



TUNEL  
Fotografía



TUNEL  
Fotografía

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

CENTRAL ANTUCO  
FENOMENOS DE OSCILACION EN MASA  
COMPARACION ENTRE CALCULOS Y MEDIDAS  
EN PROTOTIPO

René Neger (\*)

Resumen

El tema de la oscilación másica en centrales hidroeléctricas dotadas de una chimenea de equilibrio, ha sido ampliamente debatido en diversas publicaciones y textos especialmente en lo que a consideraciones teóricas se refiere. Sin embargo, no ocurre lo mismo cuando se trata de medidas efectuadas en prototipo, de las cuales existen muy pocas, especialmente en sistemas de túneles múltiples como los que se encuentran en la Central Antuco.

Tratándose en este caso de un sistema complejo de túneles con 2 chimeneas de equilibrio en serie y un tercer pique oscilante, se confeccionó un programa para computador que permitió el diseño de estas obras y la resolución de numerosos casos de fenómenos transitorios importantes. Con motivo de la puesta en servicio de la Central Antuco, se pudieron efectuar diversas mediciones que permitieron comprobar que el modelo matemático adoptado en este caso representaba fielmente la realidad.

\* Ingeniero Civil, División Estudios Hidráulicos de ENDESA

## 1.- Breve descripción de la Central Antuco

La central hidroeléctrica "Antuco", de 300 MW de potencia instalada, es la tercera y última integrante del Aprovechamiento hidroeléctrico del río Laja desarrollada por ENDESA. La fig. N° 1 muestra un esquema del sistema de túneles en presión de la central Antuco. El agua es captada fundamentalmente en 2 ptos; la Bocatoma Polcura en el río del mismo nombre capta aproximadamente el 75% del gasto de plena carga mientras que la bocatoma Laja capta el 25% restante. En el esquema sólo aparece la última parte de la aducción Laja, la correspondiente al túnel en presión denominado túnel Laja 2 que es el que participa en el fenómeno de oscilación en masa. El resto de la aducción Laja, constituido por una serie de canales y túneles, queda independizado del sistema en presión por el vertedero de rebalse de la rama Laja.

El túnel Polcura, con una longitud equivalente de 4887m y sección herradura deformada de  $D = 6,6m$ , se junta en el punto denominado VC1 con el túnel Laja 2 de 1523m y una sección herradura deformada de  $D = 4,0m$ . Desde allí continúa el túnel común 1 de 1034, de longitud y una sección herradura deformada de  $D = 7,10m$  hasta el punto VC4 donde se encuentra la chimenea secundaria, continuando a partir de ese punto el túnel común 2, de 6867m y la misma sección del común 1, hasta la chimenea de equilibrio principal, desde allí continúa este túnel en un pequeño tramo de 25m donde se bifurca en 2 tuberías de presión de 5m de diámetro cada una que conducen el agua finalmente hasta las 2 unidades generadoras de 150 MW cada una.

Se capta además el agua del estero Pichipolcura, la que es conducida por un túnel acueducto hasta la chimenea secundaria donde se incorpora al resto del escurrimiento. Este túnel acueducto no participa de los fenómenos de oscilación en masa ya que el rápido de descarga de esta chimenea evita que las oscilaciones ascendentes lleguen hasta él.

## 2.- Fenómenos de oscilación en masa

Se llama fenómenos de oscilación en masa a aquellos escurrimientos impermanentes lentamente variados que sobrevienen en una cierta instalación como consecuencia de la variación de apertura de algún órgano de cierre en

un conducto a presión. Estos fenómenos se resuelven con las ecuaciones clásicas de la hidráulica en que se considera incompresible al agua y rígido al conducto a presión. A diferencia de estos están los fenómenos rápidamente impermanentes en que la presión y el caudal sufren fuertes variaciones en pocos segundos, caso del Golpe de Ariete.

Cuando una central hidroeléctrica sufre una variación de carga (variación de la demanda de potencia), el regulador reacciona de manera de producir una apertura o un cierre de la turbina. En el caso de la Central Antuco, se trata de turbinas Francis, luego son los álabes móviles los elementos que producen el aumento o disminución del gasto a través de la turbina. Esta variación del gasto en la turbina produce un golpe de ariete en las tuberías cuya magnitud es función de la longitud de estas. De aquí nace la importancia de la presencia de la chimenea de equilibrio principal cual es la de aliviar el aumento de presión en las tuberías y disminuir su efecto en el resto de los túneles. Como segunda ventaja podríamos mencionar el hecho de que su presencia permite efectuar aumentos bruscos de carga, ya que ante tal requerimiento, la chimenea, que se encuentra próxima a las turbinas, reacciona entregando rápidamente la cantidad de agua que tal maniobra exige.

La figura N° 2 muestra la disposición de la chimenea de equilibrio principal de la Central Antuco. Se trata de una chimenea de tipo diferencial provista de un elevador de 6.50m de diámetro y un depósito exterior de 20,30m de diámetro. El elevador culmina en un vertedero circular a la cota 760m y está comunicado con el depósito exterior por medio de 3 orificios independientes abocinados en sus extremos y con un diámetro de 1,40m. Este tipo de solución fue la que resultó mas conveniente en este caso, desde un punto de vista técnico y económico.

La figura N° 3 muestra la disposición de la chimenea secundaria cuya función en este caso es totalmente diferente a la principal. En efecto, su presencia permite la incorporación del agua proveniente de la aducción Pichipolcura a la aducción común. La cámara inferior está dimensionada en volumen y ubicación de manera que los descensos del nivel del agua que en ella se producen alcancen valores mínimos que aseguren la no entrada de aire al túnel. Como consecuencia de la existencia de esta chimenea, la aducción Polcura

puede cruzar el estero Pichipolcura mediante un sifón-puente. La ubicación de un vertedero de rebalse a la cota 736m tiene la doble finalidad de absorber las oscilaciones positivas y la de evacuar gran parte del gasto de los túneles durante una situación transitoria, que de otra manera tendría que ser evacuada por una obra de mucho mayor envergadura ubicada a la entrada del sifón Polcura de la rama Laja.

El vertedero entrega a un rápido de descarga que en su parte terminal dispone de una cuchara de lanzamiento. El gasto máximo que evacúa esta obra durante un rechazo de carga es de  $150m^3/seg$ , caudal que es entregado al estero Pichipolcura.

En la figura N° 4 se muestra precisamente esta obra con su vertedero de rebalse dimensionado para un gasto máximo de  $50m^3/seg$ . Durante un régimen transitorio, el nivel oscila dentro del pique inclinado pudiendo alcanzar en algunas acasiones cotas superiores a la del umbral del vertedero frontal. ( 738,05m )

### 3.- Resolución teórica del problema

En lo que se refiere a la resolución teórica del problema de los impermanentes en el sistema de túneles y chimeneas de la Central Antuco, no se abundará en mayores detalles en esta ocasión ya que en un trabajo que fué presentado en el 2º Coloquio Nacional de Hidráulica, efectuado en Noviembre de 1973 en Santiago, se abordó este tema. En dicho trabajo se podrán encontrar todas las ecuaciones que resuelven el problema, su método de resolución por medio de un programa para computador, las pruebas efectuadas para chequear su funcionamiento y las conclusiones que de su aplicación se obtuvieron. Dichas conclusiones fueron básicas para el diseño de todas las obras que participan de los regímenes transitorios y fueron corroboradas por las medidas efectuadas en el prototipo durante las pruebas de puesta en servicio efectuadas durante el año 81.

### 4.- Puntos de medida e instrumentación

Durante la puesta en servicio de la Central se realizaron diversos tipos de medidas que cumplieran a su vez diversas finalidades. En primer lugar, para determinar el coeficiente de rugosidad de los túneles, que es fundamental conocer para poder efectuar una comparación entre medidas en prototipo y cálculos teóricos, se registró la presión interior en las ventanas 1, 2, 4 y 5 mediante manómetros conectados a tomas de presión dejadas en esos puntos con ese propósito. ( ver figura N° 1 ). En un arranque colocado en el sifón Polcura de la rama Laja también se instaló un manómetro para registrar las variaciones de nivel en el pique inclinado. Los manómetros habían sido todos previamente contrastados.

En la chimenea de equilibrio se registraron niveles tanto en el elevador como en el depósito exterior mediante sendos limnigrafos eléctricos debidamente calibrados. La medida se hace por medio de un flotador que corre por unas guías que se instalan previamente al llenado de los túneles. Se debe hacer presente que en algunas pruebas con potencias iniciales altas, se produce gran turbulencia en el depósito exterior en la zona de salida del chorro. En efecto, al salir el chorro de los orificios y disipar su energía en la masa líquida del depósito, la turbulencia intercedía con el buen funcionamiento del flotador y provocaba su atascamiento por lo cual hubo que aumentar considerablemente su peso para mejorar el rendimiento.

Para registrar las variaciones de nivel en la chimenea secundaria se utilizó un instrumento inscriptor Lumiscript ubicado frente al tapón de la ventana 2. Allí se habían dejado instaladas previamente tomas de presión conectadas tanto al pique inclinado de la chimenea como al túnel de aducción mismo con el objeto de medir las oscilaciones de nivel dentro de la chimenea y la presión a la entrada respectivamente.

El inscriptor Lumiscript es un instrumento electrónico que funciona en conjunto con un amplificador y que recibe la información desde un captor de presión instalado en el punto de medida que transmite las variaciones de presión transformadas en impulsos eléctricos. La precisión del instrumento es muy buena y se presta especialmente para medir variaciones bruscas

de presión tales como las que se producen durante un golpe de ariete. La cota en la bocatoma Polcura se registró mediante lecturas limnimétricas.

5.- Determinación práctica de algunos coeficientes hidráulicos

Para poder efectuar una real comparación entre las medidas en el prototipo y el cálculo teórico, el programa que resuelve este problema debe ser alimentado con ciertos parámetros básicos tales como el coeficiente de rugosidad de los túneles, coeficientes de gastos de los orificios, coeficientes de pérdida de carga en la inserción de la chimenea secundaria y con algunos otros de menor importancia tales como los coeficientes de gasto de todos los vertederos involucrados;

5.1 Coefficientes de rugosidad de los túneles

Para poder calcular en forma práctica el coeficiente de rugosidad de los túneles, se efectuaron medidas de presión en los distintos puntos mencionados anteriormente durante escurrimiento en régimen permanente. La determinación del gasto que escurría en cada prueba fué determinada indirectamente utilizando la curva  $Q/\sqrt{H}$  (obtenida a través de experiencias en el modelo de la turbina).

El resultado de las medidas efectuadas y la elaboración de resultados se puede encontrar en un trabajo presentado al 5º Congreso Nacional de Hidráulica realizado en Santiago en Octubre de 1981. Los resultados indicaron para los túneles de la central Antuco un coeficiente de rugosidad  $n=0.0132$ .

5.2 Coefficiente de pérdida de carga de los orificios de comunicación

El coeficiente de pérdida de carga de los orificios de comunicación entre el elevador y el depósito exterior de la chimenea principal incide directamente en los niveles que alcanza el agua en dichos depósitos y a su vez en la efectividad de la chimenea para frenar o acelerar la masa de agua contenida en los túneles. En el proyecto se había supuesto un coeficiente que hacía óptimo el funcionamiento. Se tomaron 3 pruebas de las numerosas realizadas por tener muy buenos registros de la variación de los niveles. En un

rechazo de 166 MW, se tomaron valores del nivel  $Z_1$  ( Elevador ) y  $Z_2$  (dep. exterior ) cada 10 seg. durante el ascenso de la primera onda. Se tabuló el valor medio del intervalo de 10 seg,  $\bar{Z}_1$  y  $\bar{Z}_2$  y su diferencia  $\bar{Z}_1 - \bar{Z}_2 = \Delta Z$ . Por otro lado se tabuló la expresión válida para el gasto a través de los orificios, la que debe ser igual al gasto entrante al depósito exterior (  $Q_2$  ) siendo:

$$\bar{Q}_2 = \frac{\Delta Z_2}{\Delta t} \bar{A}_2$$

$\bar{Q}_2$  = gasto medio del intervalo

$\bar{A}_2$  = area transversal del depósito exterior

$\Delta Z_2$  = dif. de nivel en el dep. est. para el intervalo ( Obtenido del registro )

En la figura N° 5 aparecen los puntos así obtenidos para un rechazo de 166 MW y otro de 200 MW. Si escribimos la relación en la forma:

$$Q_2 = K\sqrt{\Delta Z}$$

y se hace un ajuste independiente para ambos grupos de puntos por el método de los mínimos cuadrados resulta para el rechazo de 200 MW la curva 2 y si se calcula la curva teórica con  $K = 25$  resulta la curva 1. Ambas representan muy bien el comportamiento del orificio. Efectuando este mismo procedimiento para una toma de carga rápida de 166 MW, resultó un coeficiente  $K' = 25$ . Esto indica que el orificio proyectado se comporta de igual forma cualquiera sea el sentido del escurrimiento.

5.3 Perdida de carga en la inyección de la chimenea secundaria

Si se observa la figura N° 3, se notará que la chimenea secundaria se conecta con el túnel de aducción a través de un pique inclinado que culmina en una pantalla. Dicha pantalla, proyectada para asegurar el túnel contra la posible entrada de aire, provoca una pérdida de carga al escurrimiento que entra o sale de la chimenea secundaria. Esta pérdida incide poco en las oscilaciones de la chimenea principal, pero si incide en la magnitud del gasto de reflujos de la rama Laja, y por ende, en la capacidad de la obra de rebalse de dicha rama. Para determinar la pérdida en la inserción para un gasto en-

trante, se tomaron los registros obtenidos del instrumento Lumiscript para la presión a la entrada y el nivel dentro de la chimenea. Si llamamos  $(\Delta H)_{máx}$  a la diferencia máxima entre la presión y el nivel para una cierta maniobra y  $Q_{2máx}$  al máximo gasto que entró a la chimenea, se tiene:

$$K = \frac{(\Delta H)_{máx}}{Q_{2máx}}$$

Para conocer  $Q_{2máx}$  se midió la marca dejada por el agua al escurrir por el vertedero (H) y se utilizó la ecuación:

$$Q_v = m L \sqrt{2g} H^{3/2}$$

en que:  $m = 0.4$   
 $m L \sqrt{2g} = 15.95$

Efectuando este procedimiento en 4 pruebas con buenos registros, resultó un valor bastante uniforme de  $K = 0.0003$ . Se utilizó este procedimiento ya que el registro del nivel en la chimenea secundaria no es lo suficientemente preciso como para utilizar un método similar al empleado para los orificios de la chimenea principal. Con respecto al valor de  $K'$  para el gasto saliente, los gastos fueron tan pequeños durante las pruebas que no se pudo calcular. De acuerdo al valor obtenido para  $K$ , se estimó para  $K'$  un valor 0.0004. Estos resultados están dentro del orden de magnitud del supuesto en el proyecto.

#### 6.- Cálculo teórico de 3 casos medidos

Resulta de enorme importancia para comprobar las maniobras de diseño, verificar alguno de los casos medidos realmente en terreno tomando en cuenta los coeficientes hidráulicos determinados a partir de las medidas y todos los antecedentes geométricos definitivos. Se introdujeron todos estos antecedentes en el computador y se procesaron 3 maniobras de las numerosas pruebas efectuadas durante la puesta en servicio.

#### 6.1 Rechazo de 166 MW con interruptos ( Máx. para 1 unidad )

En un rechazo de este tipo, la unidad queda finalmente girando en vacío conectada a la red. En este caso, toda la potencia estaba generada por la unidad 1 estando la unidad 2 detenida. Otra particularidad interesante de esta prueba es que la rama Laja aún no había entrado en servicio en esa fecha y estaba aislada del resto mediante un tapón metálico. Este hecho también se tomó en cuenta en el cálculo.

En la figura N° 6 se ha dibujado para el pique interior de la chimenea principal, las oscilaciones medidas y calculadas. El valor máximo teórico fué de 749,57m contra 748,75 reales, ocurridos ambos a los 150 seg de producido el rechazo

La diferencia de 0.82m es mínima dado el monto de las oscilaciones. La oscilación del depósito no se ha incluido para no complicar la figura.

En cuanto a la chimenea secundaria, el resultado teórico para el valor máximo de 738,33m contra 737,40 del registro del Lumiscript. El registro instrumental puede tener un error de  $\pm 0.50m$  lo que hace pensar en una coincidencia bastante satisfactoria, especialmente en la forma de la curva.

#### 6.2 Toma rápido de 166 MW ( máx. para 1 unidad )

Las condiciones de las unidades generadoras y de la rama Laja eran las mismas que las descritas en el pto. 6.1. En la figura N° 7 se ve que el valor mínimo de la oscilación para el registro en terreno fué 708,23m contra 706,68m del cálculo teórico. En este caso, aunque la diferencia es de 1,55m, estimamos que dada la variedad de obras y otros antecedentes que el cálculo no puede considerar, es una buena aproximación. Para la chimenea secundaria, el mínimo se produce en la segunda oscilación y corresponde a una cota 711,29m en el cálculo teórico contra 711,90m del registro instrumental. En este caso la aproximación es francamente satisfactoria además de reproducirse perfectamente la forma de la onda.

### 6.3 Rechazo de 240 MW con Shut-down ( 120 MW c/unidad )

Esta prueba tiene la particularidad de haber sido el rechazo de carga programado más grande que ha efectuado la ENDESA hasta el momento. Ambas unidades estaban generando 120 MW c/u y la rama Laja ya había entrado en servicio para esta oportunidad aunque sin aporte de gasto durante la prueba.

El Shut-down opera de manera que las unidades se cierran totalmente con su máxima velocidad de cierre. La figura N° 8 muestra la representación de 240 seg de esta prueba. El valor máximo teórico fue de 753,69m contra 753,03m reales, ocurridos ambos alrededor de los 165 seg. La diferencia de solo 0.64m indica que la presencia de la rama Laja no le quita exactitud al modelo matemático, sino por el contrario, ratifica la aplicabilidad de este para cualquier caso que se presente.

En cuanto a la chimenea secundaria, se aprecia que las oscilaciones medidas y calculadas teóricamente se confunden en el dibujo siendo el máximo teórico de 738,79m contra 738,90m del registro instrumental. En esta prueba se obtuvo la mejor concordancia entre todos los casos estudiados.

### 7.- Conclusiones

Las pruebas efectuadas en el terreno demostraron que por muy complejo que sea un sistema de túneles en presión con diferentes chimeneas de equilibrio, las ecuaciones de la hidráulica resuelven satisfactoriamente el problema de las oscilaciones que se producen durante un régimen transitorio. La concordancia será cada vez mejor atendiendo al valor asignado a los diferentes coeficientes hidráulicos que intervienen en el fenómeno.

### Bibliografía.-

- 1.- "Análisis de los fenómenos transitorios de la Central Antuco"  
René Neger  
2º Coloquio Nacional de Hidráulica. Nov. 1973
- 2.- División de Estudios Hidráulicos "Pruebas civiles hidráulicas"  
Informe OICOH N° 314 - ENDESA, Enero 1982
- 3.- "Incidencia de los fenómenos transitorios en el proyecto de obras Hidráulicas de Centrales Hidroeléctricas"  
Horacio Mery  
Publicación de ENDESA - Junio 1978
- 4.- "Coeficientes de rugosidad en túneles revertidos con hormigón que escurren en presión"  
Lincoln Alvarado y René Neger  
5º Congreso Nacional de Ing. Hidráulica - Octubre 1981

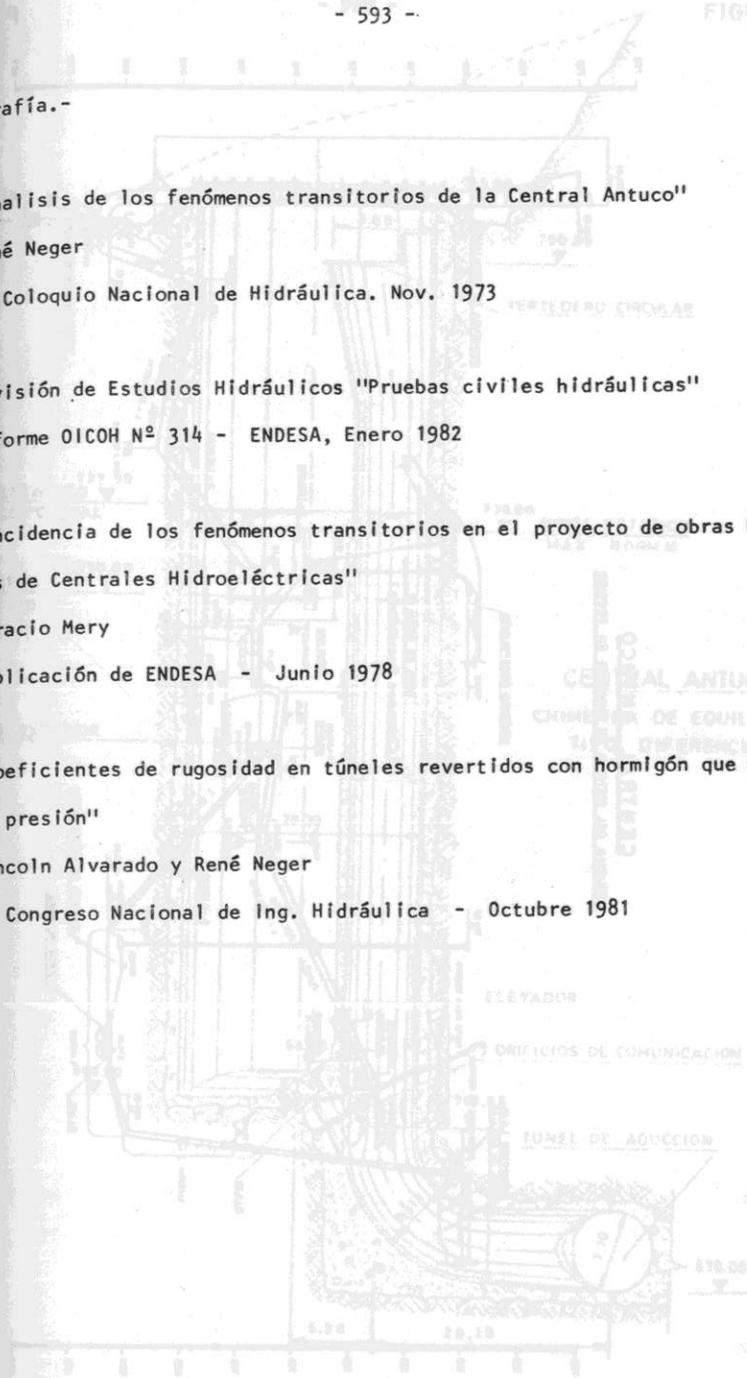


FIGURA 1

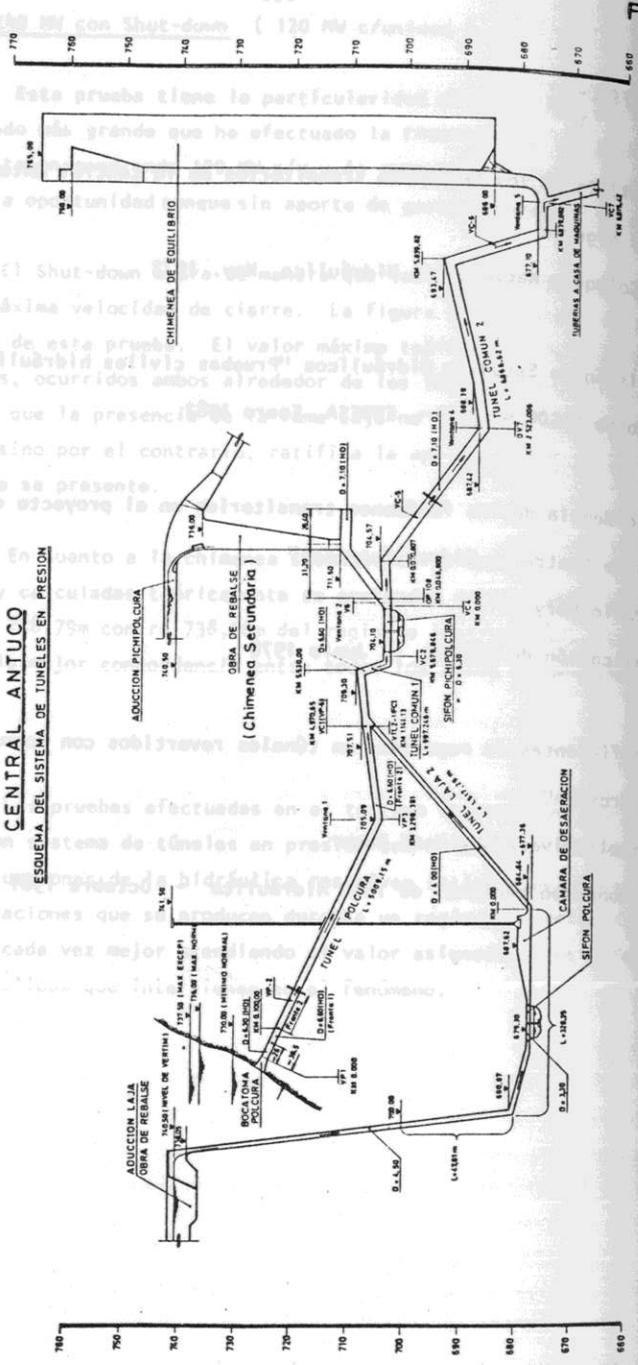
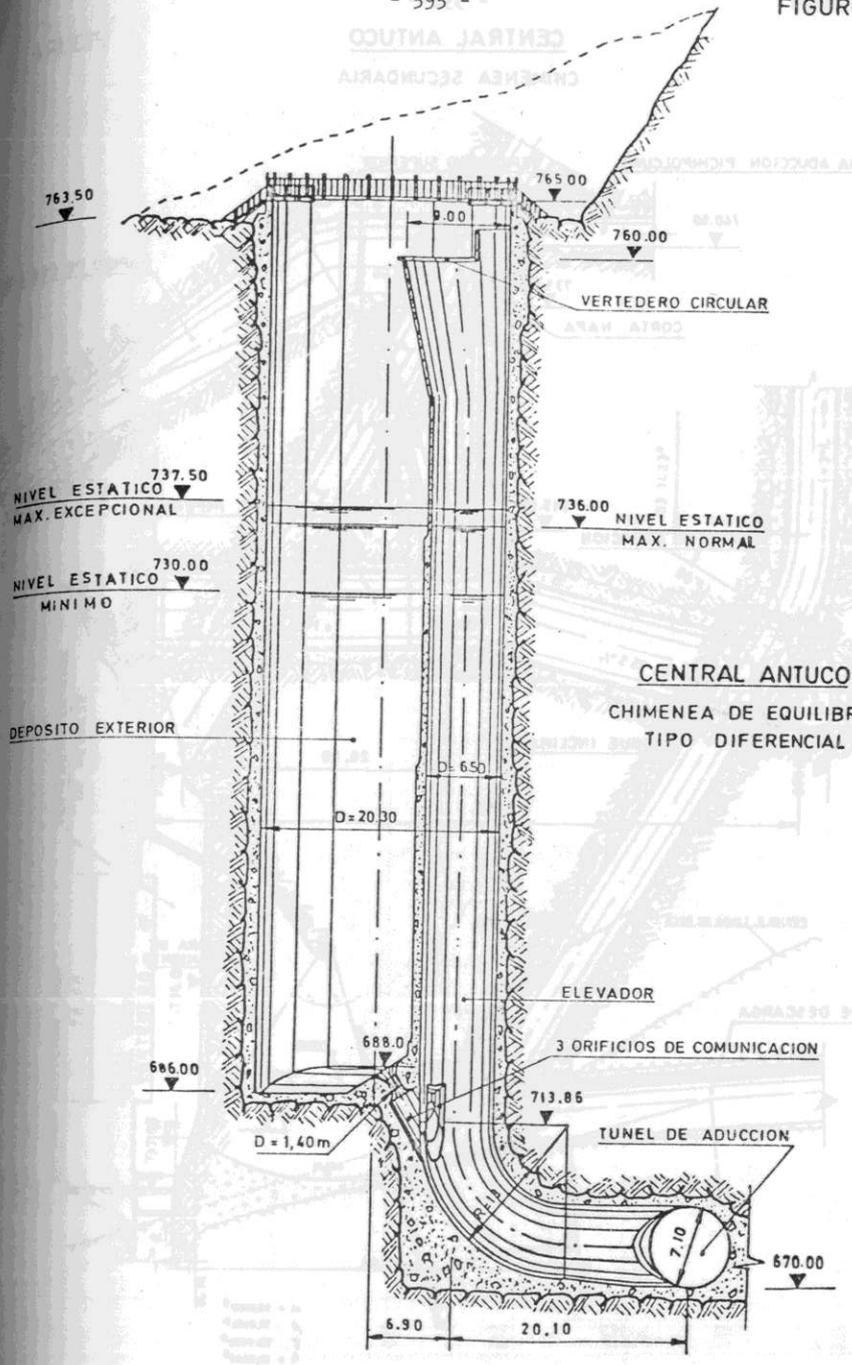


FIGURA 2



CENTRAL ANTUCO  
CHIMENEA SECUNDARIA

FIGURA 3

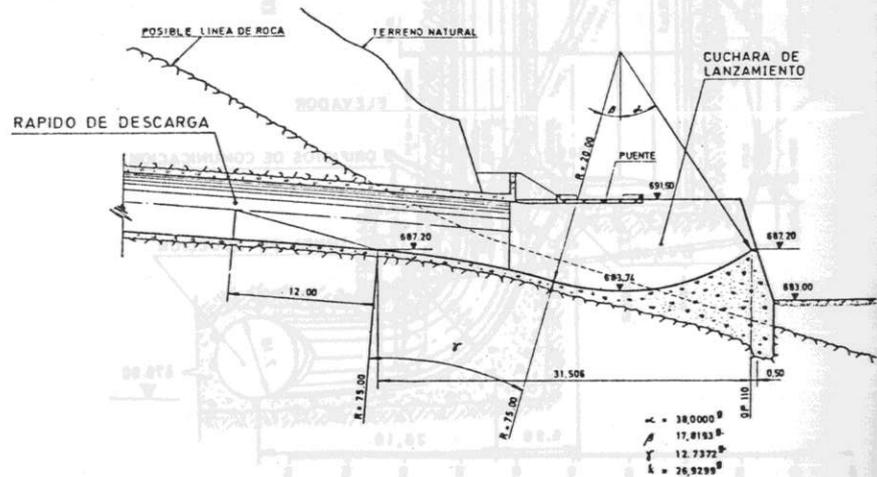
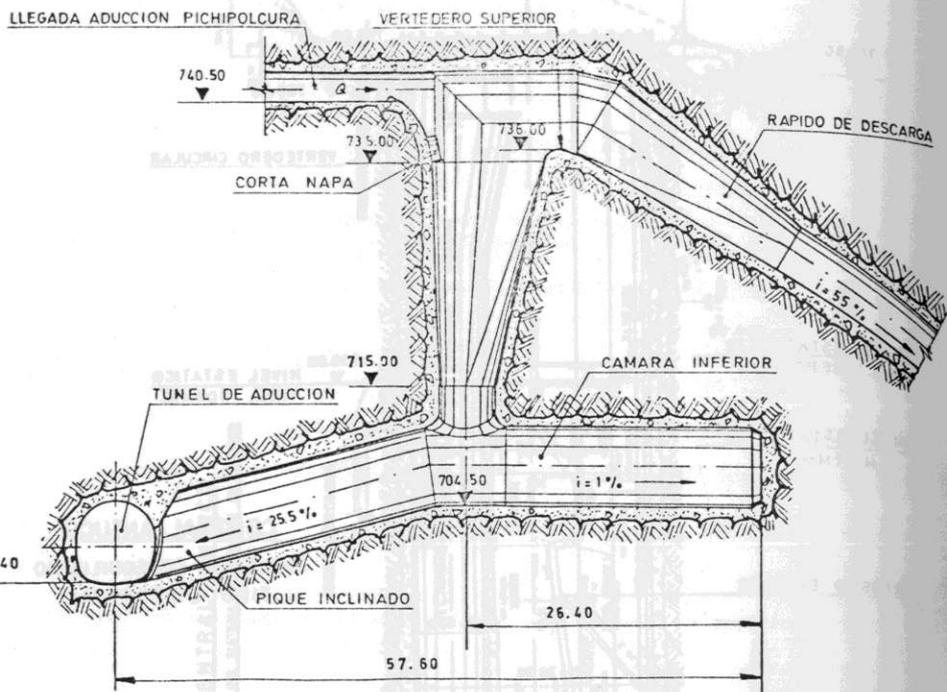
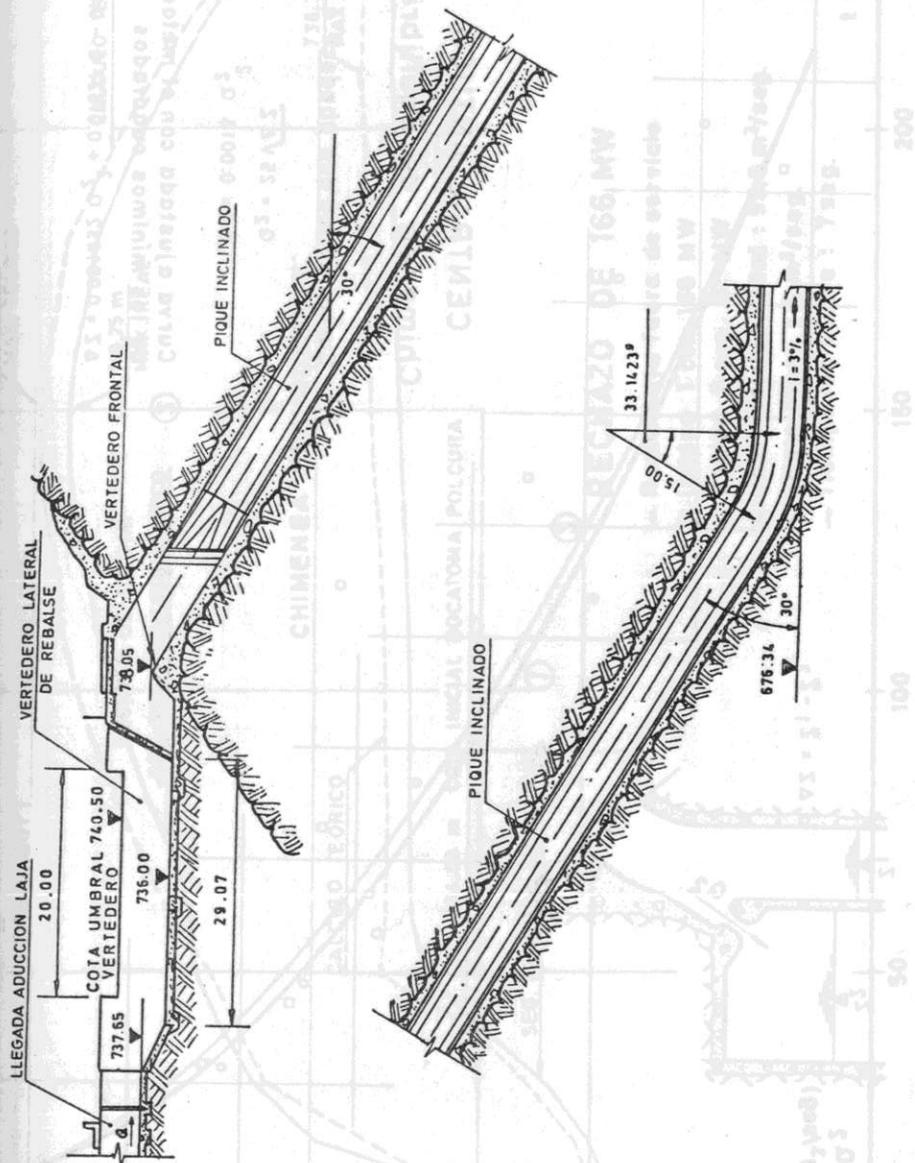


FIGURA 4

CENTRAL ANTUCO  
ENTRADA SIFON POLCURA - RAMA LAJA



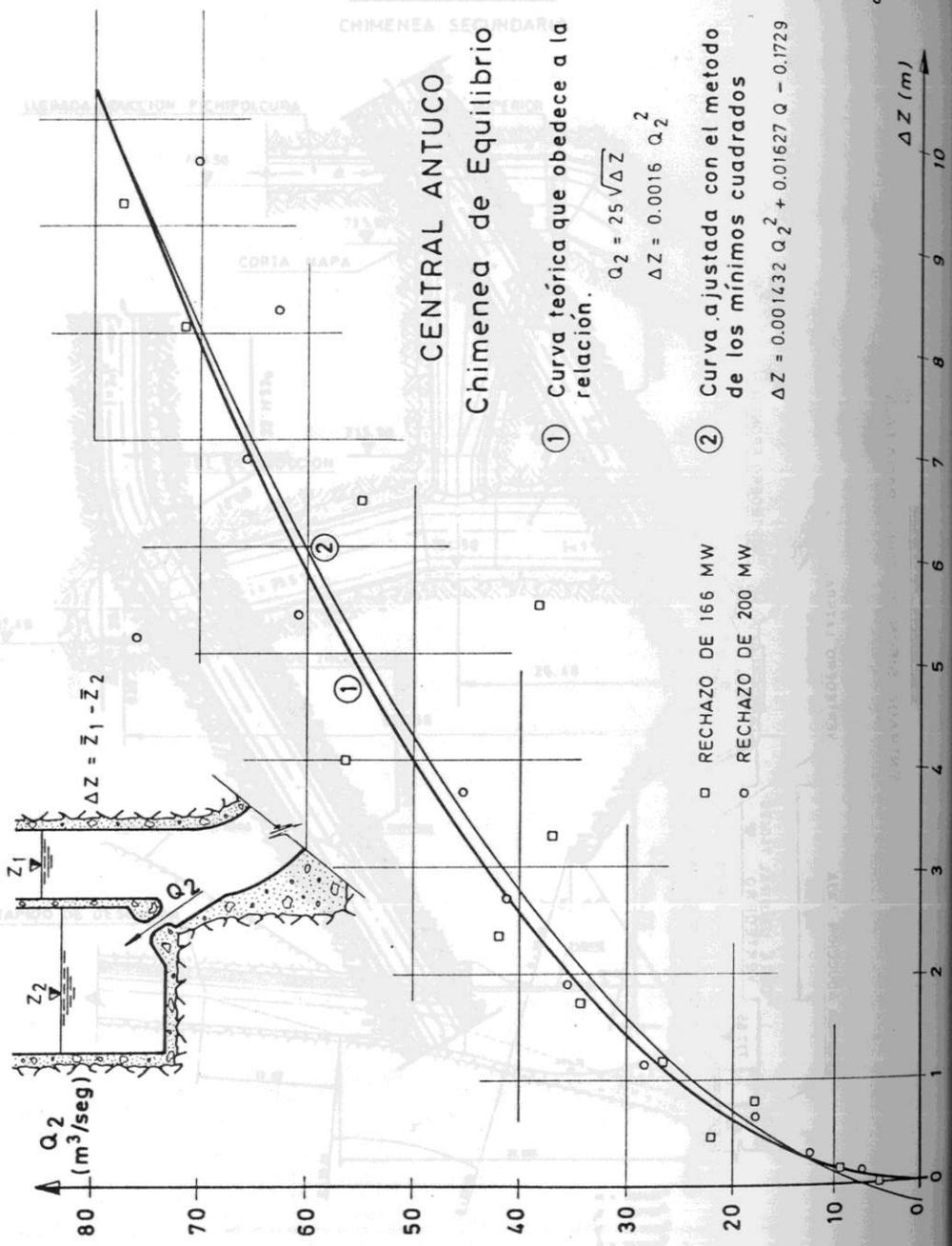


FIGURA 5

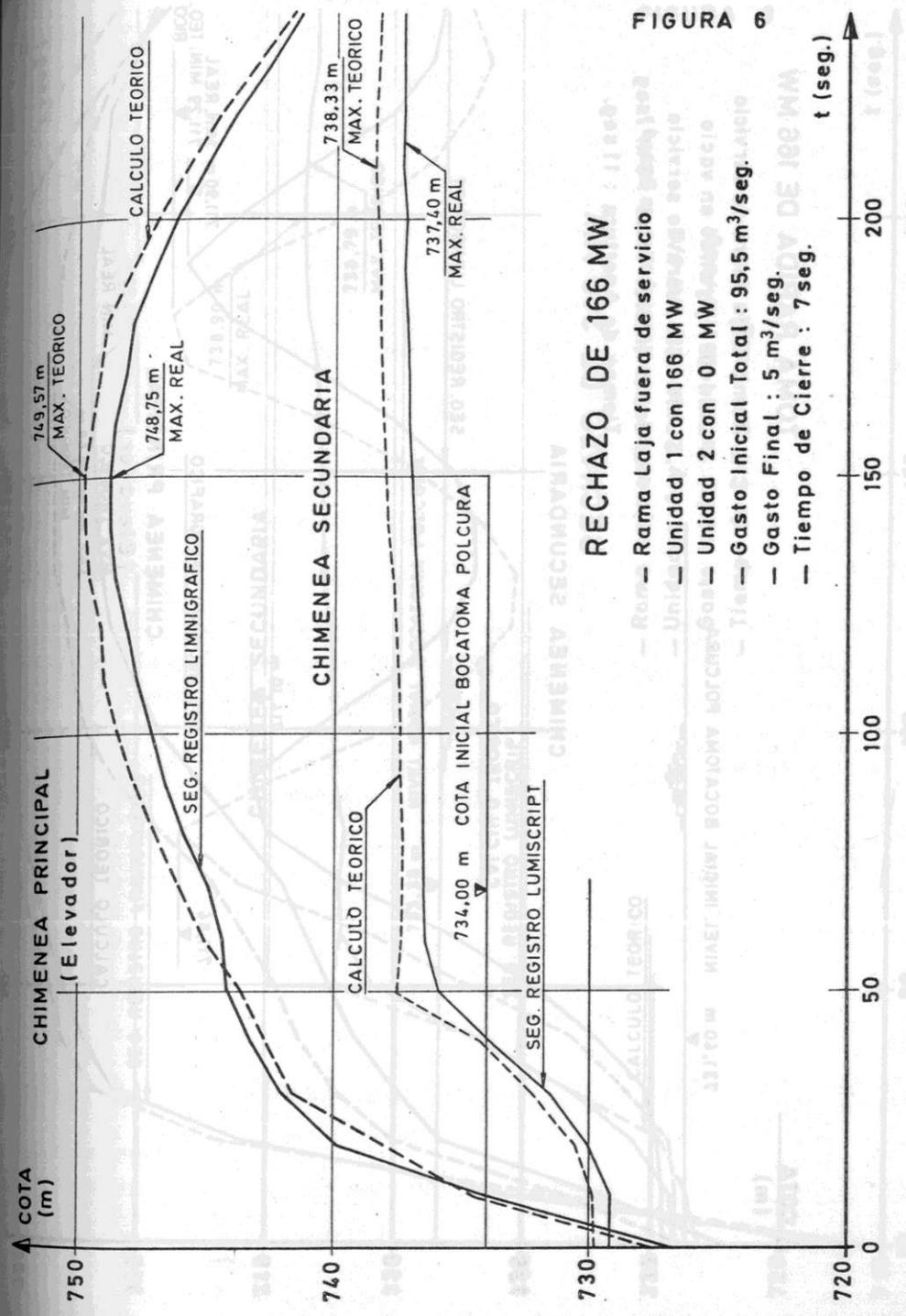


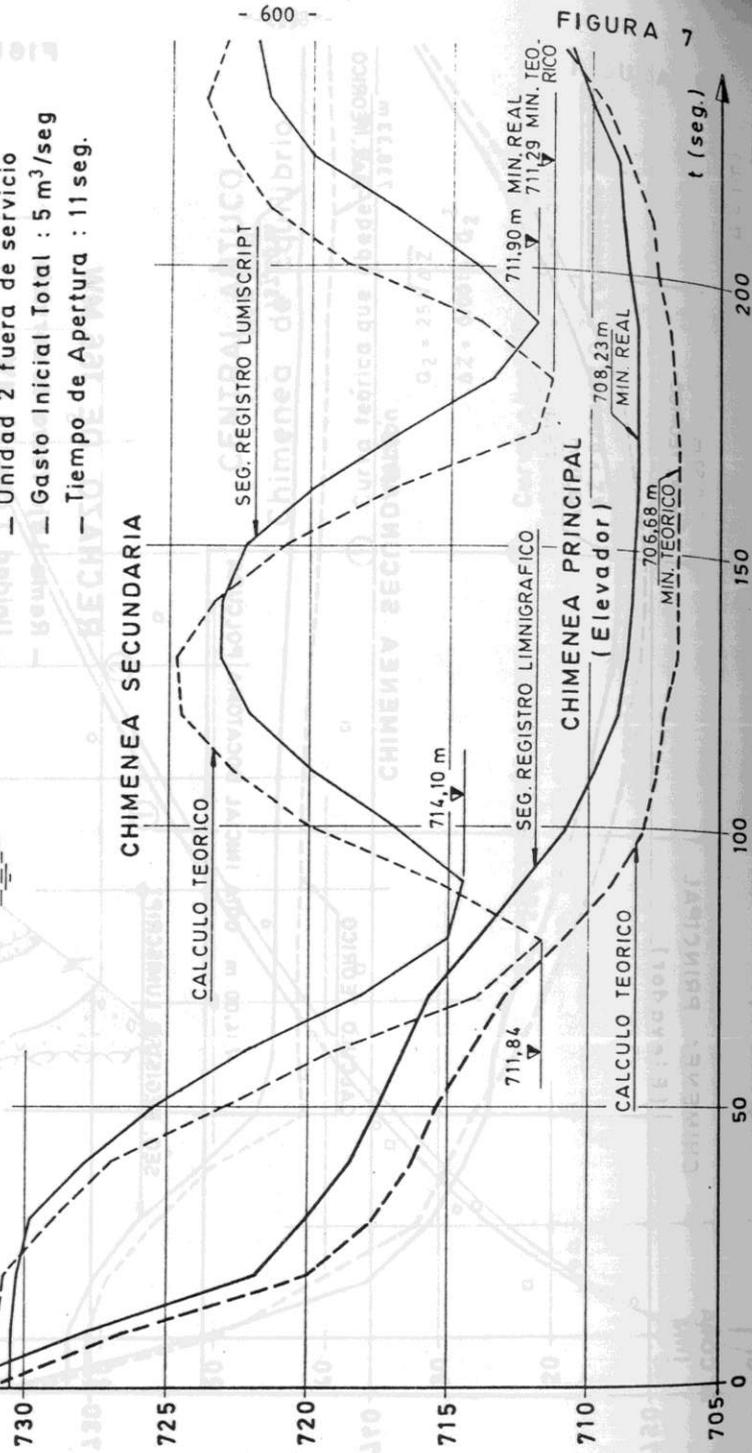
FIGURA 6

▲ COTA (m)

### TOMA RAPIDA DE 166 MW

- Rama Laja fuera de servicio
- Unidad 1 girando en vacío
- Unidad 2 fuera de servicio
- Gasto Inicial Total : 5 m<sup>3</sup>/seg
- Tiempo de Apertura : 11 seg.

731,40 m NIVEL INICIAL BOCATOMA POLCURA



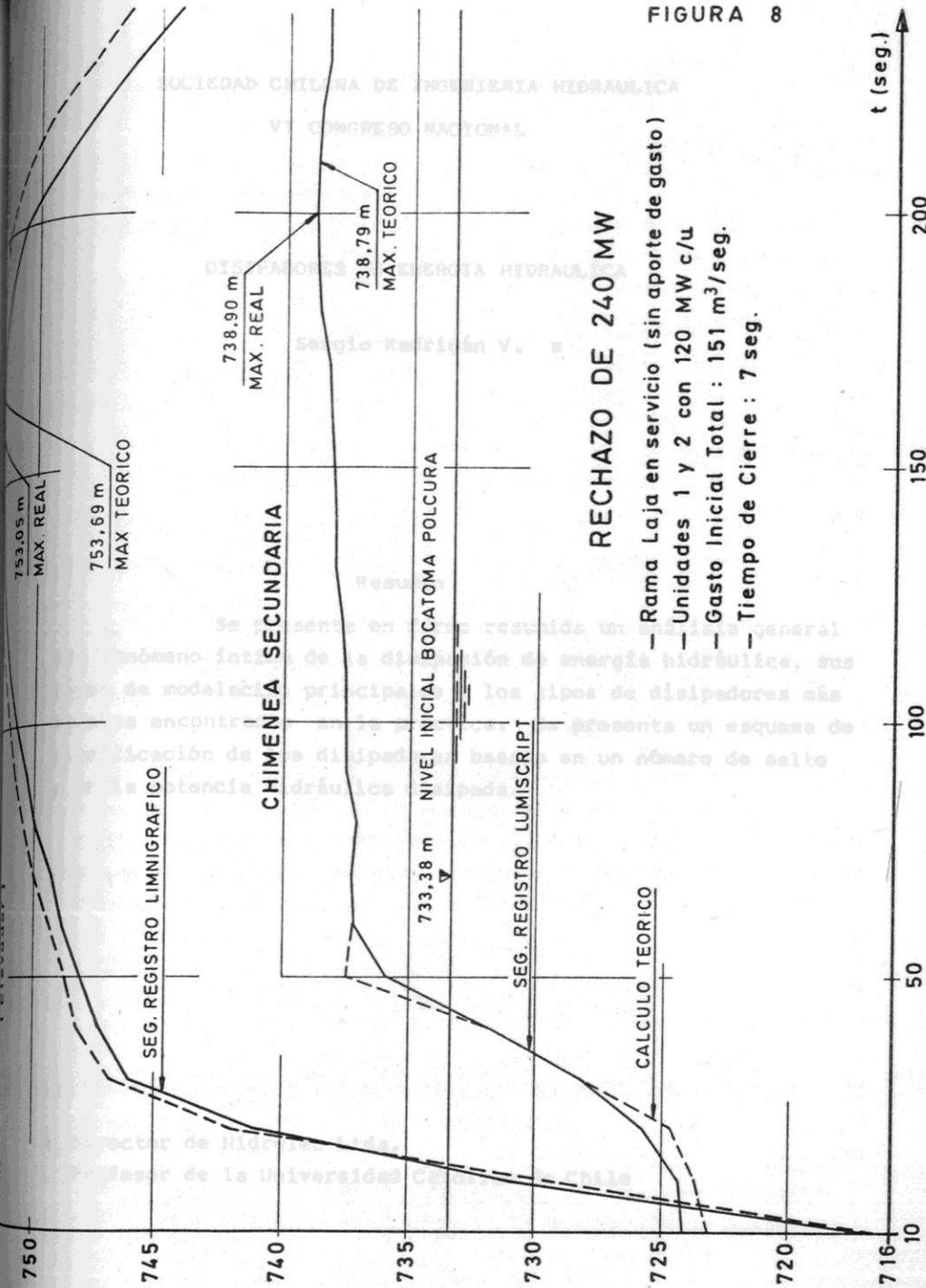
- 600 -

FIGURA 7

t (seg.)

- 601 -

FIGURA 8



### RECHAZO DE 240 MW

- Rama Laja en servicio (sin aporte de gasto)
- Unidades 1 y 2 con 120 MW c/u
- Gasto Inicial Total : 151 m<sup>3</sup>/seg.
- Tiempo de Cierre : 7 seg.

t (seg.)