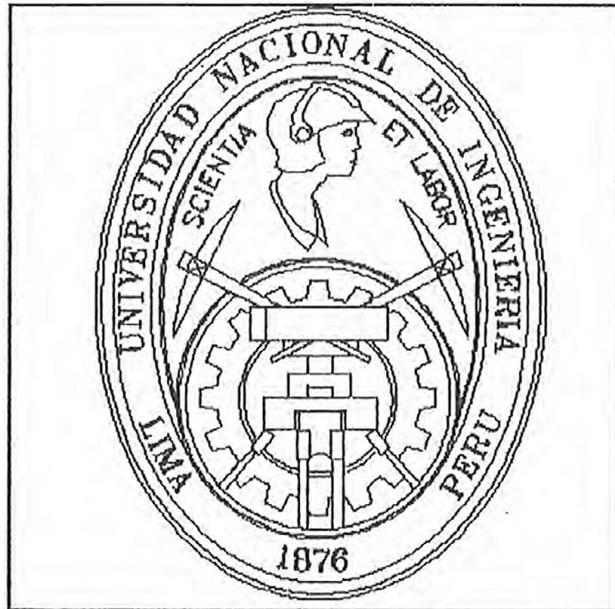


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**T E S I S  
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECANICO**

**ANALISIS Y SOLUCION DE LOS PROBLEMAS DE  
RESONANCIA EN UNA TURBINA PELTON  
LIMITE DE 72 MW**

**RAUL FRANCISCO CHAVEZ DENEN  
PROMOCION 75-I**

**LIMA - PERU  
1997**

## DEDICATORIA

A mis padres quienes esperaron  
con mucha paciencia y también  
ilusión este momento.

A mi esposa e hijos quienes no  
dejaron de apoyarme y alentarme  
para lograr este propósito.

## IV

### CONTENIDO

PROLOGO	8
LISTADO DE SIMBOLOS	10
CAPITULO I	14
INTRODUCCION	14
1.1 OBJETIVO	14
1.2 EL COMPLEJO HIDROENERGETICO DEL MANTARO	15
1.2.1 Ubicaci3n	15
1.2.2 Esquema general del aprovechamiento	15
1.2.3 Desarrollo actual	17
1.3 LA CENTRAL HIDROELECTRICA RESTITUCION	20
1.3.1 Principio de funcionamiento	20
1.3.2 Descripci3n del equipo principal	23
1.3.2.1 Equipo Hidromec3nico	25
1.3.2.2 Equipo Mec3nico	26
1.3.2.3 Equipo El3ctrico	27
1.3.2.4 L3neas a3reas	27
1.3.2.5 Equipo suplementario	28
CAPITULO II	30
SELECCION DEL TIPO Y CARACTERISTICAS DE LA TURBINA	30
2.1 TIPO	30
2.2 CARACTERISTICAS	34
2.2.1 Di3metro del chorro	34
2.2.2 Di3metro del rodete	36
2.2.3 Dimensiones de la cuchara	37
2.2.4 N3mero de cucharas	39
CAPITULO III	42
CALCULO, FABRICACION Y PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL DISTRIBUIDOR	42
3.1 CALCULO DE RESISTENCIA	42

## V

3.1.1	Premisa	42
3.1.2	Materiales y tensiones admisibles	42
3.1.3	Cálculo de espesores	43
3.1.4	Verificación del cálculo de resistencia en los refuerzos de las derivaciones	47
3.1.4.1	Fuerza vertical sobre los refuerzos	49
3.1.4.2	Distribución de la fuerza V	52
3.1.5	Verificación del nervio divisor y de las nervaduras	54
3.1.5.1	Nervadura I	54
3.1.5.2	Nervio divisor y Nervadura II	56
3.1.5.3	Nervio divisor y Nervadura III	62
3.2	FABRICACION	69
3.3	PROCEDIMIENTO DE MONTAJE	70
CAPITULO IV		74
EL FENOMENO DE RESONANCIA		74
4.1	MANIFESTACION Y CONSECUENCIAS	74
4.2	INVESTIGACION SOBRE SU ORIGEN	75
4.2.1	Aspectos estáticos	76
4.2.2	Aspectos dinámicos	77
4.2.2.1	Frecuencias excitantes	78
4.2.2.1.1	Descarga de las cucharas sobre los escudos	78
4.2.2.1.2	Vórtices de reguero	78
4.2.2.2	Frecuencias propias	79
4.2.2.2.1	Sistema inyector-Tubería de derivación	79
4.2.2.2.2	Frecuencia propia, parte terminal del nervio	84
CAPITULO V		90
SOLUCION ADOPTADA Y RESULTADOS OBTENIDOS		90
5.1	REFUERZO DE LAS DERIVACIONES	90
5.1.1	Anclaje de las tuberías de las derivaciones a la principal	90
5.1.2	Vínculos en la extremidad del nervio	91

## VI

5.1.3 Anclaje de la parte interior de la tubería de derivación	91
5.2 REFUERZO DEL VOLADIZO DE LOS INYECTORES	92
5.3 METODOLOGIA SEGUIDA PARA LA REPARACION Y MODIFICACION	93
5.3.1 Reparación de las grietas, Grupo N° 1	94
5.3.1.1 Limpieza y reparación de bordes	94
5.3.1.2 Proceso de soldadura	94
5.3.1.3 Prueba de estanqueidad	95
5.3.2 Modificación de las derivaciones y refuerzo de la caja Pelton	95
5.4 MEDICION DE LA FRECUENCIA NATURAL	97
5.4.1 Medición en el prototipo antes y después de la modificación	97
5.4.2 Comparación entre valores obtenidos en el prototipo y en el modelo modificado	101
5.5 OPERACION EXPERIMENTAL	101
5.5.1 Nuevo período de funcionamiento de prueba	101
5.5.2 Rendimiento de la turbina	105
CONCLUSIONES	112
BIBLIOGRAFIA	117
APENDICE	119

# PROLOGO

## PROLOGO

En las grandes obras hidráulicas, con frecuencia se presentan fenómenos relacionados con la operación de las estructuras o máquinas, que son imprevisibles o de muy difícil pronóstico, debido al complejo comportamiento de los fluidos en general, sobre todo si éstos están sometidos a relativamente grandes velocidades y presiones.

Durante la fase de puesta en servicio del primer grupo generador de la Central Hidroeléctrica Restitución, se produjo uno de aquellos fenómenos, al entrar en resonancia partes de la estructura del distribuidor de la turbina Pelton con ciertas frecuencias excitantes producidas por el paso del agua.

Como consecuencia se produjo el agrietamiento de la chapa de acero de las cinco primeras derivaciones de la turbina Pelton a los doce (12) días de haber iniciado su operación experimental. Este fue el primer caso de este tipo producido en el mundo en una turbina Pelton.

Las causas del fenómeno se determinaron a partir de un estudio de las frecuencias propias de la estructura y las frecuencias excitantes, analizándose a continuación las

modificaciones que deberían llevarse a cabo en el diseño a fin de conjurar el problema surgido.

Se ejecutaron luego las reparaciones en las partes dañadas y las modificaciones de diseño aludidas, tarea que no resultó sencilla por estar el distribuidor íntegramente embebido en concreto.

Afortunadamente las acciones tomadas no afectaron el rendimiento de la turbina y hacia fines de 1989 la Central llevaba operando alrededor de cinco (5) años sin mayores contratiempos.

## LISTADO DE SIMBOLOS

$A$	=	área transversal de la nervadura sobre la cual actúa $N_d$
$d$	=	diámetro del chorro de la turbina Pelton
$D$	=	diámetro nominal del rodete Pelton
$D_e$	=	diámetro exterior del rodete Pelton
$e$	=	desplazamiento del eje neutro
$E$	=	módulo de elasticidad
$E_c$	=	energía cinética de las masas oscilantes
$E_p$	=	energía potencial elástica
$f$	=	frecuencia
$F'$	=	fuerza sobre el nervio debido a la presión $p$
$F''$	=	parte de la fuerza vertical $V$ tomada por la nervadura
$F'''$	=	fuerza debida al momento de empotramiento $M_A$ de la nervadura III
$F_s$	=	fuerza en el nervio divisor
$g$	=	aceleración de la gravedad
$h$	=	espesor de la placa
$H$	=	altura del salto
$I$	=	momento de inercia de las masas oscilantes
$J$	=	momento de inercia
$J_m$	=	momento de inercia medio, nervadura III

$K_2$  = factor experimental de reducción de la fuerza  $V$

$M$  = momento

$n$  = velocidad angular

$n_s$  = número específico de revoluciones

$N$  = potencia

$N_c$  = fuerza normal que actúa sobre las nervaduras de las derivaciones

$p$  = presión, pulsación, número de pares de polos

$Q$  = caudal

$R_0$  = radio de la fibra neutra de la nervadura

$R_{om}$  = radio medio de la fibra neutra nervadura III

$R_s$  = esfuerzo de fluencia mínimo

$S$  = número de Stroudhal

$t_a$  = paso de división del rodete Pelton

$u$  = velocidad tangencial del rodete

$v$  = velocidad

$V$  = fuerza vertical actuante sobre el nervio del refuerzo original en las derivaciones del distribuidor

$y$  = módulo de Poisson

$Z$  = número de cucharas del rodete Pelton

$\beta$  = factor de contracción del chorro

$\sigma'$  = esfuerzo de tracción

$\sigma''$  = esfuerzo de flexión  
 $\sigma_A$  = esfuerzo admisible a tracción  
 $\sigma_1$  = esfuerzo o tensión circunferencial  
 $\sigma_2$  = esfuerzo o tensión longitudinal o meridiana  
 $\sigma$  = tensión de comparación según Hyber-Von Mises

$\rho$  = masa por unidad de área de la placa

$\gamma$  = peso específico

= frecuencia circular de vibración de la  
placa

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

#### 1.1 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es efectuar un estudio sobre las causas del fenómeno de resonancia presentado en el distribuidor de la turbina del Grupo Generador N° 1, durante el período de operación experimental de la fase de puesta en servicio de la Central Hidroeléctrica Restitución, así como mostrar la solución para eliminar las causas y sus consecuencias, y los resultados obtenidos.

Se ha considerado necesario, con el fin de tener una idea cabal del proceso seguido, desde la concepción del diseño del distribuidor hasta su operación en condiciones reales de funcionamiento, exponer en los capítulos pertinentes, lo relacionado con el cálculo estático de resistencia, proceso constructivo, montaje y pruebas a la terminación del montaje.

## 1.2 EL COMPLEJO HIDROENERGETICO DEL MANTARO

### 1.2.1 Ubicación

El Complejo Hidroenergético del Mantaro, del cual forma parte la Central Hidroeléctrica Restitución, está ubicado en la provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica, en la vertiente del Atlántico de la Cordillera de los Andes de la región central del Perú, siendo este complejo la pieza fundamental del Sistema Interconectado Centro Norte.

La distancia por carretera desde Lima, es alrededor de 480 kilómetros, desarrollándose las obras del mencionado complejo, entre las cotas 2,700 m.s.n.m. (Represa de Tablachaca) y 1,550 m.s.m.m. (Casa de Máquinas de la C.H. Restitución). La ubicación se muestra en la Lámina N° 1.1.

### 1.2.2 Esquema General del Aprovechamiento

El río Mantaro antes de su confluencia con el río Ene para formar el Apúrimac, describe en su curso dos grandes curvas, con un desnivel total aproximado aprovechable de 2,300 metros, correspondiendo 1,150



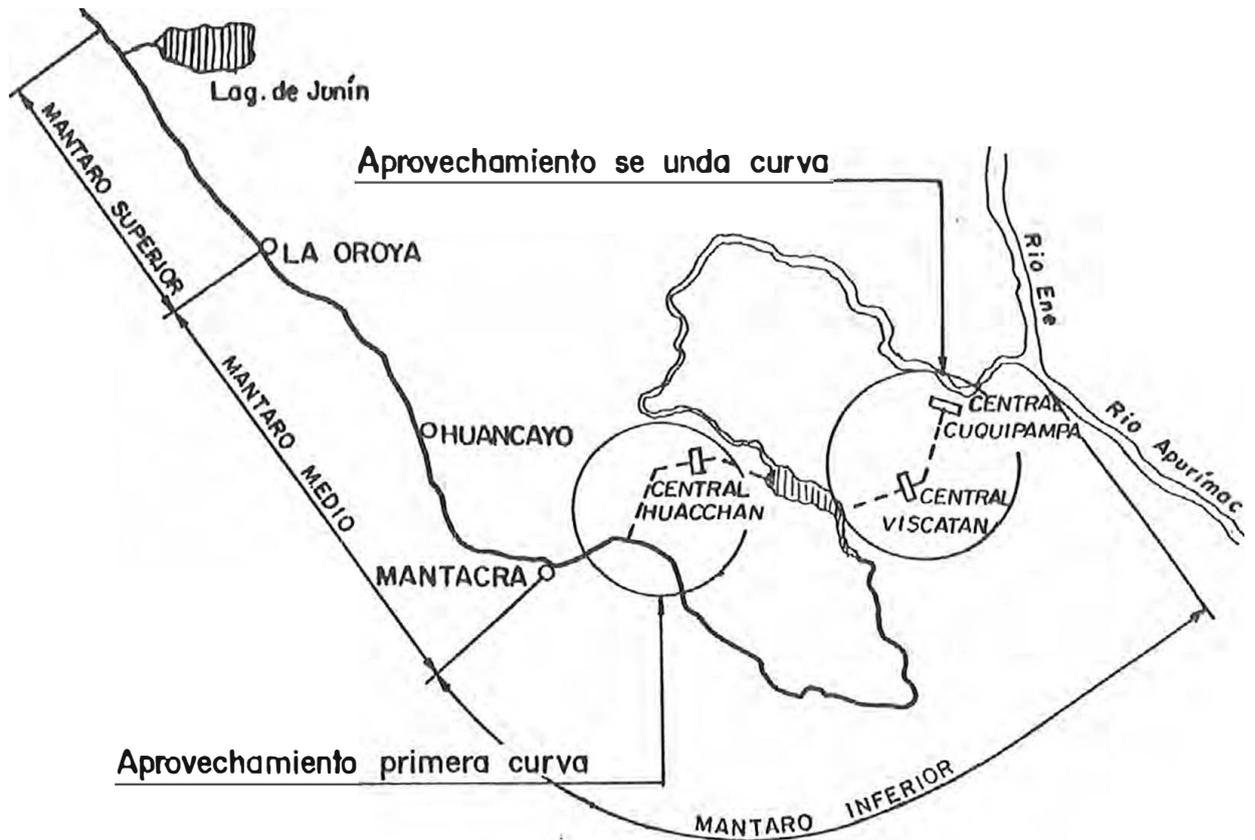
metros a la primera y otro tanto a la segunda. El caudal medio fluctúa de 80 a 115 m<sup>3</sup>/seg. entre la primera y segunda curva. El desarrollo integral, estudiado en diversas ocasiones, muestra como alternativa más conveniente su ejecución en dos grandes etapas, cada una de las cuales corresponde precisamente al aprovechamiento del salto disponible en cada curva, con embalse de regulación y toma para cada caso, descargando las aguas turbinadas de la primera curva en el embalse de la segunda, tal como se aprecia en la Lámina N° 1.2

### 1.2.3 Desarrollo Actual

Con la puesta en servicio de la Central Hidroeléctrica Restitución, a mediados del año 1985, se ha culminado el desarrollo de la llamada "Primera Curva" del río Mantaro inferior, máximo desarrollo alcanzable considerando el salto disponible desde la captación en la represa de Tablachaca hasta la entrega nuevamente al río Mantaro y solo con el caudal propio de este río. Las obras para el aprovechamiento total de esta "Primera Curva" se han desarrollado en dos saltos: el primero constituido por C.H. Santiago Antúnez de Mayolo, se ejecutó en dos etapas; y el

## LAMINA N° 1.2

### ESQUEMA ORIGINAL DE APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO DEL MANTARO INFERIOR



### POTENCIA Y ENERGÍA

PRIMERA CURVA		
ETAPAS	POTENCIA INSTAL. (kw)	PRODUCCION DE ENERGIA (kwh 10 <sup>6</sup> /año)
1ra. Etapa	330,000	1,700
2da. Etapa	330,000	1,350
3ra. Etapa	440,000	2,250
<b>TOTAL 1ra. CURVA</b>	<b>1'100,000</b>	<b>5,250</b>

SEGUNDA CURVA		
ETAPAS	POTENCIA INSTAL. (kw)	PRODUCCION DE ENERGIA (kwh 10 <sup>6</sup> /año)
3ra. Etapa	750,000	4,800
5ta. Etapa	800,000	4,900
<b>TOTAL 2da. CURVA</b>	<b>1'550,000</b>	<b>9,700</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>2'650,000</b>	<b>14,950</b>

segundo salto, que da lugar a la C.H. Restitución, está considerada como la tercera etapa. Las características básicas son las que se describen a continuación:

Primer Salto:

C. H. Santiago Antúnez de Mayolo.

Presa por gravedad.

Conducción a presión.

Salto bruto: 855 mts.

Primera Etapa:

Número de grupos: 3

Caudal por grupo: 16 m<sup>3</sup>/seg.

Potencia por grupo: 114 MW

Tipo de turbina: Pelton de 4 chorros.

Segunda Etapa:

Número de grupos: 4 (1 de reserva)

Caudal por grupo: 16 m<sup>3</sup> seg.

Tipo de turbina: Pelton de 4 chorros.

Segundo Salto:

C. H. Restitución

Tercera Etapa:

Conducción a pelo libre

Salto bruto: 257 mts.

Número de grupos: 3

Caudal por grupo: 32 m<sup>3</sup>/seg.

Potencia por grupo: 72 MW

Tipo de turbina: Pelton de 6 chorros.

### 1.3 LA CENTRAL HIDROELECTRICA RESTITUCION

#### 1.3.1 Principio de Funcionamiento

La Central Hidroeléctrica Restitución como ya se ha visto, aprovecha el segundo salto de la primera curva, para lo cual las aguas turbinadas del Central Santiago Antúnez de Mayolo son captadas a pelo libre a través de un puente tubo de 5.00 metros de diámetro y 93 metros de longitud que cruza la quebrada por la cual discurre el río Colcabamba, empalmado luego con el túnel de conducción de 790 metros de longitud, de los cuales 550 metros son blindados, cuya sección tiene forma de herradura con un diámetro medio de 5.00 metros, llegando de esta manera las aguas al pulmón regulador construido en caverna, siendo su capacidad de 25,000 m<sup>3</sup>, al final del cual está la zona de

captación del conducto forzado y desarrollo de éste. En la margen izquierda del pulmón, existe un vertedero que descarga el exceso del caudal hacia el túnel de demasía y rápida, la cual finalmente vierte las aguas al río Mantaro.

Es importante mencionar que atendiendo a su longitud: 450 mts., desnivel: 260 mts. y caudal máximo: 96 m<sup>3</sup>/seg., la estructura de la rápida ocupa el segundo lugar en importancia a nivel mundial. El tramo final de dicha estructura es el denominado "Salto de Sky", el cual permite disipar la energía del agua que discurre por aquella, utilizando como se comprende, la fuerza de gravedad para este propósito.

Mediante el túnel de descarga, cuya longitud aproximada es de 200 metros, las aguas turbinadas de la Central descargan al río Mantaro. A través de este túnel y su continuación denominado Túnel de Enlace, puede ser desagüado el Conducto Forzado, utilizando la válvula de purga instalada para tal fin. La energía eléctrica es generada a una tensión de 13,800 V, luego es elevada para su transmisión a 220,000 V, mediante transformadores de potencia monofásicos instalados en una caverna paralela a la caverna de la Casa de Máquinas. Desde dichos transformadores, la energía es

conducida mediante cables especiales con aceite a presión, monofásicos de 220 kV hacia el Patio de Salida que es al exterior, desde donde salen tres líneas de transmisión aéreas de una sola terna, una línea por Grupo Generador a una tensión de 220,000 V.

El punto de llegada de las mencionadas líneas es la Subestación de Distribución de Campo Armiño, hacia donde llega también la energía generada por la Central Hidroeléctrica Santiago Antúnez de Mayolo. Desde la mencionada subestación, la energía es enviada mediante varias líneas de transmisión hacia los diversos centros de carga, siendo dichas líneas las que se mencionan a continuación:

Mantaro - Pomacocha (doble terna).

Mantaro - Pachachaca - Callahuanca (doble terna).

Mantaro      Cobriza      Huanta      Ayacucho (simple terna).

Mantaro - Pisco - Lima (simple terna).

Mantaro - Lima.

La Central Hidroeléctrica Restitución ha sido concebida para operar en tándem con la Central Santiago Antúnez de Mayolo, para lo cual se dispone de un equipo denominado "Sistema de Regulación y

Mediciones Hidráulicas", cuya función es básicamente medir el nivel de agua constantemente en el pulmón de la Central Restitución y ordena, de acuerdo al nivel medido, la toma de carga por los Grupos Generadores, tanto de una Central como de la otra, de manera que el nivel en el pulmón se mantenga dentro de ciertos límites preestablecidos. Ver Lámina N° 1.3 (sección longitud).

Es importante señalar que la Central Restitución no forma parte del esquema original de aprovechamiento integral de las dos curvas del río Mantaro y de llegar a desarrollarse la segunda curva, esta Central quedaría probablemente fuera de servicio o en todo caso podría quedar como central de reserva o de punta, según la decisión que se adopte en el momento oportuno.

### **1.3.2 Descripción del Equipo Principal**

Por razones de un mejor ordenamiento y manejo de la obra, el equipo electromecánico se dividió en cinco grandes grupos:

- Equipo Hidromecánico
- Equipo Mecánico

## CAPITULO II

### SELECCION DEL TIPO Y CARACTERISTICAS DE LA TURBINA

#### 2.1 TIPO

A continuación se presenta un análisis teórico para luego compararlo con los valores prácticos adoptados teniendo en cuenta las siguientes premisas:

Caudal máximo total	96 m <sup>3</sup> /seg.
Salto neto nominal	255.20 mts.
Número de grupos	3
Rendimiento garantizado a máxima potencia	90.1 %
Potencia por turbina	72,181 kW

El número específico de revoluciones  $n_s$ :

$$n_s = \frac{N}{H^{5/4}}$$

donde:

$n_s$  = número específico de revoluciones

- Equipo Eléctrico
- Líneas Aéreas
- Equipo Suplementario

A continuación, se da una breve descripción o más bien una enumeración del equipamiento, debido a que sería demasiado extensa una descripción más detallada, que no es materia de este trabajo.

#### **1.3.2.1 Equipo Hidromecánico**

Están involucrados los equipos necesarios para el funcionamiento de las vías de agua:

- 1.A Compuerta de entrada.
- 2.A Compuertas de descarga de la Central Santiago Antúnez de Mayolo.
- 3.A Fuente tubo.
- 4.A Conducto forzado.
- 5.A Ascensor de inspección del conducto forzado.
- 6.A Compuertas de descarga de la Central Restitución.
- 7.A Revestimiento de impermeabilidad (blindaje) en el túnel de conducción.
- 8.A Puertas blindadas de presión.

9.A Flotador en el canal de descarga de la Central Santiago Antúnez de Mayolo.

10.A Compuerta de emergencia a la entrada del conducto forzado.

#### 1.3.2.2 Equipo Mecánico

Están comprendidos los equipos que transforman la energía hidráulica en mecánica, aquellos que los complementan y los equipos necesarios para el mantenimiento y adecuado servicio de la central:

01.B Turbinas y reguladores.

02.B Válvulas esféricas.

03.B Sistema de agua de refrigeración.

04.B Sistema de drenaje.

05.B Sistema de ventilación y climatización.

06.B Sistema de aire comprimido de uso general.

07.B Puentes grúas.

08.B Taller Mecánico y Eléctrico.

09.B Equipo móvil contra incendio.

10.B Sistema de agua potable.

10.B Plataforma de transporte del rodete Pelton

### **1.3.2.3 Equipo Eléctrico**

En este rubro se encuentran incluidos los equipos que transforman la energía mecánica en eléctrica, así como los que cumplen la delicada misión de regular los parámetros de generación, protección y transporte de energía eléctrica:

- 01.C Generadores.
- 02.C Transformadores de potencia.
- 03.C Barras y equipos de 13.8 kV.
- 04.C Equipo de alta tensión.
- 05.C Servicios auxiliares.
- 06.C Equipos de mando, medida, protección y señalización.
- 07.C Instalaciones domésticas.
- 08.C Cables de fuerza y control.
- 09.C Red de puesta a tierra.
- 10.C Equipo de Telecontrol y Teleprotección.
- 11.C Equipos auxiliares de corriente de baja intensidad.
- 12.C Sistema de regulación y mediciones hidráulicas.

### **1.3.2.4 Líneas Aéreas**

Comprende la línea de 220 kV que está constituida por tres ternas independientes, una por grupo tendidas entre el patio de salida de la Central

Restitución y la subestación de Campo Armiño y la línea de 33 kV, tendida entre la Central Santiago Antúnez de Mayolo y el patio de salida de Restitución con la finalidad de alimentar los servicios auxiliares para el arranque.

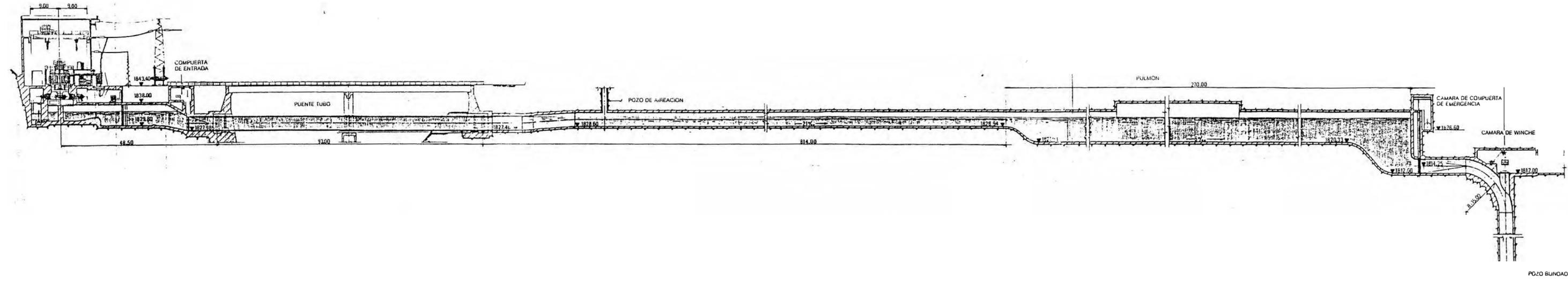
#### 1.3.2.5 Equipo Suplementario

El equipo así denominado, se adquirió con el fin de solucionar el problema que significaba la reparación integral de una rueda de dimensiones tan grandes como es la Central Restitución (4.2 m  $\phi$ , 30 TM) y también reducir costos de mantenimiento del Complejo Mantaro y de otras centrales del sistema, así como ganar experiencia en este campo. El equipo es el siguiente:

Horno eléctrico para tratamiento térmico de rodetes Pelton.

Puente grúa de 40 TM.

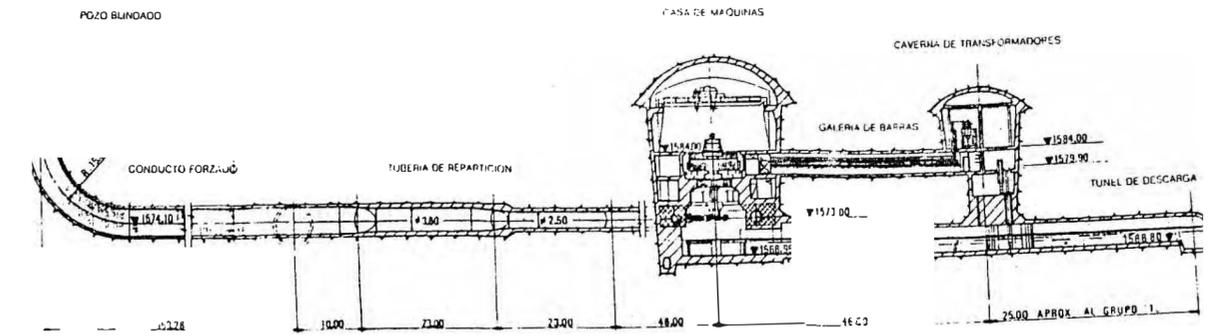
CENTRAL SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO



LAMINA Nº 1,3

SECCION LONGITUDINAL C. H. RESTITUCION

CENTRAL RESTITUCION



## CAPITULO II

### SELECCION DEL TIPO Y

### CARACTERISTICAS DE LA TURBINA

$n$  = velocidad angular en RPM

$N$  = potencia

$H$  = salto neto nominal en m.

Tabulando velocidades para velocidades angulares compatibles con la frecuencia de generación, velocidades que se pueden determinar de la siguiente expresión:

$$n = \frac{60 f}{p}$$

donde:

$n$  = velocidad angular en RPM

$f$  = frecuencia en generación = 60 Hz

$p$  = número de pares de polos

Se tiene el Cuadro N° 2.1.

CUADRO N° 2.1

p	24	20	18	16	15	12
n(RPM)	150	180	200	225	240	300
$n_s^*$	39	47	53	59	63	79
$n_s^{**}$	46	55	61	69	74	92

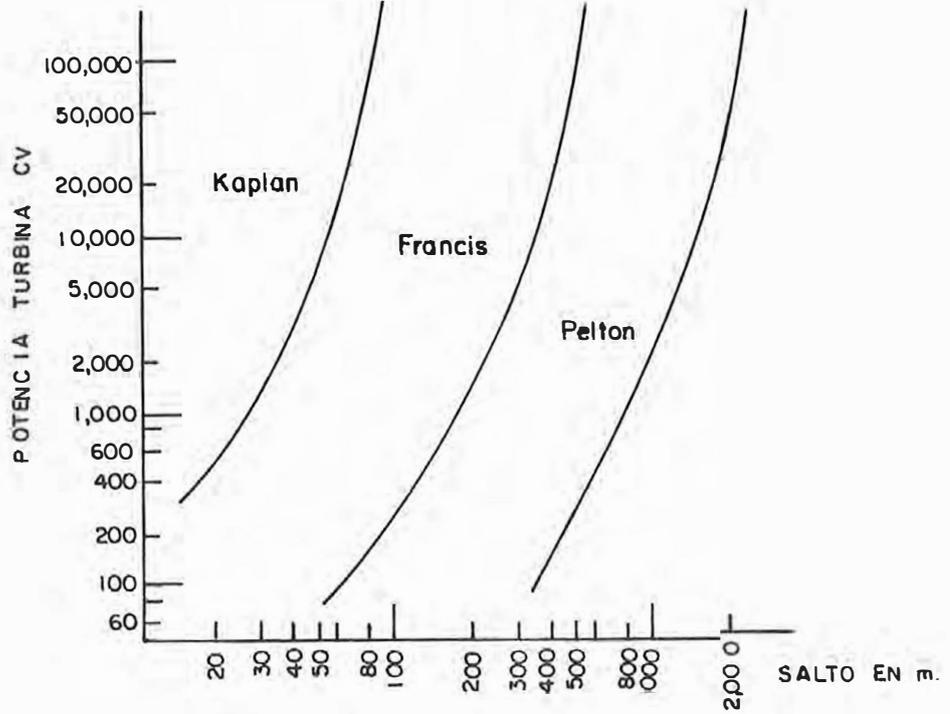
\* Potencia en kW

\*\* Potencia en cv

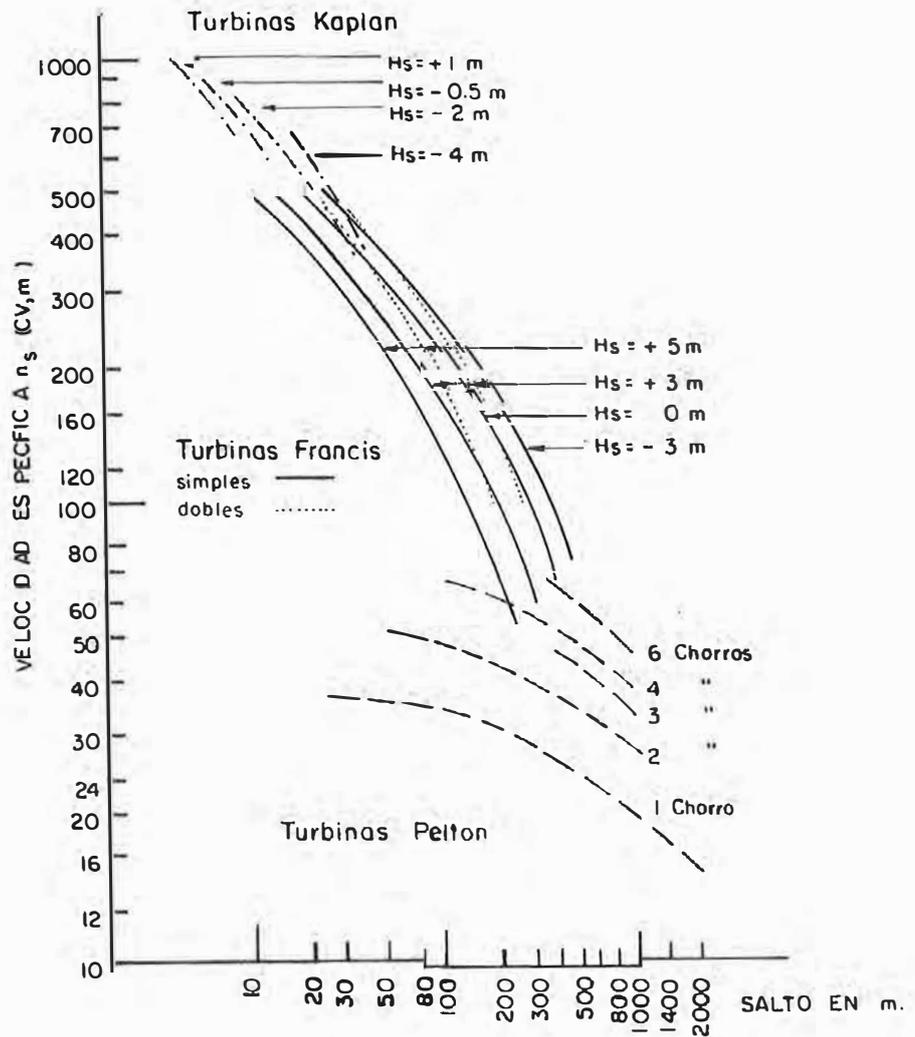
Del análisis del cuadro anterior, de las referencias 1 y 2 y de los datos obtenidos de fabricantes de turbinas, mostradas en la Lámina N° 2.1, la solución aunque en el límite entre turbinas del tipo Pelton y Francis se acerca teóricamente más a estas últimas y en efecto, en el estudio a nivel de factibilidad se adoptó como solución turbinas Francis lentas a 240 RPM de eje vertical. Sin embargo, en el estudio definitivo se analizó el problema bajo otros aspectos, como son:

- Calidad del agua.
- Experiencia en la operación de turbinas Pelton.

LAMINA N° 2.1



CAMPO DE APLICACION DE LAS TURBINAS



Facilidad de mantenimiento.

- Tiempo necesario para el reemplazo de rodetes.

Rendimiento a cargas parciales.

Como resultado de esta nueva evaluación se eligieron turbinas Pelton de 6 chorros a 200 RPM y eje vertical, cuyas características básicas se describen a continuación.

## 2.2 CARACTERISTICAS

Se determinan las características principales en base a la metodología existente sobre el particular en la referencia 2 y 3. Los números entre paréntesis ( ) indican los valores de construcción adoptados.

### 2.2.1 Diámetro del Chorro

$$d = 2 \sqrt{Q / \pi V} \quad ( \alpha )$$

donde:

d = diámetro del chorro, en m.

Q = caudal por chorro en m<sup>3</sup>/s = 32/6

$V$  = velocidad de salida en m/s.

a su vez la velocidad de salida se puede calcular mediante:

$$\bar{V} = \beta \sqrt{2gH}$$

donde:

$\beta$  = factor de contracción del chorro = 0.95

$H$  = salto en m. = 255.20

$g$  = 9.81 m/s<sup>2</sup>

por lo tanto:

$$V = 67.22 \text{ m/s}$$

reemplazando valores en (a), el diámetro del chorro será:

$$d = 0.318 \text{ m.} = 318 \text{ mm.}$$

### 2.2.2 Diámetro del Rodete

Determinada de antemano la velocidad de rotación del rodete (200 RPM) y conocida la velocidad de salida del chorro, se puede determinar el diámetro nominal del rodete mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{u}{\pi n} \times 60,000 \quad (\beta)$$

donde:

D = diámetro nominal del rodete

u = velocidad tangencial del rodete, en m/s

n = velocidad angular del rodete en RPM.

En las ruedas Pelton, la velocidad tangencial es aproximadamente igual a la mitad de la velocidad de salida del chorro:

$$u = V / 2 = 67.22 / 2 = 33.61 \text{ m/s}$$

reemplazando datos en la fórmula  $(\beta)$

$$D = 3,210 \text{ mm} \quad (3,190 \text{ mm})$$

### 2.2.3 Dimensiones de la Cuchara

Las medidas aproximadas se toman en base a una relación directa con el diámetro "d" del chorro, según la referencia 2, página 199 y la referencia 3, página 1471; de acuerdo al croquis mostrado en la Lámina N° 2.2.

$$\begin{aligned} b' &= 3.75 d = 3.75 \times 318 = 1,193 \text{ mm.} \\ b'' &= 3.0 d = 3.0 \times 318 = 954 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (1,070 \text{ mm.})$$

$$\begin{aligned} h' &= 3.50 d = 3.50 \times 318 = 1,112 \text{ mm.} \\ h'' &= 2.5 d = 2.5 \times 318 = 795 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (1,000 \text{ mm.})$$

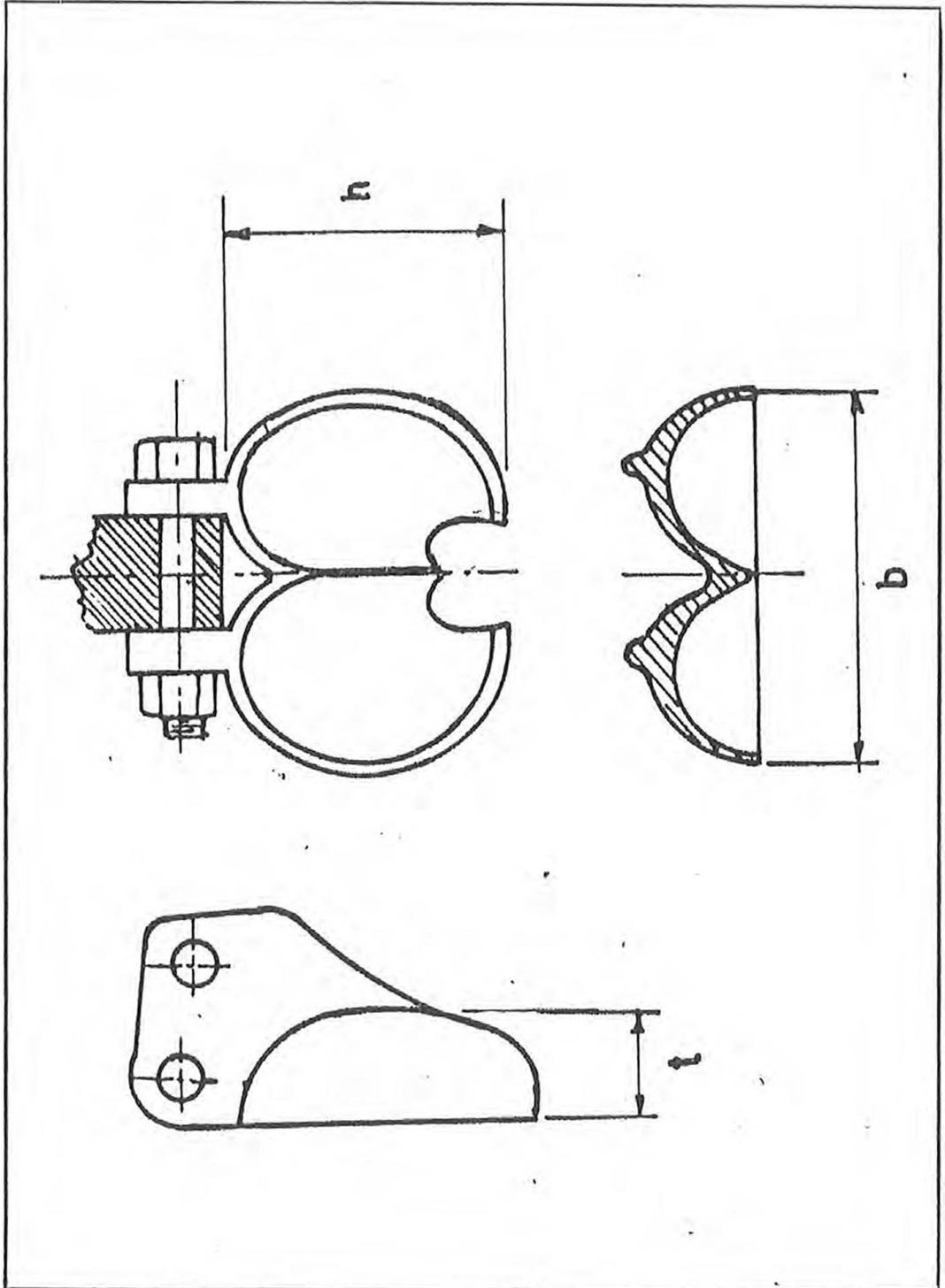
$$\begin{aligned} t' &= 1.50 d = 1.50 \times 318 = 477 \text{ mm.} \\ t'' &= 0.85 d = 0.85 \times 318 = 270 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (450 \text{ mm.})$$

' = corresponde a la referencia 2

'' = corresponde a la referencia 3

Como se observa los coeficientes de la referencia 2, se adaptan mejor al presente caso.

2.2



#### 2.2.4 Número de Cucharas

Normalmente las cucharas se disponen de manera que el diámetro nominal o primitivo "D" corte a la misma a los 3/5 de su altura, desde el borde exterior del rodete, resultando que el diámetro exterior "D<sub>e</sub>" del rodete será:

$$D_e = D + 2 \times \frac{3}{5} h$$

$$D_e = 3,210 + 2 \times \frac{3}{5} \times 785$$

$$D_e = 4,152 \text{ mm (4,190)}$$

En este caso ya se conoce el número de cucharas "Z" que ha sido adoptado, por lo que solamente se calculará el paso de división "t<sub>a</sub>" a partir de la expresión:

$$t_a = \frac{\pi \times D_e}{Z}$$

tomando el valor real de D<sub>e</sub> = 4,190 mm y reemplazando valores:

$$t_a = \frac{\pi \times 4,190}{20}$$

$$t_a = 658 \text{ mm}$$

En rodetes normales el paso de división es muy cercano a "h", es decir  $t_a \approx h$ . Sin embargo, en este caso:

$$t_a = 658 = \frac{658}{h} \times h = \frac{658}{1,000} \times 1,000$$

$t_a = 0.658 \times h$ , es decir un valor bastante alejado de un rodete normal.

Es necesario advertir que en este tipo de piezas fundamentales y de alto costo, se construye primero, antes de construir el prototipo, un modelo a escala reducida, el cual es sometido a diversos ensayos, de cuyos resultados se puede establecer la bondad del diseño. Para definir otras características de la turbina se requieren cálculos o diseños que no son materia de este trabajo, pero se debe mencionar como característica importante, que el rodete de la turbina y el rotor del generador van montados en un eje vertical, el cual se apoya en la parte superior de un cojinete de empuje del tipo Mitchell, mantenido en posición mediante dos cojinetes guías, en la zona del generador y de la turbina respectivamente.

En la parte central del eje se ha practicado un agujero cilíndrico a través del cual se puede desplazar un pistón accionado por un mecanismo hidráulico, el cual sirve para montar y desmontar el rodete Pelton con facilidad.

## CAPITULO III

### CALCULO, FABRICACION Y PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL DISTRIBUIDOR

## CAPITULO III

### CALCULO, FABRICACION Y PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL DISTRIBUIDOR

#### 3.1 CALCULO DE RESISTENCIA

##### 3.1.1 Premisa

Esta parte tiene por objeto ilustrar los criterios elegidos para dimensionar el colector principal, las derivaciones y sus refuerzos, que en conjunto conforman el distribuidor.

##### 3.1.2 Materiales y Tensiones Admisibles

Tubería principal y derivaciones:

acero Fe 56-2 UNI 5907-66, esfuerzo de fluencia mínimo  
 $R_s = 392$  MPa en el campo de los espesores seleccionados.

Nervaduras de refuerzo:

acero Fe 42B UNI 7070-72, esfuerzo de fluencia mínimo  
 $R_s = 245$  MPa para el espesor elegido.

Tensión admisible a tracción según especificaciones técnicas, que toman en cuenta que el distribuidor irá embebido en concreto:

$$\sigma_A = 0,7 R_s \text{ bajo ensayo a la presión}$$

$$p = 4.4 \text{ MPa}$$

$$\text{Tuberías: } \sigma_{A1} = 0,7 \times 392 = 274 \text{ MPa}$$

$$\text{Nervaduras: } \sigma_{A2} = 0,7 \times 245 = 172 \text{ MPa}$$

### 3.1.3 Cálculo de Espesores

Las fórmulas se deducen de la referencia 4, página 441 (ver apéndice N° 1) y los símbolos de la Lámina N° 3.1

#### a) Cono de la embocadura

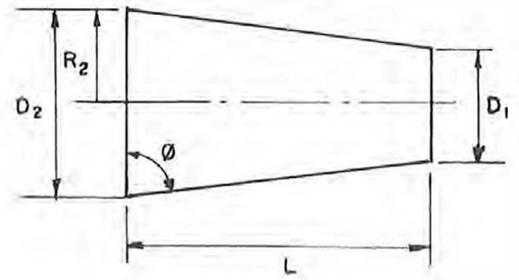
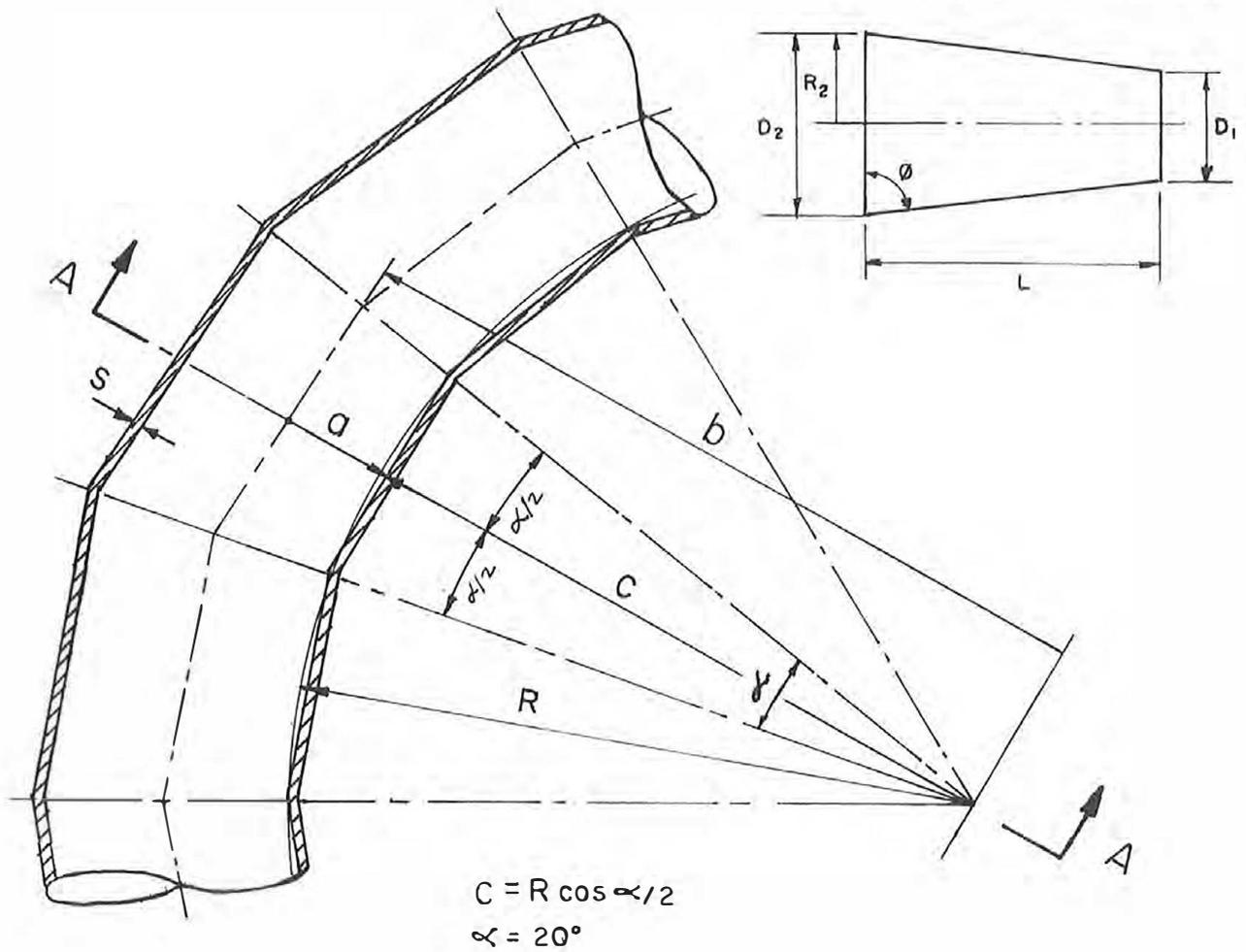
Tensiones circunferenciales  $\sigma_2$  y meridianas calculadas con las fórmulas de la membrana cónica:

$$\sigma_2 = pR_2 / (s-2) \sin \phi$$

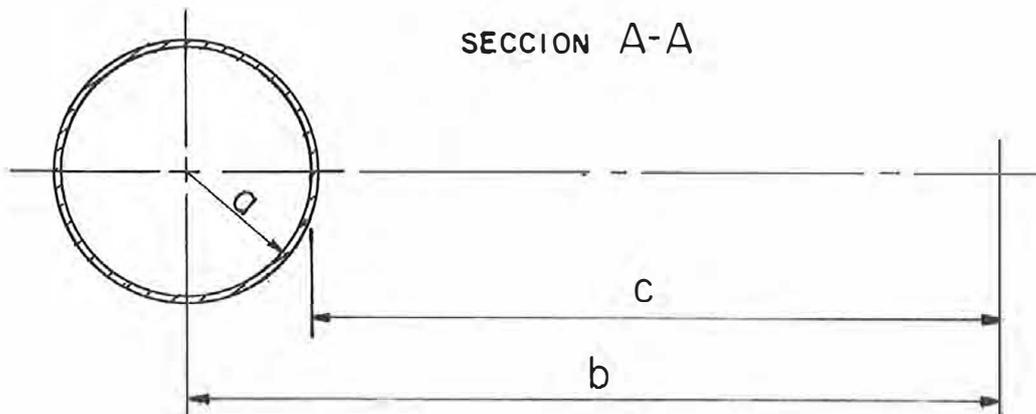
$$\sigma_1 = \sigma_2 / 2$$

SIMBOLOGIA DEL DISTRIBUIDOR

ESQUEMA CONO DE EMBOCADURA



SECCION A-A



$$\theta = 90^\circ - \operatorname{atg} \frac{(D_2 - D_1)}{2L_{1-2}} = 90^\circ - \operatorname{atg} \frac{(2400 - 2230)}{2 \times 1530} = 86,82^\circ$$

$$\sigma_2 = \frac{4,4 \times 10^6 \times 1200}{(23 - 2) \sin 86,82^\circ} = 252 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 = \frac{252}{2} = 126 \text{ MPa}$$

$D_1$  ,  $D_2$  y  $L_{1-2}$  diámetros respectivos y largo virola  $S_1-S_2$

La tensión de comparación, según Teoría de Hyber-Von Mises, resulta:

$$\bar{\sigma}^* = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} =$$

$$\sqrt{252^2 + 126^2 - 252 \times 126} = 218 \text{ MPa}$$

Del espesor efectivo de 23 mm. se disminuyen 2 mm. por desgaste y corrosión.

b) Virolas dispuestas en espiral

Por la conicidad mínima de las virolas resulta prácticamente:  $\sin \theta = 1$

Se efectuó el cálculo de los espesores mínimos, considerando de manera conservadora solo la tensión circunferencial  $\sigma_2$ , utilizando la fórmula para cilindros de paredes delgadas en primer lugar y luego la fórmula de la membrana tórica a fin de comparar resultados.

La fórmula para cilindros de paredes delgadas, es:

$$s'_{\min} = \frac{P \times a}{\sigma_{A_1}}$$

donde:

p = presión

a = radio interior

$\sigma_{A_1}$  = *esfuerzo permisible*

y la fórmula de la membrana tórica:

$$s''_{\min} = \frac{Pa}{2\sigma_{A_1}} \left(1 + \frac{b}{c}\right)$$

donde:

C = R cos  $\alpha/2$

R = 6,100 mm (excepto para las últimas virolas)

$\alpha = 20^\circ$

A los espesores mínimos calculados, se agregó el sobreespesor de 2 mm. ya mencionado, más un margen, el cual considera los esfuerzos concentrados debidos a los ángulos de unión de las virolas. Los resultados se hallan tabulados en el Cuadro N° 3.1.

#### **3.1.4 Verificación del Cálculo de Resistencia en los Refuerzos de las Derivaciones**

Las derivaciones tienen el mismo diámetro y la misma posición relativa con respecto al colector principal (salvo diferencia despreciable de posición de la primera). Por tener las aberturas en el colector principal el mismo largo aproximado, la fuerza máxima  $V = p \times l \times R_1$ , actúa donde  $R_1$  es máximo para la primera derivación ( $R_1 =$  radio interior de la tubería).

El refuerzo se realiza reemplazando la parte de pared del tubo principal (faltante por la derivación) por nervio de espesor igual y longitud apropiada soldado con penetración total a las paredes del tubo secundario.

CUADRO N° 3.1

ESPEORES DEL DISTRIBUIDOR						
VIROLAS	b	a	$s'_{\min}$	$s''_{\min}$	$s'''_{\min} + 2$	$s_{\text{elegido}}$
$S_3 - S_4$	7,104	1,097	17.6	19.2	21.2	23
$S_7 - S_8$	6,982	975	15.7	16.9	18.9	20
$S_{13} - S_{14}$	6,857	850	13.7	14.6	16.6	18
$S_{21} - S_{22}$	6,707	700	11.3	11.9	13.9	15
$S_{29} - S_{30}$	6,507	500	8.0	8.4	10.4	15
$S_{33} - S_{34}$	2,250	500	8.0	9.2	11.2	15

Dimensiones en mm.

Tres nervaduras de tamaño y disposición adecuados, juntamente con el tubo secundario, cuyo espesor (18 mm.) es bastante superior al mínimo (11,2) requerido para la parte terminal del colector, transmiten los esfuerzos al nervio mencionado.

#### 3.1.4.1 Fuerza Vertical Sobre los Refuerzos

Basándose en los criterios ilustrados en las referencias 5 y 6, la fuerza total vertical se determina con la relación:

$$V = p \times A \times K_2$$

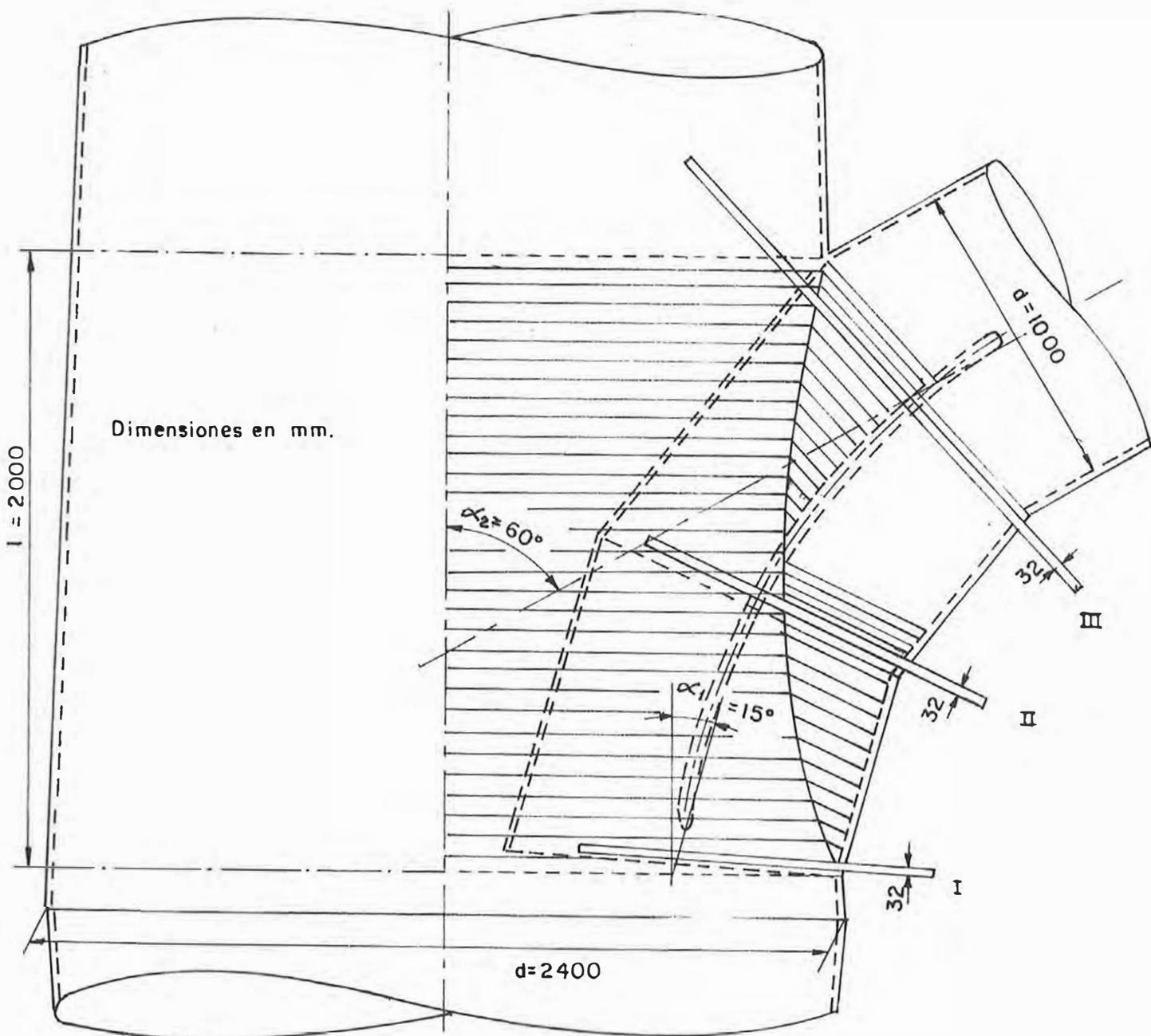
$p$  = presión de ensayo

$A$  = proyección horizontal del área no soportada por la pared del colector principal (faltante por la derivación). Véase figura en Lámina N° 3.2.

$K_2$  = factor de reducción, el cual considera el hecho de que las zonas del colector principal, cerca del área arriba mencionada, impidan las deformaciones (en particular con esfuerzos de corte), soportando de esta manera parte de la carga.

LAMINA N° 3.2

DETERMINACION DEL AREA  
PARA CALCULO DE LA FUERZA  
SOBRE EL CONJUNTO NERVADURAS -  
NERVIO DIVISOR



$$A = 2'652,000 \text{ mm}^2 = \text{suma de \u00e1reas rayadas}$$

Se logró determinar el factor  $K_2$  cumpliendo ensayos extensométricos sobre modelo escala 1:5 de acero.

Se obtuvo:  $K_2 = 0.80$

De la figura de la Lámina N° 3.2

$$A = 2.652.600 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$V = p A K_2 = 4.4 \times 10^{-6} \times 2.652.600 \times 0.80 = 9,337 \text{ kN}$$

Efectuando el mismo cálculo con los criterios ilustrados en la referencia N° 6, se obtiene: relación entre la resistencia del tubo con derivación y la del mismo sin derivación:

$$S = 1 - \frac{d'}{d} (1 - 0.7 \sin \alpha)$$

$d'$  = diámetro de la derivación

$d$  = diámetro de la tubería

$\alpha$  = ángulo de la derivación

En el presente caso, por ser la derivación curvada, se tomó para  $\alpha$  el valor medio:

$$\alpha_m = \frac{15^\circ + 60^\circ}{2} = 37,5^\circ$$

$$S = 1 - \frac{1000}{2400} \times (1 - 0.7 \times \sin 37,5^\circ) = 0,760$$

Area de la derivación (según referencia 6):

$$A_r = d \times l = 2400 \times 2000 = 4,80 \times 10^6 \text{ mm}^2 = 4.8 \text{ m}^2$$

Carga de proyecto de los refuerzos:

$$V = pA_r(1 - s) = 4.4 \times 10^6 \times 4.8 \times (1 - 0.76)$$

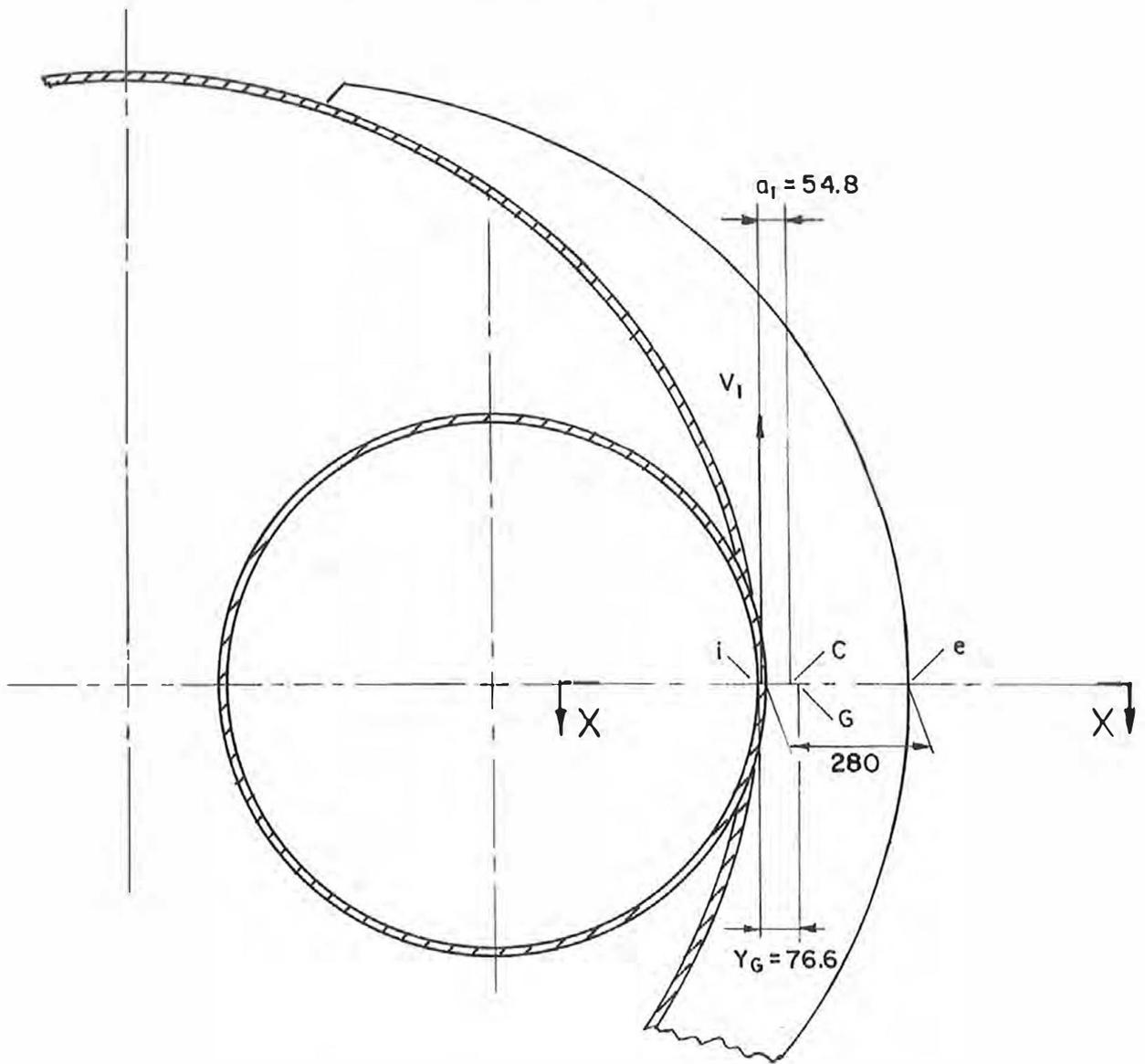
$$V = 5,069 \text{ kN}$$

inferior al valor elegido. (Ver apéndice N° 2).

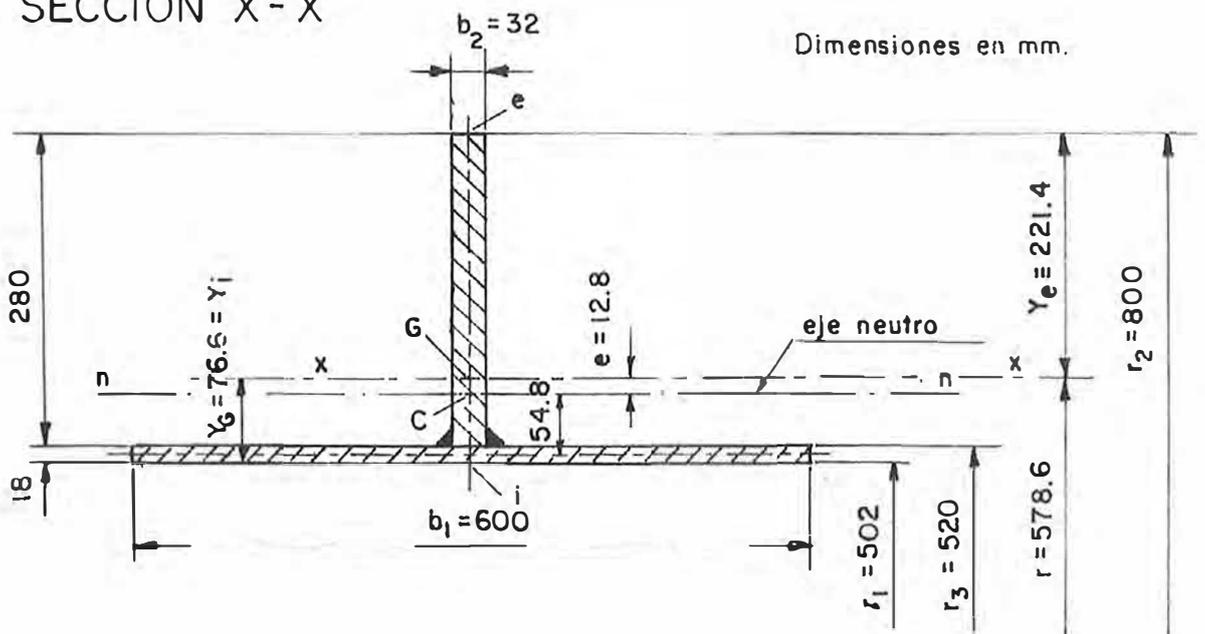
#### 3.1.4.2 Distribución de la Fuerza V

Las nervaduras de refuerzo representadas en las figuras de las Láminas Nros. 3.3, 3.4 y 3.5, tienen diferente coeficiente de deformación posible (desplazamiento vertical producido por la fuerza 1 N). En base a los resultados de los ensayos extensométricos, se concluye que la fuerza V se reparte por igual en las tres nervaduras, por consiguiente en cada una de ellas actuará la fuerza  $V_i = V/3 = 5,069 / 3 = 1,689 \text{ kN}$ .

NERVADURA I



SECCION X - X



### 3.1.5 Verificación del Nervio Divisor y de las Nervaduras

#### 3.1.5.1 Nervadura I

Referente a la figura de la Lámina N°3.3, las características de la sección X-X, son las siguientes:

Area:

$$A = 19,760 \text{ mm}^2 = 19,760 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Momento de inercia con respecto al eje x-x barocéntrico:

$$J = 167.522 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Desplazamiento el eje neutro con respecto al eje paralelo barocéntrico:

$$e = r \frac{1}{m + 1} = 12.8 \text{ mm}$$

donde:

$$m = r/A(b_1 \ln r_3/r_1 - b_1 \ln r_2/r_3) - 1 = 22.57 \times 10^{-3}$$

Momento de flexión actuando sobre la sección x-x:

$$M_c = V_1 \times a_1 = 3.112 \times 54.8 = 171 \text{ MN-mm}$$

Fuerza normal:

$$N_c = V_1 = 3,112 \text{ kN} = 3.112 \text{ MN}$$

$$\sigma_i' = N_c/A = 3.112/19,760 \times 110^{-6} = 157 \text{ MPa}$$

$$\sigma_i'' = \frac{M_c (y_i - e)}{A e r_1} = \frac{171 \times 10^6 \times (76.6 - 12.8)}{19760 \times 12.8 \times 502} = 86 \text{ MPa}$$

$$\sigma_e'' = \frac{-M_c (y_e + e)}{A e r_2} = \frac{-171 \times 10^6 \times (221.4 - 12.8)}{19760 \times 12.8 \times 800} = -176 \text{ MPa}$$

Tensiones resultantes en los puntos i y e

$$\sigma_i = \sigma_i' + \sigma_i'' = 157 + 86 = 243 \text{ MPa} < \sigma_{A_1}$$

$$\sigma_e = \sigma_e' + \sigma_e'' = 157 - 176 = -19 \text{ MPa} < \sigma_{A_2}$$

### 3.1.5.2 Nervio Divisor y Nervadura II

Referente a la Lámina N° 3.4, el conjunto constituido por la nervadura y el nervio divisor está solicitado por la fuerza  $V_2 = V/3$  y presión  $p$  actuante sobre la sección derecha del tubo secundario (no considerada en el esquema de las áreas de la Lámina N° 3.2).

Las características de la sección son:

$$\text{Area: } A = 18,560 \text{ mm}^2$$

Momento de inercia con respecto al eje barocéntrico:

$$J = 149.58 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Desplazamiento del eje neutro con respecto al barocéntrico:

$$e = 9.2 \text{ mm}$$

Las fuerzas  $F'$  y  $F''$  que actúan sobre el nervio se calculan utilizando el método de la energía de deformación, ver ref. 4, considerando el desplazamiento vertical del punto A (Ver Lámina N° 3.4). La fuerza  $F$  es debida al efecto de la presión  $p$  actuante en la sección derecha del tubo secundario (derivación) como ya se mencionó al principio de este acápite, por tanto para un desplazamiento  $\delta$  se tiene:

$$\delta_{\text{Anulario}} = \frac{(p B_2 r_1 - F') \times 2 \times r_1}{I_2 (S-2) E} \quad (1)$$

$$\delta_{\text{Arullo}} = \frac{\pi \times F' \times R_0^3}{2 E J} \quad (2)$$

igualando las ecuaciones (1) y (2):

$$\frac{(p B_2 r_1 - F') \times 2 \times r_1}{I_2 (S-2) E} = \frac{\pi \times F' \times R_0^3}{2 E J}$$

$$F' = \frac{2 \times p \times B_2 \times r_1^2}{I_2 (S-2)} - \frac{\pi R_0^3}{2 J} + \frac{2 r_1}{I_2 (S-2)}$$

Se calcula para los siguientes valores (Ver Láminas Nros. 3.4, 3.6 y listado de símbolos).

$$p = 4.4 \text{ MPa}$$

$$B_2 = 700 \text{ mm} = 0.700 \text{ m}$$

$$r_1 = 502 \text{ mm} = 0.502 \text{ m}$$

$$(S-2) = 23-2 = 21 \text{ mm} = 0.021 \text{ m}$$

$$R_0 = 577.6 \text{ mm} = 0.5776 \text{ m}$$

$$J = 149.58 \times 10^{-6} \text{ mm}^4 = 149.58 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

reemplazando los valores:

$$F' = \frac{2 \times 4.4 \times 10^6 \times 0.700 \times (0.502)^2}{0.700 (0.021)} /$$

$$\left[ \frac{(0.5776)^3}{2 \times 149.58 \times 10^{-6}} + \frac{\pi \times 2 \times 0.0502}{0.700 (0.021)} \right]$$

$$F' = 50,481 N$$

En la Lámina N° 3.6 se puede apreciar que la longitud eficaz  $l_2$  se ha tomado menor a la efectivamente disponible en la zona de la nervadura II, por cuanto la parte terminal del nervio no puede resistir validamente la fuerza  $V_2$ , debido al relativamente pequeño espesor del tubo.

Siguiendo el mismo procedimiento para  $F''$ :

$$F'' = \frac{2 \times V_2 \times r_1}{l_2 (S-2)} / \left[ \frac{\pi R_0^3}{2J} + \frac{2 r_1}{l_2 (S-2)} \right]$$

calculada para los siguientes valores:

$$r_1 = 502 \text{ mm} = 0.502 \text{ m}$$

$$V_2 = 3.112 \text{ kN} = 3.112 \times 10^6 \text{ N}$$

$$l_2 = 700 \text{ mm} = 0.700 \text{ m}$$

$$(S-2) = 21 \text{ mm} = 0.0211 \text{ m}$$

$$R_0 = 577.6 \text{ mm} = 0.5776 \text{ m}$$

$$J = 149.58 \times 10^6 \text{ mm}^4 = 149.58 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

reemplazando valores:

$$F'' = \frac{2 \times 3.112 \times 10^6 \times 0.502}{0.700 \times 0.021} /$$

$$\left[ \frac{\pi \times (0.5776)^3}{2 \times 149.8 \times 10^{-6}} + \frac{2 \times 0.502}{0.700 \times 0.021} \right]$$

$$F'' = 101,780 \text{ N}$$

a) Verificación de esfuerzos en el nervio divisor

De la Lámina N° 3.4, la fuerza actuante sobre el nervio es:

$$F_{S2} = F' + V_2 - F'' = 50,481 \text{ N} + 3.112 \times 10^6 \text{ N} - 101,780 \text{ N}$$

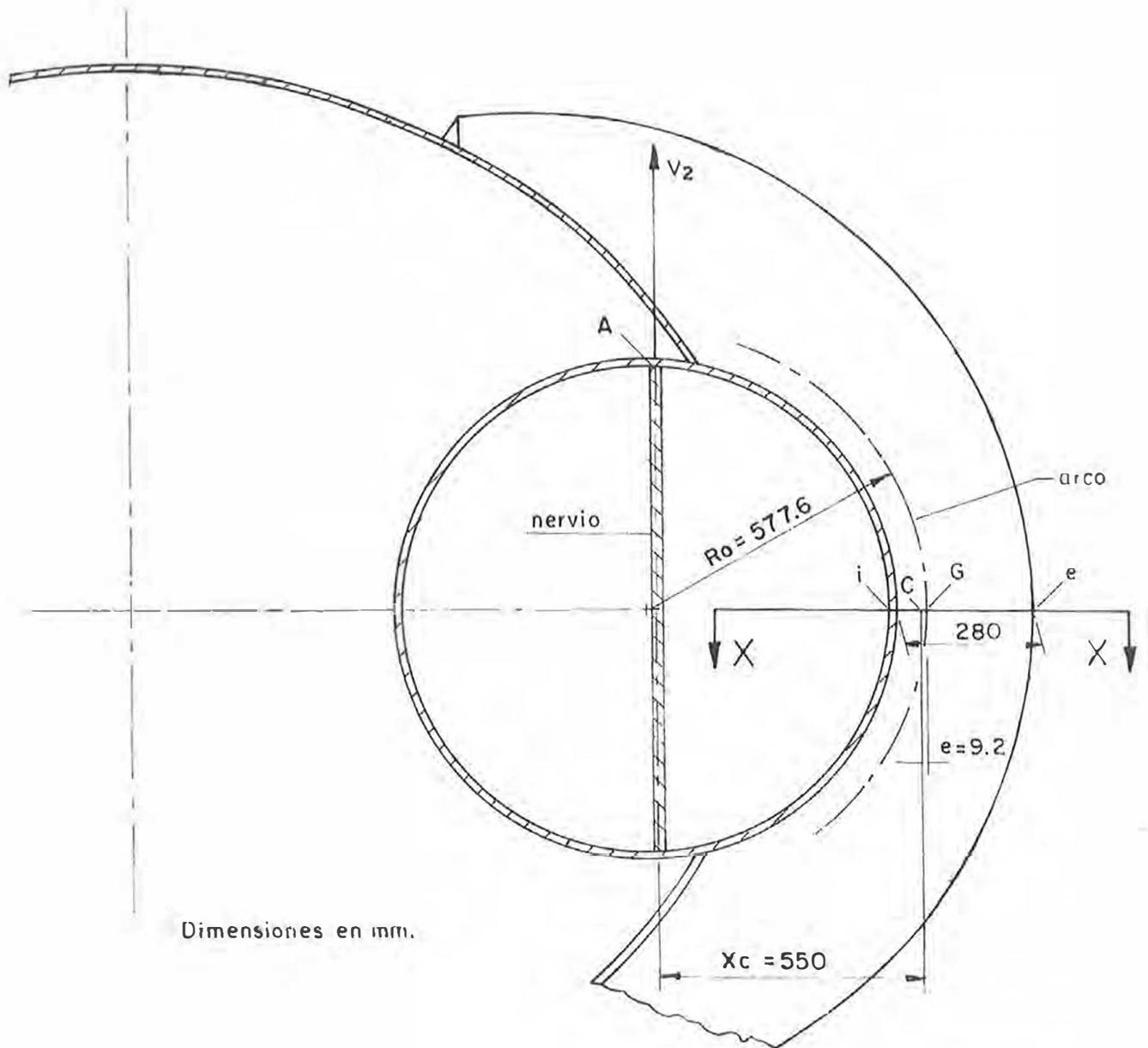
$$F_{S2} = 3'060,701 \text{ N} = 3.061 \text{ MN}$$

y el esfuerzo:

$$\sigma_{S_2} + \frac{F_{S_2}}{I_2 (S-2)} = \frac{3.061 \text{ MN}}{0.700 \times 0.021}$$

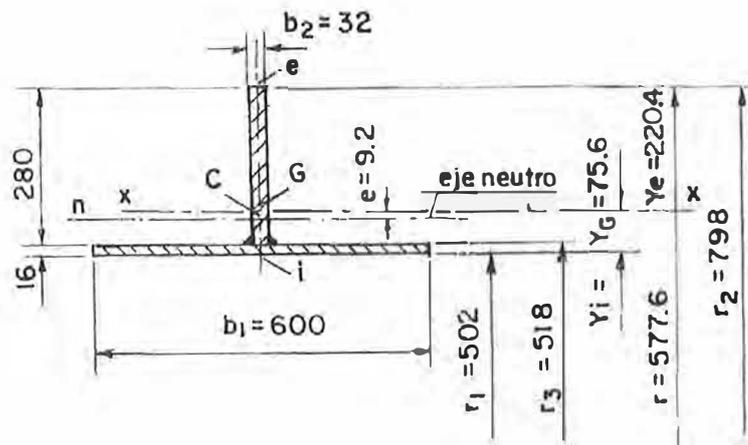
$$\sigma_{S_2} = 208.2 \text{ MPa} < \sigma_{A_2}$$

NERVADURA II

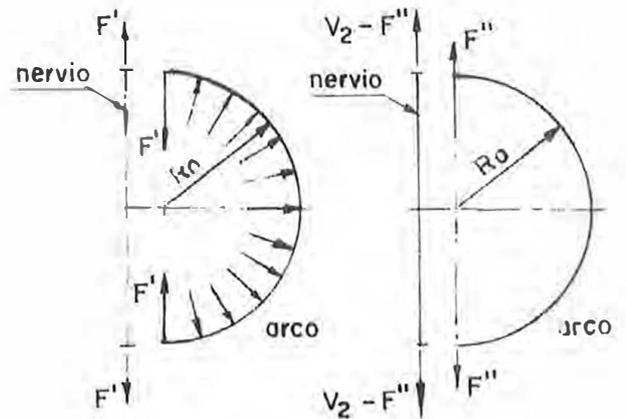


Dimensiones en mm.

SECCION X-X



ESQUEMA PARA CALCULO DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DEL NERVIO Y NERVADURA



b) Verificación de esfuerzos en la nervadura II  
(sección X-X)

La fuerza normal  $N_c$  actuante sobre el área A (Ver Lámina N° 3.4 sección X-X) es la siguiente:

$$N_c = 1/2 pB_2 r_1 - F' + F''$$

$$N_c = 1/2 \times 4.4 \times 10^6 \times 0.700 \times 0.502 - 50,481 + 101,780$$

$$N_c = 824,379 \text{ N}$$

y el esfuerzo:

$$\sigma'_i = \sigma'_e = \frac{N_c}{A} = \frac{824,379 \text{ N}}{18,560 \times 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$\sigma'_i = \sigma'_e = 44.4 \text{ MPa}$$

tomando momentos con respecto al punto c:

$$M_c = (F'' - F') \times X_a \quad (\text{ver lámina n° 3.4})$$

$$M_c = (101,780 - 50,481) \times 0.550$$

$$M_c = 28,214 \text{ N-m}$$

Los puntos críticos de mayor esfuerzo son i y e, y por lo tanto aplicando la ecuación general de esfuerzos para elementos curvos:

$$\sigma_i'' = \sigma_i' + \frac{M_c (y_i - e)}{A e r_1}$$

$$\sigma_e'' = \sigma_e' - \frac{M_c (y_e - e)}{A e r_2}$$

reemplazando valores:

$$\sigma_i'' = 44.4 + \frac{28,214 \times 10^{-6} (0.0756 - 0.0092)}{18,560 \times 10^{-6} \times 0.0092 \times 0.502}$$

$$\sigma_e'' = 44.4 - \frac{28,214 \times 10^{-6} (0.2204 + 0.0092)}{18,560 \times 10^{-6} \times 0.0092 \times 0.798}$$

$$\sigma_i'' = 66.26 \text{ MPa} < \sigma_{A_1}$$

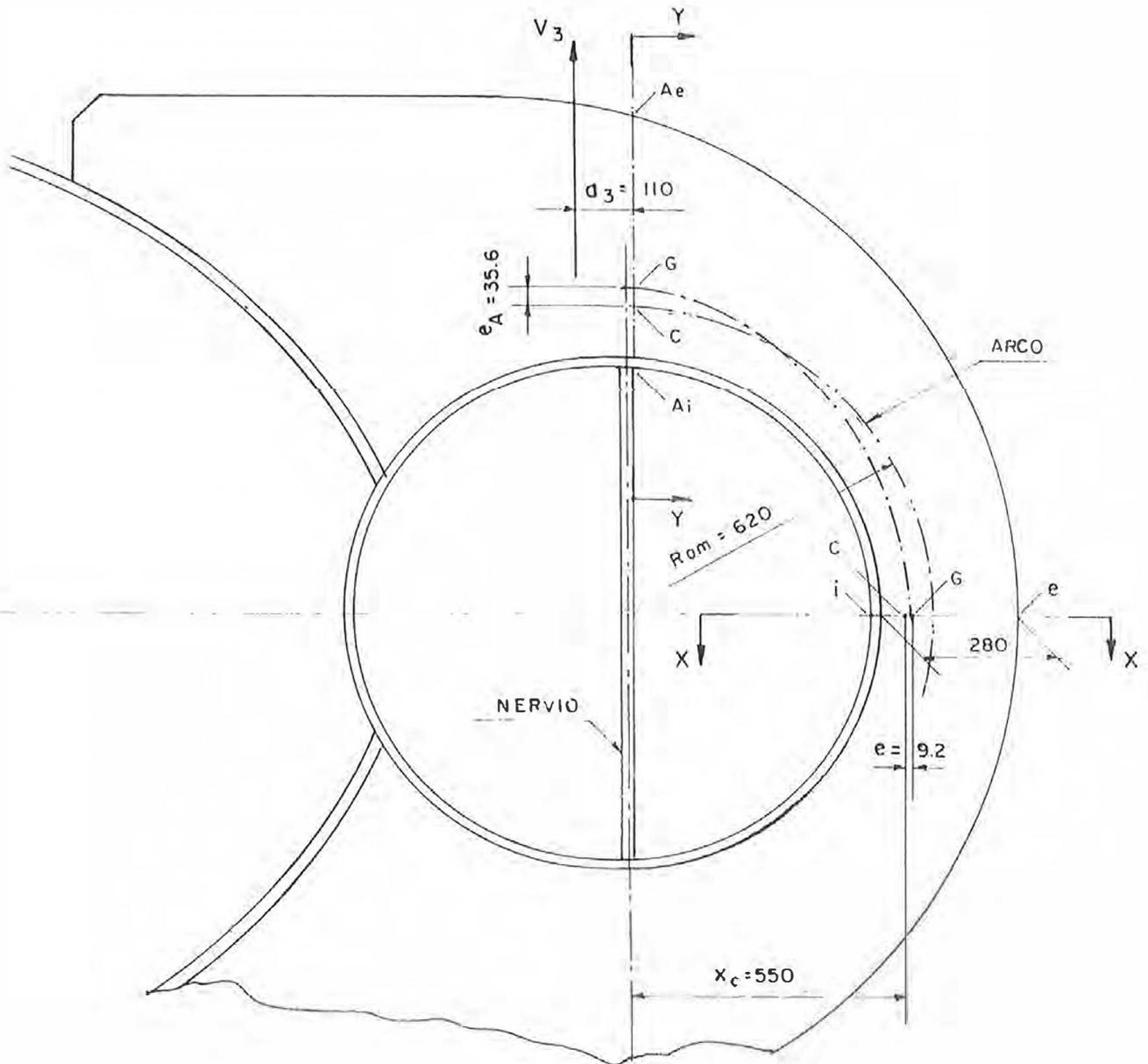
$$\sigma_e'' = -3.14 \text{ MPa} < \sigma_{A_2}$$

### 3.1.5.3 Nervio divisor y Nervadura III

Con referencia a las figuras de la Lámina N° 3.5 se determina la característica de la sección Y-Y: Area:  $A = 24,960 \text{ mm}^2$

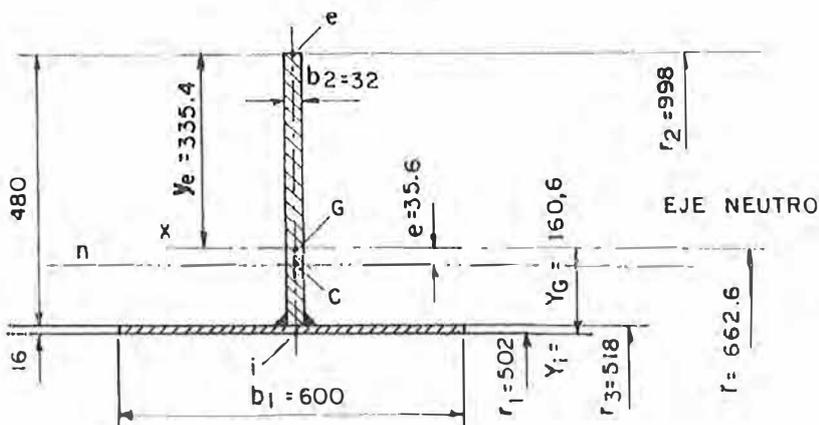
Momento de inercia con respecto al eje barocéntrico y-y:  $J = 658.46 \times 10^6 \text{ mm}^4$

NERVADURA III

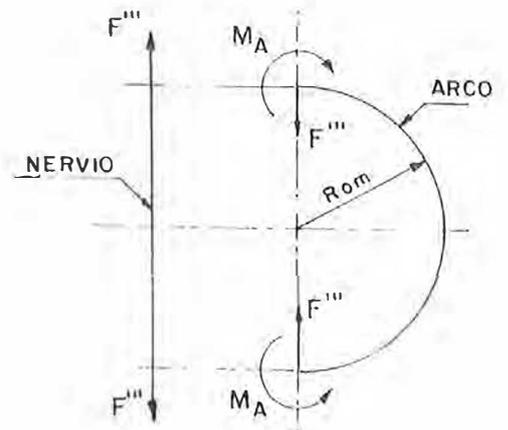


SECCION Y-Y

ESQUEMA PARA EL CALCULO DE LA FUERZA  $F'''$  DEBIDA AL MOMENTO  $M_A = V_3 \times a_3$



La sección X-X es igual a la mostrada en la lámina 3.5



Para  $F'$  y  $F''$  ver lámina 3.5

Desplazamiento del eje neutro:

$$e = 35.6 \text{ mm}$$

Luego de las figuras de las Láminas Nros. 3.5 y 3.6 se obtiene:

$$F' = \frac{2p \times B_3 \times I_1^2}{I_3 (S-2)} / \left[ \frac{\pi R_{om}^3}{2j_m} + \frac{2 \times I_1}{I_3 \times (S-2)} \right] =$$

$$\frac{2 \times 4.4 \times 10^6 \times 0.660 \times 0.502^2}{0.750 \times 0.021} /$$

$$\left[ \frac{\pi \times 0.620^3}{2 \times 400 \times 10^{-6}} + \frac{2 \times 0.502}{0.750 \times 0.021} \right]$$

$$F' = 92,961 N$$

$$F'' = \frac{2V_3 I_1}{I_3 (S-2)} / \left[ \frac{\pi R_{om}^3}{2J_m} + \frac{2 \times I_1}{I_3 \times (S-2)} \right]$$

$$\frac{2 \times 3.112 \times 10^6 \times 0.502}{0.750 \times 0.021} / \left[ \frac{\pi \times 0.620^3}{2 \times 400 \times 10^{-6}} + \right.$$

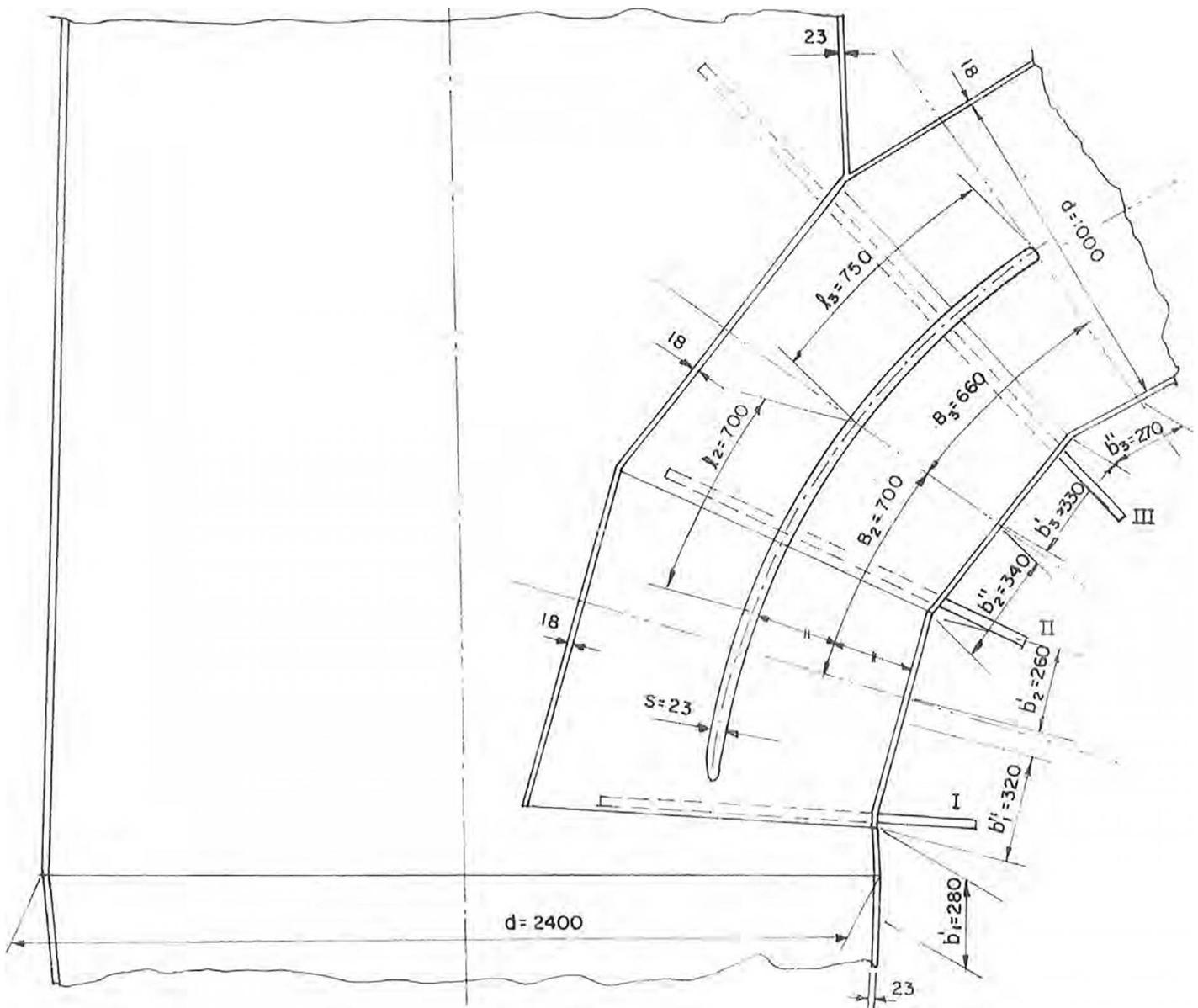
$$\left. \frac{2 \times 0.502}{0.750 \times 0.021} \right] = 198,446 N$$

$$F'' = \frac{2M_A R_{om}^2}{j_m} / \left[ \frac{2I_1}{I_3 \times (S-2)} + \frac{\pi R_{om}^3}{2 \times j_m} \right] =$$

AREA DE REFUERZO DE LA DERIVACION  
TAMAÑO TIPO DE LOS ELEMENTOS

ANCHURAS DEL TUBO SECUNDARIO COADYUVANTES CON LAS NERVADURAS  
SEGUN Ref 5

I)  $b_1 = b'_1 + b''_1 = 600$ ; II)  $b_1 = b'_2 + b''_2 = 600$ ; III)  $b_1 = b'_3 + b''_3 = 600$



$$\frac{2 \times 343 \times 10^3 \times 0.620^2}{400 \times 10^{-6}} / \left[ \frac{2 \times 0.502}{0.750 \times 0.021} + \frac{\pi \times 0.620^3}{2 \times 400 \times 10^{-6}} \right] = 659,472 N$$

$M_A$  es el momento de empotramiento debido a la unión entre el tubo principal y el nervio divisor por la nervadura III y se deduce de la medida de tensión obtenida con los ensayos extensométricos en el punto  $A_e$ . Su valor es:

$$M_A = 343 \times 10^3 \text{ N-m}$$

$J_m$  es el momento de inercia medio, definido por:

$$\bar{J}_m = \frac{J_{II} + J_{III}}{2} = \left( \frac{149.58 + 658.46}{2} \right) \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$\bar{J}_m = 400 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

#### a) Verificación del nervio divisor

Fuerza en el nervio:

$$F_{S3} = V_3 + F' - F'' + F''' = 3.112 \times 10^6 + 92,961 - 198,446 + 659,472 = 3'665,987 \text{ N}$$

$$\sigma_{s3} = \frac{F_{e3}}{I_3 \times (s-2)} = \frac{3'665,987}{0.750 \times 0.021} = 232,8 \text{ MPa} < \sigma_{A_1}$$

b) Verificación de la nervadura III

Sección Y-Y:

$$M_C = M_A = 343 \times 10^3 \text{ N-m}$$

$$\sigma_1 = \frac{M_A (y_1 - e)}{A e r_1} = \frac{343 \times 10^3 (0.1606 - 0.0356)}{24.9 \times 10^{-3} \times 0.0356 \times 0.502}$$

$$= 96.3 \text{ MPa} < \sigma_{A_1}$$

$$\sigma_e = \frac{-M_A (y_e + e)}{A e r_2} = \frac{-343 \times 10^3 \times (0.3355 + 0.0356)}{24.9 \times 10^{-3} \times 0.0356 \times 0.998}$$

$$= -143.9 \text{ MPa} < \sigma_{A_2}$$

Sección X-X

Momento de flexión:

$$M_C = M_A - (F' - F'' + F''') X_C = 343 \times 10^3 - (92,961 - 198,446 + 659,472) \times 0.550$$

$$M_C = 38,307 \text{ N-m}$$

Fuerza normal:

$$N_c = 1/2 \rho B_3 r_1 - F' + F'' - F'''$$

$$N_c = 1/2 \cdot 4.4 \times 10^6 \times 0.660 \times 0.502 - 92,961 + 198,446 - 659,472$$

$$N_c = 174,917 \text{ N}$$

$$\sigma' = N_c/A = 174,917/18.56 \times 10^{-3} = 9.42 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \sigma_e'' &= \frac{M_c (y_i - e)}{A e I_1} \\ &= \frac{38,707 \times (0.0756 - 0.0092)}{18.56 \times 10^{-3} \times 0.0092 \times 0.502} = 29.67 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_e'' &= \frac{-M_c (y_a + e)}{A e I_2} \\ &= \frac{-38,307 \times (0.2204 - 0.0092)}{18.56 \times 10^{-3} \times 0.0092 \times 0.798} = 59.37 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_i = \sigma_i' + \sigma_i'' = 9.42 + 29.67 = 39.09 \text{ MPa} < \sigma_{A_1}$$

$$\sigma_e = \sigma_e' + \sigma_e'' = 9.42 - 59.37 = -49.95 \text{ MPa} < \sigma_{A_2}$$

Las características de inercia de la sección X-X no han sido presentadas en la Lámina N° 3.5 por corresponder a las de la sección homónima de la nervadura II.

### 3.2 FABRICACION

- a) Una vez concluido el diseño de los distribuidores, se efectuó el desarrollo de las superficies de cada virola y de cada derivación. A partir de este desarrollo se trazaron las planchas de acero elegido, efectuándose luego el corte y preparación de zonas para la soldadura.
- b) A continuación se procedió al rolado de las planchas y a la soldadura por arco eléctrico en tramos independientes por cada derivación, es decir, en seis partes para facilidad del transporte entre la fábrica y la obra.
- c) Luego, se preensablaron las partes completándose el distribuidor con la finalidad de verificar las medidas especificadas en el diseño. Seguidamente se procedió al arenado en cada una de las partes al grado Sa<sub>3</sub> (norma Sueca), para inmediatamente después pintarlas interior y exteriormente, con una resina epóxica con base de zinc para evitar la corrosión.

### 3.3 PROCEDIMIENTO DE MONTAJE

El procedimiento seguido para el distribuidor de cada turbina, descrito sumariamente, es el siguiente:

- a) Las seis partes del distribuidor fueron posicionadas, niveladas y alineadas perfectamente en relación a la respectiva válvula esférica que se montó provisionalmente, soldándose por arco eléctrico las partes, previo calentamiento a 80°C mediante resistencias eléctricas. Los cordones de soldadura fueron esmerilados hasta alcanzar un acabado conveniente.
  
- b) Las partes aledañas a los cordones de soldadura que hubiera sido dañada o quemada se arenaron hasta alcanzar el grado Sa 2.5 (norma Sueca), procediendo luego al pintado con resina epóxica con base de zinc, tanto en la parte interior como en la exterior. En la parte interior se aplicaron dos manos de resina con base de caucho clorado. El espesor total especificado para la pintura fue de 440 um, con un mínimo de 50 um para la primera mano de base (resina con base de zinc aplicada en fábrica y retocada en obra).

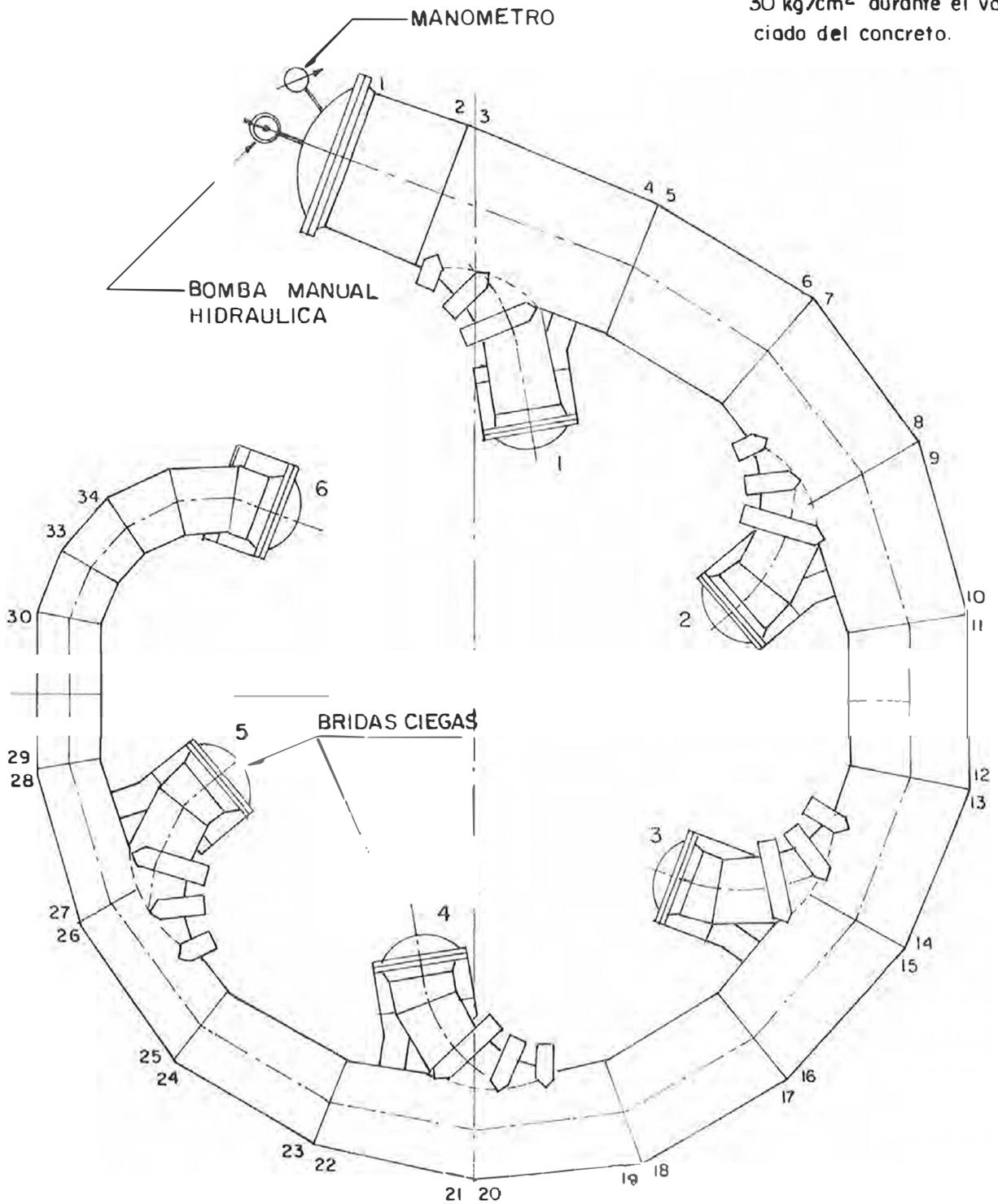
c) Seguidamente, se procedió a ejecutar la prueba hidráulica, por lo que fue necesario colocar bridas ciegas en cada una de las derivaciones y también en la brida donde sería montada posteriormente la válvula esférica. En esta última, se colocó una bomba manual para alcanzar la presión de prueba de 4.4 MPa. La disposición se puede apreciar en la Lámina N° 3.7. La presión de prueba indicada se mantuvo durante 48 horas, según especificaciones técnicas a fin de comprobar si existían fugas.

d) Como quiera que por diseño, el distribuidor sería embebido en concreto, fue necesario mantener una presión interna de 3.0 MPa durante el vaciado de concreto, con el fin de evitar su aplastamiento,

DISPOSICION DEL DISTRIBUIDOR PARA PRUEBA HIDROSTATICA  
TURBINA PELTON 72 MW.  
6 INYECTORES

PRESION DE PRUEBA : 45 kg/cm<sup>2</sup>  
TIEMPO : 48 h.

NOTA : Mantener la presión en  
30 kg/cm<sup>2</sup> durante el vaciado del concreto.



## CAPITULO IV

### EL FENOMENO DE RESONANCIA

## CAPITULO IV

### EL FENOMENO DE RESONANCIA

#### 4.1 MANIFESTACION Y CONSECUENCIAS

Después de concluidas satisfactoriamente las pruebas a la terminación del montaje, se dio inicio a la operación experimental del Grupo Generador N° 1. Las especificaciones técnicas indicaban 30 días consecutivos de funcionamiento, nueve de los cuales deberían ser a carga máxima de diseño o máxima por razones de red, estos nueve días fueron ubicados al principio del lapso de operación experimental.

Al decimosegundo día de operación experimental se observaron pequeñas filtraciones de agua a través del concreto de recubrimiento del distribuidor, en un punto ubicado en las cercanías de la puerta hermética de ingreso al rodete, suponiéndose en un principio que podría tratarse de agua de infiltración de la roca, como ya se había presentado en otros lugares. Sin embargo, al decimoquinto día de operación se puso el Grupo fuera de servicio, procediéndose a efectuar una inspección visual al interior del distribuidor, sin

que en apariencia existiera algo fuera de lo normal, por lo que se reinició la marcha, añadiéndose anilina al agua a turbinar. Al teñirse el agua que filtraba a través del concreto, fue evidente que existía una fuga a través del distribuidor.

Por lo tanto, se procedió a dejar el Grupo fuera de servicio y efectuar esta vez una inspección más minuciosa, utilizando inclusive líquido penetrante, detectándose en efecto fisuras en las cinco primeras derivaciones del distribuidor, a lo largo de los cordones de soldadura de unión entre el tabique nervio central de refuerzo y el tubo.

#### 4.2 INVESTIGACION SOBRE SU ORIGEN

Este acápite tiene la finalidad de exponer las principales causas de las fisuraciones que se manifestaron en las derivaciones del distribuidor de la turbina del Grupo N° 1 de la Central Hidroeléctrica Restitución, en el primer mes de su funcionamiento.

#### 4.2.1 Aspectos Estáticos

Se excluye que las grietas encontradas hayan sido causadas por excesivos esfuerzos estáticos por las siguientes razones:

La distribución de las grietas indica que éstas se han manifestado en zonas estáticamente poco solicitadas y que no ha sido comprometida ninguna de las zonas estáticamente más solicitadas.

Los distribuidores de los tres grupos han superado la prueba de presión en el sitio antes de su concretado, con una presión interna que es una vez y media más de la máxima que puede presentarse en cualquier condición de funcionamiento.

Como se ha indicado en el capítulo 3, el cálculo estático de los refuerzos de las bifurcaciones ha sido comprobado por pruebas extensométricas sobre un modelo en escala 1-5 construido en acero. Después de dichas pruebas el modelo ha sido llevado a la presión de colapso y ha resultado ligeramente superior al doble de la presión de prueba. Dicho valor está en concordancia con los obtenidos para las bifurcaciones de las tuberías forzadas, ver la referencia 8.

#### 4.2.2 Aspectos Dinámicos

Las grietas de notable longitud, después de cierto período de funcionamiento, indica que han intervenido fenómenos de fatiga provocados por fuerzas pulsantes con frecuencia del orden de los 100 Hz.

Con dicha frecuencia, en un período menor de 12 días se llega a un número de ciclos de  $10^8$  que es típico de las roturas por fatiga a alto número de ciclos.

Descartada la frecuencia correspondiente a las revoluciones nominales (3,33 Hz), la investigación se ha dirigido principalmente hacia algunas frecuencias excitantes más probables que tienen el orden de magnitud antes indicado:

Frecuencia por número de cucharas.

Frecuencias de vórtices de reguero al borde de salida del nervio de refuerzo de las derivaciones.

#### 4.2.2.1 Frecuencias Excitantes

##### 4.2.2.1.1 Descarga de las Cucharas Sobre los Escudos

$$f_1 = \frac{Z \cdot n}{60} = \frac{20 \cdot 200}{60} = 66.7 \text{ Hz}$$

Los hilos de fluido que se descargan con velocidad absoluta aproximadamente radial a la periferia de las cucharas, chocan el escudo de un inyector con la frecuencia  $f_1$  sobreindicada (Ver figura de la Lámina N° 4.1).

##### 4.2.2.1.2 Vórtices de Reguero

La aparición de fisuraciones en la zona del borde de salida del nervio, indica la probabilidad de las fuerzas excitantes debidas a la separación de dos hilos de vórtices alternados, denominados vórtices de Bernard-Karman. La frecuencia de separación de dichos vórtices del borde salida, está calculada según las indicaciones de la referencia 9 empleadas por los fabricantes con éxito para los predistribuidores de las turbinas Kaplan y Francis:

$$f_2 = \frac{S \cdot V}{d}$$

$S$  = número de Strouhal = 0.35

$\bar{V}$  = velocidad del agua = 7.1 m/s

$d$  = espesor del nervio = 0.023 m

Resulta:

$$f_2 = \frac{0.35 \times 7.1}{0.023} = 108 \text{ Hz}$$

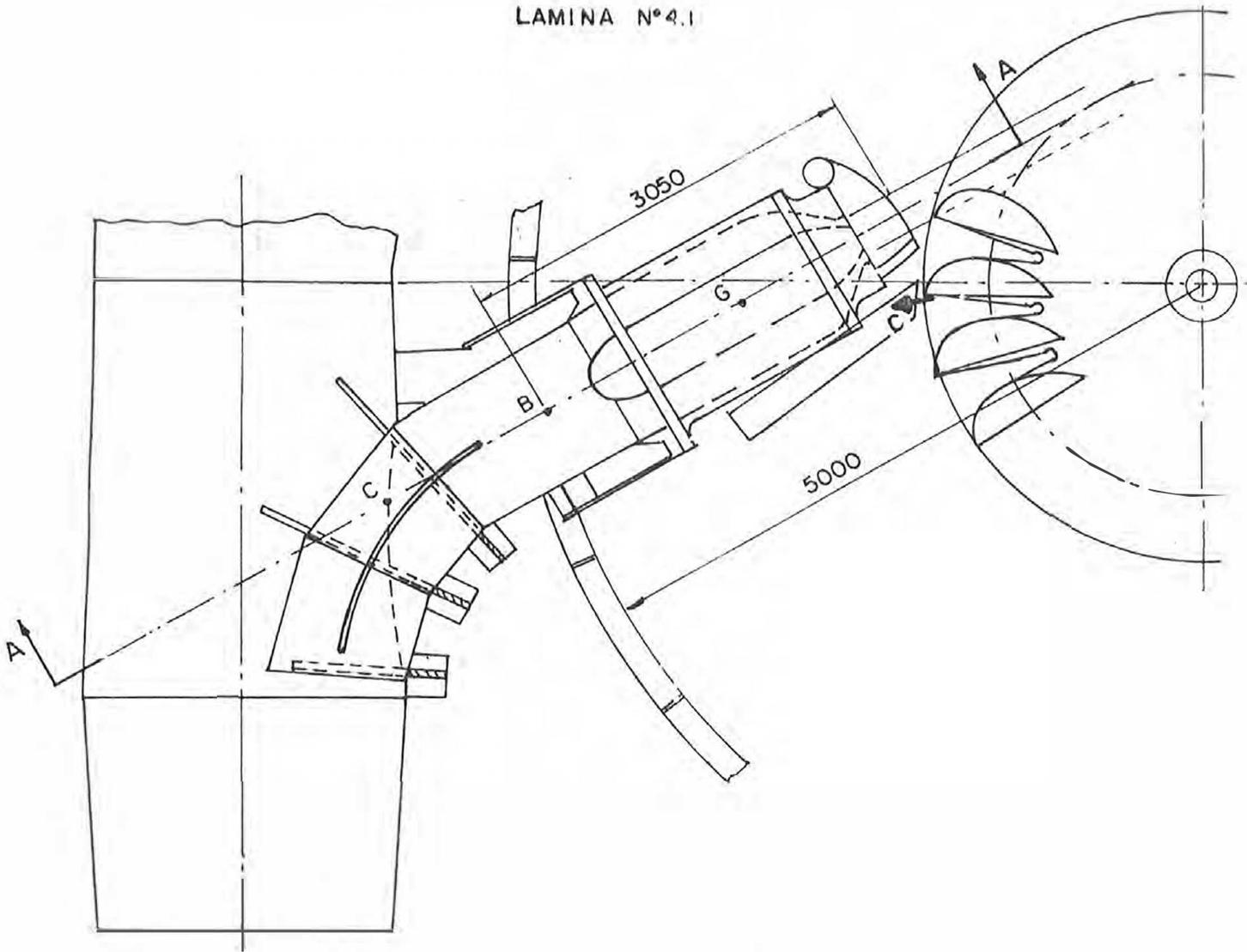
#### 4.2.2.2 Frecuencias Propias

##### 4.2.2.2.1 Sistema Inyector-Tubería de Derivación

Con relación a las figuras de las Láminas N° 4.1 y 4.2, la primera frecuencia propia de vibración flexional del sistema indicado está calculada con el método energético, según la referencia 10.

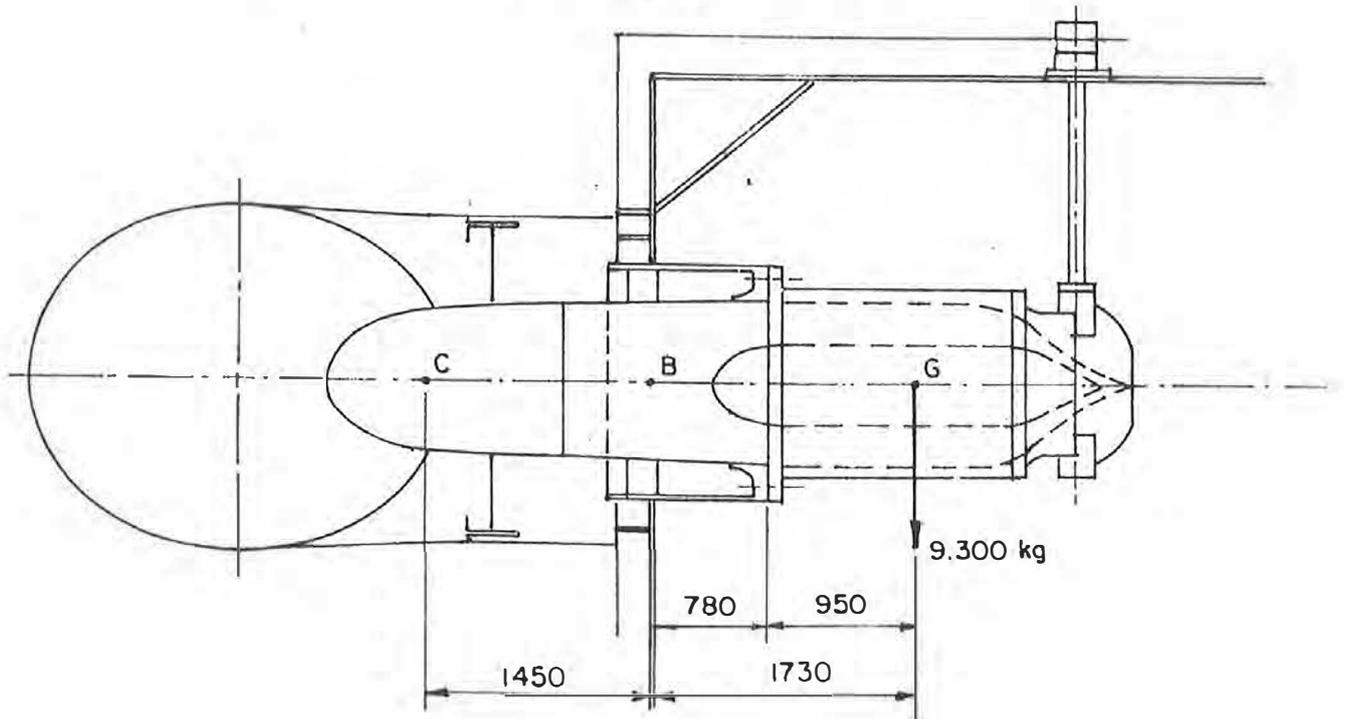
Energía potencial elástica de flexión  $E_p$  almacenada en la tubería de derivación:

$$E_p = \frac{1}{2} m_b \theta_B^2 = \frac{4 E J_1 \theta_B^2}{2 l_1}$$



SISTEMA INYECTOR - TUBERIA DE DERIVACION

ESC. 1:50



SECCION A-A

Energía cinética de las masas oscilantes  $E_c$  alrededor del eje B:

$$E_c = \frac{1}{2} I \theta_B^2 = \frac{1}{2} I p^2 \theta_B^2$$

De la igualdad  $E_p = E_c$  se consigue la pulsación  $p$ :

$$p = 2 \sqrt{\frac{E J_1}{I l_1}} \quad (1)$$

donde:

$E$  = módulo de elasticidad = 206,000 MPa

$J_1$  = momento de inercia diametral de la sección de la tubería de derivación

$$J_1 = \frac{\pi}{64} (d_e^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64} (1.066^4 - 1.030^4) = 8.138 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$I$  = momento de inercia de las masas oscilantes alrededor del eje B.

$$\begin{aligned} I &= \int_{l_3}^{l_3+l_4} \frac{w}{g} x^2 dx = \frac{P}{l_4 \cdot g} \int_{l_3}^{l_3+l_4} x^2 dx \\ &= \frac{P}{3 l_4 \cdot g} [(l_3+l_4)^3 - l_3^3] \end{aligned}$$

de la Lámina N° 4.2 :

$$l_3 = 0.780 \text{ m}$$

$$l_4 = 1.900 \text{ m}$$

$$p = 91,200 \text{ N}$$

reemplazando valores:

$$I = \frac{91,200}{3 \times 1.900 \times 9.81} [(0.780 + 1.900)^3 - 0.780^3]$$

$$= 30,620 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{seg}^2$$

$$l_1 = 1.450 \text{ m}$$

reemplazando valores en (1) se obtiene la pulsación y luego la frecuencia:

$$p = 388.6 \text{ s}^{-1}$$

$$f = P/2 \pi = 61.8 \text{ Hz}$$

Por otra parte se ha verificado que la pared de la caja Pelton de espesor relativamente reducido y no vinculada con refuerzos al concreto en la zona de anclaje del soporte del inyector, constituye un vínculo más próximo a la bisagra que a un anclaje. Al

ESQUEMA PARA EL CALCULO DE LA 1<sup>ra</sup>. FRECUENCIA PROPIA FLEXIONAL DEL SISTEMA INYECTOR-TUBERIA 1<sup>ra</sup>. DERIVACION

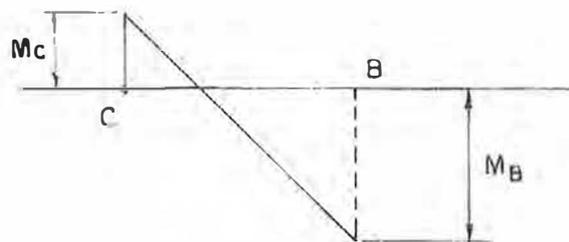
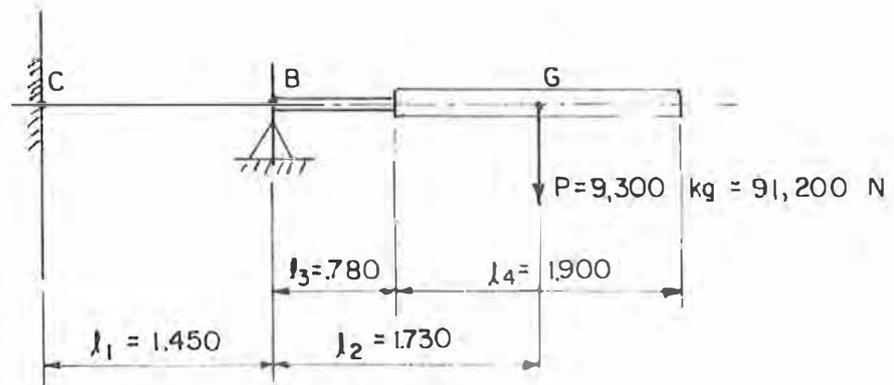
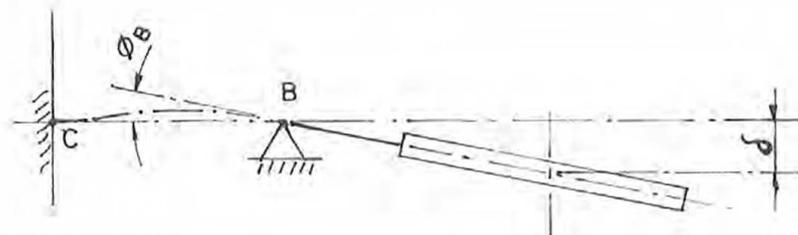


DIAGRAMA DE MOMENTO FLEXIONAL SOBRE VIGA B-C

$$M_B = P \times \lambda_2 = 157,776 \text{ N-m}$$



OSCILACION ALREDEDOR DEL FULCRO B  
SISTEMA INYECTOR -TUBERIA 1<sup>ra</sup>. DERIVACION

contrario, se tomó como hipótesis que la tubería está perfectamente empotrada en el punto C, mientras en realidad dicho anclaje es imperfecto. Es inmediato notar la cercanía del valor de frecuencia propia, ahora evaluada, con la frecuencia excitante  $f_1$  encontrada en el párrafo 4.2.2.1.1.

#### 4.2.2.2.2 Frecuencia Propia, Parte Terminal del Nervio

Para el cómputo de la más baja frecuencia propia de la parte terminal del nervio, ha sido utilizado el esquema de figuras en la Lámina N°4.3. La continuidad con la parte restante del nervio ha sido considerada suponiendo un apoyo simple como vinculación con el lado izquierdo de la plancha. Dicho esquema es conservador, es decir, da como resultado una frecuencia propia más baja que la efectiva.

De la referencia 11 y apéndice N° 4 se calcula: rigidez flexional de la plancha (D):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$$

donde:

E = módulo de elasticidad = 206,000 MPa

LAMINA N°4.3

ESQUEMA PARA EL CALCULO DE LA PRIMERA FRECUENCIA PROPIA FLEXIONAL DEL NERVIO ORIGINAL TIPICO DE LAS DERIVACIONES



$h$  = espesor de la plancha = 0.023 m

$\nu$  = módulo de Poisson = 0.3

reemplazando valores:

$$D = \frac{206,000 - (0.023)^2}{12(1 - 0.3^2)}$$

$$D = 229,524 \text{ N-m}$$

masa por unidad de área en la plancha ( $\rho$ ):

$$\rho = 1 \times h \times \frac{\gamma}{g}$$

$h$  = espesor de la plancha = 0.023 m

$\gamma$  = peso específico = 77,000 N/m<sup>3</sup>

$g$  = aceleración de la gravedad = 9.81 m/seg<sup>2</sup>

reemplazando valores:

$$\rho = 1 \times 0.023 = \frac{77,000}{9.81}$$

$$\rho = 180.5 \text{ N-seg}^2/\text{m}$$

de la relación  $b/2a = 500/1000 = 1/2$ , se obtiene de página 225 de la ref. 11 para el primer modo de vibración simétrica:

$$\lambda^2 = 6.547 \quad (\text{ver apéndice N}^\circ 4)$$

con los valores obtenidos de  $D_1 \rho_y \lambda^2$  se puede obtener la frecuencia circular de vibración de la placa ( $w$ ):

$$w = \frac{\lambda^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho}} = \frac{6.547}{0.5^2} \frac{\sqrt{229,524}}{180.5}$$

$$w = 933.9 \text{ seg}^{-1}$$

y la frecuencia de la vibración de la placa ( $f$ ):

$$f = \frac{w}{2\pi} = \frac{933.9}{2\pi}$$

$$f = 148.6 \text{ Hz}$$

se trata de frecuencia en aire.

Debido a que el nervio está sumergido en agua, dicha frecuencia será reducida por efecto de la masa de agua.

Según la referencia 9, dicha reducción es del orden del 30%, por lo tanto, resulta:

$$f = 0.7 \cdot 148.6 = 104 \text{ Hz}$$

Comparando dicho valor con aquel de los vórtices de Bernard-Karman, calculado en el párrafo 4.2.2.1.2, es inmediato ver que no hay margen de seguridad. La misma verificación hecha para los nervios de las tuberías espirales de las turbinas Pelton de 6 inyectores, descritas en el apéndice N° 3, indica que existe al menos una relación 2.6 entre la más baja frecuencia de agua que aquella de los vórtices de reguero, ésta corresponde a tener una relación superior a 3 entre frecuencia propia en aire y aquella de los vórtices de reguero, de acuerdo a lo verificado en la referencia 9. La referencia 11 se incluye en el apéndice N° 4.

## CAPITULO V

SOLUCION ADOPTADA Y RESULTADOS

OBTENIDOS

## CAPITULO V

### SOLUCION ADOPTADA Y RESULTADOS OBTENIDOS

#### 5.1 REFUERZO DE LAS DERIVACIONES

A continuación se describen las modificaciones efectuadas en las cinco primeras derivaciones de los distribuidores de las turbinas de los tres grupos.

##### 5.1.1 Anclaje de las Tuberías de las Derivaciones a la Principal

Con el fin de mejorar las condiciones de anclaje, se instalaron dos nervios adicionales, mostrados en las posiciones N° 1 y 2 del plano N° 001.

Dichos nervios reducen notablemente los esfuerzos sobre el único nervio central de diseño original que eran largamente aceptables desde el punto de vista estático, pero mucho menos en el caso de esfuerzos de fatiga.

### 5.1.2 Vínculos en la Extremidad del Nervio

Debido al peligro de resonancia en la zona de los extremos del nervio con relación a los vórtices de reguero, se aplicó una aleta horizontal (posición N° 4 del plano N° 001) que reduce a la mitad, la longitud libre de flexión del nervio (referencia 13).

Debido a que la frecuencia propia es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud, dicha medida aumentará en cuatro veces la frecuencia propia, llevando al nervio a condiciones de seguridad. Similar medida se adoptó para el borde de ingreso, donde no se presenta el peligro de vórtices alternados, pero puede presentarse una excitación de amplio espectro de frecuencias debido a la turbulencia hidráulica (posición N° 3, plano N° 001).

### 5.1.3 Anclaje de la Parte Interior de la Tubería de Derivación

Se ha instalado una aleta horizontal de unión entre la tubería principal y parte de la tubería de derivación sobresaliendo al interior de aquella, dicha aleta tiene la función de aumentar la frecuencia

propia de dicha parte respecto a las frecuencias, debido a la turbulencia hidráulica que se presenta en esta zona. También tiene la función de regularizar el flujo de dicha zona, reduciendo la turbulencia, según la referencia 9.

## 5.2 REFUERZO DEL VOLADIZO DE LOS INYECTORES

Considerando el peligro de resonancia para el sistema inyector tubería de derivación, establecido en el párrafo 4.2.2.2.1, respecto a la frecuencia de descarga de las cucharas se consideró necesario aumentar la frecuencia propia de dicho sistema, vinculando con mayor intensidad la masa del inyector a la pared de la caja Pelton.

Esto fue realizado mediante escudos de unión, instalados en posición tal, que no estorbaran la descarga de agua durante el funcionamiento, ni la del chorro desviado durante el rechazo de carga.

Las dimensiones y disposiciones típicas de los escudos se muestra en el plano N° 001. Este refuerzo fue practicado en cada uno de los seis inyectores. También se practicaron inyecciones de concreto, de

contacto entre el blindaje y concreto de recubrimiento del distribuidor en la zona cercana a los inyectores a fin de asegurar la no existencia de vacíos, tapando luego los agujeros que se habían practicado en la plancha del blindaje de la Caja Pelton para efectuar las inyecciones mencionadas. La parte vacía de los escudos también fue rellena con concreto.

### 5.3 METODOLOGIA SEGUIDA PARA LA REPARACION Y MODIFICACION

Solo en el Grupo N° 1 fue necesaria la reparación de las grietas, puesto que los Grupos N° 2 y 3 no habían entrado aún en operación. Las modificaciones fueron efectuadas en los tres grupos.

Las cinco derivaciones se consideraron como cinco zonas distintas de trabajo, puesto que la actividad realizada no provocó interacciones entre ellas.

Asimismo, fue necesario el desmontaje de los inyectores para ejecutar el trabajo. A continuación, se describen en forma resumida los trabajos realizados.

### **5.3.1 Reparación de las grietas, Grupo N° 1**

#### **5.3.1.1 Limpieza y Reparación de Bordes**

Por amoladura se limpiaron los bordes de las grietas, realizando una abertura en bisel a 45° en "V" o en "X" para grietas pasantes y accesibles por ambos lados.

#### **5.3.1.2 Proceso de Soldadura**

En primer lugar, fue necesario precalentar la zona a soldar mediante llama (gas propano) a una temperatura de 80° a 100°C, teniendo en cuenta que en la zona que interesaba al concreto, la temperatura de interpaso no excediera los 200°C. El control de temperatura se efectuó con yeso (tiza) pirómetro de contacto. A continuación, se procedió a aplicar la soldadura utilizando electrodos, tipo AWS 7016, con diámetro no superior a los 3.25 mm  $\phi$  para las primeras pasadas. Después de cada pasada se martillaban los cordones y al llegar a los primeros 5 ó 6 mm, fueron controlados con magnaflux y líquido penetrante, después de haber limpiado convenientemente las superficies. Una vez completado el trabajo se procedió a realizar una prueba de rayos X a lo largo de los cordones.

### 5.3.1.3 Prueba de Estanqueidad

La tubería del distribuidor del Grupo N° 1 se sometió a una prueba hidrostática con el máximo nivel de agua en el pulmón durante 48 horas, con el fin de verificar su estanqueidad.

### 5.3.2 Modificación de las Derivaciones y Refuerzo de la Caja Pelton

Las piezas de acero se cortaron y se biselaron de acuerdo al desarrollo del plano N° 001.

Se eliminó la pintura a lo largo de una faja de aproximadamente 100 mm de ancho a ambos lados del eje de la soldadura a efectuarse.

Se utilizaron electrodos AWS 7016.

Fue necesario el precalentamiento a una temperatura entre 80°-100°C controlado con tiza pirómetro.

En las zonas donde el precalentamiento interesaba al concreto, se mantuvo la temperatura entre pasadas del soplete inferiores a los 200°C.

Los electrodos utilizados, inicialmente, fueron de 3.25 mm de  $\phi$  y luego de mayores diámetros.

LAMINA N° 5.1

CRONOGRAMA DE REPARACION Y MODIFICACION DISTRIBUIDOR

ACTIVIDADES	TIEMPO	M E S E S					
		1	2	3	4	5	6
<b>GRUPO 1</b>							
Reparación de grietas.		█					
Fabricación y montaje de escudos.		█	█				
Fabricación y montaje de refuerzos interiores en las derivaciones		█	█				
Montaje de inyectores.			█				
Prueba de estanqueidad				█			
Puesta en operación						█	
<b>GRUPO 2</b>							
Desmontaje de inyectores			█				
Fabricación y montaje de escudos			█				
Fab. y mont. ref. interiores en derivac.			█	█			
Montaje de inyectores			█	█			
Pruebas con carga. Reg. nivel potencia				█	█		
Operación experimental					█	█	
<b>GRUPO 3</b>							
Desmontaje de inyectores			█				
Fabricación y montaje de escudos			█	█			
Fabricación y montaje de refuerzos interiores en las derivaciones.			█	█			
Montaje de inyectores				█	█		
Pruebas con carga					█	█	
Operación experimental.						█	█

El cronograma de ejecución de las reparaciones y modificación de los distribuidores, se puede apreciar en la Lámina N° 5.1 de la página anterior.

#### **5.4 MEDICION DE LA FRECUENCIA NATURAL**

##### **5.4.1 Medición en el Prototipo Antes y Después de la Modificación**

Es necesario resaltar que en este tipo de instalaciones, existen tantos prototipos, como grupos de generación se han suministrado, siendo en este caso, tres (3) y el número de grupos y por lo tanto de prototipos. Con el fin de optimizar los tiempos de las actividades del programa de trabajo para la ejecución de las reparaciones y modificaciones, las mediciones antes y después de las modificaciones, se hicieron en grupos diferentes.

Las mediciones sobre el diseño original no modificado se efectuaron en el Grupo N° 3, en cambio las mediciones sobre el diseño modificado se hicieron sobre el Grupo N° 2. Las mediciones fueron realizadas con el siguiente equipo:

Acelerómetro (Kistter) con amplificador.  
Analizador de espectro en tiempo real (Honeywell),  
Osciloscopio con memoria (Tektronix).

Las partes en examen fueron excitadas con secuencias de golpes de martillo (25 martilladas en 35 segundos) en la cercanía del punto de aplicación del acelerómetro, por el tiempo necesario para el levantamiento del espectro.

En el Cuadro N° 5.1 se muestran los valores obtenidos en las mediciones directas. En todas las pruebas, los valores de amplitud pueden considerarse comparables, por cuanto han sido medidos, prácticamente con excitaciones iguales.

En los gráficos de las Láminas N° 5.2, 5.3 y 5.4, se muestran los resultados de las mediciones, en los cuales los valores de aceleración se han convertido en valores de velocidad de vibración, debido a que se considera que esta característica es más significativa y más real, en términos de comparación de la fatiga del material.

CUADRO N° 5.1

MEDIDA DE LA FRECUENCIA PROPIA						
DERIVACION N° 2 DEL DISTRIBUIDOR MODIFICADO DEL GRUPO N° 2						
Punto	Frec. Hz	Amp. m/seg <sup>2</sup>	Frec. Hz	Amp. m/seg <sup>2</sup>	Frec. Hz	Amp. m/seg <sup>2</sup>
Am	300	1.3	344	2.0	424	3.3
Km	180	17.0	340(°)	24.0	420	4.0
Cm	290(°)	14.0	560	2.0	780	6.0
Bm	350(°)	14.0	460	6.0	515	5.0
H1 <sub>m</sub>	270	4.0	310(°)	13.0	500	3.0
H2 <sub>m</sub>	270	4.0	310(°)	28.0	500	5.0
H3 <sub>m</sub>	290	4.0	340	3.0	560(°)	17.0
H4 <sub>m</sub>	230	15.0	290(°)	28.0	570	3.0
H5 <sub>m</sub>	230	13.0	290(°)	28.0	570	5.0
H6 <sub>m</sub>	350(°)	26.0	460	15.0	510	12.0
DERIVACION N° 2 DEL DISTRIBUIDOR NO MODIFICADO DEL GRUPO N° 3						
A	140(°)	22.0	175	9.0	675	11.5
K	140	4.9	190(°)	22.0	447	7.2
C	290(°)	18.0	553	11.2	735	4.0
B	170(°)	27.0	560	11.0	740	16.0
(°) indica la frecuencia para la cual la amplitud es máxima.						

La conversión de aceleración en velocidad, se efectuó usando la siguiente expresión:

$$v = \frac{a}{2\pi f} \times 1,000$$

donde:

v = velocidad de vibración en mm/seg

a = aceleración en m/seg<sup>2</sup>

f = frecuencia en Hz

Como resultado de la modificación, se puede observar lo siguiente:

1. En el punto A del tabique vertical central, la frecuencia se ha elevado de 140 a 300 Hz (2.14 veces), reduciéndose simultáneamente la amplitud de 25 mm/seg a 1.0 mm/seg (25 veces).
2. En el punto B de salida del mismo tabique, la frecuencia se ha elevado de 170 a 340 HZ (el doble), reduciéndose la amplitud de 25 a 6.5 mm/seg (casi cuatro veces).

#### **5.4.2 Comparación entre Valores Obtenidos en el Prototipo y en el Modelo Modificado**

Se construyó un modelo en acero a escala 2.5:1 de la derivación N° 2 con las modificaciones, tomándose una serie de mediciones de la frecuencia propia, cuyos resultados se muestran en las Láminas N° 5.2, 5.3 y 5.4, debiéndose tener en cuenta la relación de dimensiones entre modelo y prototipo.

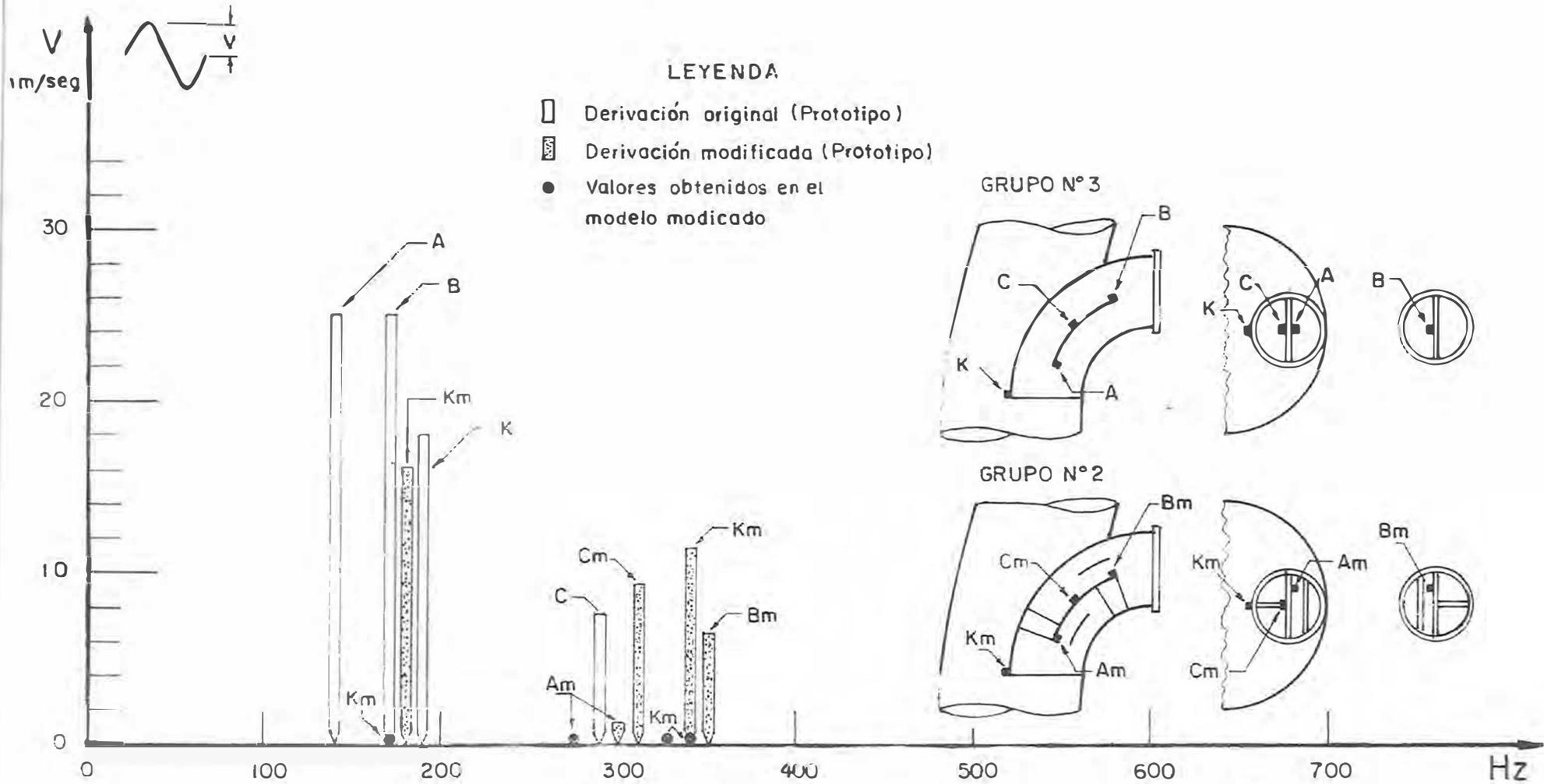
No se han indicado las amplitudes, debido a que no existe similitud entre fuerzas excitantes, sin embargo, existe una evidente relación entre los valores medios en el prototipo y en el modelo.

### **5.5 OPERACION EXPERIMENTAL**

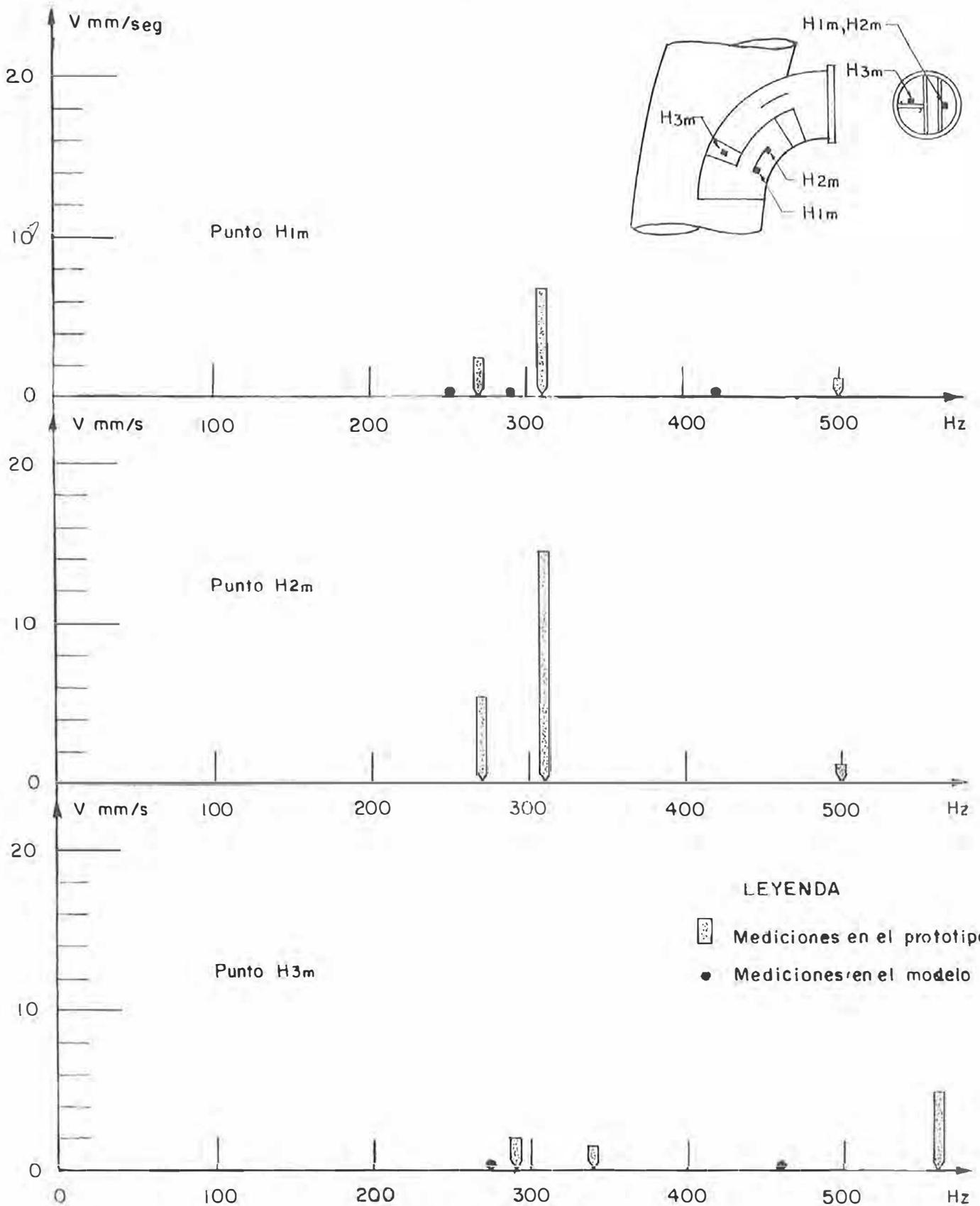
#### **5.5.1 Nuevo Período de Funcionamiento de Prueba**

Luego de concluidas las modificaciones y reparaciones en el distribuidor del Grupo N° 1, se procedió a realizar una nueva marcha de prueba a carga nominal o máxima, por razones de red. Teóricamente, hubieran bastado siete días aproximadamente para mostrar la bondad de la modificación, debido a que la

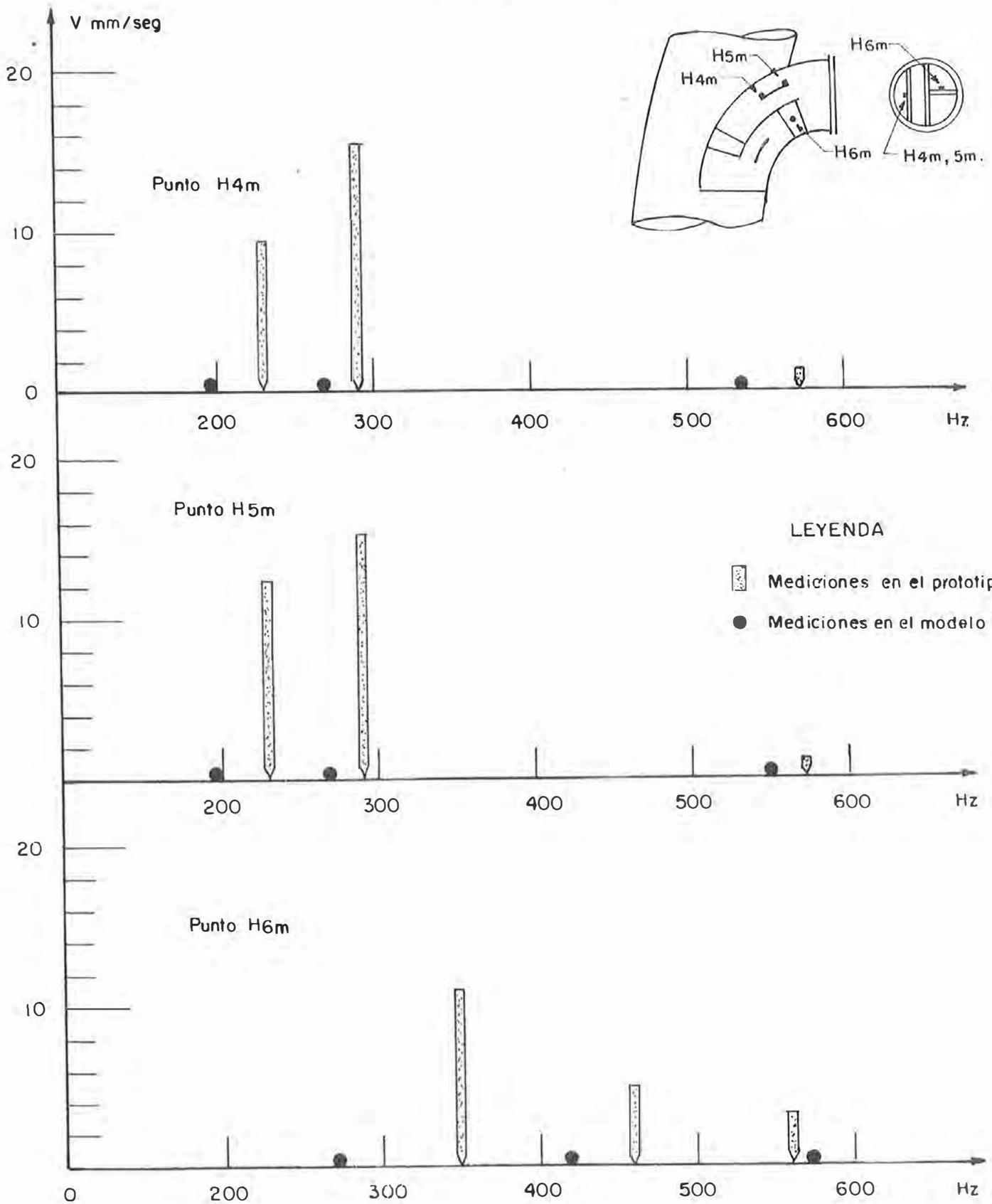
# MEDICION DE LA FRECUENCIA PROPIA BIFURCACION N°2 DEL DISTRIBUIDOR - GRUPO N°2y3



MEDICION DE LA FRECUENCIA PROPIA  
 BIFURCACION N°2 DEL DISTRIBUIDOR - GRUPO N°2  
 PRIMERA SERIE



MEDICION DE LA FRECUENCIA PROPIA  
 BIFURCACION N°2 DEL DISTRIBUIDOR - GRUPO N°2  
 SEGUNDA SERIE



frecuencia propia entre los puntos A y B se había elevado al doble. Sin embargo, se prefirió efectuar la prueba por el mismo período en que se presentaron las filtraciones, durante la primera marcha de prueba, es decir, doce días. Los resultados de esta prueba fueron satisfactorios.

#### 5.5.2 Rendimiento de la Turbina

Además de verificar que el problema de resonancia se había eliminado a partir de las modificaciones efectuadas, era necesario averiguar si estas no habían causado una merma en el rendimiento de la máquina.

Para la determinación del rendimiento se aplicó el método termodinámico directo, según el método descrito en la publicación IEC N° 607, 1ra. Edición 1978, "Methode termodinamique de mesure du rendement des turbines, pompes d'accumulation e pompes turbines hydrauliques".

Este método se basa esencialmente en la determinación de la cantidad de energía por unidad de masa, que el fluido cede al rodete; por lo que se

efectúan una serie de mediciones muy precisas de temperaturas y presiones del fluido, mediante equipo sofisticado, así como otros datos complementarios.

La prueba de rendimiento se efectuó en el Grupo N° 1. Los resultados se muestran en el Cuadro N° 5.2 y en el gráfico de la Lámina N° 5.6. En esta última, se muestran también la curva de rendimiento esperado, prevista por el fabricante de la turbina. También se incluyen las cifras del rendimiento promedio esperado y medido.

Como se puede apreciar, los rendimientos medidos sobrepasan a los rendimientos esperados, con lo que queda demostrado la bondad del diseño de la turbina y de las modificaciones efectuadas. Es factible también que la modificación efectuada haya mejorado realmente el rendimiento de la máquina, por cuanto se ha logrado una mejor conducción del fluido en las primeras cinco derivaciones del distribuidor.

Para mayor comprensión, en la Lámina N° 5.5 se muestra el Diagrama de Potencias.

CUADRO N° 5.2

PRUEBA DE RENDIMIENTO - METODO TERMODINAMICO GRUPO N° 1													
Med. N°	n (%)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>r</sub> (kW)	P <sup>*</sup> <sub>y</sub> (kW)	P <sub>u</sub> (kW)	P <sup>*</sup> <sub>y</sub> (kW)	P <sub>h</sub> (kW)	P <sup>*</sup> <sub>h</sub> (kW)	P <sub>h</sub> (kW)	Q' (m <sup>3</sup> /s)	P' <sub>y</sub> (kW)	P' <sub>h</sub> (kW)
1	90.31	257.198	13.438	29,250	1,270	30,520	77	30,597	3,379	33,796	13,386	30,165	33,403
2	91.10	257.286	17.782	39,604	1,150	40,754	77	40,831	3,905	44,736	17,710	40,259	44,193
3	91.04	257.000	22.257	49,680	1,240	50,920	77	50,997	4,935	55,932	22,179	50,386	55,345
4	90.93	256.566	27.097	60,444	1,370	61,814	77	61,891	6,089	67,980	27,025	61,321	67,438
5	90.80	255.966	31.540	70,159	1,520	71,679	77	71,756	7,186	78,942	31,493	71,357	78,583
6	90.33	255.870	33.362	73,822	1,575	75,397	77	75,474	7,996	83,470	33,318	75,101	83,142

n = eficiencia total de la turbina  $(P'_{u}/P'_{r}) \times 100$   
H = salto neto al momento de la prueba  
Q = caudal al momento de la medición  
P<sub>r</sub> = potencia eléctrica en bornes del generador

## CUADRO N° 5.2 (Continuación)

$P_a^*$  = pérdida de potencia del generador

$P_u$  = potencia mecánica útil

$P_x^*$  = potencia mecánica pérdida en los cojinetes

$P_n$  = potencia mecánica a la salida del rodete

$P_h^*$  = potencia pérdida en el rodete

$P_h$  = potencia hidráulica entregada al rodete

$Q'$  = caudal deducido para la caída neta nominal de 255.20 m, utilizando la expresión:

$$Q' = \frac{Q}{(H/H_n)^{1/2}}$$

$P'_u$  = potencia mecánica útil deducida para la caída neta nominal de 255.20 m, según expresión:

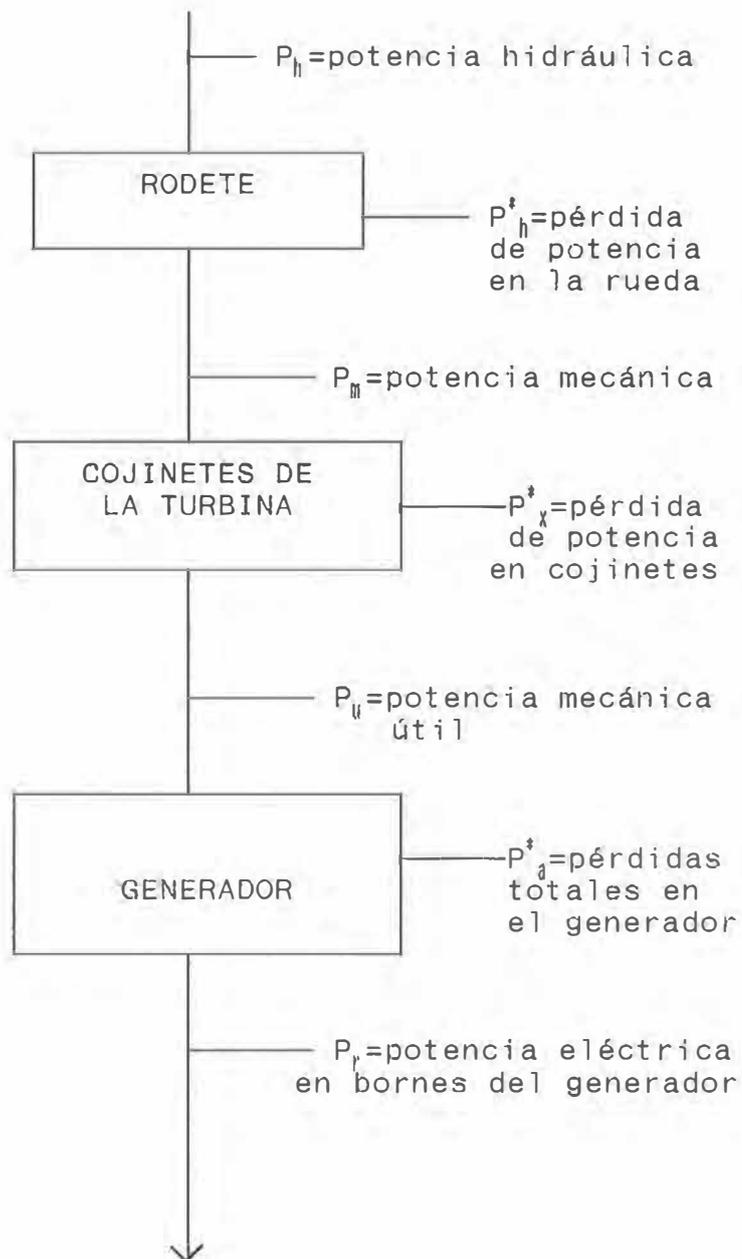
$$P'_u = \frac{P_u}{(H/H_n)^{3/2}}$$

$P'_h$  = ídem al anterior

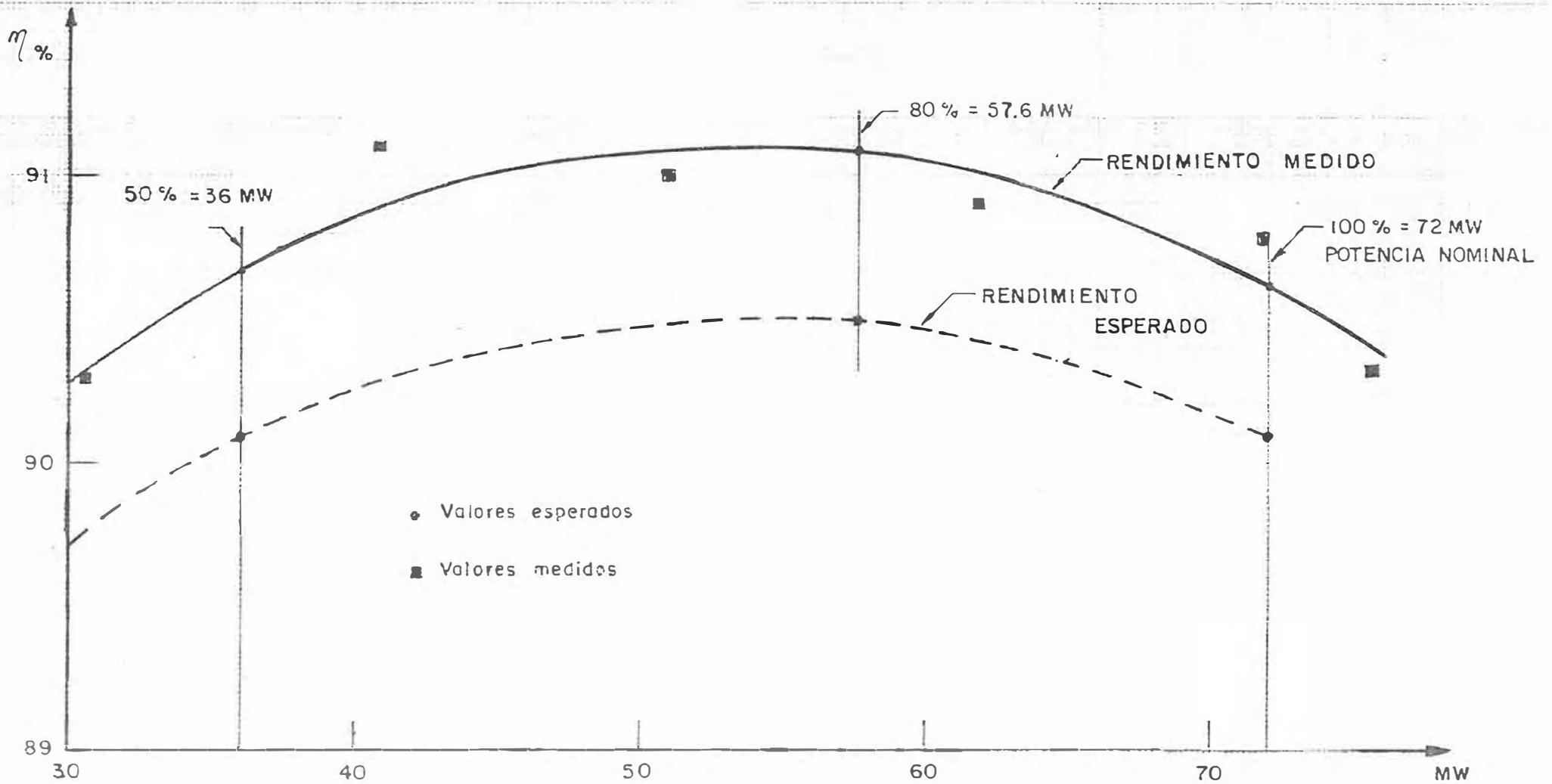
$g$  = aceleración de la gravedad deducida para el sitio 9.7782 m/seg<sup>2</sup>

## LAMINA N° 5.5

## DIAGRAMA DE POTENCIAS



# RENDIMIENTO DE LA TURBINA GRUPO N°1 - MET. TERMODIN.



## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

1. La falla observada en el material no ha sido causada por excesiva sollicitación estática; las fisuras se han presentado en zonas estáticamente poco solicitadas, lo que confirma a su vez las condiciones a que se han llegado del análisis de las experiencias industriales en la referencia 9<sup>(\*)</sup>. El cálculo teórico estático ha sido comprobado luego en el modelo, el cual fue llevado a la presión de colapso que fue el doble de la presión de prueba.
2. La complejidad de estructuras, como las de derivaciones del distribuidor, hace necesario utilizar valores obtenidos de ensayos extensométricos sobre el modelo a escala, ya que el cálculo teórico puro no es suficiente.
3. El fenómeno de resonancia que se estudia en el presente trabajo, nunca antes se había presentado, a nivel mundial, en turbinas Pelton, siendo en consecuencia un caso único en su género. Como se comprenderá, era sumamente difícil aunque no imposible, poder predecir este fenómeno.

(\*) Ver apéndice N° 5

4. En este caso particular, se trata de una turbina Pelton límite, es decir, que se ha invadido el campo de aplicación de las turbinas Francis y es conocido que en este tipo de turbinas se han presentado numerosas experiencias de este tipo, por lo que el estudio de las causas y soluciones se orientaron en este sentido, donde había una experiencia previa.

5. La solución podría haber sido modificando uno de los siguientes parámetros principales de la instalación a saber:

Geometría y dimensiones de la estructura.

Velocidad de flujo.

Frecuencias propias de la estructura.

Sistema de amortiguamiento de la estructura.

Por las características de la instalación y exigencias de funcionamiento (rendimiento, potencia caudal, etc.), solo era posible actuar en el sentido de modificar las frecuencias propias de la estructura relativamente con pequeños cambios de geometría.

6. La modificación efectuada garantiza razonablemente, a juzgar por los resultados de las mediciones de la frecuencia propia y el nuevo período de funcionamiento, que no se producirá resonancia al

régimen nominal de funcionamiento, es decir, 32 m<sup>3</sup>/seg y 72 MW. Sin embargo, podría ocurrir que la estructura entre en resonancia con alguna frecuencia propia secundaria a cargas parciales de funcionamiento, por lo que, es necesario seguir observando las estructuras durante un período relativamente largo.

7. Los análisis realizados llevan a la conclusión de que el distribuidor de esta turbina, se aleja notablemente de aquellas de anterior construcción, en el sentido de la alta relación diámetro/espesor de las tuberías que conforman el distribuidor, más del doble de las construidas anteriormente, lo que ha llevado a la estructura al área de peligro de los esfuerzos de fatiga por resonancia, típico de las turbinas de baja caída.
8. Como consecuencia del punto anterior, se puede deducir que en este caso particular, el material de mejores características mecánicas, no ha sido la mejor solución. Puesto que, de haberse utilizado un acero de menores propiedades mecánicas, hubiera requerido adoptar espesores mayores con la consecuente disminución diámetro/espesor y por ende un alejamiento del área de peligro de resonancia.

9. Aunque ciertamente se trató de una penosa experiencia tanto para el fabricante como para el cliente, desde el punto de vista contractual (quedó en tela de juicio la bondad del diseño estructural), fue muy provechosa, en el sentido que se logró para ambas partes un conocimiento más profundo del funcionamiento de las turbinas y a la predicción y solución de fenómenos de esta naturaleza en turbinas Pelton.
  
10. Los cambios introducidos en la geometría y estructura de la turbina, no afectaron los valores esperados de rendimiento y potencia.

## BIBLIOGRAFIA

## BIBLIOGRAFIA

1. ZOPPETI, J. GAUDENCIO. "Centrales Hidroeléctricas". Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1979.
2. QUANTZ, L. "Motores Hidráulicos". Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 4ta. Edición.
3. MARKS LIONEL, BAUMEISTER, T. "Manual del Ingeniero Mecánico de Marks, UTEHA, 1978.
4. TIMOSHENKO, S., WOINOWSKI, K. "Theory of plates and shells", Mc Graw Hill, 2da. Edición, 1959.
5. RUUD, F.O. "Stress Analysis of Wye Branches", Unites States Departament of Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1964.
6. SHIGOTA, J.S., GOYAL, M.R. "The Design of Penstock Wyes for the Basi Hydro Station", Water Power and Dam Construction, Junio 1977, p.p.41.
7. TIMOSHENKO, S. "Strength of Materials", Von Nostrand, 3ra. Edición, 1955.

- CIBECCHINI, SOMIGLI, DUSI. "Investigaciones sobre Bifurcaciones de tuberías forzadas y sobre elección de los materiales", Associazione Italiana, Roma, 1979.
9. SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE. "Vibration of Structures dans un Ecoulement sous l'effet du détachement Turbillonnaire de Sillage", Paris, 1981.
10. TIMOSHENKO, YOUNG, WEAVER. "Vibration Problems in Engineering", Wiley, 4ta. Edición, New York, 1974.
11. GORMAN, D.J. "Free Vibration Analysis of Rectangular Plates", Elsevier, New York, 1982.
12. PATTON KIRK, T. "Tables of Hydrodynamic Mass Factors for Translational Motion", ASME Paper N° 65, WA/UNT 2, 1965.
13. GREIN, H. STACHLE, M. "Fatigue Cracking in Stay Vanes of large Francis Turbines", Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, Colorado, State University, Junio 1978.