

La instalacion hidro-eléctrica del mineral "El Teniente"

(Traduccion del artículo «A Hydroelectric Power Plant in Chile» by E. H. Hatch, Resident Engineer, publicado en el *Engineering Record*)

POR

W. CORDERO Q.,
Ingeniero civil.

Esta instalacion está en el rio Cachapoal, a mas o ménos 300 kilómetros del puerto de Valparaiso. La estacion de fuerza está al pié de la Cordillera de los Andes, a 750 metros sobre el nivel del mar. Se ha hecho para suministrar enerjia a la mina, molinos, fundicion, etc., de la Braden Copper Company, Rancagua, Chile.

El rio Cachapoal es mui apropiado para instalaciones de fuerza motriz, teniendo su nacimiento en las nieves eternas de los Andes. Por esto es que, contrariamente a lo que sucede en los rios del Oeste de los Estados Unidos, las aguas no dejan de correr durante los dos últimos meses de la estacion seca, no produciéndose el estiaje sino en la estacion de invierno. Aun en esta época las aguas no bajan demasiado, a causa de que hai una hoya hidrográfica mas abajo de los 1 200 metros de altura, que recibe por lo jeneral lluvia en vez de nieve. Las aguas mas bajas que se han rejistrado dan un gasto de $16 \text{ m}^3/\text{seg.}$, correspondiendo el promedio de aguas bajas a $20 \text{ m}^3/\text{seg.}$; i el promedio de aguas altas a $130 \text{ m}^3/\text{seg.}$ Los árboles acarreados i los depósitos de arenas indican que a veces el rio experimenta creces considerables.

Canal.—La distancia entre la boca-toma del canal i la estacion de fuerza es de 13 kilómetros. Hai cuatro túneles que suman una lonjitud de 670 metros; las canoas alcanzan a 365 metros, siendo el resto canal abierto con 460 metros de revestimiento de concreto. Toda la lonjitud en túnel está en buena roca, escepto 150 metros que se hayan reforzados con emmaderacion. Las canoas están construidas de pino oregon en bruto en tablas de $2,5 \times 10$ cmts, las pilas de las canoas son de roble, madera nativa. La capacidad del canal es de $17 \text{ m}^3/\text{seg.}$, la seccion de $11,6 \text{ m}^2$ i la pendiente de 0,001. La escavacion del canal que alcanza a 445 000 m^3 fué hecha toda a mano.

Con el objeto de impedir la entrada al canal de grandes cantidades de aguas superficiales se han dispuesto canoas sobre el canal en los cruces con las grandes quebradas. La figura 1 da los valores de n i c de la fórmula de Kutter, obtenidos experimentalmente en varias secciones del canal de Cachapoal. En estos experimentos las secciones transversales fueron tomadas escrupulosamente, la pendiente fué tomada haciendo una nivelacion sobre el fondo del canal, 250 metros arriba 250 metros abajo de la seccion. En las medidas de las velocidades se usó un molinete Keufel and Esser.

El dique o represa al traves del rio, que eleva el agua en 3,50 metros, está construido de concreto con una seccion transversal calculada como muro de sostenimiento. Es en realidad un vertedero con una cresta de 41 metros de largo. Está reforzado con rieles i puede resistir choques considerables durante las grandes creces. Las compuertas de entrada que son cuatro, se maniobran a mano por medio de mecanismos de tornillo. Se han proyectado de tal manera que es fácil conectarlos a un motor eléctrico. Están protegidas de las aguas altas por un tabique de concreto armado. Una visita jeneral de la boca-toma aparece en la figura 2.

Durante los meses de aguas altas, el agua del rio arrastra constantemente sedimentos gruesos i piedras de gran tamaño. Las piedras mas grandes se detienen en la concavidad de las curvas del rio, i por esto es que no entran en las compuertas de entrada que están precisamente en la convexidad de una de estas curvas.

El problema de las piedras i sedimentos.—Con el objeto de eliminar de las aguas del canal las piedras i los sedimentos ha sido necesario construir una cámara para las piedras i un estanque de decantacion. Como estas piedras i sedimentos aparecen solo en época de aguas altas, se decidió que esta cámara i el estanque se limpiaran con las aguas en exceso. Por esta razon los primeros 300 metros se construyeron con una pendiente de 0,004, siendo la misma la seccion que en el canal normal, lo que da un exceso de gasto de $14 \text{ m}^3/\text{seg}$. Fué necesario revestir este trozo de canal con albañileria i concreto, a causa de que el agua llevaria gran velocidad i que el terreno no era suficientemente sólido.

La cámara para piedras se ha construido a 290 metros aguas abajos de la boca-toma. Consiste de dos compuertas descargadoras paralelas al canal, $0,92 \times 1,84$ metros, estando las piezas guias selladas a macizos de concreto que se unen a su vez a las banquetas del canal por medio de muros de concreto armado. Las compuertas son maniobradas a mano, por medio de mecanismos de tornillo. Desde 8 metros antes de las compuertas el fondo del canal toma una pendiente mayor, de tal manera que inmediatamente al fin de las compuertas el fondo del canal se encuentra en depresion con respecto del fondo normal del canal. En este punto hai un muro transversal cuya cúspide coincide con el fondo normal. A su vez frente a las compuertas el fondo tiene pendiente hácia ellas, lo que hace que las piedras se vayan por gravedad sobre las compuertas i se escapen por ellas. Las compuertas se dejan abiertas en la cantidad que se necesiten durante todo el período de aguas altas.

La eficacia de la cámara para piedras fué probada poco despues de correr por primera vez las aguas del canal. Accidentalmente se cayeron dentro del canal varias

planchas de fierro galvanizado, se fueron hacia las compuertas de la cámara i las taparon. Al día siguiente se habían formado frente a ellas depósitos de piedras que llegaban hasta 1 metro de altura. Se abrieron entonces las compuertas i todo este material junto con las planchas pasó fácilmente a través de ellas. Las piedras alcanzaban hasta 20 centímetros de diámetro.

Estanque de decantación i descargas.—El estanque de decantación está a 15 metros mas abajo que la cámara para piedras, al fin del trozo de canal de pendiente rápida. Una dificultad al proyectar el estanque de decantación se debió a que la diferencia de altura entre el fondo del estanque i la superficie del agua del río no era suficiente para dar al fondo del estanque una pendiente hacia el río de 20 grados mas o menos como era necesario. Si esto hubiera sido posible, un juego de compuertas colocadas hacia el río i parcialmente abiertas habrían sido suficientes para haber descargado el estanque de toda la arena depositada. Esta diferencia de altura no pudo haber sido obtenida sino que levantando la represa o corriendo el estanque aguas abajo del canal. En ambos casos la topografía del terreno hacia prohibitiva la ejecución de la obra. En consecuencia, se proyectó un estanque en concreto armado con un fondo plano. Las figuras 3 i 4 muestran en sus grandes líneas la disposición del estanque.

Cierta cantidad de arena queda en el fondo del estanque entre los agujeros de salida; pero la altura de la capa de arena no sube mas allá de la que permita el talud de escurrimiento de la arena húmeda. Las compuertas de los agujeros de salida se abren, naturalmente, durante todo el tiempo en que las aguas vengan muy cargadas de sedimentos. El estanque mientras funciona retiene las materias gruesas i arenosas; pero una considerable cantidad de materias arcillosas pasan en suspensión en el agua las que felizmente no causan daño apreciable en las turbinas.

Hai cinco juegos de compuertas de descarga a lo largo del canal, por medio de los cuales se puede desaguar en puntos distanciados a menos de 3 Km. En cada descarga el fondo del canal se profundiza bruscamente en 1,80 m, lo que hace que el umbral de las compuertas quede francamente bajo el fondo del canal. Este dispositivo ha dado muy buenos resultados sobretudo para retener cuerpos extraños que por cualquier motivo arrastren las aguas. Cada descarga consiste de cuatro compuertas cuyas guías van sujetas a macizos de concreto. Muros de concreto armado van desde lo alto de las compuertas hasta la banqueta del canal. La maniobra de estas compuertas es la misma de todas las anteriores.

A 300 m antes de llegar al fin del canal se ha establecido un vertedero que puede descargar cualquier cantidad de agua que no sea necesaria en las turbinas. En caso de una parada total de éstas, el vertedero puede vaciar todo el gasto del canal. La figura 6 da una vista del vertedero en funcionamiento; se ve la parte superior de las compuertas.

En el extremo del canal no se ha dispuesto un estanque regularizador de nivel; la topografía del terreno hacia que su construcción fuera muy costosa. Sin embargo, en los 30 m finales la sección del canal se agrandó hasta 42 m². Una represa de alba-

ñilería construida en la ribera de afuera del canal sirve de arranque a las cañerías que van a las turbinas. El mismo muro lleva la rejilla i las compuertas i sus mecanismos.

Las cañerías son tres i están construidas de planchas de acero remachadas, teniendo un largo cada una de 320 m. El diámetro es de 1,22 m, i el espesor de las planchas varia desde 6 mm hasta 13 mm. Al salir de la represa cada cañería está provista de un tubo piezométrico con el objeto de evitar los efectos del vacío cuando se cierran las compuertas. Las cañerías descansan sobre macizos de concreto. La cañería de los excitadores está unida a cada una de las cañerías principales, pudiéndose así hacer trabajar los excitadores con una o con todas las cañerías. La diferencia de altura entre las aguas del fin del canal i las aguas normales del desagüe de las turbinas es de 136 m.

Estacion de fuerza i maquinaria.—Para ubicar la estacion de fuerza fué necesario desmontar 31 000 m³ de un conglomerado suelto; parte de esta escavacion se efectuó por medio de un chorro hidráulico. El edificio tiene 20×50 m i está construido de armadura de acero i cubierto con fierro galvanizado. Todas las fundaciones, el desagüe, los pisos i los muros principales de los costados son de concreto o de concreto armado. Sabiéndose que el rio subia a veces hasta 4,50 m sobre sus aguas altas normales, se colocó el piso de este edificio a 7,50 m sobre el fondo del rio. Como el terreno de fundacion es de aluvion, los muros exteriores pueden ser sometidos a una solitacion de adentro hácia fuera, en el caso en que la inundacion máxima se hubiera efectuado i hubiera bajado en seguida el nivel del agua bruscamente. Por estas razones se han construido de cemento armado el muro de frente i parte de los muros terminales. Los rieles de 16 K usados en estos muros i otras partes de la obra provienen de una gran cantidad de rieles inservibles que la compañía habia adquirido. Para prevenir los efectos de posibles socavaciones del rio se han fundado los muros sobre pilotajes de rieles hincados de 4 a 5 m en el ripio.

En la estacion hai tres unidades principales, cada unidad se compone de una turbina Pelton-Francis de doble descarga de 4 000 HP que mueve un alternador Westinghouse de 2 000 KW, 2 300 volts, trifase, 60 ciclos i 600 rev./min. Estos alternadores están construidos para soportar una sobrecarga de 50% durante dos horas. Hai dos unidades excitatrices, siendo cada una de 100 KW, 125 volts, 720 rev./min., i conectada directamente a una rueda Pelton de 200 HP. Hai ademas una unidad auxiliar para la maniobra de grúas, etc.; se compone de un dinamo de corriente continua de 40 KW i 125 volts conectado a un motor trifásico de 60 HP i 2 300 volts o, si es necesario, a una Pelton de 80 HP. Todas las máquinas llevan reguladores especiales Pelton de aceite en presion.

En el piso inferior frente a los jeneradores están los transformadores elevadores de voltaje colocados en compartimientos de concreto separados unos de otros. Cada unidad se compone de tres transformadores Westinghouse aislados en aceite i enfriados por corriente de agua; cada uno es monofase, 667 KW i 2 300 a 33 000 volts. Los jeneradores se unen a los terminales de 2 300 volts que están debajo del piso por me-

dio de cables con envoltura de plomo i a traves de disyuntores de aceite. De la misma manera se unen los terminales de 2 300 volts al primario de los transformadores. Los conductores de alta tension de los transformadores son tubulares de cobre i van protegidos por barreras de concreto hasta llegar a los desconectores de aceite en el segundo piso debajo de los terminales de 33 000 volts, los que están en una caja de concreto enfrentando la parte de atras de los transformadores. La línea parte de este terminal hácia los desconectores de aceite colocados en el segundo piso, i de allí por debajo de este piso hasta los carretes de reaccion i desconectores de la pared. Los conductores atraviesan la muralla i se conectan a los conductores de la trasmision i a pararrayos electrolíticos, los que están colocados sobre una plataforma debajo de la salida de los conductores. Todos los aparatos de manio-bra i desconectores se pueden maniobrar a la distancia desde una mesa colocada en el segundo piso.

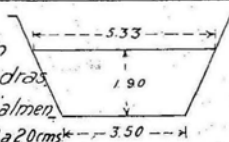
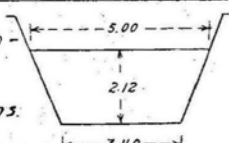
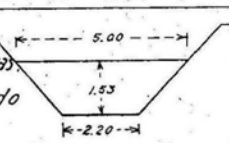
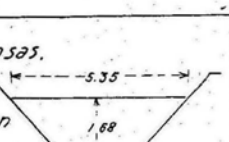
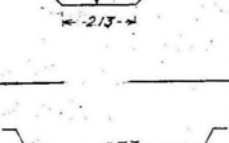
En el primer piso hai un taller equipado con las máquinas necesarias para hacer las reparaciones ordinarias. En el segundo piso hai una batería de acumuladores para el alumbrado en caso de accidentes; las oficinas principales están en el mismo piso. Un puente-grúa de 25 t puede maniobrar a todo lo largo del edificio encima de los jeneradores.

Línea de trasmision.—La línea de trasmision es de 29 Km de largo i se compone de cables número 2 de siete alambres torcidos de cobre duro. Los tres conductores, separados de 2,15 m en el plano vertical, van suspendidos de aisladores a torres de acero proyectadas para llevar dos líneas, una a cada lado. Las torres se construyeron con los rieles usados de que ya se ha hablado; su altura varía de 12 a 22 m i están espaciadas de 150 a 250 m segun lo exija la topografia de esta abrupta rejion. En la sub-estacion que está ubicada cerca de la mina i del molino, los 33 000 volts se bajan a 2 300 volts para las trasmisiones locales, i a 500 volts para el movimiento del molino.

Toda la instalacion se ha proyectado con la intencion de duplicar su capacidad en el futuro. Las obras de toma, el canal i accesorios se han construido teniendo en vista este objetivo.

Mr. C. G. Newton ha sido el superintendente de toda la instalacion; Mr. A. J. Noerager i Mr. R. C. G. Clark proyectaron e instalaron la parte eléctrica; Mr. L. A. Thomas instaló la maquinaria de la estacion de fuerza; Mr. W. P. Marshall se encargó de la construccion de la boca-toma, túneles, canal i accesorios, i Mr. L. E. Stevens construyó la línea de trasmision i sub-estacion. El autor proyectó la boca-toma, la cámara para piedras, el estanque de decantacion, las descargas i las obras de concreto de la estacion de fuerza, i últimamente ha tenido a su cargo la construccion de la estacion de fuerza, de las cañerías de bajada i demas obras del extremo del canal.

Fig. 1. VALORES DE n i C DE LA FORMULA DE KUTTER
OBTENIDOS EN LAS ESPERIENCIAS DEL CANAL DE CACHAPOAL

Secciones i calidad del terreno.	Sec. transversal m ²	Radio medio = R m	Pendiente = J	Velocidad m/seg	n	C
Taludes de arcillas con algunas piedras. Fondo parcialmente con piedra de 8 a 20 cms. 	8.40	1.12	0.0011	1.62	0.022	84.
Laja con puntas saliente de 8 a 15 cms. 	8.90	1.17	0.0010	1.44	0.024	77.
Ripio con 30 % de tierras. Taludes i fondo parejos. 	5.45	0.86	0.001	1.33	0.022	82.
Tierras arcillosas. Ripio grueso con tierra en el fondo 	6.28	0.93	0.001	1.39	0.022	82.
Piedra granítica conglomerada, puntas salientes de 8 a 30 cms. 	6.08	0.92	0.0011	1.08	0.029	61.

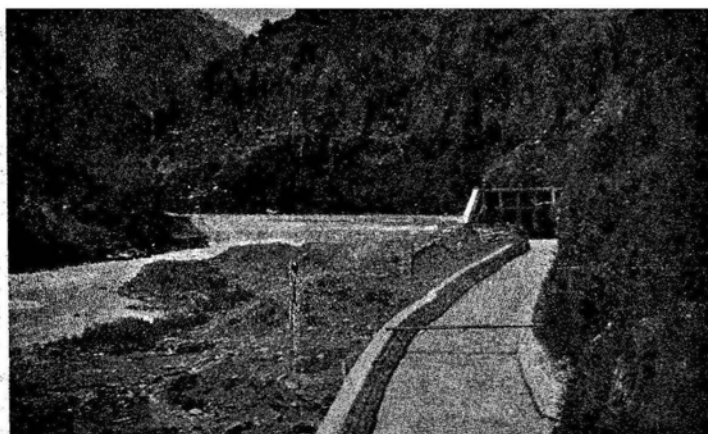


Fig. 2. Represa i boca-toma

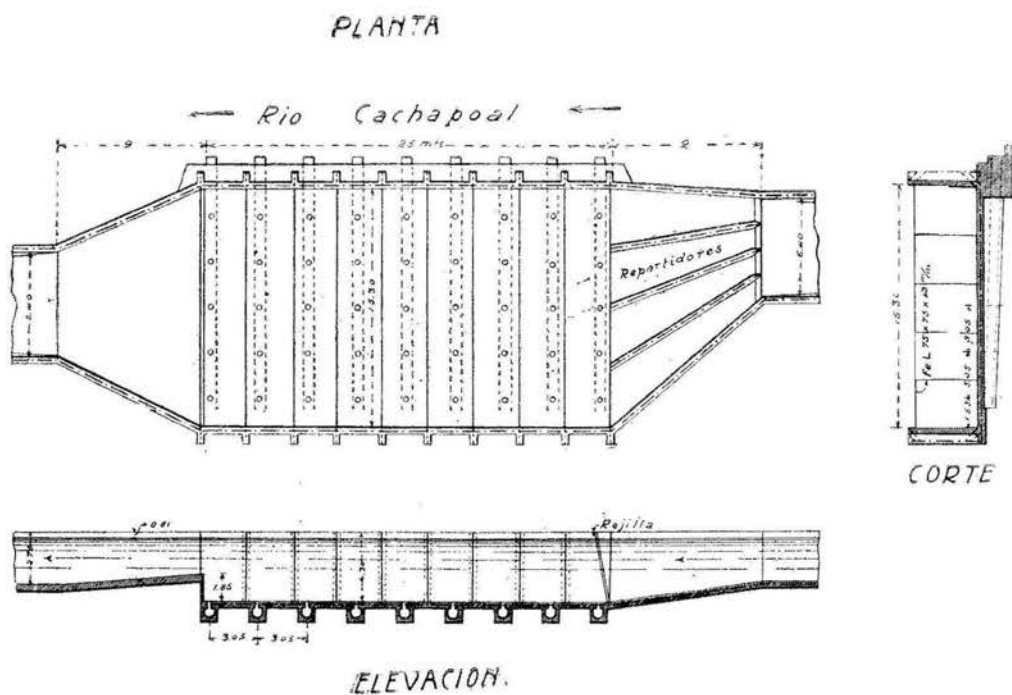


Fig 3. DETALLES DEL ESTANQUE DE DECANTACION

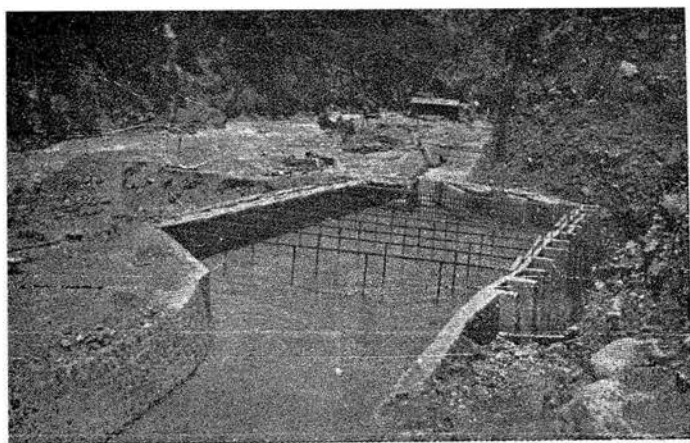


Fig. 4. Estanque de decantacion

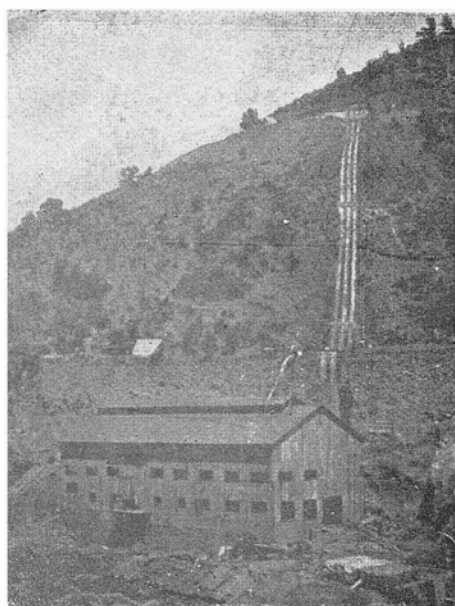


Fig. 5. Estacion de Fuerza



Fig. 6. Canal i vertedero de desca