas y un sistema de tuberías, válvulas y manómetros que aseguran un gasto mínimo de 15 lts/s. El agua es tomada de pipas y de un tanque de almacenamiento afuera de la casa de máquinas. Las bombas son capaces de levantar la presión en la cámara espiral a 2.35 MPa durante la prueba hidrostática y mantenerla a 1.57 MPa durante el empaque de la misma y el fraguado de los segundos colados. En la fig. V.7 se presenta un esquema de la posición de las bombas y el sistema de alimentación de agua para

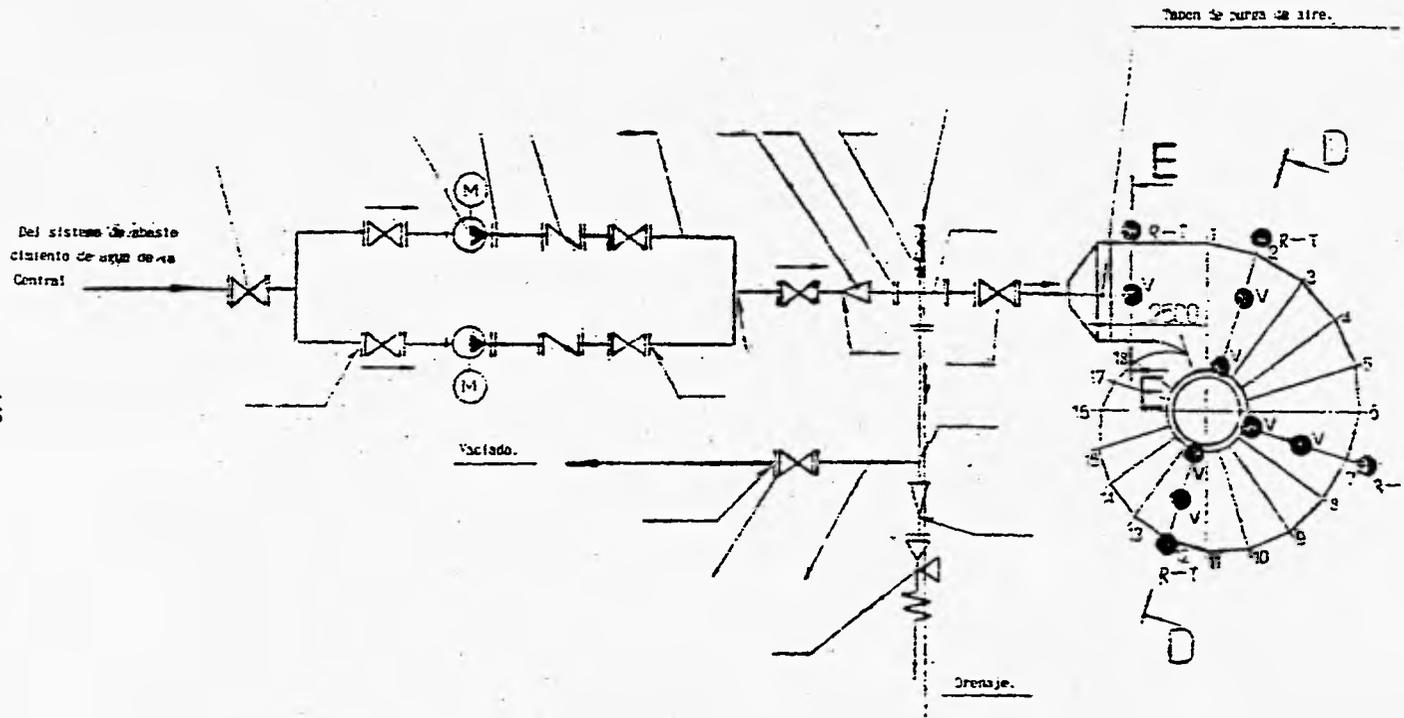


FIG. V.7 ESQUEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA PARA PRUEBA HIDROSTÁTICA Y UBICACIÓN EN PLANTA DE DEFORMÍMETROS.

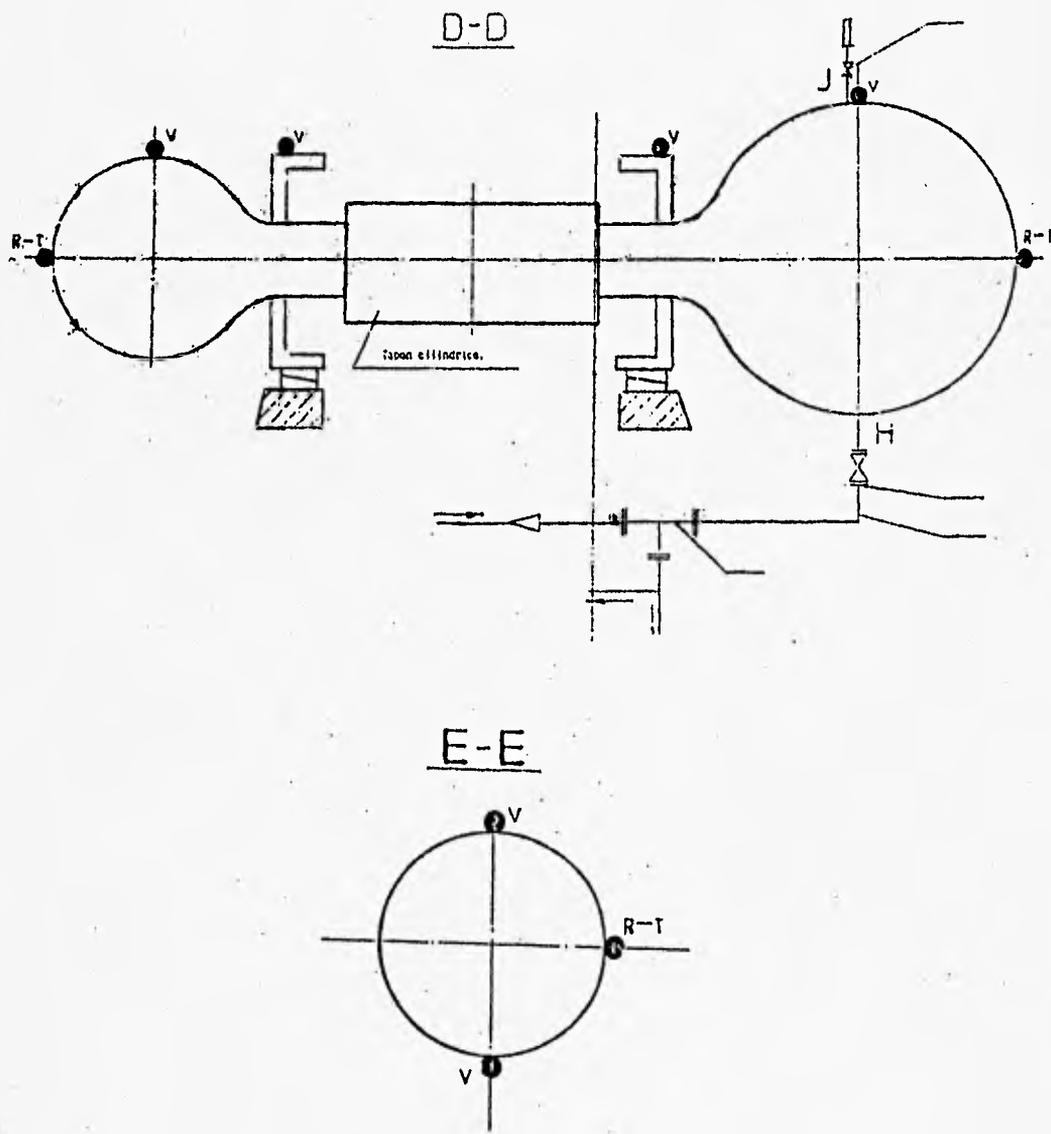


FIG. V.8 UBICACIÓN DE VÁLVULAS PARA LLENADO DE CÁMARA Y POSICIÓN DE DEFORMÍMETROS.

llenado de la carcasa espiral.

c) Instrumentación de la prueba.

Para registrar y controlar el estado de deformación de la estructura en cada etapa de la prueba se colocan, según las fig. V.7 y V.8 un conjunto de deformímetros en ciertas secciones de la carcasa, donde se pueden medir desplazamientos verticales, tangenciales y radiales. Las fig. 5.9 y 5.10 muestran los formatos de control de las deformaciones que se experimentan en las siguientes etapas:

- Cuando la cámara está vacía.
- Cuando está llena, pero no presurizada.
- Cuando está presurizada a diferentes valores.

Cada uno de los deformímetros debe estar montado y aislado, de tal suerte que no se transmitan otros movimientos al mismo que no sean los producidos en la carcasa y el antedistribuidor por efectos de la presión.

d) Prueba hidrostática.

El procedimiento indicado por el fabricante para llevar a buen término la prueba y cumplir con las especificaciones, es el siguiente:

1. Una vez implementado tanto el sistema de bombeo como el sistema de instrumentación, comienza el llenado de la carcasa a través del orificio "H" (fig. V.7), la salida del aire es por el orificio "J" (válvula de alivio). El volumen del espacio antedistribuidor y carcasa es de 640 M3 por lo que si el gasto de las bombas es de 15 lts/s y es constante, la cámara estaría llena en 11.8 hrs. Durante el llenado se deben tomar lecturas en los deformímetros cada 2 horas. Una vez llena la carcasa, se cierra la válvula sobre el orificio "H" y el orificio "J", se cierra con un tapón roscado.
2. Se arrancan las bombas y posteriormente se abre la válvula sobre el orificio "H".
3. Se sube la presión del agua en la cámara a 0.1 Mpa y se purga el aire por el orificio "J".
4. La presión del agua en la cámara se eleva en la siguiente secuencia: Se sube la presión de 0.1 MPa a 0.6 MPa y se mantiene 10 minutos. Se controla el conjunto, se verifica la estanqueidad del tapón cilíndrico y se miden con precisión las deformaciones. Se repiten siempre las mismas actividades cuando la presión aumenta manteniéndose 10 minutos de 0.6 a 1.2 MPa, de 1.2 a 1.7 MPa y de 1.7 a 2.35 MPa.

**LECTURA DE MICROMETRO No:**

Durante la prueba hidrostática

Fecha:

Hoja: /

Presión		Micrómetro		hora	LAPSO (min)	OBSERVACIONES
MPa	kg/cm <sup>2</sup>	lectura	deformación			
carcasa vacía					--	--
carcasa llena sin presión						--
0.10	01.02					
0.10	01.02				01:00	
0.10	01.02				02:00	
0.10	01.02				03:00	
0.10	01.02				04:00	
0.60	06.12					
0.60	06.12				01:00	
0.60	06.12				02:00	
0.60	06.12				03:00	
0.60	06.12				04:00	
1.20	12.24					
1.20	12.24				01:00	
1.20	12.24				02:00	
1.20	12.24				03:00	
1.20	12.24				04:00	
1.70	17.34					
1.70	17.34				01:00	
1.70	17.34				02:00	
1.70	17.34				03:00	
1.70	17.34				04:00	
2.35	23.97					
2.35	23.97				01:00	
2.35	23.97				02:00	
2.35	23.97				03:00	
2.35	23.97				04:00	
2.35	23.97				05:00	
2.35	23.97				10:00	
2.35	23.97				15:20	
2.35	23.97				20:00	
1.70	17.34					
1.70	17.34				01:00	
1.70	17.34				01:30	
1.70	17.34				02:30	
1.20	12.24					
1.20	12.24				01:00	
1.20	12.24				01:30	
1.20	12.24				02:30	
0.60	06.12					
0.60	06.12				01:00	
0.60	06.12				01:30	
0.60	06.12				02:30	
0.10	01.02					
0.10	01.02				01:00	
0.10	01.02				01:30	
0.10	01.02				02:30	

OPERADOR \_\_\_\_\_

FIG. V.9 FORMATO PARA LECTURAS DE MICROMÉTRO.

Presión		Pase	Rango carcasa guby	EV1		EV2		E1		E2		E3		E4		E5		E6		E7		E8		
MPa	kg/cm <sup>2</sup>			lect.	cal.	lect.																		
0.00	0.00																							
0.10	1.02																							
0.10	1.02																							
0.00	0.12																							
1.00	12.26																							
1.07	10.01																							
1.00	12.26																							
1.70	17.34																							
2.38	23.97																							
1.70	17.34																							
1.70	17.34																							
1.00	12.26																							
1.00	0.12																							
0.00	0.12																							
0.00	0.00																							

- V1 Vertical sobre brida del antecámbulo.
- V2 Vertical carcasa superior.
- R Radial carcasa.
- T Tangencial carcasa.
- EV1 Vertical carcasa inferior.
- EV2 Vertical carcasa superior.
- E Sección "E".
- 12 Sección "12"
- 7 Sección "7"
- 2 Sección "2"

FIG. V.10 TABLA RESUMEN DE LECTURAS DE MICRÓMETRO DE PRUEBA HIDROSTÁTICA DE CARCASA.

5. Al llegar a éste último valor, la presión se mantiene durante una hora y se comienza una inspección visual de toda la carcasa-antedistribuidor para buscar posibles presencias de humedades en las soldaduras de las uniones. Es posible que debido a la presión existan fugas de agua en el tapón cilíndrico, estas fugas son permisibles siempre y cuando el gasto de las mismas sea menor que el de capacidad de las bombas y además el agua no obstruya la inspección del conjunto. Durante este tiempo se siguen tomando lecturas cada 10 minutos del estado de deformación de la carcasa.

6. Transcurridos 60 minutos y ya finalizada la inspección, si los resultados son satisfactorios, comienza la despresurización de la cámara. Los intervalos para disminuir la presión son de 5 minutos en sentido inverso, es decir disminuyendo a los mismos valores de presión con los que ésta se incrementó, hasta llegar a un valor nulo. Se toman las últimas lecturas en los deformímetros dándose por concluida la prueba.

En las pruebas realizadas en las tres unidades de la Central se observaron características similares, en cuanto a instrumentación de la prueba, ejecución y valores de deformación de la estructura, siendo el desplazamiento máximo del orden de 5mm. Debido a las deformaciones sufridas en las bridas del antedistribuidor, se dificultó la colocación de los sellos elásticos de la tapa cilíndrica que estaban diseñados para hermetizar un cierto diámetro de placa, sin embargo y a pesar de la posibilidad de que se presentaran fugas por este motivo, se decidió no maquinar las bridas sino hasta después de realizada la prueba hidrostática y no retardar aún más el programa de montaje. Consecuentemente durante el desarrollo de la prueba se presentaron fugas a presiones cercanas a 14 kg/cm<sup>2</sup>, después a los 17 kg/cm<sup>2</sup> y a los 21 kg/cm<sup>2</sup>, pero en éste último caso el gasto de las fugas fué superior al gasto del sistema de bombeo por lo que no se pudo levantar la presión hasta 23.5 kg/cm<sup>2</sup> y hubo necesidad de implementar un sistema de bombeo adicional para continuar la prueba con todo y fugas hasta alcanzar el valor especificado. Con esta presión se realizó la inspección final y no se detectaron problemas de humedad en las soldaduras, ni fugas en la estructura de la carcasa-antedistribuidor, con lo cual se aceptaron definitivamente los trabajos de reparación del conjunto y se hizo la entrega a obra civil para realizar los segundos colados de carcasa.

#### V.6 Conclusiones.

La trascendencia que tuvieron finalmente las fallas en los antedistribuidores se reflejan en la gráfica comparativa de programas de montaje (real vs. montaje sin reparaciones) de la fig. V.11, en donde se observa además la variación en la fecha de sincronización promedio de las unidades debido a ésta causa, ya que dicho montaje es parte de la ruta crítica del programa global de casa de máquinas. Asociado al defasamiento en la generación comercial de energía eléctrica, el costo de supervisión y pruebas adicionales, así como de las reparaciones asciende a un monto considerable, muy por debajo del costo asociado a la instrumentación y seguimiento desde un inicio de un sistema de aseguramiento de calidad total, con carácter preventivo más que correctivo y en donde deben de considerarse como mínimo los siguientes aspectos:

- Códigos y normas oficiales aplicables a los trabajos.
- Análisis de la información técnica de proyecto y diseño.
- Secuencia de trabajos.
- Equipos y herramientas.
- Materiales.
- Almacenamiento de productos.
- Procedimientos de trabajo.
- Estándares de trabajo y mano de obra.
- Ambientes especiales de trabajo.
- Características de trabajo y tolerancias.
- Puntos de control y pruebas de aceptación.
- Protocolos de control de calidad, (en todos los puntos anteriores).

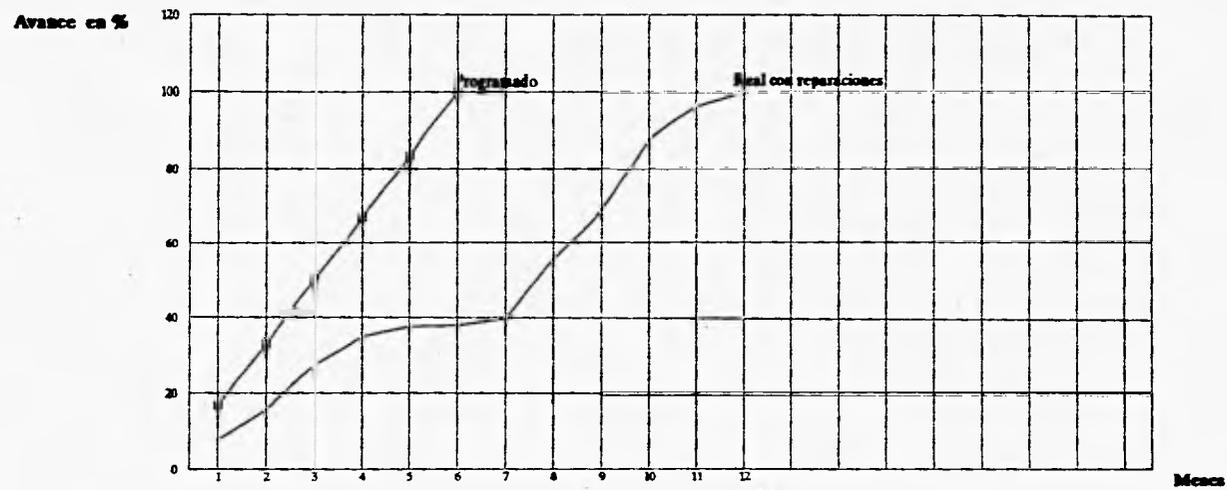


FIG. III.1 GRAFICA COMPARATIVA DE TIEMPOS DE MONTAJE DE ANTEDISTRIBUIDOR-CARCASA Y PRUEBA HIDROSTATICA.



## **VI. PUESTA EN SERVICIO Y PRUEBAS FINALES.**

### **VI.1 Introducción.**

La Puesta en Servicio de las unidades generadoras comprende los ajustes, pruebas y verificaciones finales posteriores al montaje, con objeto de llevar a cabo la sincronización a las líneas de transmisión dejando el turbogenerador en condiciones de operación para su aprovechamiento comercial, integrando de esta manera la energía generada al sistema eléctrico nacional.

Para el inicio de la Puesta en Servicio de cada unidad es necesario, por lo menos, haber terminado con el montaje de los sistemas auxiliares del turbogruppo incluyendo tableros de mando y sistemas de control ya que es necesario ponerlos en servicio antes de iniciar las pruebas directas en las máquinas para garantizar su correcto funcionamiento durante todo el período de pruebas.

Sin llegar a profundizar en la gama de actividades y pruebas necesarias para lograr tal fin, se presenta en este capítulo de manera muy general la metodología a seguir para la puesta en servicio de la turbina ya en su operación conjunta con el generador.

## ***VI.2 Programa de Pruebas y Puesta en Servicio.***

Las actividades a desarrollar en esta etapa final de montaje se pueden resumir de la siguiente manera según su secuencia de ejecución.

### ***1. Pruebas previas de los sistemas auxiliares del turbogenerador.***

- Sistema de agua de enfriamiento.
- Sistema de aire de servicio.
- Sistema de lubricación e inyección de aceite.
- Sistema contra incendio.
- Tuberías de drenaje, etc.

Se trata de pruebas funcionales que se llevan a cabo en seco, con la máquina parada, y de hecho se pueden iniciar sin haber terminado los trabajos finales de montaje de la turbina. Tienen la finalidad de verificar todas las instalaciones que auxilian al turbogruppo, además se ajustan y se calibran sus diferentes componentes tales como filtros, indicadores de presión, ajuste de carreras de válvulas, apertura y cierre, tableros locales, etc. haciéndose también una limpieza final de las tuberías garantizando su buen funcionamiento.

### ***2. Pruebas con agua muerta ó en condiciones hidrostáticas.***

Estas pruebas se realizan con el pasaje hidráulico lleno de agua, pero con la máquina parada, sin girar para lo cual es necesario realizar las siguientes actividades:

- a) Llenado del tubo de aspiración.
- b) Verificación del sello de la flecha.
- c) Ensayo del sistema de mando y regulación.  
En esta etapa se revisa la apertura y el cierre de los álabes directrices trabajando en conjunto con el anillo de mando, los servomotores y demás mecanismos.
- d) Llenado de la tubería de presión.
- e) Ensayo de compuertas de la obra de toma.  
Disparo: desde tableros en posición manual y automático bajo condiciones de cierre rápido y de emergencia. Se revisa la carrera de los eslabones de compuerta, tiempo de cierre de la toma, etc.
- f) Verificación del funcionamiento del sistema de frenado del turbogenerador.
- g) Verificación del funcionamiento del sistema de lubricación y de inyección de aceite a presión del cojinete de carga.
- h) Ensayo del sistema de refrigeración del generador.

### ***3. Ensayos mecánicos con máquina girando en vacío.***

Terminadas las pruebas con agua muerta se prepara el primer rodado de la máquina, permitiendo el libre paso del agua a través del distribuidor y del rodete, pero sin carga eléctrica

en el generador ya que no hay alimentación de corriente eléctrica al sistema de excitación del rotor del generador por lo que no se induce ningún campo magnético a las bobinas del estator y no hay generación de electricidad.

a) Primer giro y aumento de velocidad escalonada.

La velocidad nominal de rotación del turbogenerador es de 150 rpm. Esta velocidad se alcanza lentamente y en intervalos, en función de la apertura de álabes, manejando incrementos de 25 rpm, hasta llegar a 150. Cuando esta velocidad se alcanza y se estabiliza se debe verificar:

b) Medición de las vibraciones del conjunto.

c) Medición de las temperaturas en el cojinete guía y en el cojinete de carga del generador.

d) Chequeo del regulador de velocidad, ajustes menores y estabilización de frecuencias.

e) Balanceo dinámico del rotor.

f) Medición del rozamiento entre anillos de desgaste superiores e inferiores. (Se revisa el rozamiento y se ajusta su posición, de ser necesario).

g) Verificación del sistema de ventilación y enfriamiento del generador.

h) Ajuste del sistema de aire de sellado de la chumacera guía.

i) Medición del tiempo de frenado para el paro total de la máquina.

j) Ajuste del sistema de protección de sobrevelocidad:

- Ensayo de sobrevelocidad mecánica (140% Nominal)
- Ensayo de sobrevelocidad eléctrica (130% Nominal)
- Inspección del generador y turbina.

En este ensayo se debe verificar el adecuado funcionamiento del sistema de protección de la turbina cuando aumenta en un 40% la velocidad nominal de giro del grupo.

k) Pruebas del regulador de velocidad.

l) Pruebas del sistema manual de arranque y parada.

m) Secado del generador (girándolo).

n) Apriete final de control de los componentes fundamentales.

o) Revisión de las chumaceras carga y guía.

#### **4. Pruebas eléctricas del generador con excitación auxiliar y definitiva.**

Al terminar las pruebas anteriores, la máquina se vuelve a girar, pero ahora se conectan los sistemas de excitación auxiliar y definitiva del generador para verificar los parámetros eléctricos de la unidad, por lo que sí se crea un campo magnético y se induce una corriente eléctrica en las bobinas del estator, pero no se conecta el generador todavía a las líneas de transmisión.

a) Pruebas del sistema de excitación auxiliar (banco de baterías y turbina auxiliar).

b) Pruebas al sistema de protecciones.

c) Pruebas de cortocircuito.

d) Medición del voltaje inducido en la flecha.

e) Pruebas de excitación definitiva del generador.

f) Pruebas del sistema de control local del turbogenerador.

- Arranque y paradas vía relés.
  - Arranque y parada automática.
  - Parada de la máquina por falla.
  - Parada de emergencia.
- g) Pruebas al sistema de sincronización.
- Manual.
  - Automático.

#### **5. Primera sincronización y pruebas con la unidad sincronizada.**

Estas pruebas se realizan con la máquina girando ya con su sistema de excitación definitiva probado y ajustado, pero en esta fase el generador ya se conecta a las líneas de transmisión por lo que la máquina ya está trabajando con carga eléctrica (consumo).

- a) Pruebas del regulador de velocidad.
- b) Pruebas de operación al sistema de protecciones con carga:
  - Potencia inversa.
  - Baja excitación.
  - Carga desequilibrada.
- c) Rechazos de carga.
- d) Pruebas de excitación con carga.
- e) Ensayos de calentamientos con carga nominal.
  - Temperatura de turbina, generador y transformadores.
  - Medición de vibraciones.

#### **6. Pruebas con equipo para operación como condensador síncrono.**

#### **7. Inspección final y entrega para operación comercial.**

### **VI.3 Pruebas de eficiencia en el prototipo.**

#### **1. Objetivo.**

Las pruebas finales de eficiencia en campo de las turbinas hidráulicas tienen la finalidad de evaluar el diseño, pero primordialmente la calidad del conjunto de los trabajos de montaje para determinar si los requerimientos especificados por la Comisión Federal de Electricidad en cuanto a valores de potencia y eficiencia de la máquina garantizados por los proveedores, son los acordados. La reglamentación en la que se basan las pruebas está consignada en la publicación 41 del Código Internacional de Equipos Electromecánicos, (IEC-41).

Estas pruebas se llevan a cabo durante la etapa de operación comercial y normal del

turbogenerador, cuando ha pasado un determinado tiempo (por lo menos 6 meses después de su puesta en servicio, según IEC), ya que la máquina se ha asentado y estabilizado lo suficiente como para poder evaluar más objetivamente sus características de operación. Desgraciadamente en este trabajo no fué posible incluir los resultados obtenidos en la realización de las pruebas por el tiempo de espera para realizarlas (enero/febrero de 1995), sin embargo a continuación se presentan las características de las pruebas, metodologías, instrumentación, etc. para ilustrar esta última fase de pruebas en el turbogenerador.

## **2. Condiciones de prueba.**

a) Existen tres caídas netas de operación para la Central (hm<sub>máx</sub>: 157.30, hdiseño: 145.10, hm<sub>mín</sub>: 119.70 m.) y estrictamente deberían de realizarse las pruebas de eficiencia a cada una de estas caídas, pero debido a la dificultad de controlar los niveles de agua en el vaso la prueba se realiza sólo a una de ellas.

b) Durante el período de pruebas de eficiencia sólo debe estar en operación la unidad a probar para que todos los parámetros necesarios para calcularla sean obtenidos de una sola fuente de datos y los niveles del agua en el desfogue correspondan al gasto turbinado de una máquina.

c) Las pruebas de eficiencia deben ser realizadas dentro de los siguientes límites ó tolerancias durante cada ensayo individual:

- Las variaciones en la carga no deben exceder +/- 1.5% del promedio de la carga.
- Las variaciones en la caída no deben exceder +/- 1.0% del promedio de la caída.
- Las variaciones en la velocidad no deben exceder +/- 0.5% de su promedio.

d) El promedio de la caída para cada ensayo individual durante todo el conjunto de pruebas de evaluación no debe desviarse en +/- 3%.

e) Durante las pruebas el generador debe ser operado con factor de potencia constante y muy cercano a uno.

f) La medición del flujo a la turbina se realiza con tubo pitot y se mide por lo menos en tres ocasiones en cada ensayo individual de prueba.

g) Las pruebas deben ser realizadas al 50, 60, 80 y 100% de la potencia de la turbina.

h) La medición del gasto de descarga debe ser realizada en un tiempo mínimo de 60 min, para cada ensayo y repetirse al menos tres veces.

i) La potencia del generador, la presión de entrada en la turbina, los niveles, velocidad y otros parámetros, deben ser registrados a intervalos constantes (cada 5 min.) durante la medición de la descarga.

### 3. Preparativos para la prueba.

En las tablas VI.1 y VI.2 se presentan los puntos ó lugares de medición, los instrumentos, el equipo y el personal necesarios para realizar la prueba.

Antes de iniciar con la instrumentación necesaria para la prueba se debe realizar lo siguiente:

- a) La turbina y todo el pasaje hidráulico deben ser inspeccionados totalmente.
- b) El diámetro interior de la tubería de presión, en la sección de medición del flujo, debe ser medida al menos en seis diámetros, y el diámetro medio debe ser tomado como la media aritmética.
- c) El diámetro interior de la sección de medición de presión de entrada a la carcasa espiral debe ser medido, y el diámetro medio debe ser tomado como la media aritmética de cuatro diámetros medidos.
- d) La altura del manómetro de precisión tipo bourdon para medir la presión de entrada, debe ser medida desde la cota de referencia, con manómetro tipo "U" y cinta métrica.
- e) Las escalas de medición del nivel del desfogue deben ser verificadas con teodolito.
- f) No deben existir fugas de agua entre la sección de medición del flujo y la turbina. Si el agua de enfriamiento del turbogenerador es tomada desde la tubería de presión de la unidad en prueba, el flujo de enfriamiento total debe ser medido.

### 4. Métodos de medición.

#### a) Medición del flujo a la turbina.

La medición del flujo a la turbina debe ser realizado por el método del tubo pitot. La sección de medición mostrada en la fig. VI.3 debe ser tal que se obtenga una longitud recta de 20 diámetros aguas arriba y 4 diámetros aguas abajo aproximadamente. El tubo tiene la característica de ser desplazable para posicionarlo en cada punto de muestreo.

Para definir los puntos de muestreo se recurre a la norma ASME-PTC-38-1980, apéndice H, y para un diámetro de 7.80 m. se recomiendan seis puntos de muestreo por radio y cada punto de muestreo se calcula con la ecuación:

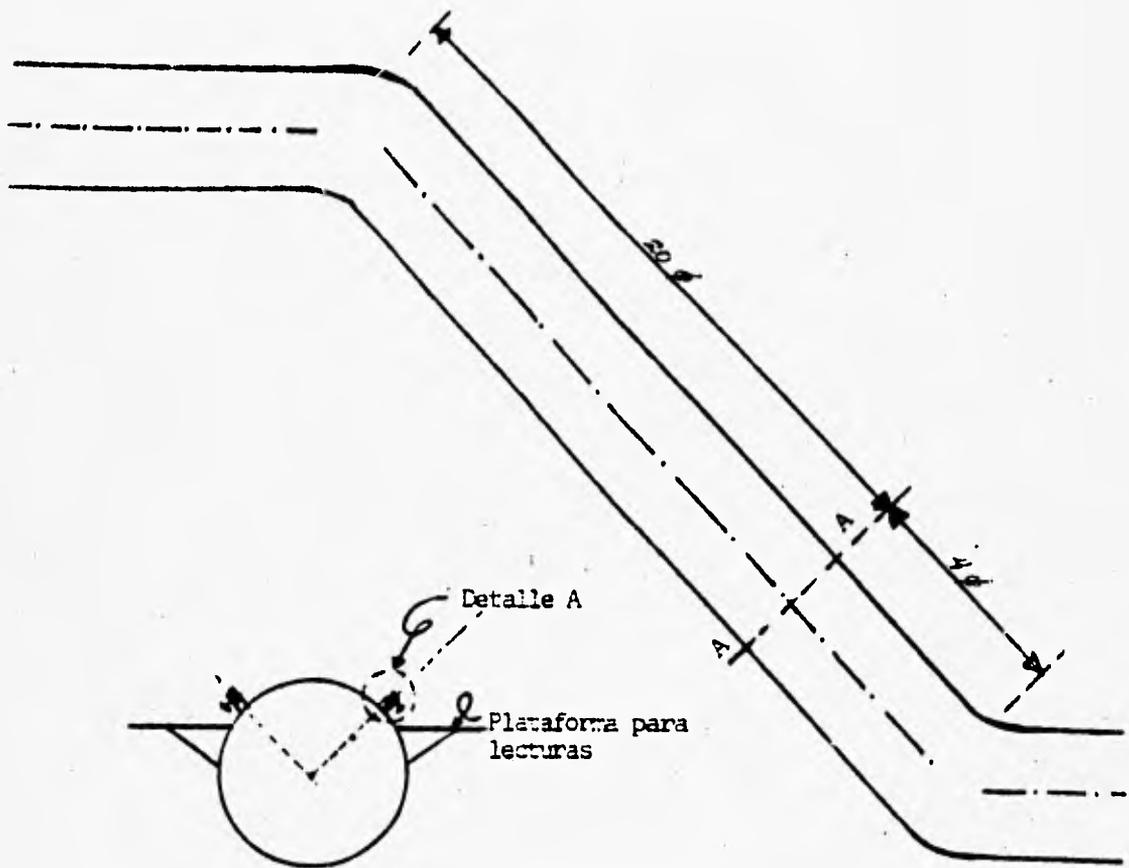
$$R_p = \sqrt{(2R^2(2p-1)/N)} \quad (6.1)$$

<i>PUNTO DE MEDICION</i>	<i>INSTRUMENTO</i>
<i>1. Potencia del generador eléctrico.</i>	<i>Wattímetros de precisión, (Método de los 2 wattmetros).</i>
<i>2. Eficiencia del generador eléctrico.</i>	<i>Resultados de pruebas calorimétricas.</i>
<i>3. Flujo a la turbina.</i>	<i>Tubo pitot. Manómetro diferencial. Mercurio. Temperatura ambiente. Temperatura del agua.</i>
<i>4. Presión de entrada a la turbina.</i>	<i>Manómetro de precisión tipo bourdon.</i>
<i>5. Nivel en el desfogue.</i>	<i>Escalas fijas en el portal de desfogue y teodolito.</i>
<i>6. Porcentaje de apertura de álabes.</i>	<i>Escala de indicación local.</i>

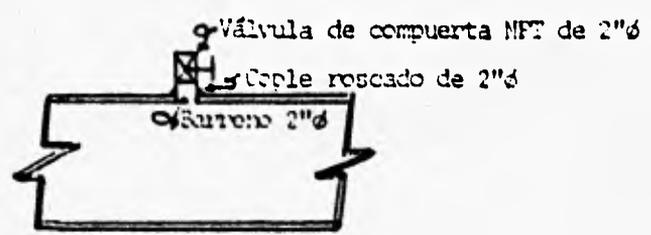
**FIG. VI.1 INSTRUMENTACIÓN PARA REALIZAR LAS PRUEBAS.**

<i>PARAMETRO</i>	<i>INSTRUMENTO</i>	<i>No. PERSONAS</i>
<i>1. Flujo a turbina.</i>	<i>Tubo pitot (2)</i>	<i>4</i>
<i>2. Calda neta.</i>	<i>Manómetro tipo bourdon. (2) Escala en desfogues (2).</i>	<i>2 2</i>
<i>3. Potencia eléctrica</i>	<i>Wattmetros clase 0.25 (2)</i>	<i>2</i>
<i>4. % de apertura de álabes.</i>	<i>Tablero local de turbina.</i>	<i>1</i>
<i>5. Velocidad de rotación rpm.</i>	<i>Tablero local de turbina.</i>	<i>1</i>

**FIG. VI.2 PERSONAL PARA REALIZAR LAS PRUEBAS.**



CORTE A-A



DETALLE A

FIG. VI.3 PREPARATIVOS PARA MEDICIÓN DEL GASTO.

donde:

$R_p$  = distancia del centro de la tubería al punto  $p$  de muestreo.

$R$  = radio interior de la tubería en m.

$N$  = número total de puntos de muestreo en dos diámetros.

$$N = 6 \times 2 \times 2 = 24.$$

$p$  = punto de muestreo seleccionado (1,2,3... $p$ ).

La posición de cada punto de muestreo se presenta en la fig. VI.4.

#### b) Medición de la caída.

La presión de entrada a la turbina se mide con un manómetro de precisión tipo bourdon, desde cuatro tomas de presión igualmente espaciadas alrededor de la sección de entrada de la espiral.

Para medir el nivel de agua en el desfogue, se utilizan escalas fijas colocadas en ambos lados del portal de desfogue de la unidad en prueba.

#### c) Medición de la potencia.

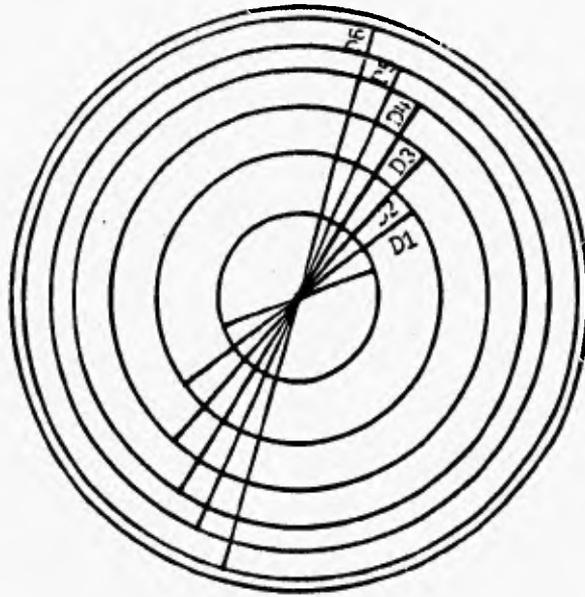
La potencia de la turbina se mide por el método indirecto, que toma en consideración la potencia eléctrica del generador (medida con wátmetros de precisión) en las terminales de salida y la eficiencia real del mismo generador.

#### d) Errores individuales en las mediciones.

Los errores individuales en las mediciones de acuerdo al código IEC-41, son:

- Medición del gasto, (método tubo pitot).	$f_q = \pm 1.5\%$
- Caída:	
Medición del nivel libre con escala fija en desfogue.	$f_h = \pm 5/h, h$ en m.
Medición de la presión de entrada a la turbina con manómetro de precisión tipo bourdon.	$f_p = \pm 0.5\%$

De acuerdo con cada imprecisión individual, el error en la medición de la caída se calcula por:



DIAMETRO

m

- D1
- D2
- D3
- D4
- D5
- D6

FIG. VI.4 POSICIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO.

$$fH = [(fh * h + fp * p/\gamma) / (h + p/\gamma)] \quad (6.2)$$

donde:

$fH$  = Imprecisión en la caída.  
 $h$  = nivel del desfogue medido, m.  
 $p$  = presión de entrada, kg/cm<sup>2</sup>.  
 $\gamma$  = peso específico del agua, kg/m<sup>3</sup>.

- Potencia.

$$fe = +/- 0.8\%$$

- Eficiencia de la turbina.

El error en la determinación de la eficiencia del prototipo de la turbina está compuesto de los errores parciales en la medición del gasto, la caída y la potencia:

$$fn = \pm \sqrt{fq^2 + fH^2 + fe^2} \quad (6.3)$$

Este valor debe encontrarse dentro del rango de imprecisiones toleradas por el Código IEC-41.

### 5. Cálculo de resultados.

#### a) Cálculo del gasto a la turbina.

La velocidad del flujo en cada punto de muestreo debe ser determinada por:

$$V_i = K_i * \sqrt{2 * g * h_i} \quad (6.4)$$

donde:

$K_i$  = coeficiente de calibración para el punto  $i$  del tubo pitot.  
 $g$  = aceleración local de la gravedad, en m/s<sup>2</sup>.  
 $h_i$  = lectura diferencial del tubo pitot en el punto  $i$ , en m. columna de agua.  
 $V_i$  = Velocidad del agua en el punto  $i$ , en m/s.

La velocidad media en cada radio se calcula como el promedio aritmético de las velocidades calculadas en cada punto de muestreo  $i$ .

$$V_r = (V_1 + V_2 + \dots + V_n) / n \quad (6.5)$$

La velocidad media de la sección de medición debe ser calculada como la media aritmética de la velocidad media en cada radio.

$$V_m = (V_{r1} + V_{r2}) / 2 \quad (6.6)$$

La descarga en la sección de medición debe ser calculada con la siguiente ecuación:

$$Q = V_m * A \quad (6.7)$$

donde:

- Q = gasto de descarga medido en m<sup>3</sup>/s.
- V<sub>m</sub> = Velocidad media en m/s.
- A = Area de la sección de medición del flujo en m<sup>2</sup>.

b) Cálculo de la caída.

La caída se calcula con la ecuación de Bernoulli:

$$H_n = Z_1 + a_1 - Z_2 + 10 * P_{g1} / \gamma + (V_1^2 - V_2^2) / (2 * g) \quad (6.8)$$

donde:

- Z<sub>1</sub> = elevación del eje del distribuidor en msnm.
- a<sub>1</sub> = Distancia del centro del manómetro al centro de turbina, en m.
- Z<sub>2</sub> = Elevación del nivel del desfogue en msnm.
- P<sub>g1</sub> = Presión a la entrada de la turbina, en kg/cm<sup>2</sup>.
- V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> = Velocidad del agua a la entrada y a la salida de la turbina.
- g = Aceleración local de la gravedad, en m/s<sup>2</sup>.

c) Cálculo de la potencia de la turbina.

Como ya se ha indicado, la potencia de la turbina se calcula por el método indirecto, es decir, por medio de la medición directa de la potencia en las terminales del generador y la eficiencia

real del mismo, para lo cual se instrumenta el estator y la chumacera de carga para conocer las pérdidas de energía que existen en el movimiento de rotación del turbogruppo.

$$P_t = P_a / N_a \quad (6.9)$$

donde:

$P_t$  = potencia de la turbina.  
 $P_a$  = potencia del generador.  
 $N_a$  = eficiencia real del generador.

d) Cálculo de la eficiencia de la turbina.

De acuerdo a la Norma IEC-41, la eficiencia se calcula como:

$$N_t = \pm P_t / (\gamma * Q * H_n * K) \quad (6.10)$$

$K = 1000/102$   
 $H_n$  = Caída neta en m.  
 $Q$  = Gasto turbinado en m<sup>3</sup>/s.  
 $\gamma$  = Peso específico del agua, en kg/m<sup>3</sup>.

6. Comparación con los valores garantizados y con los obtenidos escalando el modelo de turbina.

Debido a la dificultad para controlar los niveles de agua en el vaso, la caída de prueba puede ser diferente a aquella que corresponde específicamente a los valores garantizados. Si la desviación de la caída es menor del +/- 3%, los resultados calculados bajo la condición de caída de prueba se pueden comparar con los valores garantizados por el siguiente método de conversión:

$$\begin{aligned} N_n &= N_t \\ Q_n &= Q_t * (H_n/H_t)^{1/2} \\ P_n &= P_t * (H_n/H_t)^{3/2} \end{aligned}$$

donde:

n - indica condición garantizada.  
t - indica condición de prueba.

Si las condiciones de prueba son diferentes de las condiciones garantizadas, y la desviación de la caída varió durante las pruebas en más del 3%, las pruebas deben repetirse.

**Finalmente para determinar si la eficiencia de la turbina llena las garantías establecidas por el proveedor, la eficiencia media pesada calculada tomando en cuenta la tolerancia  $\eta_n$ , debe ser comparada con la eficiencia garantizada.**



## **VII. COMENTARIOS FINALES.**

Uno de los aspectos más importantes que se desprende de los temas abordados en el trabajo y que conviene enfatizar con la intención de que el lector reflexione sobre el mismo, es el de la planeación general de la obra dado el alto porcentaje que representa en costo y horas de trabajo la totalidad de la ejecución de las obras de generación en una central hidroeléctrica. La planeación de las actividades a desarrollar para el montaje de un sistema turbina-generador debe prestar atención especial a la coordinación de los trabajos de obra civil en casa de máquinas con los propios del montaje electromecánico, ya que de no hacerlo y no concebir los trabajos a detalle en su conjunto se corre el riesgo de elaborar programas de obra incompletos que seguramente se defasarán por interferencias de una y otra área, además se utilizarán recursos ó tendrán baja eficiencia y en caso extremo inclusive puede causarse algún daño a los equipos ó a las instalaciones cuando se pretende ejecutar actividades simultáneas que rigurosamente debieran realizarse una después de otra. Todas estas consecuencias obviamente con sus sobrecostos asociados.

Otro punto importante en este sentido es el de la planeación de la utilización de espacios, ya que se debe contar con el área suficiente para realizar al mismo tiempo trabajos preparativos del montaje en sitio como desembalaje de equipos de instalación, preensamble de los mismos, manejo de equipo pesado de construcción, etc., así como para realizar los trabajos de obra civil. Por tanto el diseño de la casa de máquinas en combinación con los procedimientos constructivos y la secuencia de construcción de la misma deberán tener en cuenta por una parte el desarrollo de la obra civil y sus necesidades y por otra, el de la obra electromecánica y las suyas propias para que en cualquier punto de los programas la utilización de espacios sea la óptima.

La elaboración de los programas de actividades del montaje de turbina no es tarea fácil, intervienen una serie de variables de toda índole que a veces difícilmente se pueden cuantificar. Tal es el caso por ejemplo, de los programas de suministro de equipos y las eventualidades que se presentan durante su transporte a obra, ó en el caso de casas de máquinas en caverna cuando los tratamientos adicionales locales a la roca pueden defasar los programas de trabajo. De cualquier forma y en lo que a la máquina se refiere es necesario primeramente estudiar toda la información técnica como planos, manuales, pruebas en fábrica del equipo en particular ya que cada caso es diferente, para entender la tecnología del fabricante y lo versátil que puede resultar su producto para proponer tal ó cual procedimiento de montaje y pruebas, así mismo para evaluar recursos a utilizar y calcular tiempos y costos. Esto naturalmente es un proceso iterativo para encontrar las propuestas de trabajo óptimas. Independientemente de la turbina los procedimientos deben integrarse a los procedimientos de montaje de generadores eléctricos principalmente, así como a otras instalaciones en casa de máquinas y obra civil para conciliarse y finalmente integrar el programa y procedimiento global de construcción y montaje de la obra de generación.

Los aspectos meramente técnicos en el diseño, la fabricación y montaje de las turbinas hidráulicas se rigen como en cualquier otro proceso productivo con parámetros y normas internacionales de calidad que se integran en un paquete en el cual quedan incluidas las pruebas de aceptación tanto en modelo como en prototipo de la máquina. No se puede ni se debe ignorar en cualquier punto del desarrollo de los trabajos la aplicación de un Sistema de Aseguramiento de la Calidad, escatimar recursos en su instrumentación puede resultar no a largo sino a muy corto plazo peligroso y antieconómico.

Actualmente nuestro país cuenta con la tecnología y la mano de obra calificada para realizar eficientemente los trabajos de montaje y pruebas de estos tipos de equipo, así como con la tecnología para desarrollar la obra civil completa de una presa. Entidades como la Comisión Federal de Electricidad han formado profesionales y técnicos capaces de asesorar a organismos e instituciones internacionales en la construcción de grandes obras hidráulicas. Sin embargo y a pesar de que ya es posible fabricar en México componentes electromecánicos varios, no sólo de turbinas para este tipo de centrales, todavía dicha industria no alcanza y por mucho, niveles de tecnología que la hagan competitiva ante empresas alemanas, japonesas y norteamericanas principalmente. La alta dependencia tecnológica trae consigo un elevado costo de adquisición de equipos y partes de repuesto para estas centrales, sólo para Aguamilpa el importe total por la importación de equipos electromecánicos alcanzó casi los 200 millones de dólares. Es necesario en esta, como en muchas otras ramas de la actividad industrial en nuestro país, el apoyo decidido a la educación, la investigación y el desarrollo de tecnologías propias que sustituyan ó minimizen en el mediano plazo las importaciones hacia nuestro país y puedan competir por lo menos en mercados menos desarrollados que el nuestro.

La Central de Aguamilpa con sus tres turbinas Francis de 320 MW representa actualmente la cuarta planta hidroeléctrica en importancia del país en lo que a potencia instalada se refiere (960 MW), siendo solamente superada por la C.H. Chicoasén (1,500 MW), la C.H. Malpaso

(1,080 MW) y la C.H. El Infiernillo (1,000 MW). Dentro de la red nacional de suministro de energía hidroeléctrica cuya potencia instalada era de 8,170 MW en 1993, Aguamilpa representa un incremento del 11.75 % que aunado a la próxima entrada en operación de la Central de Zimapán (292 MW), contribuirá de manera importante al esfuerzo por satisfacer la demanda nacional de energía eléctrica en horas pico de consumo. Aguamilpa marca también el reinicio y la continuación próximamente de otras obras de infraestructura hidráulica que conforman el plan general para el aprovechamiento del río Santiago.

---

**APENDICE**

## **APENDICE.**

### **Datos generales del proyecto.**

#### **1. Localización.**

Coordenadas:	
Longitud Oeste	104° 46'.
Latitud Norte	21° 50'.
Río	Santiago.
Estado	Nayarit.
Municipios	Tepic y El Nayar.

#### **2. Hidrología.**

Area de la cuenca del Río Santiago.	75,651 Km <sup>2</sup> .
Area de la cuenca hasta Aguamilpa.	73,834 Km <sup>2</sup> .
Número de años de registro.	51 años.
Escurrimiento medio anual.	6,775 mill. m <sup>3</sup> .
Volúmen medio mensual escurrido.	565 mill. m <sup>3</sup> .
Gasto medio anual.	214.8 m <sup>3</sup> /s.

Volúmen medio anual aprovechado.	6,257 mill m3.
Gasto medio aprovechado.	198.4 m3/s.
Porcentaje de aprovechamiento.	92 %.

### 3. Vaso de almacenamiento.

Elevación al NAMINO, 190 msnm.	Cap: 2,965 mill m3.
Elevación al NAMO, 220 msnm.	Cap: 5,540 mill m3.
Elevación al NAME, 232 msnm.	Cap: 6,950 mill m3.
Capacidad para azolves.	1,725 mill m3.
Capacidad útil NAMO-NAMINO.	2,575 mill m3.
Capacidad para control de avenidas.	1,410 mill m3.
Area ocupada por el embalse al NAME.	128 Km <sup>2</sup> .
Area ocupada por el embalse al NAMO.	109 Km <sup>2</sup> .

### 4. Obra de desvío.

Gasto máximo de la avenida de diseño.	6,687 m3/s.
Gasto máximo de descarga.	5,120 m3/s.
Localización.	Márgen izquierda.
Número de túneles (secc. portal 16X16m).	2.
Longitud del túnel No. 1	924.1 m.
Longitud del túnel No. 2	1,080.4 m.
Longitud total	2,004.5 m.
Elevación plantilla entrada túnel No 1.	64.00 msnm.
Elevación plantilla entrada túnel No. 2.	69.00 msnm.
Total de excavaciones túnel, lumbreras y entradas.	751,000 m3.
Volúmen total de concreto.	64,633 m3.
Acero de refuerzo y estructural.	1,430 ton.
Atagüa de aguas arriba:	
Tipo.	Materiales graduados.
Talud aguas arriba.	1.75:1
Talud aguas abajo.	1.5:1
Elevación de corona.	118 msnm.
Volúmen.	907,659 m3.
Atagüa de aguas abajo:	
Tipo.	Materiales graduados.
Talud aguas arriba.	1.5:1
Talud aguas abajo.	2:1
Elevación de corona.	80 msnm.
Volúmen.	78,119 m3.

### 5. Cortina.

Tipo.	Enrocamiento con cara de concreto.
Elevación del desplante.	58 msnm.
Elevación de la corona.	235 msnm.
Longitud de la corona.	642 m.
Altura máxima.	187 m.
Volúmen total de material.	14 mill m3.
Talud aguas arriba.	1.5:1
Talud aguas abajo.	1.4:1
Bordo libre.	3.0 m.
Cara de concreto:	
Área.	137,250 m <sup>2</sup> .
Espesor.	Variable de 85 a 30 cm.
Ancho de losas longitudinales.	15 m.
Volúmen de concreto.	98,850 m3.
Plinto:	
Ancho variable de 9m (fondo) a 5m (corona).	

### 6. Obra de excedencias.

Localización.	Márgen izquierda.
Tipo.	Controlado en canal a cielo abierto.
Número de canales.	2 (servicio y auxiliar).
Ancho de canales.	43.60 m.
Longitud.	382 m.
Velocidad máxima.	38 m/s.
Aireadores de tipo escalón.	
Gasto máximo de la avenida de diseño.	17,500 m3/s.
Período de retorno (Tr).	10,000 años.
Capacidad máxima de descarga.	14,900 m3/s.
Número de vanos.	6
Ancho de vanos.	12 m.
Longitud de cresta.	72 m.
Elevación canal de llamada.	205 msnm.
Elevación de la cresta.	210 msnm.
Tipo de compuertas.	Radiales.
Dimensiones de compuertas.	12 X 19.34 m.
Cantidades de obra:	
Excavación a cielo abierto.	5'200,000 m3.
Concreto.	130,901 m3.
Acero de refuerzo.	5,940 ton.

## 7. Obra de generación.

<b>Obra de Toma:</b>	
Tipo.	Rampa.
Elevación piso del canal de llamada.	170 msnm.
Número de bocatomas.	3.
Elevación piso de operación.	235 msnm.
Dimensión de compuertas.	5.8 X 7.4 m.
<b>Conducción a presión:</b>	
Número de túneles.	3.
Diámetro.	7.40 m.
Longitud.	200 m.
Longitud de blindaje.	131 m.
Espesor de placa.	Variable de 1 1/4" a 1 1/2".
<b>Casa de máquinas:</b>	
Tipo.	Caverna.
Ancho.	22.80 m.
Largo.	134.00 m.
Alto.	50.00 m.
<b>Galería de oscilación:</b>	
Ancho.	16.00 m.
Largo.	85.00 m.
Alto.	48.50 m.
<b>Túnel de desfogue:</b>	
Sección portal de 16.0 X 16.0 m.	
Longitud.	391.0 m.
<b>Cantidades de obra:</b>	
Excavación en caverna.	202,072 m3.
Excavación en túnel.	146,756 m3.
Excavación a cielo abierto.	1'774,619 m3.
Concreto.	116,771 m3.
Acero de refuerzo.	7,100 Ton.
Acero estructural, blindaje.	2,600 Ton.
<b>Equipo Electromecánico:</b>	
<b>Generador de potencia:</b>	
Generador síncrono de polos salientes de eje vertical, trifásico, para ser operado como condensador síncrono.	
Potencia Nominal.	324 Mw.
Tensión de generación.	13.8 Kv.
Frecuencia.	60 Hz.
Velocidad de rotación nominal.	150 rpm.
Número de polos.	48.

Peso del rotor.	725 Ton.
Peso del estator.	300 Ton.
Proveedor.	Electrosila.
Procedencia.	San Petesburgo, Rusia.
<b>Turbina hidráulica:</b>	
Tipo.	Francis.
Potencia Máxima.	368 Mw.
Potencia Nominal.	320 Mw.
Caída neta máxima.	157.3 m.
Caída neta de diseño.	145.1 m.
Caída neta mínima.	119.7 m.
Velocidad de rotación.	150 rpm.
Velocidad de desboque.	297 rpm.
Gasto de diseño.	240 m <sup>3</sup> /s.
Proveedor.	Turboatom.
Procedencia.	Jarkov, Ucrania.

<b>Transformadores de potencia monofásicos.</b>	
Relación de transformación.	400/13.8 Kv.
Capacidad.	125 MVA.
Frecuencia.	60 Hz.
Clase de enfriamiento.	Oil-air/2 pasos de aire forzado.
Peso con aceite.	175 ton.
Proveedor.	Zaporozhetransformator.
Procedencia.	Zaporozhyie, Ucrania.

**Subestaciones eléctricas de 400 Kv y 115 Kv.**

Las dos son del tipo encapsulada en SF6, la de 400 Kv tiene un arreglo de interruptor y medio y a través de ella se entrega la energía eléctrica generada. La de 115 Kv tiene un arreglo de barra principal y barra de transferencia y por medio de ella se recibe la energía del sistema para alimentar los servicios auxiliares de la planta.

	<b>S.E. 400 Kv.</b>	<b>S.E. 115 Kv.</b>
Frecuencia nominal.	60 Hz.	60 Hz.
Corriente nominal.	2,000 A.	2,000 A.
Número de interruptores.	8	5
Número de cuchillas.	21	14
Proveedor.	Siemens, AG.	Siemens, AG.
Procedencia.	Alemania.	Alemania.

**Sistema de control automático y adquisición de datos. (SCAAD).**

La Central cuenta con el sistema de control conocido como SCAAD (Sistema de control automático y adquisición de datos) y comprende básicamente controladores lógicos programables para cada unidad + generadora, servicios auxiliares, unidad hidráulica auxiliar, subestación y obra de toma, que se interconectan a través de fibra óptica a las computadoras localizadas en la sala de control central, ubicada en el edificio de la subestación de 400 Kv. Desde ella se puede controlar y monitorear todos y cada uno de los sistemas instalados en la Central. Es posible controlar también la Central en forma remota desde los centros de control de energía de la Ciudad de Guadalajara y de la Ciudad de México.

El proveedor es Siemens, A.G. y la procedencia es de Alemania.

**8. Fechas relevantes.**

Inicio de la obra por administración directa.	Marzo-13-1989.
Primera tronada en túnel de desvío.	Marzo-15-1989.
Inicio de las obras por contratación.	Noviembre-9-1989.
Desvío del Rfo Santiago.	Marzo-13-1990.
Cierre final del río.	Junio-25-1993.

<b><u>OBRA</u></b>	<b><u>INICIO</u></b>	<b><u>TERMINACION</u></b>
Cortina	Marzo 1990	Diciembre 1993.
Obra de excedencias.	Septiembre 1990	Febrero 1994.
Obra de Toma.	Agosto 1990	Agosto 1993.
Tubería a presión.	Abril 1991	Mayo 1993.
Casa de máquinas.	Septiembre 1990	Febrero 1993.
Túnel de desfogue.	Diciembre 1990	Junio 1993.

**Sincronización de las unidades:**

Primera Unidad.	Marzo-18-1994.
Segunda Unidad.	Mayo-28-1994.
Tercera Unidad.	Junio-9-1994.

Pruebas de Puesta en Servicio Finales.	Febrero-Octubre 1994.
Pruebas de Eficiencia en turbinas.	Enero-Febrero de 1995.

# PLANTA DEL PROYECTO

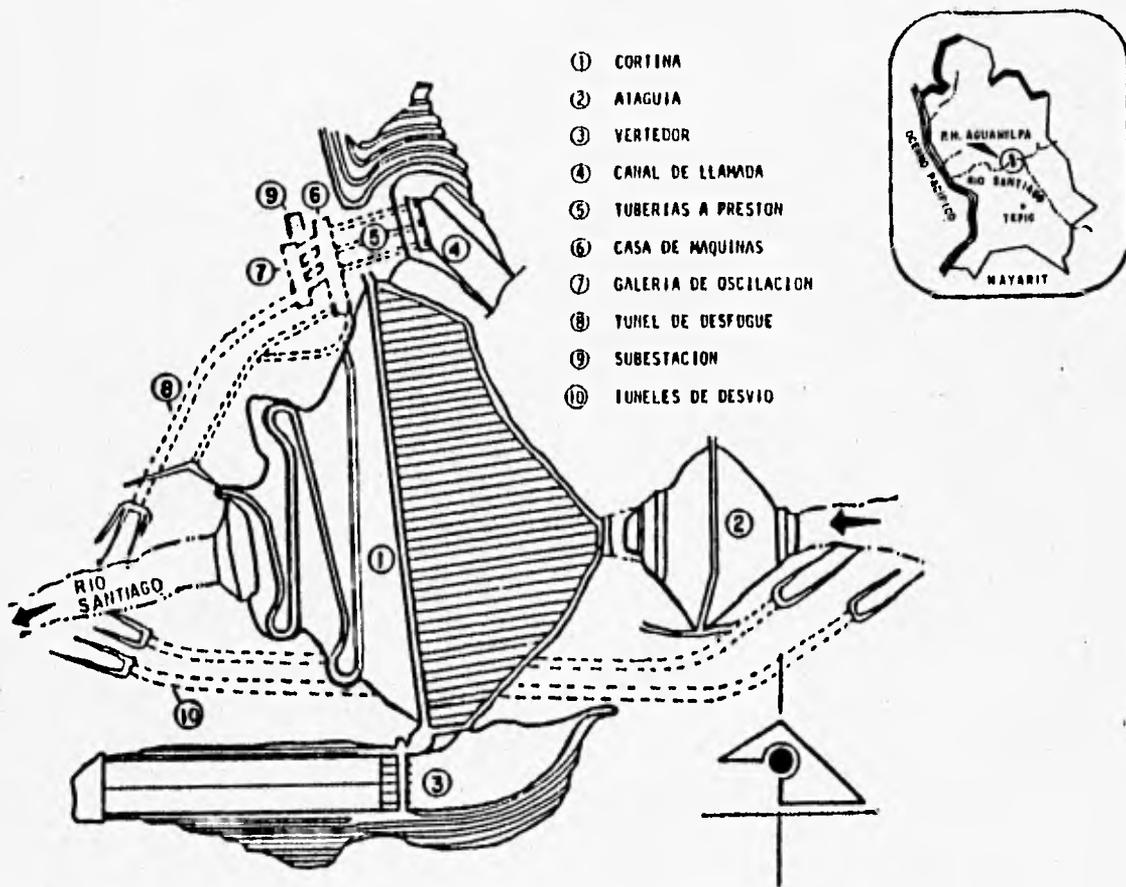


FIG. A1. LOCALIZACION DE LAS OBRAS PRINCIPALES DE LA CENTRAL.

## POTENCIAL HIDROELECTRICO RIO SANTIAGO

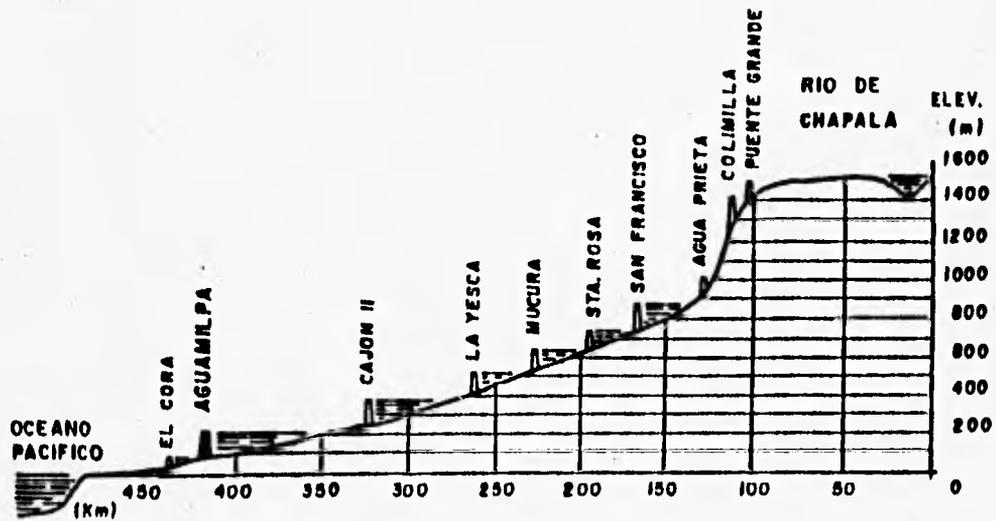


FIG. A2. PLAN DE APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO DEL RIO SANTIAGO.

---

**BIBLIOGRAFIA**

#### **BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.**

- Zopetti Júdez G., "Centrales Hidroeléctricas", Ediciones Gustavo Gili, 5a. edición, México D.F., 1982.
- Polo Encinas M., "Turbomáquinas Hidráulicas", Noriega Editores, 3a. edición, México D.F.
- Dixon S.L., "Termodinámica de las turbomáquinas", Ed. Dossat, 1a. edición en español, Madrid 1981.
- Torres Herrera F., "Obras Hidráulicas", Ed. Limusa, 2a. edición, México 1992.
- Sotelo Avila G., "Hidráulica General, Vol.1 Fundamentos", Ed. Limusa, México, D.F. 1987.
- TURBOATOM, "Reporte de las pruebas de aceptación en modelo de las turbinas hidráulicas de la Central Aguamilpa en México", Jarkov, Ucrania 1992.
- Comisión Federal de Electricidad, Laboratorio de Pruebas y Ensayos de Materiales (LAPEM), "Especificación CFE L0000-42, Requisitos del Sistema de Aseguramiento de Calidad de CFE", Irapuato, Méx. 1992.

- **International Electrotechnical Commission (IEC), "International Code for the field acceptance tests of hydraulic turbines", 2nd edition, Geneve, Suisse 1963.**
- **Héctor García G., Prof. titular "Turbomáquinas Hidráulicas" Facultad de Ingeniería, UNAM, Secretario Técnico de la División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica, UNAM.**
- **Salvador Del Pozzo M., J. Luis Vega H., Asesores de montajes electromecánicos en plantas hidroeléctricas, C.F.E., Aguamilpa, Nay.**
- **Miguel A. Izquierdo F., Arturo Zamora S., Disciplina Electromecánica, Jefatura del P.H. Aguamilpa, C.F.E.**
- **Mijail Mijailov, Jefe de Supervisión de Montaje de Turbinas, P.H. Aguamilpa, TURBOATOM, Jarkov.**
- **Bolivar Yopez, Jefe de Montaje Electromecánico P.H. Aguamilpa, Techint, S.A.**
- **Alfredo Luna, Oficina de Diseño Complementario de Obras Civiles, P.H. Aguamilpa, C.F.E.**