

Ing. Hartmut Vogel

División de Energía y Electrotecnia

Estudio de desarenadores

El fuerte impulso que se le ha dado en los últimos años a los desarrollos hidroeléctricos en el país, ha suscitado una serie de problemas técnicos que exigen una solución.

Entre éstos figura el estudio sistemático de la desarenación de las aguas que abastecen a las centrales con el objeto de sentar las bases para los posibles proyectos futuros que se puedan ejecutar. Ya en el año 1945 la Empresa Nacional de Electricidad S. A., inició investigaciones concernientes a algunos desarenadores de la cuenca del río Maipo, para continuarlos en los dos últimos años en el sistema de aducción de la planta Sauzal. En esta publicación se intenta esbozar en grandes rasgos las peculiaridades que reviste el problema y dar a conocer las conclusiones más importantes.

La acción combinada de los diversos agentes atmosféricos ocasiona paulatinamente una transformación profunda de la corteza terrestre. En mayor grado se puede observar esta descomposición lenta de las rocas en la alta montaña desde las cuales el producto de esta disgregación es transportado continuamente por los ríos a otras zonas para llegar finalmente a los desarenadores. El carácter y la magnitud del arrastre sólido están vinculados estrechamente a la naturaleza y configuración geográfica, como también a las condiciones meteorológicas de la hoya hidrográfica que se considera. Una variación estacional fuerte de caudal contribuye a aumentar la erosión a lo largo del lecho. Steinberg, basándose en el desgaste del material transportado, ha indicado que los escurrimientos naturales tienden a un perfil de equilibrio sujeto a modificación por hundimiento o solevantamiento del continente.

Al estudiar el perfil de los ríos de la zona central de Chile, se concluye que todos escurren con pendiente muy elevada. Si se toma en cuenta que el régimen hidrológico está sujeto a grandes variaciones, a lo cual se agrega el hecho de que la roca de la Cordillera de los Andes se disgrega con suma facilidad, se puede apreciar la importancia que adquiere el arrastre sólido a lo largo de estos ríos.

El régimen meteorológico está caracterizado por precipitaciones de invierno que se depositan en forma de nieve en la montaña. En consecuencia el caudal de los ríos se reduce mucho, proviniendo de los deshielos superficiales de la capa de nieve y de las reservas subterráneas. En la estación citada la energía cinética de los ríos es pequeña y el agua escurre prácticamente clara. El incremento de la radiación solar produce en la primavera los primeros deshielos, a causa de los cuales aumenta la energía cinética de los ríos y su capacidad de arrastre sólido, considerablemente. El caudal de los ríos permanece elevado para empezar a menguar durante el mes de marzo, reduciéndose en forma paralela la turbidez del agua. Sin embargo no existe una proporcionalidad entre el gasto y el arrastre de los ríos ya que se ha observado para caudales iguales de primavera y otoño arrastres sólidos bien diferentes entre sí.

A continuación se indican algunas cifras que muestran en qué forma afecta la variación periódica anual el escurrimiento de varios ríos chilenos.

	Gastos para el año 1950	
	m ³ /seg.	
	Enero	Julio
Aconcagua en las Vizcachas	75	14
Maipo en la Obra	205	48
Cachapoal en Coya	160	37
Maule en Culenar	205	180
Bío-Bío en Rucalhue	230	800
Toltén en Villarrica	182	520
Río Bueno en Río Bueno	300	615

De estos antecedentes se desprende que la variación entre los valores de enero y julio es mucho más pronunciada en los ríos Aconcagua, Maipo y Cachapoal, en tanto que a medida que se consideren ríos situados más hacia el sur el caudal de éstos es más regularizado, invirtiéndose el orden de magnitud de los gastos. Este hecho indica que el régimen fluvial en la zona sur está completamente determinado por los períodos de lluvia y no por el deshielo. Por otra parte, la existencia de una tupida vegetación reduce considerablemente la erosión, lo que redundará en perfiles más tendidos de estos ríos. En consecuencia, el escurrimiento es tranquilo y el arrastre sin importancia.

Aparte de las variaciones periódicas anuales, se produce sobre todo en las cuencas alimentadas por deshielo de nieves y ventisqueros una variación diaria periódica como consecuencia de la fluctuación de la temperatura. La variación de gasto correspondiente se desfasa y disminuye aguas abajo del centro de gravedad de la hoya hidrográfica.

Fuera de las periodicidades ya citadas, existen períodos más largos que engloban un número grande de años y que están relacionadas con el avance y retroceso de los glaciares, fenómeno que no ha podido ser abarcado con exactitud.

El régimen periódico sufre modificaciones pasajeras con motivo de perturbaciones atmosféricas, como por ejemplo tempestades de nieve en la cordillera que más abajo se descargan en forma de lluvias. En estas oportunidades

los ríos suelen aumentar enormemente su caudal, arrastran grandes cantidades de material sólido y modifican sus lechos a veces sustancialmente donde la configuración topográfica lo permite. Si estos temporales se superponen a la época de deshielo, las creces pueden alcanzar proporciones extraordinarias. Según algunos autores se produjo en una ocasión una crecida del Maule durante la cual escurría en su desembocadura un gasto de 20.000 m³/seg., en tanto que el Río de la Plata con su enorme hoya hidrográfica tiene un régimen de 30.000 m³/seg. Estos antecedentes permiten apreciar la importancia que puede adquirir el arrastre sólido, de modo que los ríos chilenos se pueden clasificar al efectuar comparaciones con otras partes de la tierra entre los ríos con mayor transporte de sedimentos. Es, por consiguiente, comprensible que tengamos que prestarles una atención especial a todos los problemas que emergen de estas consideraciones para las obras hidráulicas.

Para entrar más en detalle acerca del arrastre de los ríos se puede efectuar una clasificación que comprende dos grupos principales.

1. Material sólido en suspensión.

Este material, denominado sedimento, es transportado con la misma velocidad del agua y se mantiene en suspensión por las turbulencias que le comunican una componente de velocidad ascendente, neutralizando de esta manera la tendencia de decantación de las distintas partículas. Para estimar cuantitativamente el grado de turbidez del agua se ha recurrido al concepto de concentración del sedimento. En este caso se suele expresar la concentración en gramos de material de suspensión por unidad de volumen, o bien en partes por millón del volumen sólido con respecto al volumen total.

Si se considera la sección transversal de un río ó un canal, se le puede atribuir al agua en cada punto de esta sección una velocidad de escurrimiento

$$v_i = f(t, x, y, z)$$

en que t es el tiempo y x, y, z son las coordenadas de posición.

La dependencia del tiempo reviste dos características independientes: la primera se refiere a la fluctuación instantánea alrededor de un valor término medio v , y la segunda, a la variación de gasto, relacionada con el régimen hidrológico en los ríos y con la intervención humana en los canales.

Por otra parte, en cada punto el filete líquido correspondiente lleva una cierta cantidad de sedimento en suspensión definido por el gasto sólido unitario δ_i que se mide en gr./m² seg. Análogamente que para la velocidad se puede escribir

$$\delta_i = F(t, x, y, z)$$

siendo aplicables las mismas consideraciones sobre la influencia del tiempo. En este caso la diferencia entre δ_i y el valor medio δ es apreciable y puede alcanzar a $\pm 50\%$ de variación con respecto al término medio. La integración del gasto sólido unitario sobre toda la sección transversal arroja el gasto sólido total

$$P = \int_0^{\infty} \delta d\Omega$$

Se puede demostrar fácilmente que la relación entre el valor δ y la velocidad coordinada v es a su vez la concentración c para el punto considerado.

Se han desarrollado algunas teorías referentes a la repartición del gasto sólido unitario en una sección transversal, según las cuales en una vertical, δ obedece aproximadamente a una ley exponencial de modo que la concentración del sedimento aumenta considerablemente en la zona inferior de la sección de escurrimiento. Esta repartición sin embargo se presenta sólo en escurrimientos muy regulares. Durante la ejecución del estudio de desarenadores se ha comprobado que generalmente tanto la repartición de las velocidades como del gasto sólido unitario resultan completamente caprichosos. En lo que se refiere a la composición del sedimento comprende soluciones coloidales, arcillas y arena cuyo tamaño es función de la turbulencia. Hasta el momento no ha sido posible encontrar una expresión analítica de la variación de δ a lo largo de una línea horizontal de la sección transversal.

2. Material sólido acarreado a lo largo del lecho.

A diferencia del grupo anterior, el material acarreado a lo largo del fondo se desplaza con velocidad inferior a la velocidad del agua. El acarreo está constituido por arena gruesa, ripio y bolones, siendo triturado poco a poco por efecto del transporte. El volumen de material sólido trasladado en esta forma representa sólo un porcentaje pequeño del arrastre total.

A veces se puede clasificar aún un tercer grupo que corresponde al arrastre de características intermedias a los ya citados. Lo integran partículas de arena que descansan en el lecho móvil del río o canal y que son levantadas de él por causa de la fluctuación de la turbulencia para depositarse un trecho más aguas abajo en el fondo. Naturalmente este fenómeno es prácticamente inaccesible a una investigación teórica.

Las obras hidráulicas que se construyen a lo largo de los ríos obedecen en lo general a cuatro miras distintas, a saber, la regulación del escurrimiento con fines de riego, la generación de energía hidroeléctrica, el abastecimiento de agua potable y finalmente la navegación fluvial. Para los cuatro casos mencionados el problema del arrastre sólido es de suma importancia. En Chile, prácticamente interesan sólo los tres primeros, ya que, con excepción de ciertos estuarios en el sur del país, no existe la navegación fluvial.

La regulación del escurrimiento es lograda mediante la construcción de tranques, detrás de los cuales se embalsa un volumen considerable de agua sujeto a ser distribuido a voluntad. El proyecto de una obra de esta índole debe tomar en cuenta el embancamiento paulatino del embalse, lo que va aparejado a la disminución de volumen útil de éste. Para formarse una idea cabal del grado de importancia de este fenómeno, conviene realizar investigaciones previas en el terreno, que comprenden esencialmente la obtención de muestras en una sección transversal apropiada del río.

En la mayoría de estas obras se combina la regulación del caudal de un río con utilidades hidroeléctricas para aprovechar de este modo la caída disponible a raíz de la construcción de las presas. Como los embalses de regulación anual tienen superficies muy extensas el agua captada para las turbinas hidráu-

licas afluye a éstas prácticamente limpia, habiéndose clarificado en su travesía por el lago artificial.

En las centrales hidroeléctricas de pasada, es decir, en aquellas que utilizan directamente las aguas del río mediante obras especiales de toma, el caudal de abastecimiento es captado conjuntamente con el sedimento en suspensión. Las instalaciones de bocatoma permiten únicamente la retención y separación del acarreo del lecho, siendo menester evacuar cada cierto tiempo el material sólido acumulado frente a las compuertas que obstruyen el paso normal del río. Con el objeto de eliminar ripio y arena gruesa, se intercala entre las compuertas de bocatoma y el canal de aducción un pequeño estanque denominado desripador, del cual pasa el agua al canal por encima de un vertedero. Compuertas de fondo que dan al río permiten la evacuación del depósito cuando sea necesario.

El gasto conducido desde la bocatoma a través del túnel o canal a la central transporta sólo sedimento en suspensión, pues la velocidad elevada del escurrimiento impide la decantación. Si la concentración del material en suspensión puede alcanzar valores importantes, es forzoso disponer de un sistema de desarenación cuya ubicación depende de las condiciones topográficas, generalmente más favorable a la construcción de dichos desarenadores a poca distancia de la bocatoma. La eliminación de la arena permite reducir el gran desgaste de las turbinas producido al pasar por éstas partículas sólidas en grandes cantidades. En efecto, una concentración de un gramo de sedimento por litro de agua, significa por m^3 /seg. de gasto una cantidad de casi 90 toneladas diarias. Naturalmente, la acción del sedimento en suspensión depende de la naturaleza de sus partículas. El arrastre proveniente de piedra calcárea no tendrá el mismo efecto sobre la turbina que los granos de cuarzo que pueden dejar rayaduras en el acero a veces con la simple presión del dedo.

En las turbinas Pelton el desgaste deforma la tobera y aguja, a raíz de lo fuerza centrífuga contra los álabes del rotor y los álabes directrices, produciéndose la consiguiente erosión que se superpone al fenómeno de cavitación. De la misma manera se desgastan los sellos de las turbinas con lo cual aumenta la pérdida de agua que no atraviesa la mariposa.

En las turbinas Pelton el desgaste deforma la tobera y aguja, a raíz de lo cual el chorro es dispersado, lo que redundaría en una disminución del rendimiento.

Por otra parte, cuando la central está dotada de un estanque de sobrecarga para atender las puntas de carga de la variación diaria, es obvio que la llegada de sedimento a tales obras acabaría de llenar e inutilizarlas en pocos años, obligándose a las compañías eléctricas invertir grandes sumas en la ejecución de dragados de rehabilitación.

Los desarenadores persiguen, entonces, el objeto de eliminar totalmente la arena de tamaños intermedios y fina y reducir el contenido en arcilla. Existen variados tipos que han tenido resultados, unos más otros menos satisfactorios. Anticipándose a las conclusiones que ha arrojado el estudio de estos desarenadores, se puede afirmar que la separación de la arcilla o en general de las materias coloidales no es viable económicamente, de modo que deben proveerse los estanques de sobrecarga de todas maneras de un sistema de dragado o de una instalación de evacuación especial.

Todos los desarenadores actualmente existentes se basan en el principio de aumentar la sección transversal de escurrimiento, a causa de lo cual se reduce substancialmente la velocidad y por lo tanto la turbulencia, de manera que las partículas en suspensión pueden decantarse libremente. Existen algunos diseños diferentes para lograr este objetivo, como son los desarenadores con alimentación por vertedero lateral y el desarenador con embudo frontal de entrada. Según el tipo de operación se clasifican en desarenadores de funcionamiento continuo o intermitente.

Los ejemplos chilenos son casi todos del tipo intermitente, evacuándose los decantadores cada cierto tiempo, cuando el espesor del depósito así lo exige. Se describirán a continuación los desarenadores de alimentación por vertedero lateral a los cuales pertenecen las obras de Queltehues, Puntilla y Sauzal.

DESARENADORES DE QUELTEHUES

La central Queltehues de 36.000 kw. de potencia instalada se abastece con agua proveniente de la central Volcán y por un canal de 14 km. de longitud que toma agua del río Maipo. A 500 m. de la bocatoma se encuentra el sistema de dos desarenadores que han sido proyectados para desarenar $14 \text{ m}^3/\text{seg}$. Ambos estanques tienen un ancho de 80 m. y una longitud de 30 m. cada uno, medidos en la dirección teórica del escurrimiento, alimentándose el vertedero de entrada desde un canal de aducción de sección constante.

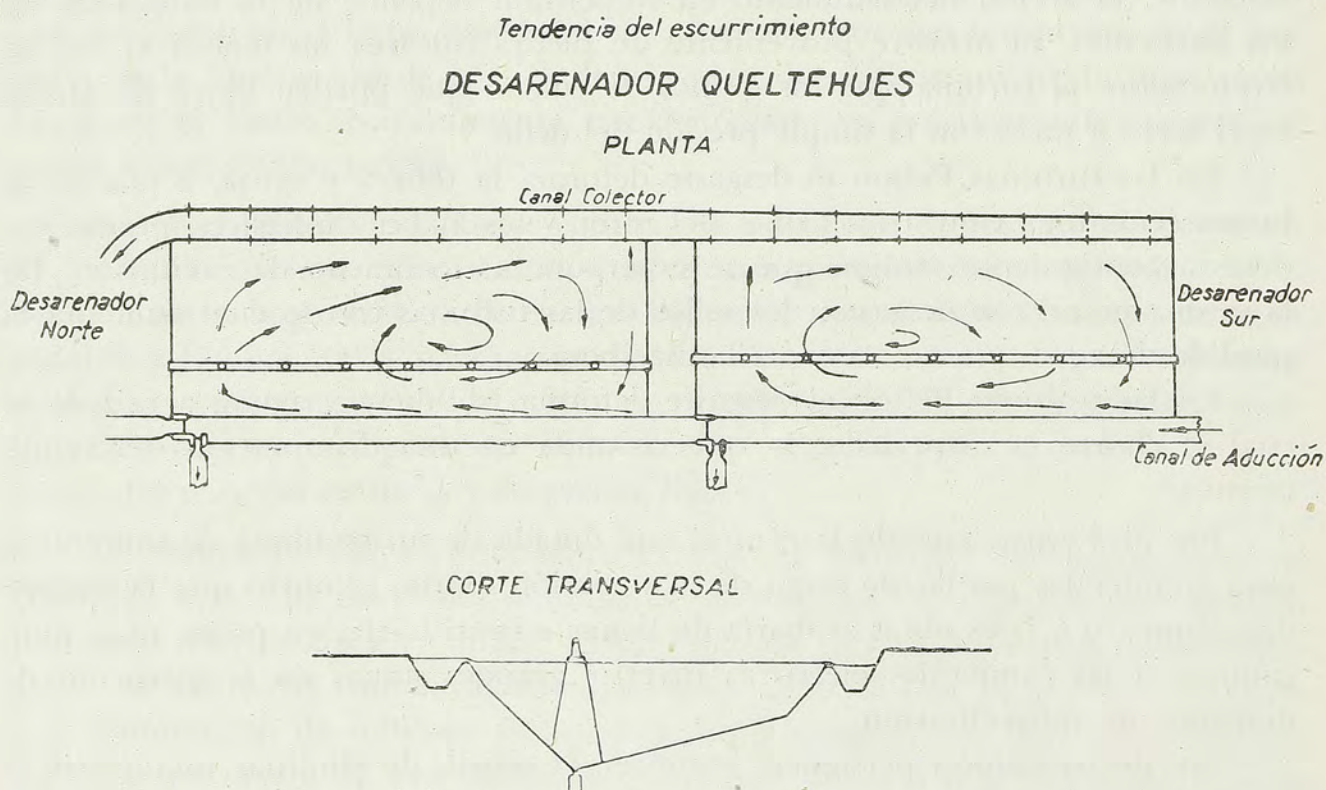


Fig. 1

El agua abandona los desarenadores por encima de un vertedero, recojiéndose en un canal de sección variable. Las 7 válvulas destinadas a limpiarlos están alineadas paralelamente al vertedero, línea en la cual se tiene una profundidad máxima de 8 m. Las válvulas se manejan desde puentes de maniobra

que atraviesan los dos desarenadores respectivamente. El canal colector posee 16 orificios comunicados en partes iguales con ambos decantadores. El vertedero de entrada está dotado de cortinas de hierro que se pueden bajar cuando se quiere impedir el paso del agua de la aducción a los estanques decantadores.

La arena en suspensión ya empieza a decantarse en el canal de alimentación causa por la cual es forzoso proceder a la limpieza periódica de dicho canal, debiéndose interrumpir durante el lapso, el abastecimiento de la central. Por efecto de la gran velocidad del agua al pasar por encima del vertedero, se produce un escurrimiento oblicuo sobre éste, de modo que los filetes líquidos aguas abajo del vertedero son prácticamente paralelos a él.

Se comprende que este fenómeno redunde en una gran perturbación dentro de los decantadores. A esto se agrega el hecho que el gasto total de $14 \text{ m}^3/\text{seg.}$ no se reparte en forma igual entre ambos estanques, fluyendo el 60% de este gasto por aquel situado más aguas arriba. Durante el estudio que efectuó ENDESA en las épocas de verano de 1945 y 1946 se desarrolló una investigación detenida acerca de la repartición de las velocidades dentro de los desarenadores, haciendo uso de un flotador que se podía graduar a diferentes profundidades. El resultado de estas observaciones demostró de manera concluyente que el gasto se concentraba en su mayor parte en el extremo norte de ambos desarenadores, donde la velocidad alcanzaba valores de 50 cm./seg. una vez limpiados los estanques, para aumentar a más de 1 m./seg. cuando ya se acercaba el momento de la próxima operación de desalojamiento de las arenas depositadas. En cambio, en las zonas restantes de los desarenadores el agua estaba provista de un movimiento circulatorio, siendo muy lenta la renovación del líquido. Este hecho se corrobora por la circunstancia que los mayores embanques, casi de 4 m. de espesor, estaban ubicados precisamente en las zonas de mayor escurrimiento.



Fig. 2

En lo que se refiere a la operación de limpieza, se efectúa en el verano con periodicidad semanal, alargándose el período a medida que va disminuyendo el gasto sólido. Para desalojar la arena de un desarenador, se corta el acceso al bajar las cortinas sobre el vertedero respectivo y se abren a continuación las válvulas de fondo, por las cuales se vacía el estanque arrastrándose al

mismo tiempo gran parte del embanque. La evacuación se produce a través de un túnel que bota el agua al río. Se ayuda a completar la operación de lavado, abriendo alternadamente las compuertas que comunican el canal colector con el desarenador fuera de servicio. Una vez terminada la maniobra de limpieza de un desarenador, que demora entre 3 y 4 horas, se le llena, para proceder en forma análoga con la segunda unidad, la que mientras tanto había estado absorbiendo el gasto total.

DESARENADORES DE PUNTILLA

La central hidroeléctrica Puntilla, perteneciente a la Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones, es abastecida por un canal de 14 km. de longitud de propiedad de una sociedad de agricultores que aprovecha alrededor de $6 \text{ m}^3/\text{seg.}$ del total de $23 \text{ m}^3/\text{seg.}$ que conduce el canal.

Como la desarenación del caudal total hubiera significado una inversión adicional, la Compañía se decidió, cuando procedió a la ampliación de su planta hidroeléctrica el año 1948, a construir un nuevo desarenador inmediatamente aguas arriba de la antigua instalación desarenadora de funcionamiento continuo. Para el nuevo diseño se recurrió al mismo tipo de entrada por veredero lateral. Las condiciones topográficas imponían una solución de mínimo espacio, compatible con el efecto de decantación deseado. Por este motivo los estanques son curvos, como se puede apreciar en el esquema.

Cada uno tiene un desarrollo medio de 63 m. y el largo asciende a 20 m. La profundidad máxima alcanza a 7 m. Para el efecto de la evacuación del

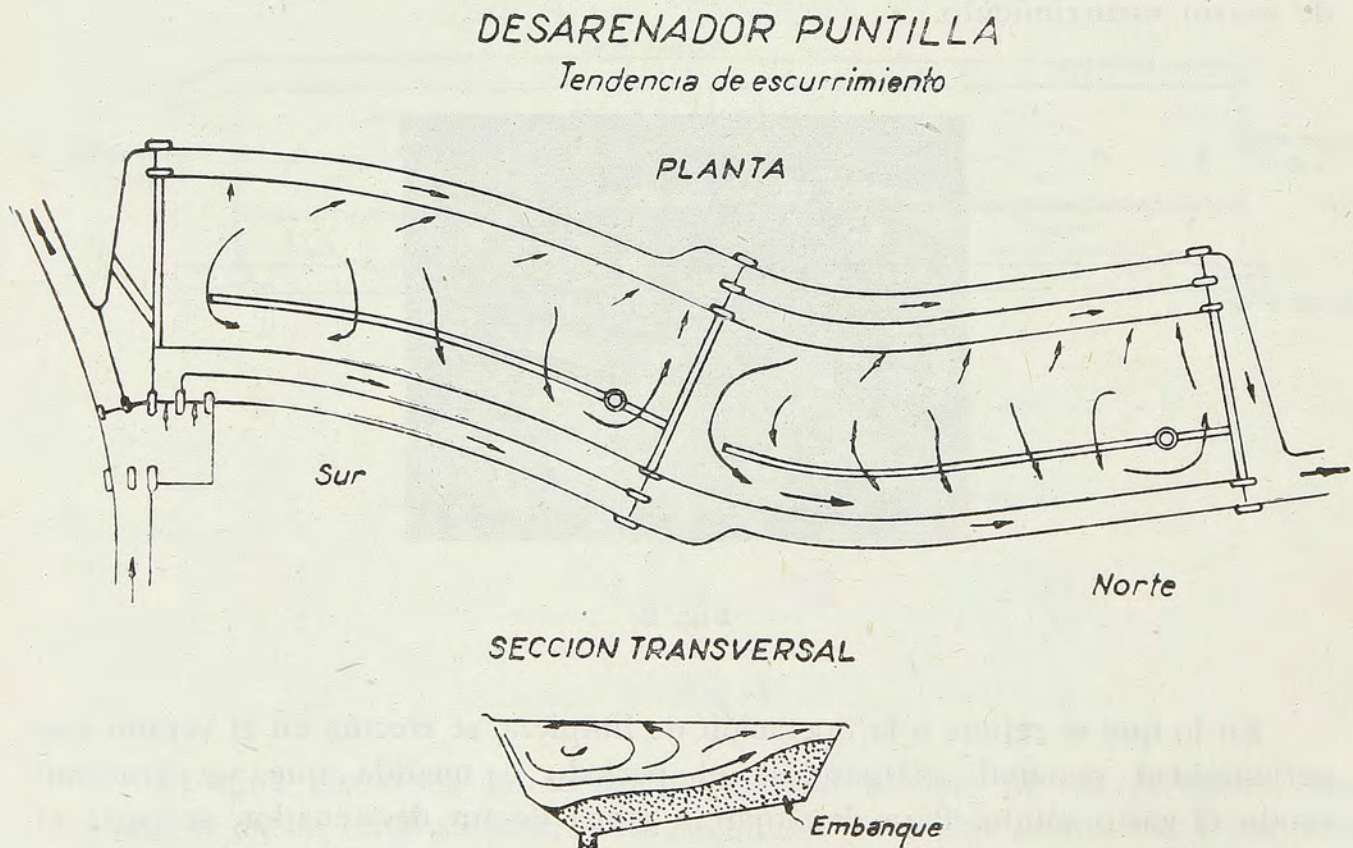


Fig. 3

embarque cada desarenador está provisto de una canaleta de fondo. Las canaletas tienen respectivamente en uno de sus extremos una válvula de descarga. Como se puede observar la relación entre dimensiones de profundidad y longitud es elevada.

Cada desarenador tiene su canal propio de aducción que puede cerrarse mediante su compuerta respectiva, ambos canales tuercen inmediatamente después en ángulo recto. La existencia de este codo produce una pérdida de carga de gran importancia. El líquido penetra a los desarenadores por encima de un vertedero sumergido. Para disminuir la turbulencia se habían colocado tablo-nes frente al vertedero de entrada, con lo cual se logra que el agua de alimentación avanzase primeramente hacia el fondo de los estanques. En estas condiciones los decantadores ofrecen una superficie tranquila. Sin embargo, la investigación del escurrimiento evidenció que el escurrimiento uniforme era sólo aparente.

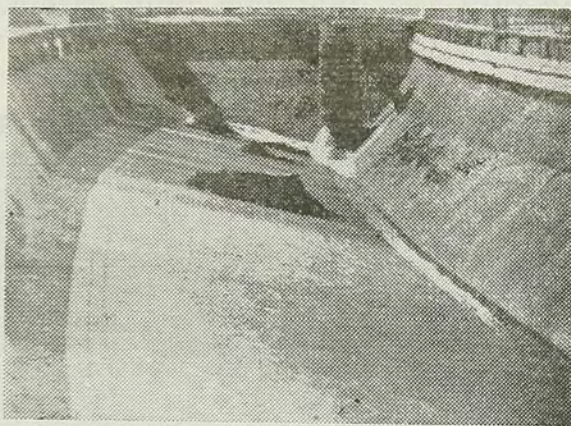


Fig. 4

Análogamente que en Queltehues se producen trayectorias caprichosas, volviendo inclusive agua del desarenador norte hacia el canal de alimentación. La disposición de la entrada como también la relación elevada entre profundidad y longitud origina fuertes componentes verticales de la velocidad. En consecuencia, existe una especie de rodillo de eje horizontal, avanzando el agua cerca del fondo en sentido del escurrimiento teórico para volver en la superficie hacia atrás. Por esta causa la arena decantada empieza a acumularse con preferencia cerca del vertedero de salida que también trabaja sumergido. Al distanciar mucho la operación de limpieza de los desarenadores suele llegar el embanque hasta la cresta del vertedero, para ser arrastrado en seguida hacia la cámara de carga. Como ambos vertederos trabajan sumergidos, el sistema de desarenación es influenciado por las condiciones de nivel en la cámara de carga.

En las épocas de crece los desarenadores deben limpiarse cada tres o cuatro días, siendo muy corta la maniobra correspondiente, la que es acelerada por compuertas de fondo entre los canales colectores y los desarenadores.

DESARENADORES DE SAUZAL

El tercer sistema de este tipo es el sistema de desarenadores de Sauzal. Ubicados a poca distancia de la salida del túnel O que conduce el gasto máximo de $58 \text{ m}^3/\text{seg.}$ desde la bocatoma, los dos estanques de decantación ofrecen un espectáculo impresionante con su longitud de 60 m. y su ancho de 50 m. cada uno. Los cruza un esbelto puente colgante que permite el acceso a las torres de las válvulas de fondo. En relación a la gran superficie, la profundidad de 6 m. es pequeña. Los taludes son suaves y no existen en consecuencia componentes verticales de velocidad de importancia.

Con el objeto de conseguir una carga constante sobre el vertedero de entrada se ha diseñado el canal de aducción de sección variable. Nuevamente se observa que el agua escurre prácticamente paralela a lo largo del vertedero para enderezarse recién cuando las masas líquidas en movimiento chocan con el muro medianero en el desarenador 1 y con el borde en el desarenador 2. También en Sauzal se procedió a estudiar las trayectorias mediante el uso del flotador, manifestándose otra vez una zona muy extensa en la cual el agua circula en forma irregular.

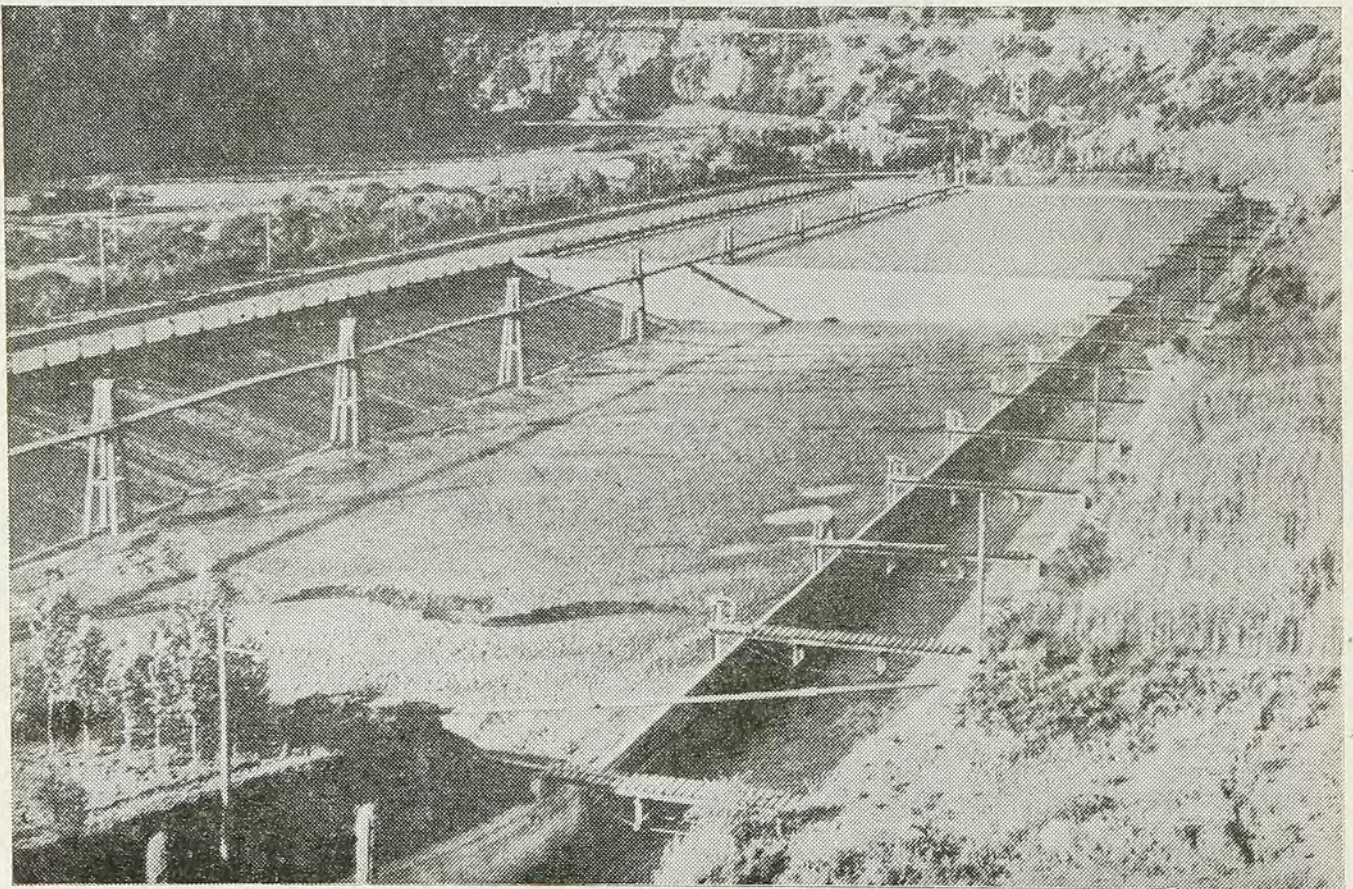


Fig. 5

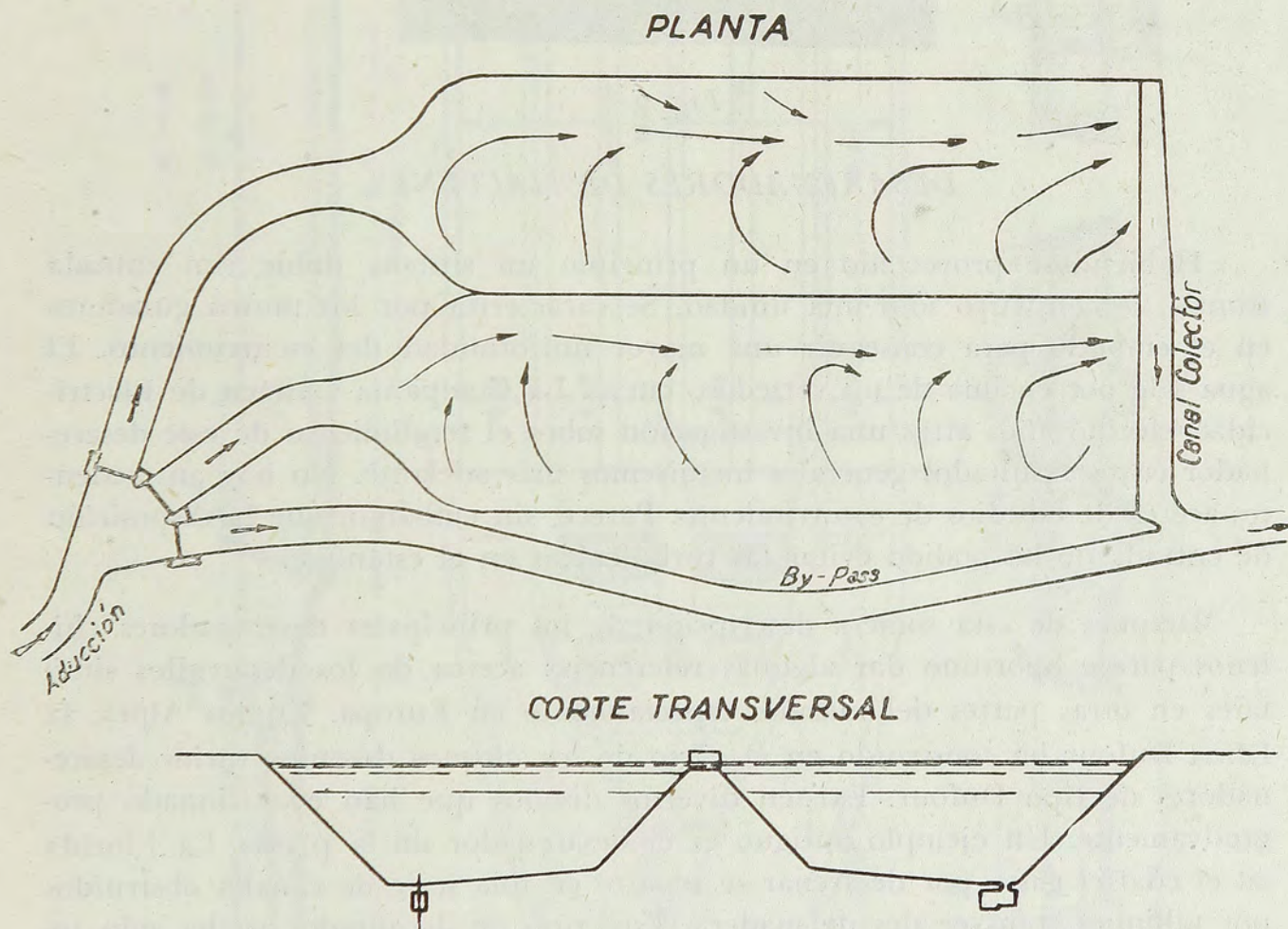
A lo largo del canal de aducción se acumula un embanque de la arena más gruesa que se desaloja continuamente por las compuertas de fondo para no correr el riesgo de que se obstruyan los orificios. En lo que se refiere a los embanques de los desarenadores no se deja acumular un depósito de más de 1 m. de espesor. Esta precaución obliga a limpiar durante los meses de deshielo cada

cuatro días. Para esta operación cada unidad permanece a veces hasta 24 horas fuera de servicio. Por consiguiente, cada segundo día prácticamente trabaja un solo desarenador. La demora considerable para efectuar la limpieza es ocasionada por la característica arcillosa y compacta del embanque en una gran extensión. El embanque frente al vertedero de entrada es eliminado totalmente abriendo algo las cortinas que cierran el paso sobre el vertedero. El agua del canal colector es admitida por unas compuertas de fondo y distribuída por una canaleta especial con el objeto de arrastrar el embanque del talud de aguas abajo del desarenador.

El tipo de desarenador con embudo frontal de entrada está representado por Volcán y Maitenes.

DESARENADORES DE VOLCAN

El sistema consiste en dos desarenadores de aproximadamente 100 m. de longitud y 28 m. de ancho cada uno. Un poco antes de los decantadores se ramifica el canal de aducción en los canales alimentadores y el by-pass. Debido de las curvas que preceden a los embudos de entrada, también en este caso se produce un escurrimiento irregular, con la consiguiente reducción de sección útil, lo que está indicado en forma esquemática en la figura adjunta. En el



DESARENADOR VOLCAN

Tendencia del escurrimiento

Fig. 6

estudio efectuado en Volcán quedó de manifiesto que el viento, que solía soplar con cierta intensidad, influencia el escurrimiento de las napas superiores. El caudal abandona los desarenadores por encima de un vertedero recto. Ambos decantadores están conectados entre sí, porque el nivel de agua es algo más elevado que el muro divisorio, pudiéndose cerrar esta comunicación por compuertas.

La limpieza de los desarenadores se efectúa durante los meses de crece semanalmente sin mucha dificultad en unas 4 horas por cada uno. Se aprovecha agua del desarenador en funcionamiento y un pequeño gasto por el embudo de entrada. El espesor máximo, determinado por sondajes, no alcanza a 2 m.

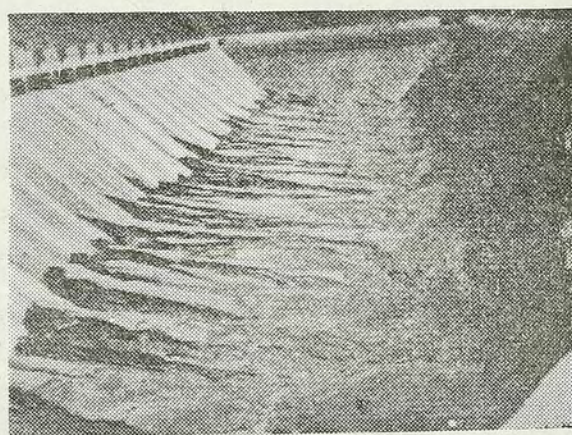


Fig. 7

DESARENADORES DE MAITENES

Habiéndose proyectado en un principio un sistema doble con entrada frontal, se construyó sólo una unidad. Se caracteriza por los muros guadores en el embudo para conseguir una mayor uniformidad del escurrimiento. El agua sale por encima de un vertedero curvo. La Compañía Chilena de Electricidad efectuó años atrás una investigación sobre el rendimiento de este desarenador cuyos resultados generales incluiremos más adelante. No hay antecedentes acerca de estudios de escurrimiento. Parece, sin embargo, que la disposición de entrada no ha podido evitar las turbulencias en el estanque.

Después de esta somera descripción de los principales desarenadores chilenos parece oportuno dar algunas referencias acerca de los desarrollos similares en otras partes del mundo, especialmente en Europa. En los Alpes, la firma Dufour ha construido en el curso de los últimos decenios varios desarenadores de tipo Dufour. Existen diversos diseños que han evolucionado progresivamente. Un ejemplo antiguo es el desarenador de la planta La Florida en el cual el gasto por desarenar se reparte en una serie de canales obstruidos por tabiques transversales de madera. Este tipo de decantador ya ha sido totalmente abandonado. En uno de los diseños más modernos, el sistema de desarenadores está precedido de un canal rectangular de paredes muy lisas para cada decantador. Como el escurrimiento en dichos canales es bien uniforme se logra ya una desarenación de las napas superiores de agua, de modo que sólo es necesario hacer pasar las napas inferiores por los desarenadores pro-

piamente tales. Esto se consigue mediante una losa partidora horizontal. El caudal que escurre sobre esta losa se desvía a través de canales by-pass.

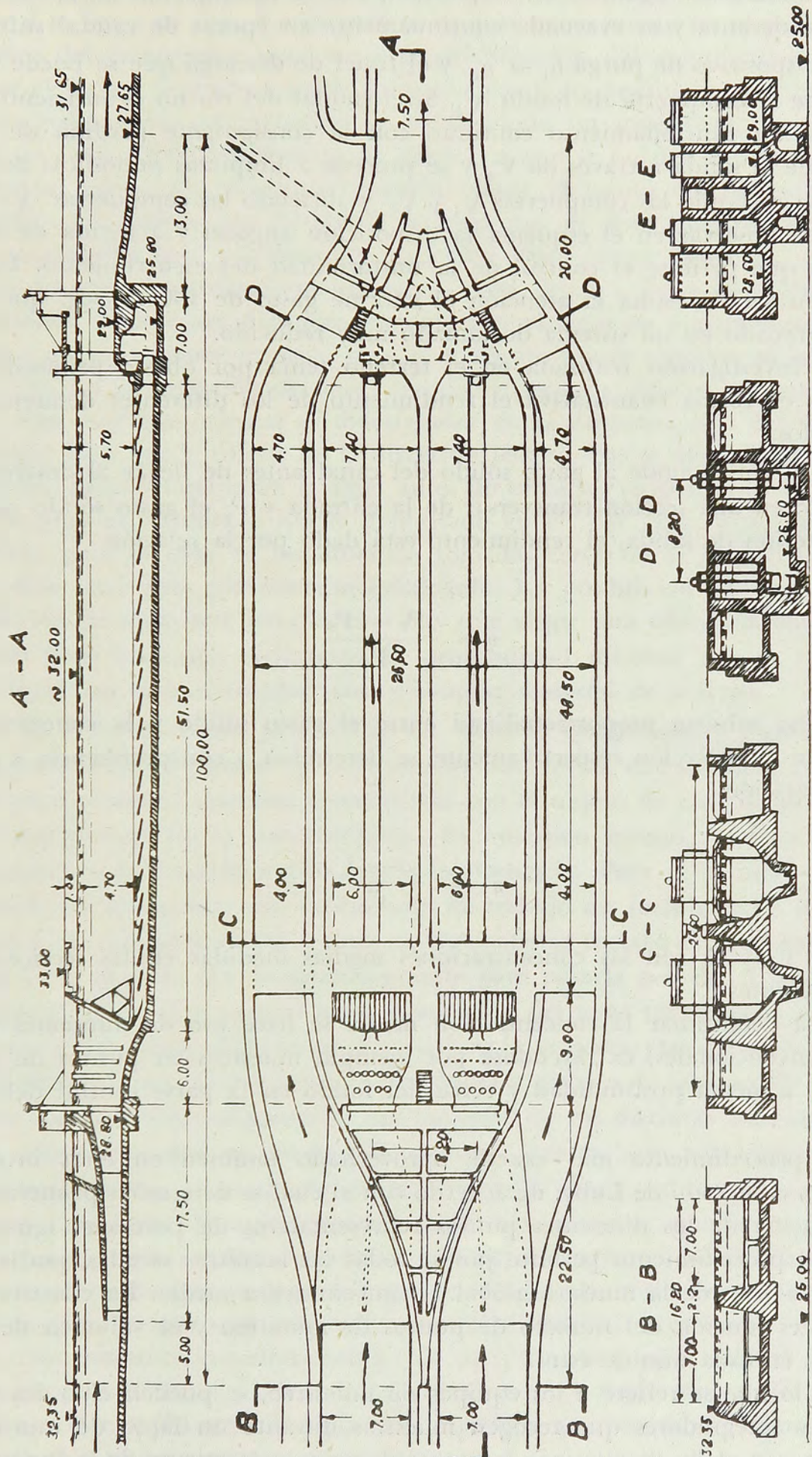


Fig. 8

El canal que capta la parte inferior sufre un ensanchamiento paulatino provisto de una barras tranquilizadoras de la corriente y de una reja para eliminar materias orgánicas en suspensión. Por la disminución de la velocidad la arena decanta y es evacuada continuamente en épocas de caudal suficiente por el dispositivo de purga $u_1 - u_n$ y el túnel de descarga que se puede cerrar mediante la compuerta de fondo V_4 . Si el caudal del río no es suficiente para permitir un funcionamiento continuo con la consiguiente pérdida de agua, se impide la salida a través de V_4 y se procede a limpiezas periódicas de corta duración cerrando las compuertas V_1 y V_2 y abriendo las compuertas V_3 y V_4 . Se puede observar en el esquema la disposición angosta y alargada de los estanques que permite el control de la uniformidad del escurrimiento. Para el caso considerado llama la atención el enorme gasto de $100 \text{ m}^3/\text{seg.}$ que debe ser desarenado en un sistema de tamaño muy reducido.

La investigación realizada en el terreno tenía por objeto primordial establecer en forma cuantitativa el rendimiento de los diferentes desarenadores estudiados.

Si P_e corresponde al gasto sólido del canal antes de llegar al desarenador avaluado en una sección transversal de la entrada y P_s el gasto sólido medido en la sección de salida, el rendimiento está dado por la relación

$$\eta = \frac{P_e - P_s}{P_e}$$

Como subsiste proporcionalidad entre el gasto sólido y la concentración media en cada sección respectivamente, se determina η con preferencia a partir de la ecuación

$$\eta = \frac{C_e - C_s}{C_e}$$

en que C_e y C_s son las concentraciones medias medidas en las secciones correspondientes.

Para determinar la concentración media se hace uso de diferentes muestreos convencionales, extrayéndose por ejemplo muestras en puntos de la superficie, a media profundidad y cerca del fondo en la parte central del río o canal.

El procedimiento más exacto, aprovechado también en estas investigaciones es el método de Luby, de acuerdo con el cual se determina primeramente la ubicación de los diferentes puntos representativos de porciones iguales de gasto. El procedimiento permite juntar todas las muestras sacadas, pudiéndose calcular a base de la muestra global la concentración media. La exactitud del método es función del número de puntos de muestreo y el volumen de agua extraída en cada uno de éstos.

En lo que se refiere a los equipos de muestreo, se pueden citar los muestreadores integradores que recogen muestras durante un lapso de uno o dos minutos, con el fin de eliminar la fuente de error proveniente de la fluctuación

instantánea de la concentración. Para usar dichos instrumentos se puede extraer todo el volumen de agua en un mismo punto de la sección considerada, o bien se llenan con agua proveniente de toda una vertical, moviéndolos lentamente a lo largo de ésta. La diferencia de presión existente en el exterior y el interior del mustreador ocasiona una perturbación del escurrimiento alrededor de él, lo que se traduce en un falseamiento de los resultados.

Para reducir esta perturbación se ha diseñado un mustreador que consiste de un tubo cilíndrico provisto de dos tapas que se pueden cerrar simultáneamente al actuar un mecanismo especial desde el punto del operador. En los estudios efectuados por ENDESA se hizo uso de este tipo trabajándose con mustreadores de 1 y 2 litros de capacidad. Para operar con ellos se fijan a barras de acero lo suficientemente largas para llegar a la profundidad máxima deseada. La presión dinámica ejercida por el agua en movimiento sobre el equipo, obliga a poner tirantes, pues la barra no puede absorber el esfuerzo por flexión. En la operación del muestreo deben tomarse algunas precauciones. Desde luego, hay que orientar el mustreador en la dirección real del escurrimiento que bien puede diferir de la dirección teórica. No se debe mantener el instrumento mucho tiempo en el agua antes de cerrarlo, ya que se corre el peligro que algo de sedimento quede depositado en él. Por otra parte, hay que cerciorarse, para el caso de las muestras tomadas cerca de la superficie, que todo el aire haya sido previamente desalojado. La posibilidad de embanques en la sección de muestreo, para la cual hay que elegir una ubicación con escurrimiento bien uniforme, determina la profundidad máxima con la cual se puede llegar con el mustreador para no captar material de acarreo.

En las investigaciones practicadas en Volcán, Queltehues y Puntilla, se fijaron previamente 9 puntos en cada sección transversal, extrayéndose en cada uno de estos puntos 3 muestras consecutivas con el objeto de compensar la variación instantánea de la concentración. El muestreo mismo requiere cierta pericia sobre todo cuando existe mucha turbulencia. Para el número de 27 muestras había que contar con media hora de trabajo sin incluir todos los preparativos y el transporte de los frascos en los cuales se vaciaba el agua extraída. El total de la muestra era demasiado grande para pasarla por papel filtro. En consecuencia, hubo que recurrir a la decantación del agua muestreada, que requería más de 24 horas. Eliminada el agua limpia se podía proceder a la filtración del residuo. La próxima etapa correspondía a trabajo de laboratorio donde se clasificaba el sedimento mediante un tamizaje en sus distintas fracciones de tamaño decreciente que se pesaban finalmente. Este trabajo era bastante engorroso; sobre todo, el tamizado de las muestras exigía mucho tiempo. En Sauzal las cantidades de agua extraídas eran aún mayores, pues ascendían a los 90 litros por cada sección. Para hacer más expedito el procedimiento de trabajo y considerando que en primer lugar interesaba el rendimiento de los desarenadores para la arena en suspensión, se simplificó el procedimiento haciendo pasar las muestras inmediatamente por un juego de tamices de 40 mallas de abertura $d = 0,42$ mm., 100 mallas de abertura $d = 0,143$ mm. y 200 mallas de abertura $d = 0,074$ mm. Del material fino que atravesaba el último tamiz se recogió sólo una muestra representativa.

Entre todas las investigaciones practicadas, la serie más larga de muestras se efectuó en Sauzal. Se iniciaron en verano de 1949 para proseguirlas desde noviembre del año pasado. En el gráfico siguiente aparecen varias curvas referentes a la central Sauzal, que son:

1. Curva de variación del gasto del río Cachapoal.
2. Curva de la temperatura media diaria.
3. Curva de la concentración total en la entrada al desarenador.
4. Curva de concentración de sedimento $> 0,074\text{mm}$.

Durante el estudio efectuado en Sauzal no estuvo en servicio el estanque de sobrecarga, debido a lo cual el gasto exigido por la central fué regulado por maniobras en la bocatoma. En consecuencia, el régimen de escurrimiento de los desarenadores era sumamente irregular y el rendimiento η es función de dos variables que son el gasto del canal y la concentración del agua de alimentación. A pesar de disponer de un número relativamente grande de muestras no ha sido posible establecer una relación empírica entre η , C_e y el caudal Q . La disminución de la eficiencia para aumentos de gasto parece compensarse algo por un mejor aprovechamiento de la sección transversal de los decantadores, de la cual trabaja actualmente tal vez la tercera parte en forma efectiva. Se ha podido comprobar durante la limpieza del desarenador 2, que el rendimiento de una sólo unidad era sensiblemente igual a la eficiencia conjunta de ambas unidades, motivado tal vez por el hecho que el vertedero de entrada trabajaba en una cierta extensión como vertedero frontal. De esta manera se enderezaban las trayectorias líquidas a través de los desarenadores. Para mayores concentraciones totales de sedimento aumenta el porcentaje de partículas más pesadas, lo que se traduce en un mejor rendimiento.

Considerando las discrepancias observadas entre los diversos muestreos salta a la vista que conviene reunir el mayor número de antecedentes posible. Ciertamente la laboriosidad de los procedimientos empleados dificulta la obtención continua de muestras, pues se requiere personal que esté constantemente dedicado a estos trabajos.

Se ha confeccionado un cuadro comparativo de varios desarenadores chilenos. Los antecedentes se refieren a valores medios de experiencias de verano, habiéndose indicado debajo de cada nombre la época a la cual se refieren los datos correspondientes. A continuación aparecen para ambas secciones de muestreo valores medios de la concentración total de sedimentos, como también los valores relativos de la concentración de sedimento de diámetro hipotético mayor y menor que $0,074\text{ mm}$. En forma análoga se han clasificado los diversos rendimientos obtenidos.

Para poder hacer una comparación de los distintos desarenadores, se ha indicado más abajo el volumen de agua de los diferentes sistemas y el tiempo de paso para cada uno de ellos, definido por el tiempo teórico que necesitaría el agua para renovarse totalmente. Por último aparece la velocidad teórica de decantación de las partículas más chicas retenidas en los desarenadores y el tamaño de éstas.

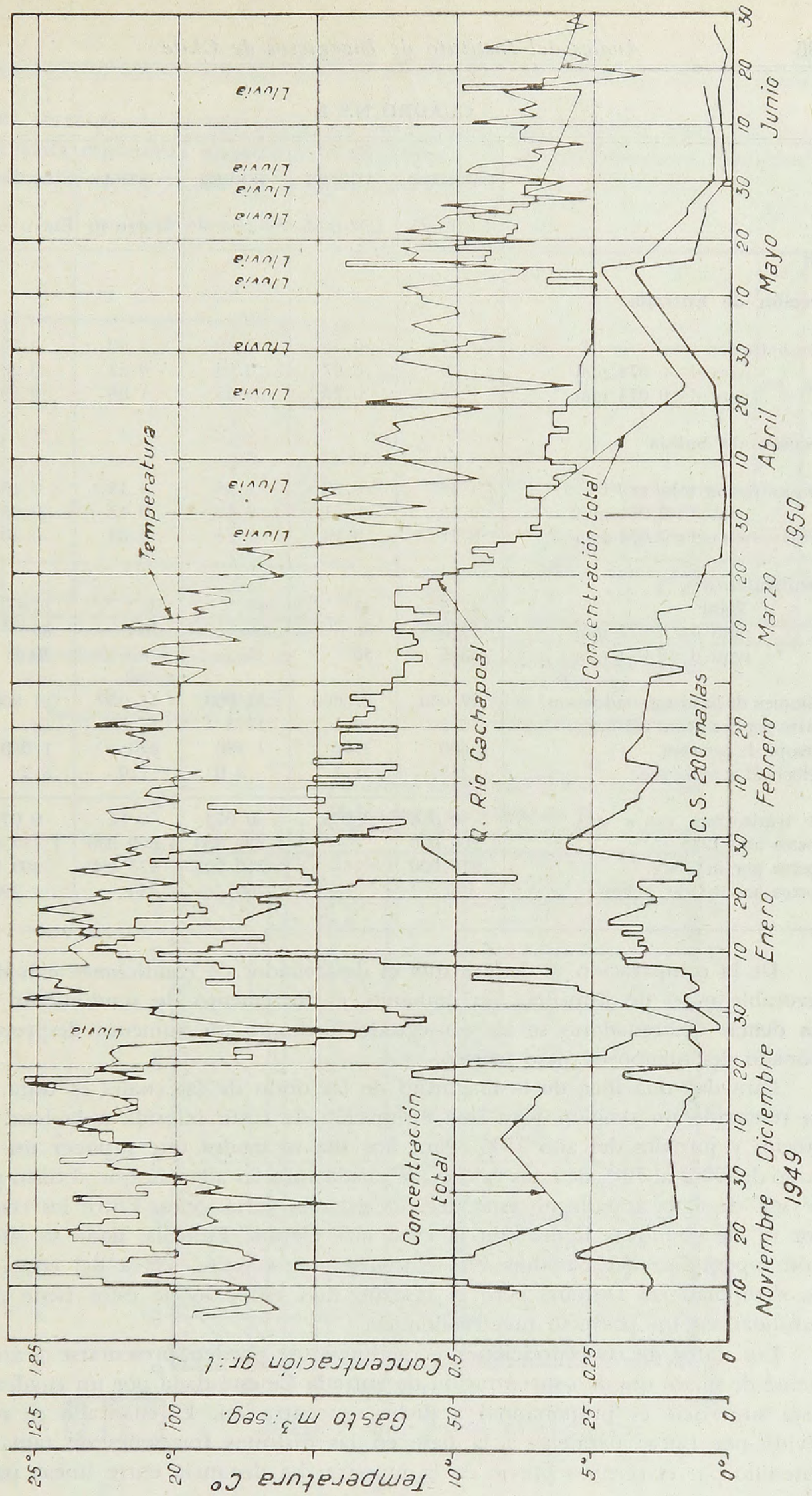


Fig. 9

CUADRO N.º 1

	MAITENES	VOLCAN	QUEL- TEHUES	PUNTILLA	SAUZAL
	Enero 25	Enero 46	Febrero 46	Marzo 46	Enero 49-50
Sección de Entrada					
Concentración total gr / l	2.55	0.35	2.30	1.60	0.70
» para $d > 0.074$ mm	1.40	0.07	0.95	0.52	0.20
» para $d < 0.074$ mm	1.15	0.28	1.35	1.08	0.50
Sección de Salida					
Concentración total gr / l	1.35	0.20	1.35	1.15	0.45
» para $d > 0.074$ mm	0.58	0.01	0.12	0.12	0.05
» para $d < 0.074$ mm	0.77	0.19	1.23	1.03	0.40
Rendimiento η %					
Total	47.5	45	45	31	35
para $d > 0.074$ mm	59.0	86	86	76	83
para $d < 0.074$ mm	33.5	30	15	8	20
Volumen de los desarenadores m ³	17.000	27.000	23.000	11.000	61.000
Gasto por desarenar m ³ / seg.	10.5	9.5	14.5	17.5	58
Tiempo de paso seg.	1.600	2970	1.580	620	1.050
Velocidad w mm / seg.	2.5	1.7	3.0	7.0	3.2
dé teórico mm. con $\sigma = 1$	0.066	0.055	0.073	0.11	0.075
Costos año 1945	3.200.000	—	4.500.000	4.800.000	1.750.000
Costos por m ³ / seg.	310.000	—	310.000	275.000	300.000
Costos por m ³ de volum.	190	—	200	430	290

De la comparación se deduce que el desarenador de condiciones más desfavorable es el de Puntilla. Sin embargo, el incremento de rendimiento de los demás desarenadores se ha conseguido mediante un aumento desproporcionado del tiempo de paso teórico.

Para dar una idea de la magnitud de las obras de las cuales se trata, se ha reservado un renglón para una estimación de costo referida a la base de precios y jornales del año 1945. Para hoy día se tendrá que suponer un recargo del 60% al 70% de estos valores. Se puede apreciar además, que el costo por m³/seg. de agua tratada no está afecto a grandes variaciones. Entre los costos por m³ de estanques figura con la cifra más elevada Puntilla, dada su situación topográfica desfavorable. No se tienen antecedentes acerca del costo de los desarenadores Dufour, pero el tamaño más reducido de éstos tiene que redundar en un proyecto más económico.

Los datos de concentraciones y rendimientos pueden presentarse gráficamente de modo que la concentración de entrada C_e esté dada por un cuadrado cuya superficie es proporcional a dicha concentración. El cuadrado se subdivide por líneas paralelas a la base en las distintas fracciones de tamaño, obtenido por el cernido previo de la muestra. La distancia entre líneas para-

las corresponde al porcentaje en peso de la concentración total. La parte achurada representa el sedimento depositado en los desarenadores, indicándose el valor del η referente a cada tamaño.

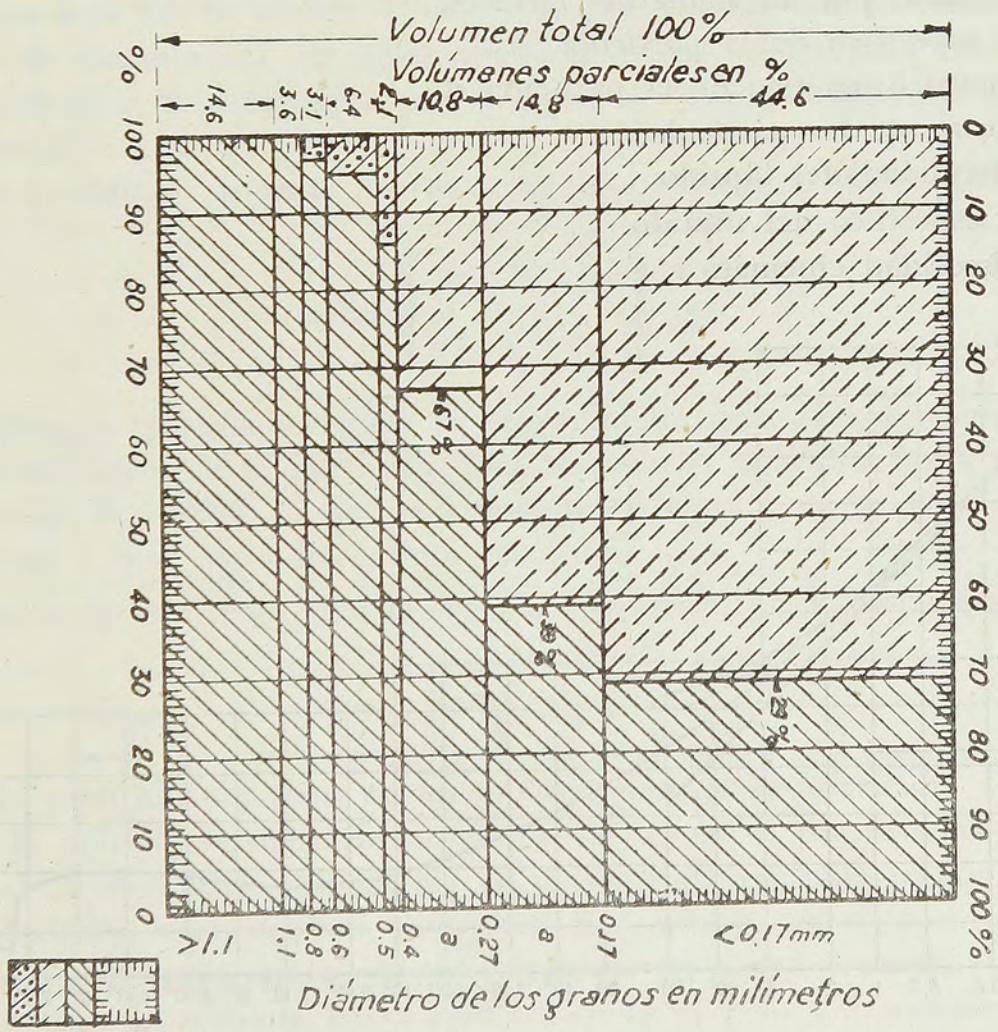
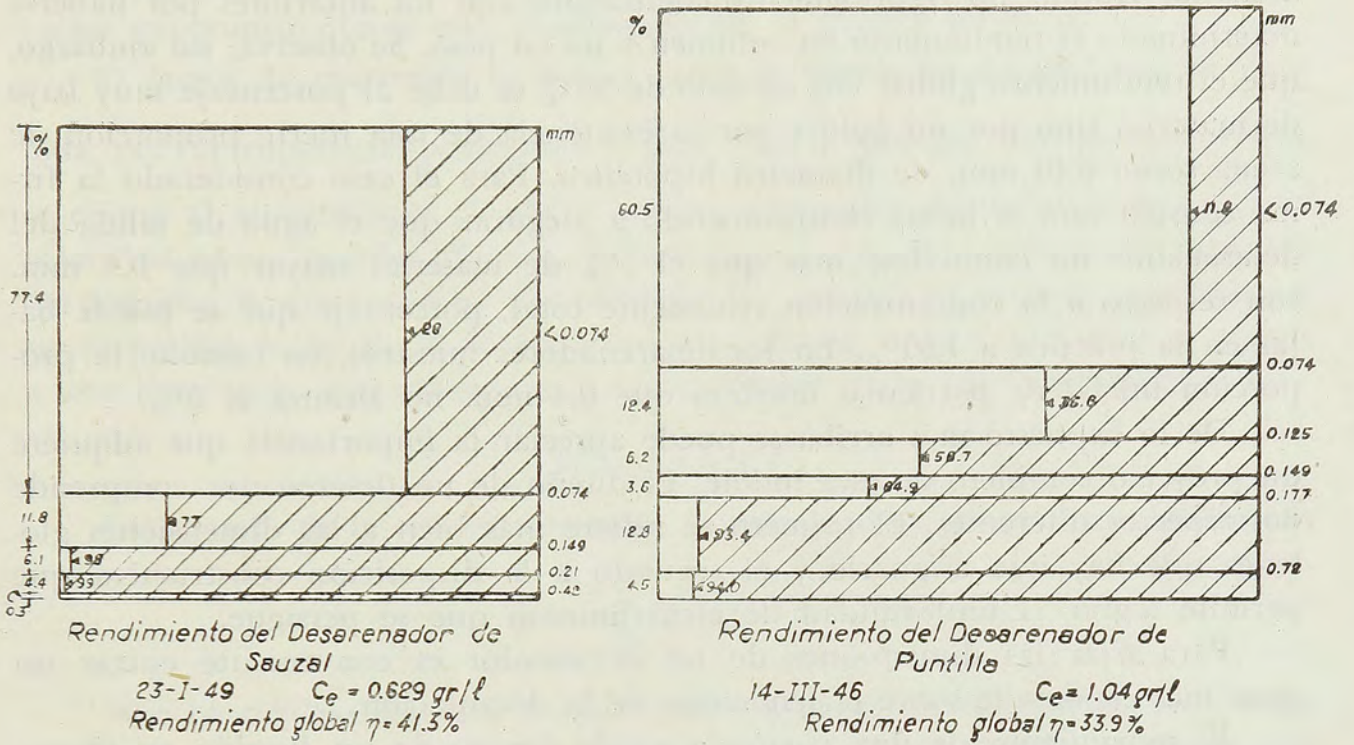


Fig. 10

Se acompañan gráficos de esta índole para muestras efectuadas en días determinados de Sauzal y de Puntilla (el gráfico de Puntilla representa un muestreo de resultados más desfavorable que el término medio). Para tener un índice de comparación se incluye también un gráfico análogo para un desarenador Dufour no rigurosamente comparable con los anteriores por haberse determinado el rendimiento en volumen y no en peso. Se observa, sin embargo, que el rendimiento global tan elevado de 55% se debe al porcentaje muy bajo de material fino por un lado y por la existencia de una fuerte proporción de arena sobre 0,40 mm. de diámetro hipotético. Para el caso considerado la firma constructora se había comprometido a asegurar que el agua de salida del desarenador no contuviese más que el 5% de material mayor que 0,4 mm. con respecto a la concentración remanente total, porcentaje que se puede bajar en la práctica a 1,55%. En los desarenadores nuestros, en cambio, la proporción inicial de partículas mayores que 0,4 mm. no alcanza el 5%.

De lo expuesto más arriba se puede apreciar la importancia que adquiere un proyecto completo de esta índole. El diseño de un desarenador comprende dos aspectos diferentes. El primero se refiere más bien a las dimensiones globales que hay que asignarle y el segundo a la disposición constructiva que permite lograr la uniformidad de escurrimiento que se persigue.

Para fijar las dimensiones de un decantador es conveniente entrar un poco más en detalle sobre el fenómeno de la decantación.

El movimiento de una partícula sólida dentro de un líquido en reposo es influenciado por los siguientes factores:

- Peso específico de la partícula γ_s
- diámetro hipotético de la partícula d ,
- la forma de las partículas,
- la viscosidad del líquido μ ,
- peso específico del líquido γ , y
- la viscosidad cinemática ν .

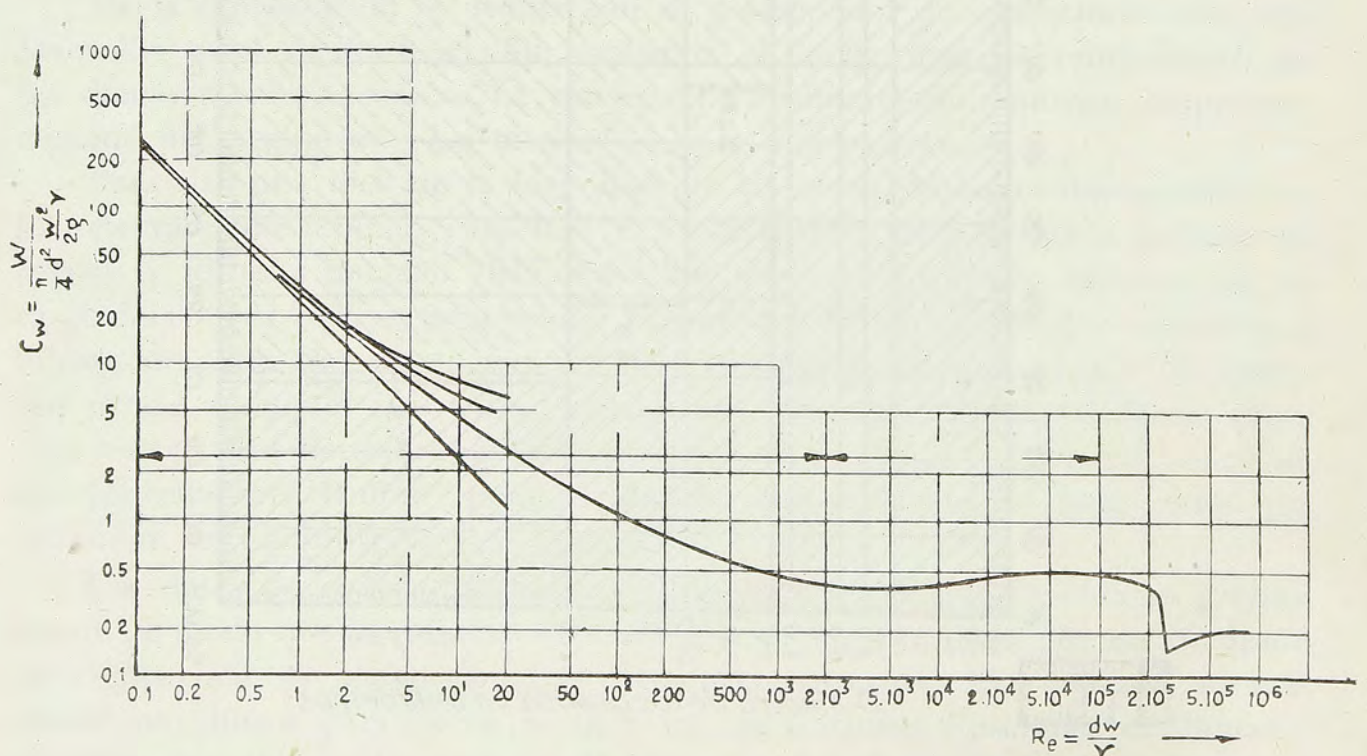


Fig. 11

No es posible expresar la velocidad de decantación w por una sola ley funcional. Con el objeto de reducir la multiplicidad de las variables que intervienen en el fenómeno se ha determinado el factor de resistencia c_w de una partícula en función del número de Reynolds R_e correspondiente; ambas variables son números abstractos. El resultado de experiencias efectuadas por varios experimentadores está condensado en el gráfico adjunto.

El factor de resistencia se define como la fuerza de decantación W dividida por la superficie proyectada $\frac{\pi}{4} d^2$ y la presión hidrodinámica que se opone al movimiento. Es obvio que las partículas pequeñas caen con una velocidad menor que las grandes, de modo que, si no se modifica la viscosidad del líquido, R_e crece con el diámetro de la partícula. La curva que aparece en el gráfico se ha dividido en tres zonas. En la zona I la curva se acerca a una línea recta que obedece a la ley de Stokes dada por la relación

$$W = 3 \pi \mu w d$$

Despejando de la ecuación anterior la velocidad de decantación, se obtiene

$$w = \frac{1}{18} d^2 \frac{\gamma_s - \gamma}{\mu}$$

Sólo partículas pequeñas o que están animadas de velocidades muy bajas o que se muevan en un líquido muy viscoso para las cuales R_e es menor que 1 obedecen a la ley de Stokes. Para el caso en estudio sólo interesan las condiciones de decantación en agua; introduciendo valores para la condición $R_e < 1$ se llega a la conclusión que los granos de arena de $d > 0,14$ mm. ya no obedecen a la ley de Stokes.

Para la segunda zona de la curva rige la fórmula de Allen que es

$$w = \left[\frac{4g (\gamma_s - \gamma)}{30 \gamma \sqrt{\nu}} \right]^{2/3} d$$

Se observa que en este caso la velocidad de decantación resulta proporcional al diámetro de la partícula. Esta fórmula es aplicable hasta el número de Reynolds $R_e \leq 2000$, lo que corresponde en agua a un tamaño de aproximadamente 4 mm. para los granos de arena.

Para la tercera zona rige la ley de Newton-Rittinger dada por

$$w = \frac{2}{3} \sqrt{3 g d \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma c_w}}$$

cuya aplicación no interviene en los problemas de la desarenación.

En la práctica el sedimento que trae un canal se compone de partículas de todos tamaños cuyas velocidades de decantación en agua tranquila se pueden deducir de las relaciones anteriores. Por otra parte, si se dispersa en el laboratorio sedimento dentro de un recipiente de agua, se puede estudiar con disposiciones adecuadas la curva que relaciona el peso del sedimento depositado con el tiempo transcurrido. Se obtiene una curva como la indicada en la

figura. Como se conoce el camino recorrido por las diferentes partículas, se puede determinar en cada instante la velocidad de decantación w de aquellas, que se están depositando en el mismo momento. A base de las ecuaciones anteriores o experimentalmente es posible establecer entonces el tamaño d_i que corresponde a una velocidad w_i de la cual estas partículas están animadas.

Si se considera un intervalo t_i , el peso depositado hasta este momento será P_i y la inclinación de la tangente a la curva en el punto M representativo de esta situación $P' = \left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=t_i}$ indica el flujo de decantación de todas las partículas de diámetro menor o igual que d_i . El trazo BC representa el total de las partículas de $d < d_i$ que se están depositando en el fondo; por consiguiente el trazo OC proporciona el peso del total de partículas de $d \geq d_i$ contenidas en la suspensión inicial.

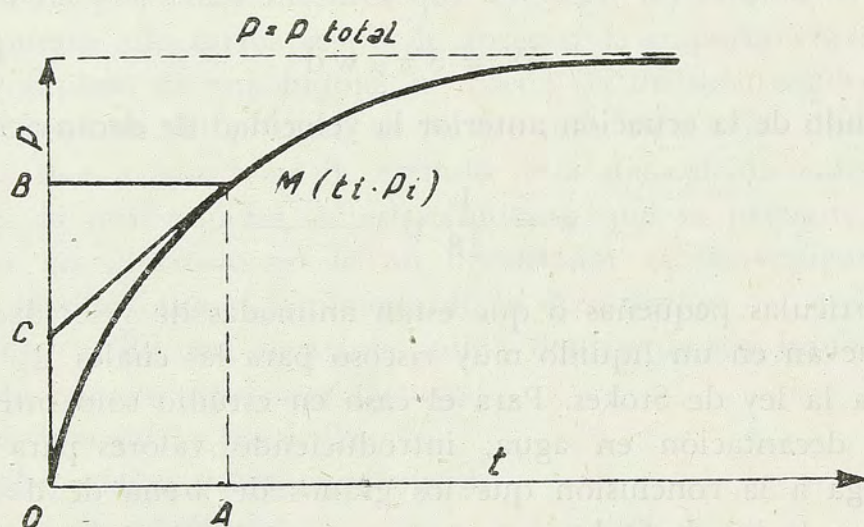


Fig. 12

Si se conoce el tipo de sedimento que arrastra un río o canal, se puede dibujar la curva anterior llamada también curva de Odén. En el eje de las abscisas se lleva el tiempo de decantación t y en escala variable los valores coordinados de w y d ; en ordenadas se lleva el sedimento depositado en función del peso total inicial. Si para el proyecto de un desarenador se desea desalojar totalmente las partículas de cierto tamaño $d > d_1$, es posible determinar la velocidad de decantación correspondiente y a través de la curva el porcentaje total eliminado y el porcentaje de material decantado que sea menor que d_1 . La partícula de diámetro d_1 determina en consecuencia la magnitud del desarenador, pues el agua tiene que estar animada de una velocidad tan pequeña, que dicha partícula haya logrado depositarse antes que el caudal sea evacuado. Para una profundidad h constante de los desarenadores el tiempo de paso por el desarenador está dado por la relación

$$t_1 = \frac{h}{w_1}$$

Por otra parte, si S es la superficie de los decantadores y Q el gasto que que los atraviesa, se obtiene

$$t = \frac{S h}{Q}$$

Se llega fácilmente a la relación $S = \frac{Q}{w_1}$, y en consecuencia a la conclusión que la superficie S que hay que adoptar es completamente independiente de la profundidad, de modo que para un proyecto económico es recomendable adoptar la profundidad mínima admisible con la formación del embanque.

Las consideraciones anteriores suponen que el escurrimiento a través de los decantadores sea perfectamente uniforme, pues en tales condiciones el sedimento se decantará como en un líquido en reposo. En la práctica subsisten siempre irregularidades del movimiento acentuadas para mayores velocidades del agua, lo que a su vez limita la profundidad mínima de los desarenadores. Las turbulencias inevitables obligan a introducir en la expresión que da la superficie de proyecto un coeficiente de seguridad σ , cuyo valor sólo puede ser ratificado por la experiencia. De esta manera se obtiene la ecuación

$$S = \sigma \frac{Q}{w_1}$$

El valor de σ se puede suponer variable entre 2 y 5 y depende en gran parte del segundo aspecto de diseño de un sistema de desarenación que se refiere a las condiciones de entrada y a la disposición general. Con el objeto de impedir corrientes circulatorias dentro de los desarenadores hay que lograr mediante un ensanche recto paulatino una entrada frontal uniforme. Simultáneamente debe subdividirse la superficie total del sistema en varios recintos independientes más pequeños, pues, aun asegurada una buena entrada frontal, es imposible controlar el escurrimiento en grandes extensiones afectadas por viento y diferencias de temperaturas. Para unidades angostas se pueden adoptar, de acuerdo con el criterio enunciado anteriormente, profundidades mucho menores que en las actuales lagunas de sedimentación, sin producirse inconvenientes de explotación con una sección transversal adecuada. La pequeña profundidad evita por otra parte turbulencias ocasionadas por componentes verticales de velocidad. El mayor número de estanques facilita la maniobra de limpieza de cada uno, durante la cual se encuentra fuera de servicio un porcentaje mucho más pequeño del sistema total que en las obras en funcionamiento en el presente.

Para futuros proyectos se recomienda la adopción de desarenadores que reúnan las condiciones antes enunciadas que en líneas generales son características del tipo Dufour. En lo que se refiere a las medidas aconsejables para mejorar el rendimiento de los decantadores de alimentación lateral existentes, se propone disponer frente a los vertederos de entrada tabiques de guía que tengan al principio una dirección paralela al escurrimiento sobre el vertedero para ponerse normal a éste a medida que se internan en el desarenador. Dichos tabiques o muros podrían terminar a unos 4 metros de distancia del borde de entrada.

Como conclusión final de los estudios efectuados se puede decir que las inversiones para desarenadores del tipo de laguna son desproporcionadas con los resultados obtenidos.