

# **PROYECTO CANUTILLAR**

**DEFINICION DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS  
DE DISEÑO Y DE LAS  
CARACTERISTICAS DE GENERACION**



## INDICE

### DETERMINACION DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS DE DISEÑO Y DE LAS CARACTERISTICAS DE GENERACION DE LA CENTRAL CANUTILLAR

	Página
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCION	4
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
4. DETERMINACION DEL VALOR DE $Z_{P_{m\acute{a}x}}$	8
4.1 Cálculo Beneficios Brutos Actualizados	10
4.2 Cálculo Inversion Inicial	13
4.3 Gastos de Operación y Mantención	16
4.4 Valor de $Z_{P_{m\acute{a}x}}$ Optimo	16
5. TAMAÑO OPTIMO DE LAS OBRAS DE CONDUCCION	18
6. DETERMINACION DE $H_{P_{m\acute{a}x}}$ , $Q_{m\acute{a}x}$ Y DE LA POTENCIA INSTALADA	28
7. CARACTERISTICAS DE GENERACION DE LA CENTRAL	34
8. CONCLUSIONES	38

## A N E X O

### CALCULO DE PERDIDAS DE CARGA

1. SITUACION CON DOS MAQUINAS FUNCIONANDO	1
2. SITUACION CON UNA MAQUINA FUNCIONANDO	4

## CENTRAL CANUTILLAR

### DEFINICION DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS DE DISEÑO Y DE LAS CARACTERISTICAS DE GENERACION

#### 1. RESUMEN

En el informe denominado Determinación de la Potencia a Instalar en la Central Canutillar (en adelante informe de la Potencia) se concluye, después de calcular los beneficios netos actualizados asociados a distintas capacidades de la central, que el tamaño óptimo se obtiene para una potencia de 130 MW. Con posterioridad a ese trabajo, se efectuaron diversos estudios, que se describen en el presente informe, que permiten concluir que la potencia indicada se debe entregar con un nivel bajo en el lago Chapo (cota 228 m). Los estudios de simulación demuestran que la frecuencia con que se alcanza este nivel es tan pequeña, que la capacidad de 130 MW corresponde a la potencia firme de la central. Para niveles del lago Chapo superiores a la cota 228 m no resulta económico limitar la potencia entregada por la central al valor antes indicado. En consecuencia, con el nivel máximo normal en el lago (cota 243 m) y con los álabes de las turbinas plenamente abiertos, será posible entregar una potencia máxima, medida en los bornes de alta tensión de los transformadores de la central, de 143,8 MW.

Los estudios realizados permitieron definir los principales parámetros de diseño de las obras y equipos del proyecto. Ellos son los siguientes:

Potencia instalada	:	143,8 MW
Potencia firme	:	130,0 MW

2.

$Z_{Pm\acute{a}x}$	:	Nivel necesario en el lago Chapo para poder entregar la potencia instalada = 243 m. Esta cota coincide con el nivel máximo normal de operaci3n del embalse.
$H_{Pm\acute{a}x}$	:	Altura neta de caida = 213,51 m, calculada con el nivel $Z_{Pm\acute{a}x}$ y el caudal de diseño.
$Q_{m\acute{a}x}$	:	Caudal máximo o de diseño = 76,46 m <sup>3</sup> /s.
$D_{T\acute{u}nel}$	:	Diámetro túnel de aducci3n (circular) = 4,80 m.
$D_{Pique}$	:	Diámetro pique vertical, túnel horizontal y túnel blindado = 4,00 m.
$D_{Tuber\acute{f}as}$	:	Diámetro tuber\acute{f}as en presi3n = 2,80 m.
$\Delta_{m\acute{a}x}$	:	Pérdida de carga máxima = 25,89 m, asociada al caudal de diseño.

Tomando como base los parámetros indicados, se defini3 la malla de alerta 3ptima de operaci3n del embalse (lago Chapo) y se simul3 la operaci3n de la central durante un período de 41 años (abril 1941-marzo 1982). Los resultados obtenidos son:

Potencia instalada	143,8 MW
Potencia firme	130,0 MW
Energía media anual	964,0 GWh
Caudal medio generado	59,5 m <sup>3</sup> /s
Caudal medio rebasado	0,5 m <sup>3</sup> /s
Nivel medio del embalse	237,4 m
Nivel mínimo del embalse (mayo 1944)	224,9 m
Nivel medio descarga	3,6 m
Altura neta promedio	210,0 m

3.

Altura neta media ponderada respecto  
a los ingresos por valorización de la  
energía 209,5 m

En los estudios efectuados se supuso que la bocatoma de la central se ubicará en la posición que corresponde a un túnel de aducción de 7 246 m de longitud y que las obras de la zona de caída serán totalmente subterráneas.

## 2. INTRODUCCION

El objetivo del presente estudio es definir los principales parámetros de diseño y las características de producción de la central Canutillar. En los diseños de la central que se han efectuado hasta la fecha los valores de estos parámetros han sido determinados provisoriamente, por lo cual se requiere realizar un análisis más profundo sobre la materia.

Para la elaboración de presupuestos y para la valoración de la energía y potencia firme de la central se utilizaron, cuando fue posible, los antecedentes disponibles del estudio de la Potencia.

En los cálculos efectuados se consideró el nivel de precios vigente al 31 de diciembre de 1984. Teniendo en cuenta que en el informe señalado en el párrafo anterior los resultados obtenidos no varían significativamente al trabajar con valores de mercado o sociales o con distintas tasas de actualización, en el presente informe los análisis sólo se hicieron con precios de mercado y una tasa de interés de un 10% anual.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La potencia instalada en la central queda dada por:

$$P = K Q_{\text{máx}} H_{\text{Pmáx}}, \text{ donde}$$

$P$  = potencia instalada (kW)

$K$  = constante

$Q_{\text{máx}}$  = caudal máximo o de diseño de las obras de con  
ducción de la central (m<sup>3</sup>/s)

$H_{\text{Pmáx}}$  = altura neta de caída con la cual la turbina entrega la potencia máxima del generador, es  
tando el distribuidor de la turbina con aber  
tura máxima (m).

El valor de  $H_{\text{Pmáx}}$  queda dado por:

$$H_{\text{Pmáx}} = Z_{\text{Pmáx}} - Z_{\text{descarga}} - \Delta_{\text{máx}}$$

donde:

$Z_{\text{Pmáx}}$  = nivel mínimo requerido en el embalse pa  
ra dar la potencia instalada.

$Z_{\text{descarga}}$  = nivel en la descarga. En este estudio se considerará este nivel como constan-  
te e igual a 3,60 m, que corresponde a la cota media del mar en la zona de des  
carga.

$\Delta_{\text{máx}}$  = pérdida de carga para  $Q_{\text{máx}}$ .

La constante  $K$  vale:

$$K = g \eta_T \eta_G \eta_{Tr} (1 - C_p), \text{ donde:}$$

6.

- $g$  = aceleración de gravedad =  $9,806 \text{ m/s}^2$
- $\eta_T$  = rendimiento de la turbina a plena carga, con el nivel  $Z_{P_{\text{máx}}}$  en el embalse. En esta etapa del informe se adoptará un valor de 89%, que corresponde al rendimiento normal de una turbina Francis a plena carga.
- $\eta_G$  = rendimiento del generador a plena potencia. Se adoptó el valor 98,5%.
- $\eta_{Tr}$  = rendimiento del transformador a plena potencia. Se adoptó el valor 99,5%.
- $C_p$  = coeficiente que representa la fracción del consumo propio de la central. Se adoptó un valor de 0,5% = 0,005.

Con estos valores se obtiene  $K = 8,51$ , que se aproximó a 8,5.

El problema a resolver es el de determinar el  $H_{P_{\text{máx}}}$  óptimo o, lo que es lo mismo, de definir el nivel  $Z_{P_{\text{máx}}}$  y el caudal  $Q_{\text{máx}}$ . Este último parámetro es de gran importancia en el diseño de la central, pues las dimensiones de las obras de captación (bocatoma), conducción (túnel, chimenea de equilibrio de aguas arriba, túnel blindado y tuberías) y evacuación (túnel y chimenea de equilibrio de aguas abajo) están ligadas a este valor. El problema indicado es complejo, pues para optimizar el valor de  $H_{P_{\text{máx}}}$  se debe efectuar un estudio económico que permita calcular el beneficio neto actualizado asociado a cada valor de esa variable. La altura neta  $H_{P_{\text{máx}}}$  óptima será aquella que maximice el valor de los beneficios netos actualizados. Por otra parte, para cada valor  $H_{P_{\text{máx}}}$  hay un valor de  $Q_{\text{máx}}$  y una determinada dimensión económica de las obras de la central. A su vez, las pérdidas de carga máximas y por ende el valor de  $H_{P_{\text{máx}}}$ , dependen de  $Q_{\text{máx}}$  y de las dimensiones de las obras de la central.



Se observa que las variables en juego son muchas como para estudiarlas todas simultáneamente. Por tal motivo, en primer lugar se calculó el valor de  $Z_{P_{m\acute{a}x}}$  óptimo, suponiendo que la potencia instalada es de 130 000 kW. Esta capacidad se definió en el informe de la Potencia. Más adelante se demuestra que esta potencia conviene darla para niveles bajos en el lago y que para niveles superiores no vale la pena limitar la potencia generable, de lo cual resulta que la capacidad instalada de la central será mayor que 130 MW. Posteriormente, conocida la variable  $Z_{P_{m\acute{a}x}}$  se calcularon las dimensiones económicas de las obras y los valores de  $H_{P_{m\acute{a}x}}$  y  $Q_{m\acute{a}x}$ . Por estar estos tres últimos parámetros interrelacionados entre sí, su determinación final se hizo por tanteos.

Habiendo definido todas las variables antes mencionadas, se calculó la malla de alerta óptima de operación del embalse lago Chapo y se simuló la operación de la central para determinar sus características de operación y generación.

#### 4. DETERMINACION DEL VALOR DE $Z_{P_{m\acute{a}x}}$

Para definir el valor de  $Z_{P_{m\acute{a}x}}$  se debe efectuar un estudio económico, en el que se comparen los mayores beneficios por energía y potencia que se obtienen al disminuir el valor de  $Z_{P_{m\acute{a}x}}$  con el incremento del costo de la central debido al aumento del caudal  $Q_{m\acute{a}x}$ , necesario para mantener una misma potencia instalada.

Considerando que el nivel del lago Chapo podrá fluctuar normalmente entre las cotas 243,0 y 220,0 m, se estudiaron los siguientes valores de  $Z_{P_{m\acute{a}x}}$ : 238,3m; 233,3 m; 228,3 m y 223,3 m (como se verá más adelante, corresponden a alturas netas máximas de 210, 205, 200 y 195 m).

Para calcular los caudales  $Q_{m\acute{a}x}$  y las pérdidas de carga máximas asociadas a estos niveles, se deben conocer las dimensiones de las obras hidráulicas de la central, que dependen de los caudales  $Q_{m\acute{a}x}$ . Al respecto se contaba con los antecedentes contenidos en el Informe de Avance de julio de 1984, en el que se diseñó la central para un caudal  $Q_{m\acute{a}x} = 65 \text{ m}^3/\text{s}$  y un diámetro de túnel de 4,50 m ( $V_{m\acute{a}x} = 4,09 \text{ m/s}$ ). Suponiendo que para otros caudales  $Q_{m\acute{a}x}$  el diámetro del túnel, túnel blindado y tuberías varía de acuerdo a las curvas dadas para distintas calidades de roca en la publicación Dimensiones Económicas de Obras de Aducción con Flujo a Sección Llena de Centrales Hidroeléctricas, es posible definir el diámetro de las obras indicadas para distintos caudales máximos y luego calcular la pérdida de carga de las conducciones de la central para caudales de 60, 70 y 80  $\text{m}^3/\text{s}$ . Estas pérdidas resultaron ser de  $24,65 \text{ m} \pm 0,10 \text{ m}$ , por lo que se consideró un valor constante de 24,70 m para cualquier caudal en el rango analizado. El hecho de que estas pérdidas sean aproximadamente constantes para distintos caudales se explica pues en el caso de la central Canutillar ellas son básicamente friccionales y si por una parte la velocidad económica de las conducciones aumenta con el caudal, por otra el

diámetro y por ende el radio hidráulico también lo hace, compensándose ambos efectos.

Luego,

$$H_{Pm\acute{a}x} = Z_{Pm\acute{a}x} - Z_{descarga} - \Delta_{m\acute{a}x}$$

$$H_{Pm\acute{a}x} = Z_{Pm\acute{a}x} - 3,6 - 24,7 = Z_{Pm\acute{a}x} - 28,3 \text{ m}$$

Por otra parte, como

$$P = K H_{Pm\acute{a}x} Q_{m\acute{a}x}, \text{ y}$$

$$P = 130\ 000 \text{ kW (valor definido en informe de la Potencia).}$$

$$K = 8,5, \text{ se obtiene}$$

$$Q_{m\acute{a}x} = 15\ 294,1/H_{Pm\acute{a}x}, \text{ de donde se tiene para los distintos } Z_{Pm\acute{a}x} \text{ analizados:}$$

$Z_{Pm\acute{a}x}$ (m)	$H_{Pm\acute{a}x}$ (m)	$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)
238,3	210,0	72,83
233,3	205,0	74,61
228,3	200,0	76,47
223,3	195,0	78,43

Es decir, se tienen cuatro variantes que con distintos pares de valores QH entregan una potencia de 130 MW. Para determinar cuál es la combinación óptima, se debe calcular el valor actualizado de los beneficios netos (VABN) asociado a cada par de valores. La combinación

de valores QH que permita maximizar el VABN será la solución óptima. El VABN queda dado por:

VABN = BBA - I - O, donde,  
VABN = valor actualizado de los beneficios netos.  
BBA = beneficios brutos actualizados.  
I = inversión inicial.  
O = gastos de operación y mantención de la central, actualizados.

#### 4.1 Cálculo Beneficios Brutos Actualizados

Para calcular los beneficios brutos actualizados de las variantes analizadas, fue necesario calcular la energía generada y la potencia firme de cada una de ellas, las que se valorizaron con los costos marginales de mercado para la energía y la potencia del Sistema Interconectado, indicados en el informe de la Potencia.

Antes de calcular la energía y potencia de las variantes se determinó la malla de alerta óptima para cada caso, lo cual se hizo con la ayuda del programa computacional denominado Determinación de la Malla de Alerta Óptima para la Explotación de una Central Hidroeléctrica de Embalse. A continuación se simuló la operación de la central mediante el programa computacional Operación Simulada de Centrales Hidroeléctricas. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro N° 1: Se observa que en la medida que  $H_{p_{máx}}$  disminuye, la energía producida por la central aumenta. Ello se debe a que al incrementar el caudal de diseño aumenta el diámetro de las obras de conducción y por ende las pérdidas de carga en promedio disminuyen, pues el caudal medio que se extrae desde el lago es prácticamente una constante.

Para calcular los beneficios brutos asociados a la pro

CUADRO N° 1

POTENCIA FIRME Y ENERGIAS MENSUALES  
DE LAS VARIANTES ANALIZADAS

$H_{P_{m\acute{a}x}}$ (m)	210,0	205,0	200,0	195,0
$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	72,8	74,6	76,5	78,4
Potencia firme (MW)	121,9	125,1	130,0	130,0
Energías mensuales (GWh):				
A	93,5	95,5	96,1	96,3
M	96,9	98,9	99,4	99,6
J	93,0	94,4	94,9	95,1
J	97,7	99,0	99,4	99,5
A	97,1	98,1	98,3	98,8
S	91,1	91,7	92,2	92,5
O	78,2	75,0	78,5	81,6
N	21,8	22,6	24,6	28,5
D	25,4	26,1	26,8	25,3
E	84,5	82,3	82,6	85,6
F	89,2	89,7	90,0	90,2
M	96,2	97,4	97,9	98,2
Energía media mensual	80,4	80,9	81,7	82,6

ducción de la central se utilizaron los siguientes costos marginales de mercado de la energía y la potencia firme, puestos en Canutillar (nivel de precios 31.12.84), que se muestran en el Cuadro N° 2.

CUADRO N° 2

COSTOS MARGINALES EN CANUTILLAR

ENERGIA (US\$/MWh)

A	42,86
M	36,69
J	31,14
J	31,17
A	31,17
S	26,03
O	21,33
N	13,98
D	13,98
E	22,66
F	34,04
M	43,59

POTENCIA FIRME

32,2 (US\$/KW/año)

Los beneficios brutos anuales que se obtuvieron con es  
tos valores son:

<u>H<sub>Pmáx</sub> (m)</u>	<u>Beneficios brutos anuales (miles US\$)</u>
210,0	34 299,5
205,0	34 664,7
200,0	35 065,0
195,0	35 301,2

Para calcular los beneficios brutos actualizados es -  
tos valores se dividieron por un factor de recuperación del capital igual  
a 0,1008591 (tasa de actualización de un 10% anual y vida útil de 50 años),  
con lo que se llegó a:

<u>H<sub>Pmáx</sub> (m)</u>	<u>Beneficios brutos actualizados (miles US\$)</u>
210,0	340 073
205,0	343 694
200,0	347 663
195,0	350 005

## 4.2 Cálculo Inversión Inicial

Los presupuestos de las variantes estudiadas se obtu-  
vieron a partir de los antecedentes recopilados para elaborar el informe  
de la Potencia. En estos presupuestos se excluyó el costo asociado a las  
captaciones Lenca-Pangal, pues éste valor es una constante que no incide  
en la determinación del VABN máximo.

Aprovechando el hecho de que para el informe antes se  
ñalado se calculó el costo de las obras y equipos para tres caudales dife

rentes, a base de esos antecedentes se determinaron curvas continuas, que permitieron deducir costos para cualquier caudal dentro del rango o del entorno en que se trabajó (65 a 83 m<sup>3</sup>/s). Así se obtuvo el costo de las siguientes partidas que dependen del caudal de diseño de la central (las obras o equipos no listados se supuso se mantienen constantes para diferentes caudales y una misma potencia):

- Obras Civiles:
  - bocatoma
  - ventana zona bocatoma
  - túnel de aducción
  - chimenea de equilibrio de aguas arriba
  - pique en presión
  - túnel en presión
  - túnel blindado
  - tuberías hormigonadas contra la roca
  - caverna de máquinas
  - túnel de acceso
  - túnel de evacuación
  - chimenea de equilibrio de aguas abajo
  - pique de compuertas
  - interconexión con el mar
  
- Equipos:
  - bocatoma (mecánicos y eléctricos)
  - blindajes
  - válvulas esféricas
  - turbinas
  - equipos mecánicos auxiliares
  - compuertas difusores
  - tecla pique compuertas

Los presupuestos de las distintas variantes se muestran en el Cuadro N° 3.



**CUADRO N° 3**

**CENTRAL CANUTILLAR**

**PRESUPUESTO A COSTO DE MERCADO**

(Nivel de precios 31.12.84 en miles US\$ equivalentes)

	H = 210,0 m; Q = 72,83 m3/s			H = 205,0 m; Q = 74,61 m3/s			H = 200,0 m; Q = 76,47 m3/s			H = 195,0 m; Q = 78,43 m3/s		
	MN	ME	TOTAL	MN	ME	TOTAL	MN	ME	TOTAL	MN	ME	TOTAL
<b>1. INGENIERIA Y ADMINISTRACION</b>												
1.1 Ingeniería y dirección de obras	15 679	2 137	17 816	15 679	2 137	17 816	15 679	2 137	17 816	15 679	2 137	17 816
1.2 Administración y gastos generales	7 972	-	7 972	8 023	-	8 023	8 074	-	8 074	8 126	-	8 126
	23 651	2 137	25 788	23 702	2 137	25 839	23 753	2 137	25 890	23 805	2 137	25 942
<b>2. COSTO DIRECTO DE CONSTRUCCION</b>												
2.1 Terrenos, derechos y servidumbres	320	-	320	320	-	320	320	-	320	320	-	320
2.2 Obras de infraestructura	9 895	657	10 552	9 895	657	10 552	9 895	657	10 552	9 895	657	10 552
2.3 Obras civiles	36 773	12 474	49 247	37 165	12 657	49 822	37 562	12 840	50 402	37 971	13 025	50 996
2.4 Equipos de operación	2 163	29 257	31 420	2 188	29 383	31 571	2 212	29 512	31 724	2 234	29 644	31 878
2.5 Gastos portuarios y fletes	1 820	-	1 820	1 829	-	1 829	1 837	-	1 837	1 846	-	1 846
2.6 Montajes	6 095	2 336	8 431	6 125	2 336	8 461	6 154	2 336	8 490	6 184	2 336	8 520
2.7 Derechos de internación	9 290	-	9 290	9 343	-	9 343	9 397	-	9 397	9 452	-	9 452
	66 356	44 724	111 080	66 865	45 033	111 898	67 377	45 345	112 722	67 902	45 662	113 564
<b>3. SIN ASIGNACION ESPECIFICA</b>												
3.1 Imprevistos	11 350	5 343	16 693	11 426	5 383	16 809	11 502	5 423	16 925	11 580	5 464	17 044
	11 350	5 343	16 693	11 426	5 383	16 809	11 502	5 423	16 925	11 580	5 464	17 044
Total (1+2+3)	101 357	52 204	153 561	101 993	52 553	154 546	102 632	52 905	155 537	103 287	53 263	156 550
<b>4. GASTOS FINANCIEROS (10% CONSTANTE)</b>												
	27 866	13 369	41 235	28 041	13 459	41 500	28 217	13 549	41 766	28 397	13 641	42 038
Total (1+2+3+4)	129 223	65 573	194 796	130 034	66 012	196 046	130 849	66 454	197 303	131 684	66 904	198 588

De acuerdo al Cuadro N° 3 la inversión inicial de las distintas variantes analizadas es:

$H_{P_{m\acute{a}x}}$ (m)	Inversión Inicial (miles US\$)
210,0	194 796
205,0	196 046
200,0	197 303
195,0	198 588

#### 4.3 Gastos de Operación y Mantenición

Los gastos anuales de operación y mantención se estimaron en un 1% de la inversión inicial. Actualizando esa cifra durante la vida útil de las obras se obtuvo:

$H_{P_{m\acute{a}x}}$ (m)	Gastos Operación y Mantenición (miles US\$)
210,0	19 314
205,0	19 438
200,0	19 562
195,0	19 690

#### 4.4 Valor de $Z_{P_{m\acute{a}x}}$ Optimo

El nivel óptimo de  $Z_{P_{m\acute{a}x}}$  es el que permite maximizar el valor actualizado de los beneficios netos (VABN). A continuación se calcula el VABN para distintos niveles  $Z_{P_{m\acute{a}x}}$ , a base de los antecedentes dados en los puntos 4.1, 4.2 y 4.3.

CALCULO VABN A COSTO MERCADO (i = 10%)

$Z_{Pm\acute{a}x}; H_{Pm\acute{a}x}$ (m)	BEN. BRUTOS ACT. (Miles US\$)	COSTO TOTAL (Miles US\$)	GASTOS O.y M. (Miles US\$)	VABN (Miles US\$)
238,3; 210,0	340 073	194 796	19 314	125 963
233,3; 205,0	343 694	196 046	19 438	128 210
228,3; 200,0	347 663	197 303	19 562	130 798
223,3; 195,0	350 005	198 588	19 690	131 727

Analizando estos resultados se observa que el óptimo (VABN máximo) se encuentra fuera del rango analizado o en su límite inferior, es decir, sería económicamente conveniente diseñar la central para un valor de  $Z_{Pm\acute{a}x}$  algo menor a la cota 223,3 m. Considerando que en los estudios de simulación realizados las cotas mínimas alcanzadas en el lago Chapo siempre están algunos metros por sobre la cota 220,0 m, se decidió dejar un pequeño volumen de reserva y definir la cota señalada como el nivel mínimo normal de operación del embalse. En consecuencia, se adoptará para  $Z_{Pm\acute{a}x}$  el valor 220,0 m. El hecho de que la cota adoptada para  $Z_{Pm\acute{a}x}$  sea la mínima posible significa que el caudal de diseño de las obras de la central será el máximo ( $Q \times H = \text{constante}$ ). Es decir, es económicamente conveniente incrementar al máximo el tamaño de las obras de la central (gran inversión inicial) para obtener mayores beneficios por energía y potencia firme.

### 5. TAMAÑO OPTIMO DE LAS OBRAS DE CONDUCCION

En el capítulo anterior se determinó que es conveniente diseñar las obras de la central para un nivel  $Z_{Pm\acute{a}x} = 220,0$  m. Ahora bien, conocido este valor queda aún por determinar el caudal máximo (o de diseño)  $Q_{m\acute{a}x}$ , la altura neta  $H_{Pm\acute{a}x}$ , la máxima pérdida de carga hidráulica  $\Lambda_{m\acute{a}x}$  y la geometría de las obras de conducción (forma y diámetro  $D$  de las secciones).

Las ecuaciones o relaciones que ligan a estas variables son:

$$P = K Q_{m\acute{a}x} H_{Pm\acute{a}x}$$

$$H_{Pm\acute{a}x} = Z_{Pm\acute{a}x} - Z_{descarga} - \Lambda_{m\acute{a}x}$$

$$\Lambda_{m\acute{a}x} = f_1 (Q_{m\acute{a}x}, D)$$

$$D = f_2 (Q_{m\acute{a}x})$$

Las dos primeras ecuaciones fueron presentadas en el capítulo 3. La relación entre las pérdidas de carga, el caudal y la geometría es de tipo hidráulico. La última ecuación en realidad representa a un conjunto de ecuaciones, que permiten relacionar el caudal máximo con los diámetros óptimos de las diferentes conducciones de la central (túnel de aducción, pique vertical -idem al diámetro del túnel horizontal y túnel blindado- y tuberías). El problema planteado debe resolverse por tanteos, pues las variables están relacionadas entre sí.

Veamos en primer término el cálculo de los diámetros económicos. El diámetro más relevante es el del túnel de aducción, pues como esta obra es de una gran longitud, la dimensión elegida influye fuer

temente en el cálculo de las pérdidas de carga y en el presupuesto de las obras de la central. Por consiguiente, es conveniente analizar detalladamente la dimensión óptima económica del túnel.

Según la publicación Dimensiones Económicas de Obras de Aducción con Flujo a Sección Llena de Centrales Hidroeléctricas, el diámetro económico de una aducción circular puede calcularse como:

$$D = \left\{ 54,90 g \eta n^2 L \left[ \frac{b_p + T_f c_p b_e}{r + m} - \left( \frac{dI_{ab}}{dP} \right)_{Q_{m\acute{a}x} = cte} \right] \frac{Q_{m\acute{a}x}^3}{\left( \frac{dI_a}{dD} \right)} \right\}^{3/19}$$

donde:

$g$  = aceleración de gravedad ( $9,806 \text{ m/s}^2$ ).

$\eta$  = eficiencia media ponderada de la transformación de la energía hidráulica en eléctrica. Suponiendo:

$\eta_T$  = 93,5% (turbina). Este valor corresponde al rendimiento promedio de la turbina, suponiendo que normalmente ésta trabajará en el entorno de la zona de máxima eficiencia.

$\eta_G$  = 98,5% (generador).

$\eta_{Tr}$  = 99,5% (transformador).

$C_p$  = 0,5% (consumo propio central)

se obtuvo  $\eta = 0,912$

$n$  = coeficiente de Manning. Se consideró igual a 0,0135.

- L = longitud del túnel. Se trabajó con un valor unitario, es decir,  $L = 1$  m.
- $b_p$  = beneficio anual producido por la instalación de potencia marginal en la central (32,2 US\$/kW año).
- T = número de horas del año (8 760 horas).
- $f_{cp}$  = factor de carga de las pérdidas de energía que se originan en las obras de conducción. Este factor relaciona las pérdidas efectivas que se producen en un período T, con las máximas que se registran cuando las instalaciones operan con el caudal de diseño. De acuerdo a las recomendaciones dadas en la publicación antes citada se adoptó  $f_{cp} = 0,46$  ( $Q_{med}/Q_{máx} = 0,758$  y  $\Sigma_o = 0$ ).
- $b_e$  = beneficio por unidad de energía marginal entregada por la central (0,030998 US\$/kWh). Este valor se calculó dividiendo los beneficios anuales asociados a la energía por la generación media anual de la central, de acuerdo a los antecedentes que se entregan en el capítulo 7.
- r = factor de recuperación del capital (0,1008591).
- m = gastos anuales de operación y mantención, expresados como porcentaje de la inversión (0,01).
- $\left(\frac{dI_{ab}}{dP}\right)_{Q_{máx}=cte}$  = costo marginal de la potencia que debe instalarse aguas abajo del término de la aducción para aprovechar la disminución de la pérdida de carga a caudal máximo si se aumenta el diámetro del túnel. Este término se evalúa más adelante.

$\left(\frac{dI_a}{dD}\right)$  = Costo marginal del túnel de aducción (incluyendo el costo de la bocatoma profunda) para una variación del diámetro. Este término se evalúa a continuación.

Para evaluar el término  $(dI_a/dD)$  se dispone de los costos directos de construcción de la bocatoma profunda, de la ventana en la zona de bocatoma y del túnel de aducción, para diámetros de 4,50, 4,70 y 4,90 m. Después de sumarle a estos costos un imprevisto de un 15% y los gastos financieros (MN : 29,53% y ME : 28,96%) se obtuvieron los siguientes resultados:

<u>Diámetro (m)</u>	<u>Costo total (miles US\$)</u>	<u>Costo total/ml (US\$)</u>
4,50	42 380	5 849
4,70	46 032	6 353
4,90	49 933	6 891

Ajustando una parábola cuadrática a estos últimos valores, se llegó a:

$$I_a = 430,9125 D^2 - 1 444,49 D + 3 622,94, \text{ de donde, derivando}$$

$$\left(\frac{dI_a}{dD}\right) = 861,825 D - 1 444,49$$

Para evaluar el término  $(dI_{ab}/dP)_{Q_{\text{máx}}=\text{cte}}$  se siguieron las pautas dadas en la publicación antes citada en este mismo capítulo. De acuerdo a esas recomendaciones, para una central con una caída entre 100 y 200 m la distribución del costo marginal entre las distintas obras que lo originan es aproximadamente la que se indica a continuación:

<u>Obra</u>	<u>Porcentaje del costo marginal (%)</u>
a) Chimenea de equilibrio	12
b) Tuberías de presión	-
c) Caverna de máquinas	-
d) Obras de evacuación	-
e) Equipo de generación	40
f) Equipo de control, protección y medida	12
g) Instalaciones y equipo auxiliar	7
h) Patio elevador	29
i) Línea de transmisión	-
	<hr/>
T O T A L	100

Para evaluar el costo marginal de los ítem e, f y g se usaron los antecedentes expuestos en la publicación Relaciones para Estimar Costos Preliminares de Proyectos Hidroeléctricos y se supuso que las obras de la zona de caída corresponden a las de la solución subterránea. Los costos marginales que se obtuvieron son los siguientes (para los equipos importados se da el costo CIF y para los equipos nacionales se da el costo puesto en fábrica):

<u>Equipo</u>	<u>Costo Marginal (US\$/kW)</u>	
	MN	ME
Turbinas (2)	-	17,888
Generadores (2)	-	22,861
Transformadores (2)	-	3,787
Eq. mecánico auxiliar	0,463	4,669
Eq. eléctrico auxiliar	3,462	15,938
	<hr/>	<hr/>
T O T A L	3,925	65,143



A estos valores se le agregaron los gastos portuarios y fletes, derechos de internación, costos de montaje, imprevistos y gastos financieros, obteniéndose finalmente:

Costo marginal equipos mecánicos y eléctricos (US\$/kW):

MN	49,150
ME	85,033
	<hr/>
T O T A L	134,183

En el caso particular de la central Canutillar el costo marginal del patio elevador (ítem h) respecto a la potencia es nulo, debido a que los equipos primarios son los mismos para potencias de hasta unos 160 MW, ya que la corriente nominal mínima para la cual se fabrican es mucho mayor de la que tiene la central.

Si el costo del ítem h es cero, debe corregirse la distribución porcentual antes indicada de los costos marginales. De esta forma el porcentaje de la chimenea de equilibrio pasa a ser un 16,9% del total y un 20,3% del valor de los equipos, con lo cual se llegó finalmente a:

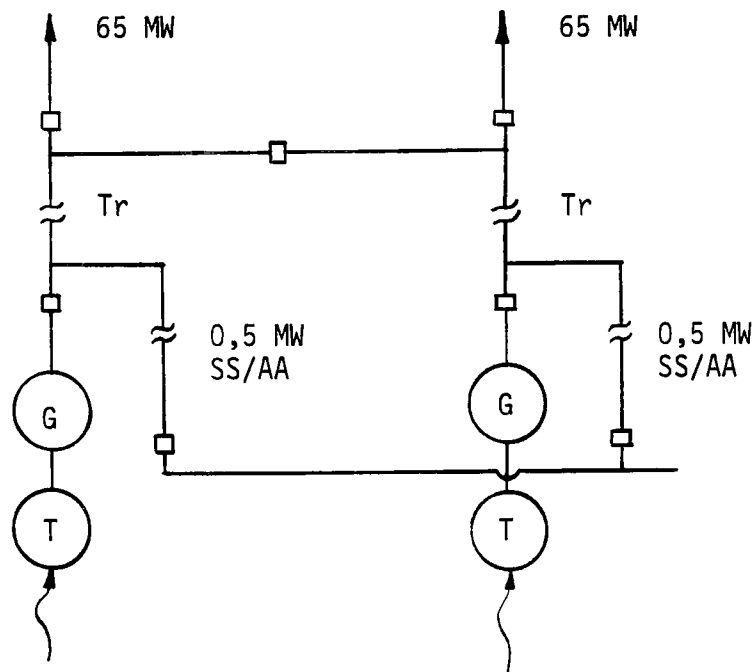
$$\left(\frac{dI_{ab}}{dP}\right)_{Q_{\text{máx}}} = \text{cte} = 161,474 \text{ US\$/kW}$$

Reemplazando este valor y el del término  $(dI_a/dD)$  en la expresión que permite calcular el diámetro económico del túnel de aducción, se obtuvo:

$$D = \frac{0,1303773 Q_{\text{máx}}^3}{D - 1,6760827}^{3/19}$$

Antes de definir las características de la central se revisaron los valores de los rendimientos de los equipos y de los consumos propios de la central, dados en el capítulo 3.

Se consideró el siguiente esquema:



Para las turbinas se decidió adoptar los siguientes rendimientos en función del nivel del lago Chapo (valores más bien conservadores):

<u>NIVEL LAGO CHAPO (m)</u>	<u>RENDIMIENTO TURBINA (%)</u>
220,0	91,8
228,0	92,0
243,0	92,3

Los rendimientos de los generadores y transformadores no se alteraron respecto a los ya definidos en el capítulo 3, es decir:

$$\eta_G = 0,985$$

$$\eta_{Tr} = 0,995$$

Para los servicios auxiliares de la central se consideró un consumo de 0,5 MW por unidad, es decir:

$$C_p = 1 \text{ MW}$$

Después de diversos tanteos se determinó que el diámetro económico del túnel de aducción es de 4,80 m. Con ese valor se obtuvo:

- Pérdidas de carga:

$$\Delta h = 4,4283 \times 10^{-3} Q^2 \quad (\text{dos máquinas operando})$$

$$\Delta h = 5,1634 \times 10^{-3} Q^2 \quad (\text{una máquina operando})$$

En anexo incluido al final del presente informe se justifican estas relaciones.

-  $Z_{Pm\acute{a}x} = 220,00 \text{ m}$

-  $H_{Pm\acute{a}x} = 189,15 \text{ m}$

-  $\Delta h_{m\acute{a}x} = 27,29 \text{ m}$

-  $Q_{m\acute{a}x} = 78,50 \text{ m}^3/\text{s}$

Introduciendo el valor de  $Q_{m\acute{a}x}$  en la relación que permite calcular el diámetro económico se obtiene  $D = 4,787 \text{ m}$ , que confirma

el valor adoptado,  $D = 4,80$  m. Por lo demás, los valores asignados a las variables  $b_e$  y  $f_{cp}$ , que intervienen en la fórmula del diámetro económico, son los correspondientes a los deducidos con  $D = 4,80$  m. De acuerdo al ábaco para la determinación del diámetro económico de túneles en presión, que se presenta en la publicación citada anteriormente, el punto  $D = 4,80$  m,  $Q = 78,50$  m<sup>3</sup>/s cae en una zona intermedia entre las curvas dadas para túneles de aducción excavados en roca poco alterada y roca sana.

El análisis efectuado para el túnel de aducción también se puede considerar como válido para el túnel en presión de la evacuación, por lo cual se adoptó para esa obra un diámetro de 4,80 m.

Como el diámetro del pique vertical de la aducción (que es igual al del túnel en presión y al del túnel blindado) y el diámetro de las tuberías es poco relevante frente al diámetro del túnel de aducción, se aceptó determinar esas dimensiones utilizando los ábacos dados en la publicación referente a diámetros económicos. Entrando al gráfico denominado Abaco para Determinar el Diámetro Económico de Aducciones Blindadas con Revestimiento Interior de Acero, Excavación en Roca Poco Alterada, con  $H = 280$  m c.a. (presión máxima en la tubería considerando golpe de ariete) y  $Q = 78,50/2$  m<sup>3</sup>/s, se obtuvo  $D = 2,76$  m que se aproximó a  $D = 2,80$  m.

El diámetro del túnel en presión y túnel blindado se calculó de tal forma que la velocidad del escurrimiento sea la misma que la de las tuberías, con lo que se obtuvo  $D = 3,96$  m, que se aproximó a  $D = 4,00$  m.

Resumiendo, los resultados geométricos obtenidos son:


<u>Obra</u>	<u>Diámetro (m)</u>
- Túneles de aducción y evacuación	4,80

<u>Obra</u>	<u>Diámetro (m)</u>
- Pique vertical, túnel en presión y túnel blindado	4,00
- Tuberías hormigonadas contra la roca	2,80

Las fórmulas dadas anteriormente para el cálculo de las pérdidas de carga, con una o dos máquinas en servicio, fueron deducidas considerando los diámetros indicados.

6. DETERMINACION DE  $H_{Pm\acute{a}x}$ ,  $Q_{m\acute{a}x}$  Y DE LA POTENCIA INSTALADA

De acuerdo a lo indicado en los capítulos anteriores y al informe de la Potencia, los valores de los parámetros de diseño de la central serían los siguientes (estas cifras se modifican más adelante):

Potencia Instalada	130,00 MW
$Z_{Pm\acute{a}x}$	220,00 m
$H_{Pm\acute{a}x}$	189,15 m
 $m\acute{a}x$	27,29 m
$Q_{m\acute{a}x}$	78,50 m <sup>3</sup> /s

La adopción de estos valores como definitivos significaría que para niveles en el embalse superiores al mínimo normal de operación (cota 220,0 m) se deberá accionar el distribuidor de la turbina cerrando los álabes móviles, para limitar el paso del agua, de modo que no se sobrepase la potencia instalada. Es decir, el caudal de diseño o máximo sólo se podría extraer desde el lago Chapo cuando en él se haya alcanzado el nivel mínimo de operación.

Con los valores indicados para los parámetros de diseño de la central se simuló su operación durante un período de 41 años. Observando los resultados obtenidos, se vio que el nivel mínimo que alcanza el lago Chapo corresponde a la cota 222,70 m. Cabe entonces formularse la siguiente pregunta: ¿Es conveniente diseñar las obras de conducción y los equipos hidromecánicos para un caudal de 78,50 m<sup>3</sup>/s, que nunca circuló por la central durante el período simulado ?

Esta pregunta debe responderse por separado para las obras de conducción y para los equipos hidromecánicos. Respecto a las primarias, es razonable respetar la geometría de las obras definidas en el ca

pítulo anterior, pues la inversión inicial efectuada en construir las obras de conducción para un caudal  $Q_{m\acute{a}x}$  relativamente grande se recuperará con creces por la energía que permanentemente se gana al reducir las pérdidas de carga. Es decir, el estudio que se hizo para determinar los diámetros de las obras de conducción sigue siendo válido. Sin embargo, este análisis no cabe en el caso de los equipos hidromecánicos, pues el mayor costo que significa adquirir dos turbinas capaces de trabajar con un gran caudal no se recuperará a futuro, ya que esa capacidad permanecerá ociosa durante la vida útil de la central. Ello sólo se traduciría en que permanentemente se deberán operar las turbinas limitando el caudal, de tal forma que la potencia entregada por esos equipos no sobrepase la instalada. Es decir, de acuerdo a lo señalado, no parece razonable diseñar las turbinas para que sean capaces de dar la potencia de 130 MW (en transformadores) con la cota 220,0 m en el lago Chapo y un caudal máximo de 78,50 m<sup>3</sup>/s. Mientras más alta sea la cota del lago para la cual se dará la potencia instalada, más se reducirán los beneficios brutos calculados para la central, pero también disminuirá el caudal máximo que circulará por las obras y los equipos. Esto se traducirá en que se reducirá el costo de las turbinas, de la caverna de máquinas y de los elementos que quedan diseñados por el régimen transiente, es decir, chimeneas de equilibrio de aguas arriba y aguas abajo y momento de inercia adicional requerido en los generadores.

De acuerdo a lo indicado se deduce que es conveniente dar la potencia instalada de 130 MW con un nivel en el lago Chapo superior a la cota 220,0 m. Después de analizar diversas posibilidades se optó por fijar este nivel a la cota 228,0 m ( $Z_{Pm\acute{a}x} = 228,0$  m), correspondiente al nivel mínimo que se alcanza en el embalse durante el invierno del año 1962, que es el período que para todas las centrales del Sistema Interconectado Central de Chile se considera para determinar la potencia firme de la central. Es decir, al decidir entregar la potencia de 130 MW con el nivel 228,0 m en el lago Chapo se está fijando la potencia firme de la central

en 130 MW. Además, como durante el período simulado de 41 años sólo durante 8 meses (1,6% del tiempo) se alcanzan niveles inferiores a la cota 228,0 m, los beneficios brutos de la central prácticamente no varían respecto a los calculados, pero sí disminuye la inversión asociada a los equipos (válvulas esféricas, turbinas, compuertas de difusores, momento de inercia de los generadores) y obras civiles (chimenea de equilibrio) al reducirse el caudal máximo o de diseño.

Considerando un rendimiento de las turbinas de un 92%, se obtuvo:

Potencia	130,00 MW
Z	228,00 m
H	200,13 m
$\Delta$	24,27 m
Q	74,03 m <sup>3</sup> /s

Ahora bien, para niveles en el lago superiores a la cota 228,0 m caben dos posibilidades:

Variante 1 : Se limita el caudal en la turbina, de tal forma que no se sobrepase la potencia instalada de 130 MW.

Variante 2 : Se instala una potencia de 143,8 MW de manera tal que no sea necesario cerrar los álabes de la turbina.

En este segundo caso la energía total generada respecto a la de la Variante 1 se reduce, pues al admitirse mayores caudales la altura neta media disminuye, al igual que la energía producida. Sin embargo, dado que en el caso 2 se dispone de mayor potencia, es posible generar más energía durante los meses de mejor precio. En resumen, aun cuando la Variante 2 produce menos energía, los beneficios brutos actualizados



se incrementan en unos 3 millones de US\$. Esta cantidad paga la mayor in versión de aproximadamente 800 mil dólares que habría que efectuar en los equipos de generación, caverna de máquinas, chimeneas de equilibrio y mayor momento de inercia de los generadores. Por consiguiente, se decidió diseñar la central para que pueda operar con plena apertura de la turbina cuando el nivel del embalse alcance la cota 243,0 m. Considerando en esas condiciones un rendimiento de las turbinas de 92,3%, se obtuvo:

Potencia instalada	143,80 MW
$Z_{Pm\acute{a}x}$	243,00 m
$H_{Pm\acute{a}x}$	213,51 m
$\Delta_{m\acute{a}x}$	25,89 m
$Q_{m\acute{a}x}$	76,46 m <sup>3</sup> /s

Es decir, la potencia que se deberá instalar en la cen tral Canutillar es de 143,8 MW. Esta potencia la podrá entregar la cen - tral sólo cuando el nivel del lago Chapo sea igual o superior a la cota 243,0 m.

En el otro extremo, cuando el nivel del lago alcance su nivel mínimo normal, la potencia máxima que se podrá entregar con plena apertura de los álabes será de 122,8 MW. En estas circunstancias y su poniendo un rendimiento de las turbinas de 91,8%, resulta:

Z	220,00 m
H	192,99 m
$\Delta$	23,41 m
Q	72,70 m <sup>3</sup> /s
Potencia	122,80 MW

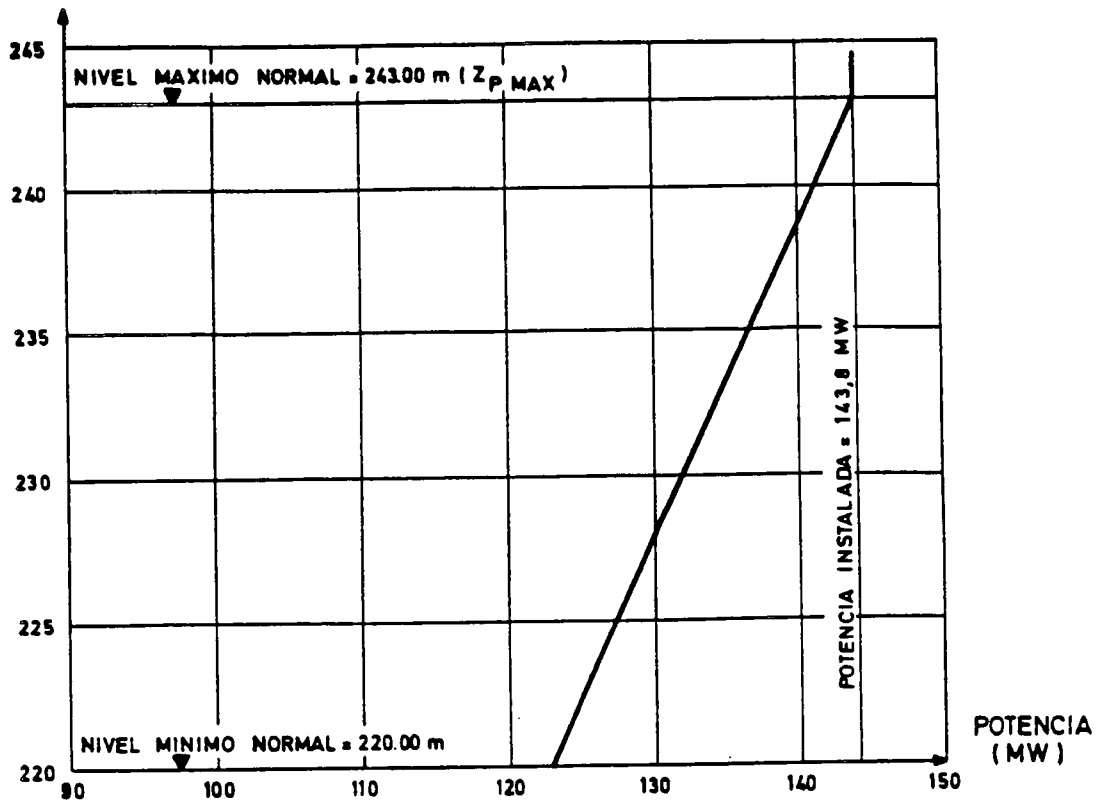
En la Figura N° 1 se ha graficado la variación de la

potencia que puede entregar la central en función del nivel de las aguas en el lago Chapo. Para niveles superiores a la cota 243,0 m (nivel máximo normal del lago) se deberá limitar la potencia permanente de la central a 143,8 MW.

En la misma Figura N° 1 se muestra también la forma en que variará el caudal máximo que pueden aprovechar las turbinas con el nivel de las aguas en el lago Chapo. Se observa que para cotas superiores a los 243,0 m es necesario cerrar los álabes de las turbinas para no exceder la potencia instalada.

VARIACION DE LA POTENCIA ENTREGADA POR LA CENTRAL EN FUNCION DEL NIVEL EN EL LAGO CHAPO

NIVEL EMBALSE (m)



VARIACION DEL CAUDAL MAXIMO ACEPTADO POR LAS TURBINAS EN FUNCION DEL NIVEL EN EL LAGO CHAPO

NIVEL EMBALSE (m)

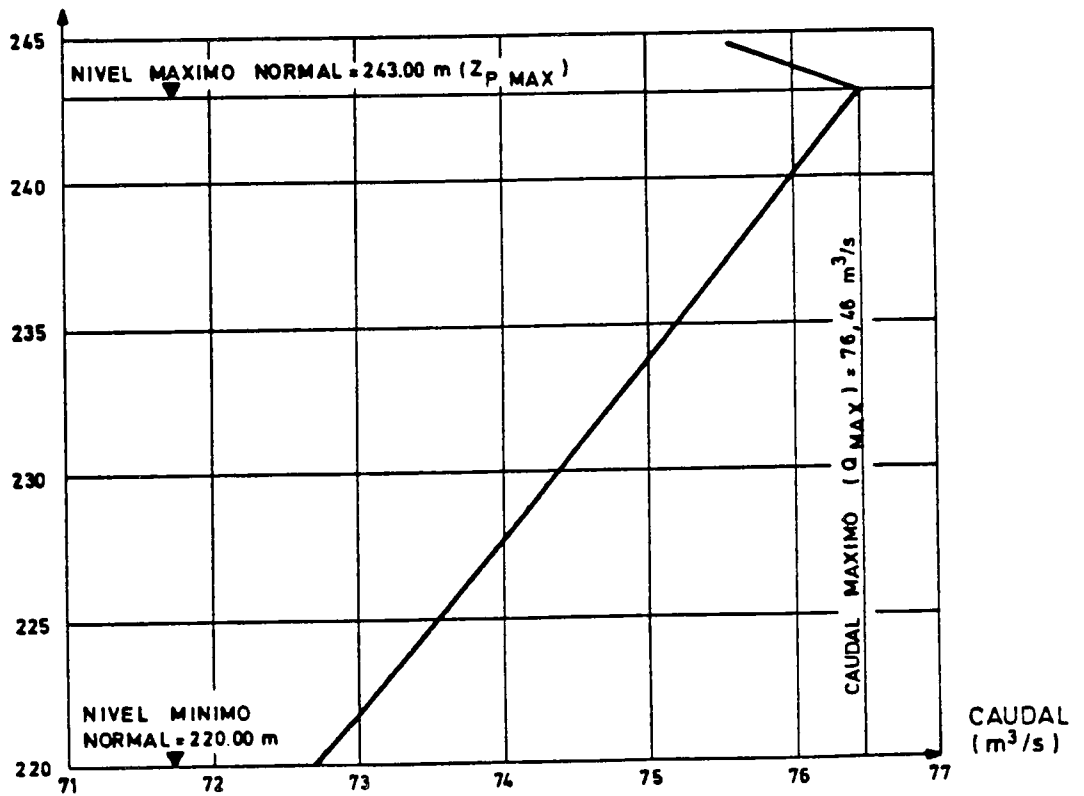


FIGURA Nº 1

7. CARACTERISTICAS DE GENERACION DE LA CENTRAL

Una vez conocidos los valores de la potencia instalada y de  $Z_{Pm\acute{a}x}$ ,  $H_{Pm\acute{a}x}$ ,  $Q_{m\acute{a}x}$  y  $\omega_{m\acute{a}x}$  se estudiaron las características de generación de la central.

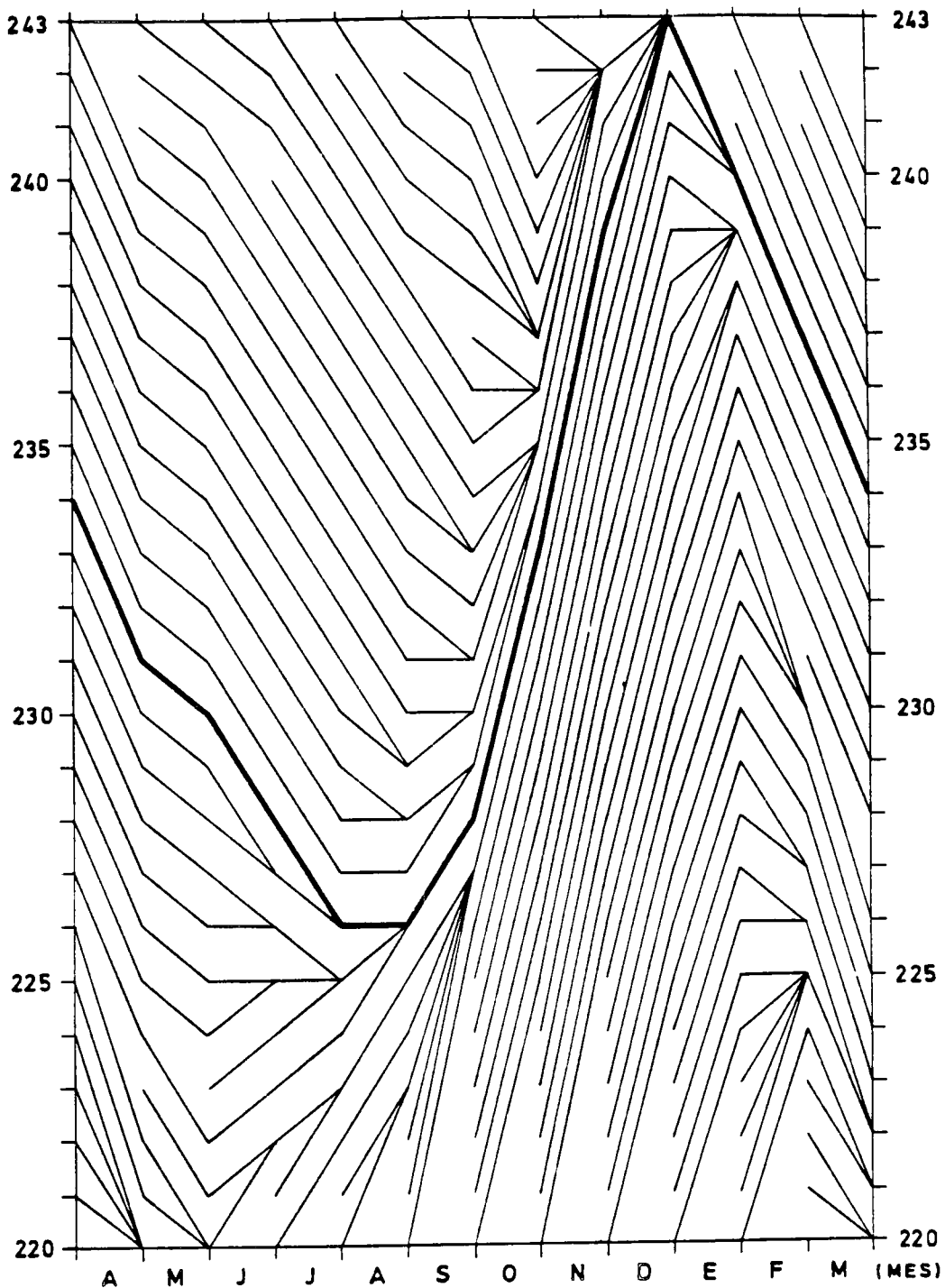
Previo a efectuar la operación simulada de la central se definió la malla de alerta del embalse, para lo cual se consideraron los precios de mercado de la potencia firme y de la energía mensual, indicados en el informe de la Potencia. Se supuso además que la potencia firme debería entregarse diariamente durante las 5 horas de punta de los meses de invierno (mayo a septiembre). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura N° 2.

Conocida la norma de operación del embalse se simuló la operación de la central Canutillar durante un período de 41 años (abril 1941-marzo 1982). Los resultados obtenidos son:

Potencia instalada	143,8 MW
Potencia firme	130,0 MW
Energía media anual	964,0 GWh
Energías medias mensuales (GWh)	
Abr	97,4
May	101,1
Jun	98,3
Jul	102,9
Ago	101,9
Sep	94,1
Oct	69,9
Nov	14,4
Dic	17,8
Ene	74,2

## MALLA DE ALERTA

COTA EMBALSE  
INICIO MES  
(m.s.n.m.)



NOTA:

LA TRAYECTORIA DESTACADA CORRESPONDE AL NIVEL DE ESTABILIZACION.

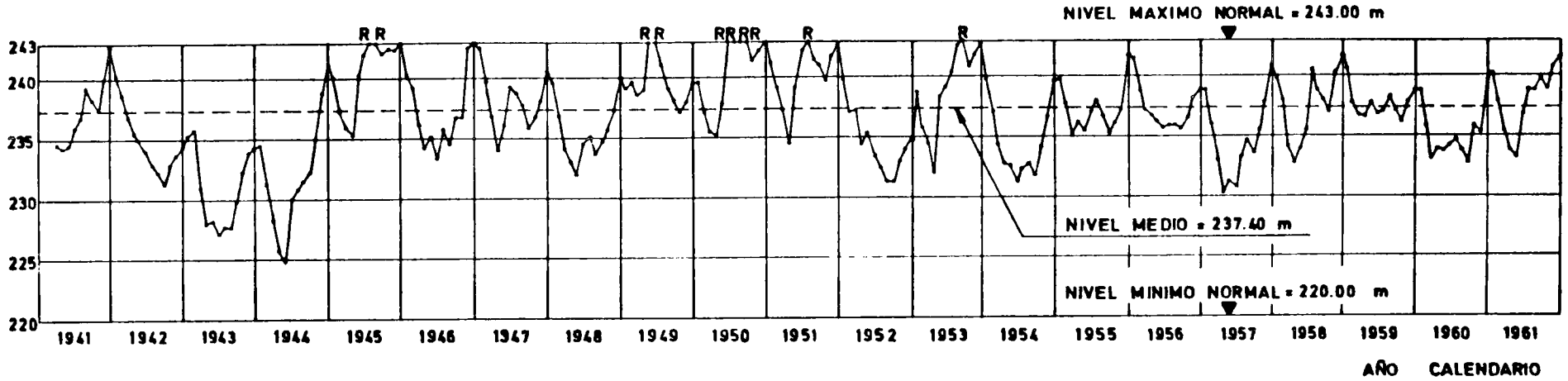
FIGURA Nº 2

Feb	92,6
Mar	99,4
Factor de planta	76,5%
Caudal medio generado	59,5 m <sup>3</sup> /s
Caudal medio rebasado	0,5 m <sup>3</sup> /s
Nivel medio del embalse	237,4 m
Nivel medio descarga	3,6 m
Altura neta media ponderada respecto a los ingresos por valorización de la energía	209,5 m

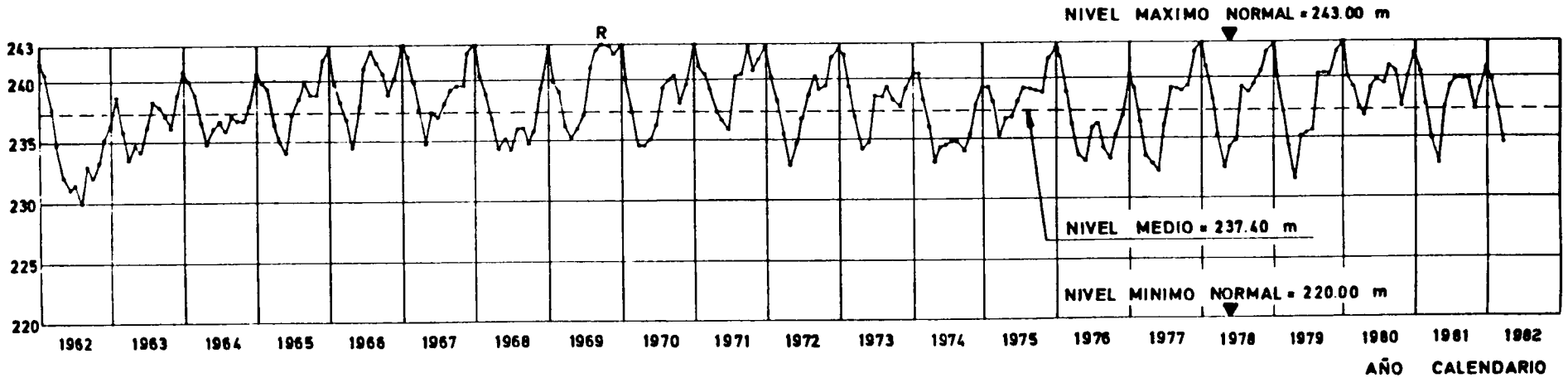
En la Figura N° 3 se ha graficado la variación mensual del nivel del lago Chapo. Se observa que durante el período simulado el nivel mínimo del lago se alcanza en mayo del año 1944 y corresponde a la cota 224,9 m. También puede verse que durante 20 meses se alcanza el nivel máximo normal del lago y que en 11 de estos meses se producen rebases. Los vertimientos indicados están asociados a los inviernos de los años lluviosos, en los cuales el gran caudal afluente al lago peralta el nivel de las aguas transgrediéndose así la norma de operación que normalmente indica que es conveniente deprimir el embalse hasta fines de septiembre.

Por el contrario, cuando de acuerdo a lo recomendado por la malla de alerta el nivel máximo normal se alcanza en diciembre, no se producen rebases, pues la capacidad instalada de la central es suficiente como para poder operar de pasada, extrayendo del lago un caudal igual al afluente.

COTA EMBALSE  
(m)



COTA EMBALSE  
(m)



NOTA:

LA LETRA R INDICA OCURRENCIA DE REBASES.

FIGURA Nº 3

8. CONCLUSIONES

De lo expresado en los capítulos anteriores se puede concluir lo siguiente:

- a) La potencia firme de la central Canutillar, medida en los transformadores de salida, será de 130 MW. El nivel mínimo requerido en el lago Chapo para poder entregar esta potencia es de 228 m.
- b) Para niveles en el lago Chapo superiores a la cota 228 m no es económico limitar la potencia a 130 MW. En consecuencia, en la central deberá instalarse una potencia de 143,8 MW, valor que corresponde a la potencia máxima que se puede dar con el nivel máximo normal del lago (cota 243 m) y con plena apertura de los álabes de las turbinas (supo ne un rendimiento de estos equipos de un 92,3%).
- c) El caudal máximo requerido por las turbinas para dar la potencia instalada es de 76,46 m<sup>3</sup>/s.
- d) Los diámetros económicos de las diversas obras de conducción son los siguientes:

<u>Obra</u>	<u>Diámetro (m)</u>	<u>Velocidad Máxima (m/s)</u>
- Túneles de aducción y evacuación	4,80	4,23
- Pique vertical, túnel en presión y túnel blindado	4,00	6,08
- Tuberías hormigonadas contra la roca	2,80	6,21



- e) Considerando la geometría de las obras de captación, aducción y evacuación de la central, se han deducido las siguientes expresiones para calcular las pérdidas de carga (caída subterránea):

$$\Delta h = 4,4283 \times 10^{-3} Q^2 \quad (\text{dos máquinas operando})$$

$$\Delta h = 5,1634 \times 10^{-3} Q^2 \quad (\text{una máquina operando})$$

Para el caudal de diseño, que se repartirá entre las dos unidades, la pérdida de carga es de 25,89 m.

- f) La altura neta con la cual se da la potencia máxima es de 213,51 m.
- g) La energía media anual producida por la central es de 964,0 GWh. El factor de planta que se deduce de esta cifra es de 76,5%.
- h) El nivel medio de las aguas en el lago Chapo, durante el período de 41 años en que se simuló la operación de la central, correspondió a la cota 237,4 m. El nivel mínimo en el lago se produjo en mayo de 1944 y alcanzó la cota 224,9 m. Cabe señalar que la norma de operación utilizada para operar el lago, que considera conveniente embalsar agua durante los meses de primavera, se mantuvo constante de año en año. En la realidad, durante un año de escasez hidrológica extrema en el Sistema Interconectado, es probable que sea conveniente desembalsar agua en Canutillar en el período de primavera, con lo cual se alcanzarían niveles inferiores al mínimo obtenido durante el período simulado.

## A N E X O

### CALCULO DE PERDIDAS DE CARGA

#### 1. SITUACION CON DOS MAQUINAS FUNCIONANDO

A continuación se detallan las pérdidas de carga que se producen en los conductos hidráulicos de la central Canutillar para un caudal de 76 m<sup>3</sup>/s, suponiendo que las obras de la zona de caída serán subterráneas. Posteriormente, a partir de estos antecedentes se deduce una relación general entre el caudal Q que circula por las conducciones y la pérdida de carga.

OBRA	ANTECEDENTES DE CALCULO	PERDIDAS DE CARGA (m)
1. Bocatoma Profunda	K básico (Levin, ábaco N° 17) : 1,25 $\Delta K$ entrada : 0,45 - 0,30 0,15 $\Delta K$ taza : 0,45 - 0 0,45 $\Delta K$ pique rejas : 0,35 - 0 <u>0,35</u> K total 2,20 $v^2/2g = 0,900$ m	1,979
2. Túnel Aducción	D = 4,80 m; L (sin curvas) = 7246,11 - 68,09 = 7178,02 m n Manning = 0,0135; J = 2,5210 x 10 <sup>-3</sup>	18,096
3. Curva Horizontal	$\theta = 78^\circ$ ; R = 50,00 m Internal Flow (pág. 141): K = 0,223 $\epsilon = 0,8$ mm (hormigón); $C_f = 0,01308/0,00745$ ; $v^2/2g = 0,900$ m	0,352
4. Transición	$J_m = 4,4776 \times 10^{-3}$ (promedio entre 2 y 5); L = 7,50 m	0,034

OBRA	ANTECEDENTES DE CALCULO	PERDIDAS DE CARGA (m)
5. Pique Vertical y Túnel en Presión	$D = 4,00 \text{ m}; L \text{ (sin curvas)} = 297,00 \text{ m}$ $\mathcal{E} = 0,8 \text{ mm (hormigón)}$ $f = 0,0138; J = 6,4343 \times 10^{-3}$	1,911
6. Curvas Verticales	$\theta = 90^\circ \text{ y } 81,47^\circ; D = 4,00 \text{ m}; R = 10,00 \text{ m}$ Internal Flow (pág. 141): $K = 0,154 \text{ y } 0,15$ $\mathcal{E} = 0,8 \text{ mm (hormigón);}$ $Cf = 0,0138/0,0073; v^2/2g = 1,865 \text{ m}$	1,037
7. Túnel blindado	$D = 4,00 \text{ m}; L = 104,00 \text{ m}$ $\mathcal{E} = 0,05 \text{ mm (acero pintado)}$ $f = 0,00878; J = 4,0937 \times 10^{-3}$	0,426
8. Bifurcación	$\theta = 60^\circ; \text{Levin, ábaco N}^\circ 44, \text{ curva } 4:$ $K = 0,12; v^2/2g = 1,865 \text{ m}$	0,224
9. Tuberías	$D = 2,80 \text{ m}; L = 52,65 \text{ m}$ $\mathcal{E} = 0,05 \text{ mm}$ $f = 0,0092; J = 6,3809 \times 10^{-3}$	0,336
10. Curvas en Planta	$\theta = 30^\circ \text{ y } 8,53^\circ; R = 5,00 \text{ m}$ Internal Flow (pág. 141): $K = 0,063 \text{ y } 0,016$ $\mathcal{E} = 0,05 \text{ mm}; Cf = 0,0092/0,0077$ $v^2/2g = 1,942 \text{ m}$	0,183
11. Válvula Esférica	$D = 2,13 \text{ m}; \text{Internal Flow (pág. 271):}$ $K = 0,025; v^2/2g = 5,87 \text{ m}$	0,147
12. Curva Difusores	$\theta = 23,21^\circ; R = 30,00 \text{ m}; \phi 3,90 \text{ m}$ Internal Flow (pág. 146): $K = 0,074$ $\mathcal{E} = 1,0 \text{ mm}; Cf = 0,0158/0,0083;$ $Co = 0,57; v^2/2g = 0,322 \text{ m}$	0,026

OBRA	ANTECEDENTES DE CALCULO	PERDIDAS DE CARGA (m)
13. Tramo Recto Difusores	$\phi$ 3,90 m; L = 8,00 m $\epsilon$ = 1,00 mm $f$ = 0,0143; $J$ = $1,1807 \times 10^{-3}$	0,009
14. Encuentro Difusores	$\theta$ = 46,42° Internal Flow (pág. 230): $K$ = 0,02; $v^2/2g$ = 0,900 m	0,018
15. Expansión en Chimenea	Internal Flow (pág. 269): $K$ = 0,20; $v^2/2g$ = 0,322 m	0,064
16. Entrada Túnel Evacuación	Internal Flow (págs. 268-269): $K$ = 0,10; $v^2/2g$ = 0,900 m	0,090
17. Túnel Evacuación	D = 4,80 m; L = 120,00 m $J$ = $2,5210 \times 10^{-3}$ (idem túnel aducción)	0,303
18. Difusor	Internal Flow (pág. 168): $K$ = 0,39; $C_d$ = 1,04; $v^2/2g$ = 0,900 m	0,329
19. Quiebre Salida	$\theta$ = 23° Internal Flow (pág. 149): $K$ = 0,07 $C_f$ = 0,018/0,008; $C_o$ = 0,45 $v^2/2g$ = 0,199 m	0,014
TOTAL		25,578 m

Considerando que para un caudal de 76 m<sup>3</sup>/s las pérdidas de carga que se producen alcanzan a 25,578 m y suponiendo que estas pérdidas debieran ser proporcionales al cuadrado del caudal Q (m<sup>3</sup>/s), se obtiene:

$$\Delta = 4,4283 \times 10^{-3} Q^2 \text{ (m)}$$

## 2. SITUACION CON UNA MAQUINA FUNCIONANDO

A continuación se detallan las pérdidas de carga que se producen en los conductos hidráulicos de la central en el caso que sólo uno de los dos grupos turbogeneradores esté en funcionamiento, con un caudal de 38 m<sup>3</sup>/s. Posteriormente se deduce una relación entre el caudal Q y la pérdida de carga, para el caso en que sólo una unidad se encuentre en servicio.

OBRA	ANTECEDENTES DE CALCULO	PERDIDAS DE CARGA (m)
1. a 7. Desde Bocatoma Profunda hasta Túnel Blindado	Pérdidas iguales a un cuarto de las ya calculadas para 76 m <sup>3</sup> /s	5,959
8. Bifurcación	$\theta = 60^\circ$ ; Levin, ábaco N° 44, curva 4: $Q_b/Q = 1$ ; $K = 0,88$ ; $v^2/2g = 0,466$ m	0,410
9. a 13. Desde Tuberías hasta Tramo Recto Difusores	Pérdidas iguales a las ya calculadas para 76 m <sup>3</sup> /s, con dos máquinas en servicio.	0,701
14. Encuentro Difusores	$\theta = 46,42^\circ$ Internal Flow (pág. 230): $K = 0,18$ ; $v^2/2g = 0,225$ m	0,041
15. Expansión en Chimenea	Internal Flow (pág. 269): $K = 0,50$ ; $v^2/2g = 0,322$ m	0,161
16. a 19. Desde Entrada Túnel Evacuación hasta Quiebre Salida	Pérdidas iguales a un cuarto de las ya calculadas para 76 m <sup>3</sup> /s.	0,184
TOTAL		7,456 m

Suponiendo que las pérdidas de carga son proporcionales al cuadrado del caudal  $Q$  (m<sup>3</sup>/s), se obtiene:

$$\Delta h = 5,1634 \times 10^{-3} Q^2 \quad (\text{m})$$