SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

X CONGRESO NACIONAL

GOLPE DE ARIETE EN TUBERIAS DE PVC Y ACERO EN ESTACIONES DE BOMBEO

JULIO PINEDA ARIAS (*)

Se presenta el caso de pruebas de golpe de ariete en una estación de Bombeo formada por una impulsión con tubería de PVC y una impulsión con tubería de acero. En las pruebas se efectuaron cortes de energía, registrando la onda de presión en manómetros inscriptores.

Se analiza el comportamiento de las tuberías de PVC y acero, comparando los resultados, con respecto al cálculo teórico, así como el comportamiento de los materiales entre sí y el funcionamiento de válvulas reguladoras de golpe de ariete.

La planta de bombeo corresponde a un proyecto de restitución de caudales de riego a canalistas de Antuco en las Centrales del Laja de ENDESA

(*) INGENIERO CIVIL. SECCION OBRAS CIVILES ENDESA

1.- INTRODUCCION

En instalaciones de bombeo, donde no existe un celador permanente, en que además no se cuenta con un sistema de control de golpe de ariete, y donde por razones de operación del sistema de abastecimiento de energía se producirán cortes periódicos de suministro, se hace necesario realizar pruebas de presión dinámica bajo la solicitación de golpe de ariete para diferentes condiciones de funcionamiento.

En la instalación que se presenta, se cuenta con bombas de eje vertical con motor exterior y bomba sumergida, ambas impulsiones constan de válvula de retención (check) y válvula de regulación de caudal. La válvula check, provoca el efecto conocido de impedir que, al producirse el corte de suministro de energía, el flujo inverso haga girar el rodete de la bomba en sentido contrario, con los efectos negativos que ello provoca; sin embargo este efecto produce sobrepresiones mayores a las que existirían sin la válvula mencionada.

A partir del análisis teórico del golpe de ariete, se resolvió instalar elementos de control en la impulsión de P.V.C. Estos elementos son válvulas diseñadas con el objeto de disminuir los efectos de variaciones de presión al interior de la tubería.

La válvula de control funciona de manera que al detenerse la bomba, y producirse la presión negativa ésta se abre permitiendo el ingreso de aire, evitando sobrepasar una presión negativa preestablecida. En la fase siguiente del fenómeno de golpe de ariete, la onda de presión positiva hace que la válvula se abra al sobrepasar un valor límite, logrando de este modo la regulación poniendo el sistema en contacto con la atmósfera y evacuando un cierto volumen de líquido.

2.- DESCRIPCION DEL SISTEMA DE BOMBEO

El sistema de bombeo esta formado por dos impulsiones, con dos bombas en paralelo en cada una. En la figura Nº 1 se presenta un esquema de la instalación.

La impulsión número 1 consta de dos bombas con caudal nominal de 125 l/s y altura de elevación total de 78 m.c.a. cada una La tubería de esta impulsión es de PVC, clase 10, de 355 mm de diámetro y 2.230 m de longitud. La altura geométrica de elevación es de 30 m.c.a. A la salida de cada válvula de regulación de caudal se encuentra una derivación en Tee de Ø = 4", en la cual se ha instalado la válvula de control de golpe de ariete, cuya descarga se orienta hacia el estanque de la planta de bombeo.

La impulsión Nº 2 está formada por dos bombas de caudal nominal 250 l/s cada una y altura de elevación 25 m.c.a. La longitud total de esta impulsión es de 620 m. La tubería es de acero de 6 mm de espesor, con 600 mm de diámetro en los primeros 270 m y 500 mm en los 350 m restantes. Aproximadamente a 250 m de la planta de bombeo, en la tubería de 600 mm, existe una derivación en Tee de 300 mm de diámetro y 15 m de longitud, que entrega 100 l/s a un canal intermedio. El caudal de esta derivación se ha ajustado mediante la instalación de una placa orificio.

En las tablas siguientes, se presentan las características de cada una de las impulsiones.

TABLA Nº 1

IMPULSION Nº 1

Nº de Bombas	2	
Potencia	145	HP c/u
Velocidad nominal	1.470	rpm
WR^2/Etapa	3.293	lb Ft^2
Caudal	125	l/s c/u
Altura Elevación	78	m.c.a.
Altura Geométrica	30	m.c.a.
Marca	Peabody Floway	
Modelo	14 FKH	
Etapas	5	
Tubería	PVC	
Longitud	2.230	m (355 mm)

TABLA Nº 2

IMPULSION Nº 2

Nº de Bombas	2	
Potencia	100	HP c/u
Velocidad nominal	1.470	rpm
WR^2/Etapa	9.499	lb Ft^2
Caudal	250	l/s c/u
Altura Elevación	25	m.c.a.
Altura Geométrica	15	m.c.a.
Marca	Peabody Floway	
Modelo	18 MKH	
Etapas	1	
Tubería	Acero	
Longitud T_1	270 m	(600 mm)
T_2	350 m	(500 mm)

3.- ANALISIS TEORICO

El cálculo teórico del golpe de ariete se ha realizado utilizando el método gráfico de Bergeron.

3.1 Hipótesis de cálculo

a) Hipótesis 1

Considerando la baja inercia de las bombas, y dado que no se encontraron antecedentes que permitieran realizar el cálculo para este tipo de bombas, en la aplicación del método gráfico, la recta de pendiente "2p", se prolongó directamente hasta la ordenada de presión p = 0 (figura Nº 2).

b) Hipótesis 2

Dado que en la impulsión Nº 2 existen dos singularidades, a saber, una reducción de 600 a 500 mm en el Km 0,270 y una derivación en Tee en el Km 0,250 y con el objeto de simplificar el cálculo, se ha supuesto que el efecto de la derivación compensa la sobrepresión producida a causa de la reducción, de diámetro. Por lo tanto, el cálculo se simplifica suponiendo una sola tubería de 620 m de largo y diámetro constante de 600 mm.

A partir de los resultados de las pruebas realizadas, se verificó que ambas hipótesis de cálculo fueron correctas ya que las presiones medidas son cercanas al planteamiento teórico y no sobrepasan los valores obtenidos del cálculo.

En las tablas siguientes se presentan los parámetros utilizados en el análisis teórico y los resultados de sobrepresión máxima para cada impulsión.

TABLA Nº 3

CAUDAL TOTAL	250 l/s
VELOCIDAD	3,1 m/s
VELOCIDAD ONDA	369 m/s
ALTURA ELEVACION	79 m.c.a.
RENDIMIENTO	84%
K_1	3,51
B	1,496
H/HR	1,49
PRESION MAXIMA	11,5 Kg/cm²

TABLA Nº 4

CAUDAL TOTAL	500 l/s
VELOCIDAD	1,77 m/s
VELOCIDAD ONDA	1400 m/s
ALTURA ELEVACION	25 m.c.a.
RENDIMIENTO	81%
K_f	3,94
B	10
H/HR	3
PRESION MAXIMA	7,5 Kg/cm²

4.- PRUEBAS REALIZADAS

A continuación se resumen las pruebas mas relevantes, de todos los ensayos realizados.

La pruebas se dividieron en tres series de medidas.

Serie Nº 1
Impulsión Nº 1

Serie Nº 2
Impulsión Nº 2, con derivación intermedia abierta.

Serie Nº 3
Impulsión Nº 2, con derivación intermedia cerrada.

Para el registro de las presiones se instalaron manómetros inscriptores en la salida de cada bomba, y en el inicio de la tubería común. Además se llevó registro instantáneo en un manómetro convencional ubicado en un punto intermedio de cada impulsión. Los manómetros inscriptores se muestran como "I" en la figura Nº 1, mientras el manómetro convencional se presenta con una "M".

El control de gasto se realizó por medidas paralelas, obtenidas de la curva características de las bombas y de aforos en la descarga de las impulsiones. A partir de los resultados obtenidos, y dado que en la mayoría de los casos la diferencia no superó el 6 % se adoptarán los valores obtenidos de la curva característica por ser más confiables.

5.- RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS PRUEBAS

5.1 Serie Nº 1. Impulsión Nº 1

Esta serie se refiere a las pruebas realizadas en la tubería de PVC, es decir, en la impulsión Nº 1. Ella fue diseñada para un gasto máximo de 250 l/s, con una altura manométrica de 78 m. c.a.

Las pruebas se realizaron con las bombas funcionando en forma alternada y en conjunto. Además, se consideraron situaciones con las válvulas de control de golpe de ariete cerradas y abiertas.

La serie de medidas se inició con los caudales inferiores para finalizar con el caudal máximo, el que alcanzó un total de 220 l/s. Este caudal resulto ser un 12 % inferior al de diseño, debido principalmente a la mayor longitud de la tubería con respecto al proyecto original.

En la tabla Nº 5 se resumen los resultados de esta serie de medidas, mientras que en las Figuras Nº 4a y 4b se presenta el registro para las pruebas números Nº 1 y Nº 8.

TABLA Nº 5

							PRESION MAXIMA		P. MINIMA
PRUEB	BOMBA	L1	P.TRAB	CAUDAL	VAL ANTIARIET		SALIDA	MEDIO	SALIDA
Nº	Nº	m.c.a	m.c.a	l/s	B Nº3	B Nº4	m.c.a	m.c.a	m.c.a
1	1	59.0	42.5	148	A	A	57.7 I	42.0 M	-1.8 I
2	1	59.0	43.5	148	A	C	58.7 I	42.0 M	-1.8 I
3	1	59.0	43.5	148	C	C	56.9 I	40.0 M	-2.1 I
4	2	59.0	46.7	148	A	A	58.0 I	35.0 M	-2.1 I
5	2	59.0	46.0	148	C	A	61.5 I	35.0 M	-2.0 I
6	1+2	80.0	70.5	215	A	A	61.8 I	40.0 M	-4.5 I
7	1+2	80.0	70.2	215	C	A	67.6 I	40.0 M	-5.3 I
8	1+2	90.0	74.0	220	A	A	65.6 I	45.0 M	-5.0 I

Al analizar los registros de presión se observa el efecto de la tubería de PVC, tanto en la forma de la onda como en la magnitud de los resultados. Se aprecia así mismo la influencia de la válvula de control de golpe ariete en la regulación de la presión negativa. El efecto de control en la presión positiva no se manifiesta claramente por no alcanzarse la presión máxima preestablecida.

Si se observa el registro de la prueba N°1, en que la presión de trabajo es de 42.5 m.c.a., se tiene que la presión máxima llega a 57.7 m.c.a., es decir, es un 35% superior a la presión de trabajo. Sin embargo, para el caso de caudal máximo (Prueba N° 8) en que la presión de trabajo es de 74.0 m c.a., la presión máxima de golpe de ariete resulta ser de 65,6 m c.a., es decir, claramente inferior en un 11.4%. Esta situación puede deberse a un efecto amortiguador de la onda, producido por la deformación de la tubería de PVC, tal como se aprecia en la forma de la onda dada por la figura N° 4. Es improbable que dicho efecto amortiguador se deba al accionamiento de la válvula de control de golpe de ariete, ya que la válvula se hubiera accionado automáticamente al alcanzarse la presión de trabajo.

Analizando el registro de la prueba, para 220 l/s se puede observar que al producirse el corte de energía, la presión cae bruscamente a un valor inferior a cero (-5,0 m c.a.), pero es limitada por el accionamiento de la válvula de control de golpe de ariete. Se produce entonces la reflección de la onda, manteniéndose dicha presión negativa aproximadamente por un lapso de 15 seg, donde se nota la llegada de la onda positiva, la que se va incrementando con algunas oscilaciones hasta alcanzar a los 33 seg un valor máximo de 65.6 m c.a., luego desciende a un mínimo igual a 9,2 m c.a. y aumenta nuevamente, repitiéndose esta situación hasta estabilizarse en torno a la altura estática de presión del sistema.

El manómetro, ubicado en el punto intermedio de la tubería registró el paso de la onda negativa a los 3 seg de producida la detención, empezando luego a aumentar la presión a los 20 seg. Estos valores coinciden con el período en que el inscriptor de presión se mantuvo registrando una presión inferior a cero. La presión máxima se obtuvo a los 32 seg. y alcanzó un valor de 45 m.c.a.

5.2 Serie N°2 Impulsión N°2, con derivación intermedia abierta

La serie de medidas N°2 corresponde a la impulsión N°2, en tubería de acero de 600 mm de diámetro. Esta impulsión fue diseñada para un gasto máximo de 500 l/s, con una presión de trabajo a la salida de la bomba de 25 m c.a.

Al igual que en la Serie N°1, las pruebas se realizaron con ambas bombas funcionando tanto separadamente, como en conjunto. Las medidas se iniciaron con el gasto de una sola bomba para finalizar con ambas bombas funcionando al máximo de su capacidad. Bajo estas condiciones el gasto máximo alcanzado fue de 555 l/s con una presión a la salida de las bombas de 22 m c.a.

En la tabla N°6 se resumen los resultados de las mediciones realizadas. En las figuras N°5a y 5b se entregan dos de los registros más representativos.

TABLA N° 6

					PRESION MAXI		P. MINIMA
PRUEB	BOMBA	L1	P.TRAB	CAUDAL	SALIDA	MEDIO	SALIDA
N°	N°	m c.a	m c.a	l/s	m c.a	m c.a	m c.a
1	3	23.0	15.5	260	16.3 I	6.0 M	-3.9 I
2	3	19.0	15.5	308	15.8 I	4.0 M	-2.3 I
3	4	23.0	15.0	260	15.0 I	6.0 M	-2.0 I
4	4	19.0	15.5	308	15.0 I	4.0 M	-2.3 I
5	3+4	25.0	16.5	435	50.0 I	27.0 M	-5.7 I
6	3+4	22.0	19.5	555	60.0 I	35.0 M	-4.4 I

I: MANOMETRO INSCRIPTOR
M: LECTURA MANOMETRO CONVENCIONAL

Para los gastos superiores a 400 l/s, la presión máxima sobrepasa la presión de trabajo, controlada a la salida de la válvula de regulación. Para los gastos inferiores a 400 l/s, la presión máxima es inferior o levemente superior a la presión de trabajo en dicho punto.

En la figura N°5a se observa el registro obtenido para un gasto de 260 l/s y presión de trabajo de 15,5 m c.a. En dicha prueba la sobrepresión máxima por golpe de ariete alcanza un valor de 16.3 m c.a., estabilizándose rápidamente en torno a la altura estática de presión.

En la figura 5b el registro se obtuvo para un gasto de 555 l/s, con una presión de trabajo de 19.5 m c.a., en que la presión máxima llega a 54.4 m c.a. Este valor resulta ser 2,8 veces superior a la presión de trabajo. (H/Hr = 2.8).

Si se analiza el registro de esta prueba, se verá que al producirse el corte de energía la presión desciende bruscamente hasta un valor negativo igual -4.4 m c.a. Este valor negativo se alcanza en t = 0,5 seg, para luego aumentar levemente a una presión p = 1,5 m c.a. donde se observa claramente la llegada de la onda positiva. Esta onda alcanza un máximo de 54,4 m.c.a., valor que se produce a los 10 seg. de producido el corte de energía. La siguiente onda que se recibe en el registro corresponde a un mínimo de presión positiva p = 7,5 m c.a. continuando la oscilación por un tiempo de 60 seg donde se estabiliza en torno de la presión estática de 15 m c.a.

En el control de presión intermedia, ubicado en el km 0.260 de la tubería de 600 mm de diámetro, aguas abajo de la derivación y antes de la reducción, se registró una presión máxima de 35 m. c.a., detectada a los 11 segundos de producida la detención. La presión mínima registrada en este manómetro se produjo al instante siguiente de la detención, no lográndose ser determinado con precisión.

5.3 Serie N°3. Impulsión N°3, con derivación intermedia cerrada

La serie de medidas N°3 se realizó con el objeto de comparar los resultados, con respecto a los obtenidos aplicando la hipótesis N° 2 de cálculo. En esta serie, las pruebas en la impulsión N°2 se realizaron manteniendo cerrada la válvula de la derivación intermedia.

Las pruebas se hicieron siguiendo el mismo procedimiento de la serie N°2; sin embargo, debido a las altas presiones registradas el caudal máximo de prueba, fue de 435 l/s. En la tabla N°7 se resumen los resultados de las mediciones realizadas. En las figuras Nos. 6a y 6b se presentan dos de los registros mas representativos, para caudal mínimo y caudal máximo de prueba.

TABLA N° 7

					PRESION MAXI		P MINIMA
PRUEB	BOMBA	L1	P TRAB	CAUDAL	SALIDA	MEDIO	SALIDA
N°	N°	m c a	m c a	l/s	m c a	m c a	m c a
1	3	19 0	17 5	308	66 2 I	50 0 M	-3 0 I
2	3	23 0	16 0	262	54 9 I	45 0 M	-3 6 I
3	4	19 0	18 0	308	71 0 I	60 0 M	-3 9 I
4	4	23 8	17 0	262	61 0 I	50 0 M	-4 5 I
5	3-4	25 0	19 0	435	130 0 I	90 0 M	-6 2 I

I MANOMETRO INSCRIPTOR
M LECTURA MANOMETRO CONVENCIONAL

En la tabla anterior y a partir de lo observado en los registros de presión, se aprecia que la presión máxima por efecto de golpe de ariete, es alrededor 3 veces superior a la producida con la válvula abierta, para un mismo gasto.

Para el caudal máximo medido en esta serie; 435 l/s , se registró una presión máxima superior a 130 m. c.a. Al inicio de la tubería donde se encuentra una unión con flange, se produjo una filtración que impulsó tres chorros correspondientes a las presiones medidas de 130, 110 y 98 m c.a., esto se debió aparentemente a la elongación en zona elástica de los pernos de la unión. Para caudales inferiores no se registraron filtraciones en la unión antes mencionada.

En el registro del manómetro intermedio la presión máxima fue de 90 m c.a., producido a los 11.5 seg de ocurrido el corte de energía.

6 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En los ensayos realizados con motivo de la puesta en servicio de la estación de bombeo, fue posible verificar en la práctica el comportamiento de elementos tan distintos como el PVC y el acero.

Es así como, en la tubería de PVC, para los máximos caudales, no se superó la presión de trabajo existente al inicio de la impulsión. Los resultados de las pruebas en regimen transiente dieron una presión máxima del orden del 60 al 70% de lo obtenido por los cálculos teóricos, evidenciándose en la inscripción el efecto amortiguador de onda hidráulica que posee el material.

Por su parte el comportamiento de las válvulas de control de golpe de ariete, resultó altamente satisfactorio. En los registros es posible apreciar claramente el control que se produce cuando se alcanza la presión mínima preestablecida. Lo mismo ocurre en el caso de la presión máxima, efecto que no fue registrado en los manómetros inscriptores por quedar las válvulas, calibradas a una presión superior a la existente. Sin embargo, en la etapa de calibración se observó claramente el comportamiento como elemento de control, tanto para las presiones máximas como mínimas. Estas válvulas resultan ser una buena alternativa a los elementos tradicionales de regulación de onda hidráulica, como son los estanques amortiguadores, las cámaras

de aire, etc., especialmente en impulsiones que conducen gastos de gran magnitud.

El comportamiento de la impulsión de acero, presenta una característica muy diferente a la del PVC, ésta produce un período de onda de muy corto tiempo tal como se aprecia en las figuras 5a y 5b.

En los ensayos se debe destacar además los diferentes resultados obtenidos entre la serie de pruebas N°2 y N°3.

En efecto, tal como se indicó en las hipótesis de cálculo, se supuso que la derivación, compensa la sobrepresión que se produciría a causa de la reducción. En la figuras N° 6b y N° 7 se observa la onda de presión, al inicio de la impulsión, para los casos de la derivación abierta y cerrada, con un gasto de 435 l/s.

Si se analiza la condición de válvula abierta, la relación que se obtiene entre presión máxima por golpe de ariete y la presión de trabajo es prácticamente igual a la obtenida por el cálculo teórico (H/Hr = 3)

Analizadas las impulsiones, PVC y acero se puede concluir que las hipótesis empleadas para el calculo de golpe de ariete bajo las condiciones descritas se ajustan a la realidad.

Las pruebas de presión en condiciones de golpe de ariete, en impulsiones que conducen caudales de cierta importancia, como las analizadas en este trabajo son absolutamente necesarias para verificar el comportamiento seguro del sistema.

Los resultados de las pruebas permiten evidenciar situaciones que el cálculo teórico, por su imposibilidad de reflejar fielmente la realidad y consecuente complejidad asociada, no está en condiciones de solucionar. De este modo se está aún a tiempo de corregir lo que sea necesario, o bien instalar los elementos pertinentes para controlar de mejor forma las sobrepresiones producidas.

7.- BIBLIOGRAFIA

Parmakian, J.(1963). "Waterhammer Analysis" Dover Publications, Inc.

Mery M, H. (1969). "Golpe de Ariete en Tuberías y dispositivos de control". ENDESA.

Wylie,B; Streeter, V. (1978). "Fluid Transients". Mc Graw-Hill

Donsky,B; et al. (1979) "Upsurge and Speed-Rise Charts Due to Pump Shutdown". Journal of the Hidraulics Division. Junio 1979.

Kinno,H; Kennedy,J. (1965). "Water-Hammer Charts for Centrifugal Pump Systems". Journal of the Hidraulics Division. (Mayo 1965)

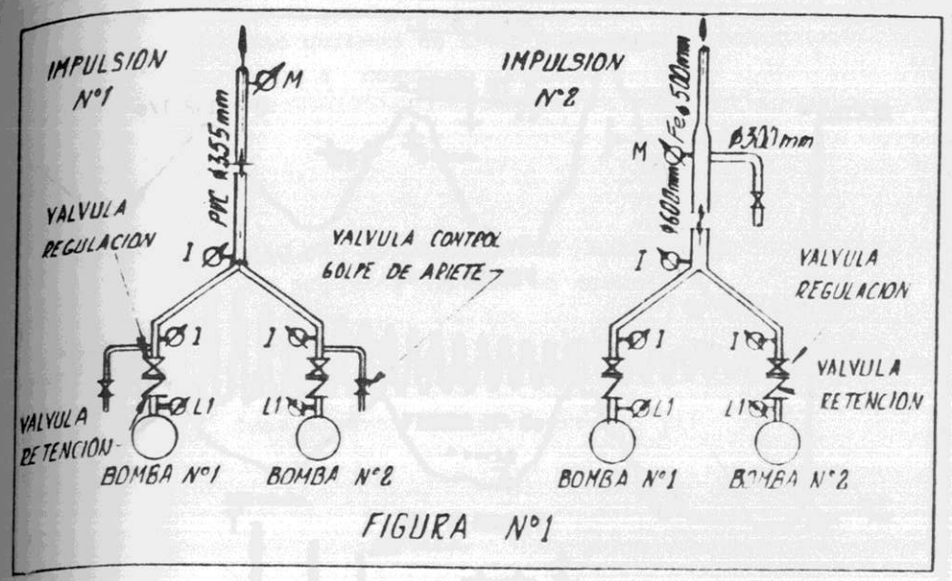

FIGURA N°1

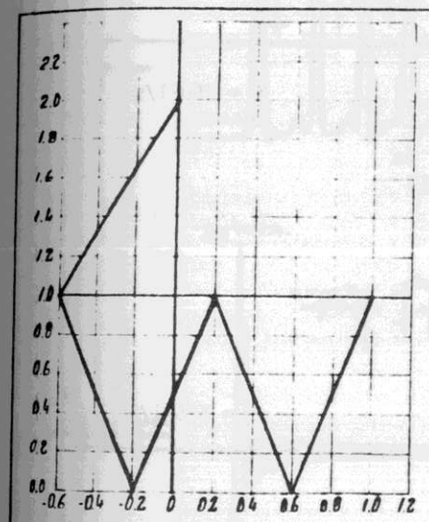

FIGURA N°2

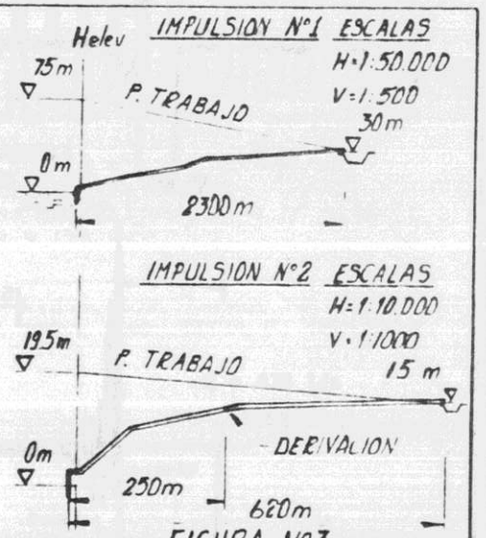

FIGURA N°3

SERIE N° 1

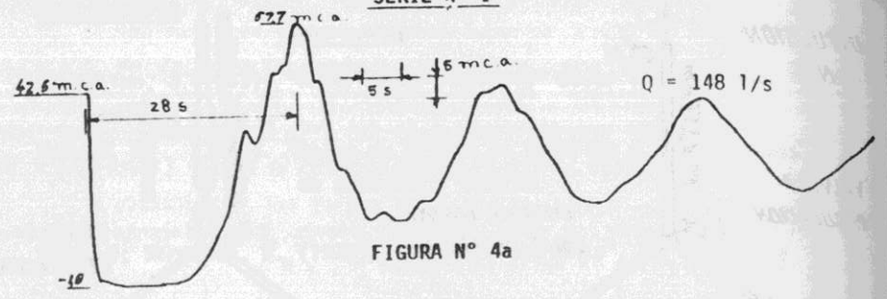

FIGURA N° 4a

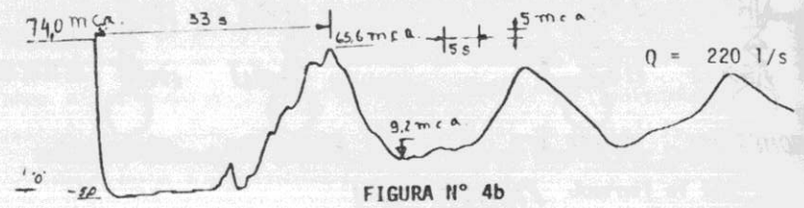

FIGURA N° 4b

SERIE N° 2

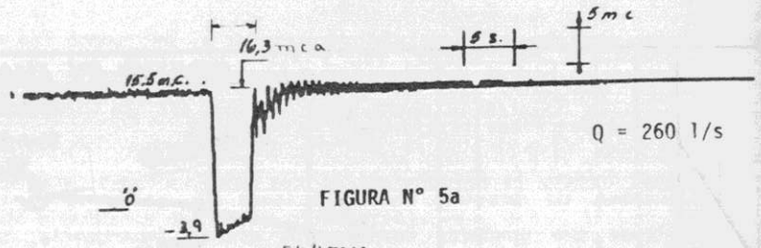

FIGURA N° 5a

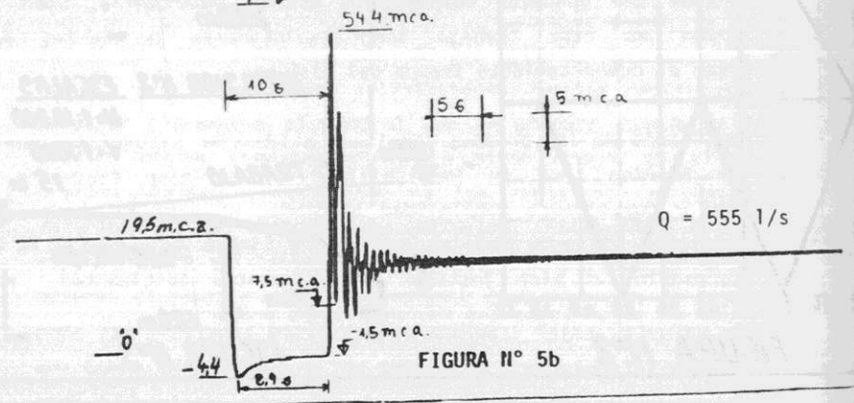

FIGURA N° 5b

SERIE N° 3

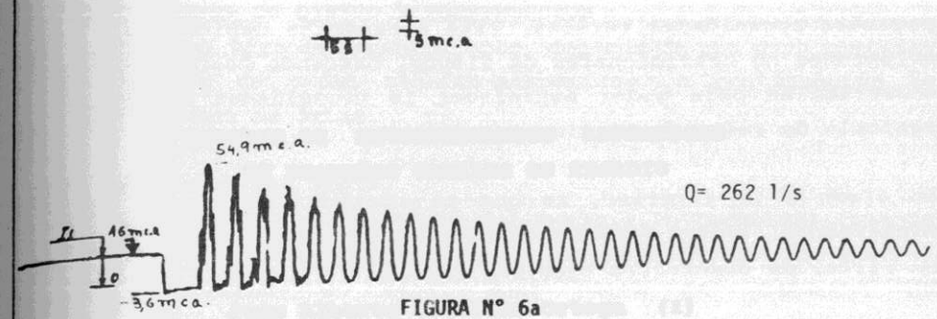

FIGURA N° 6a

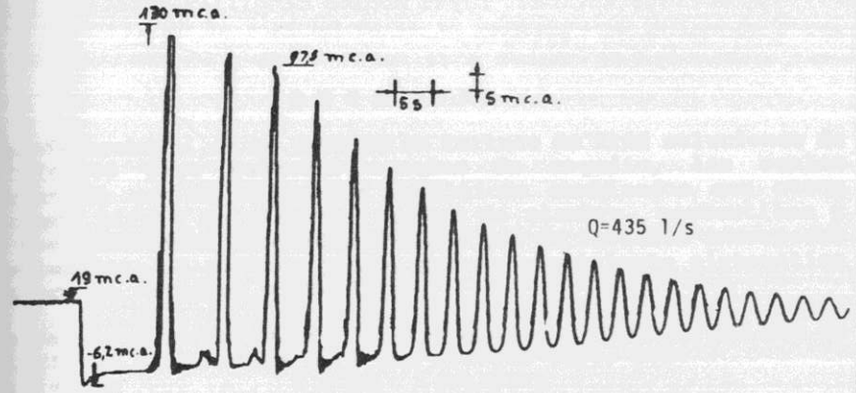

FIGURA N° 6b

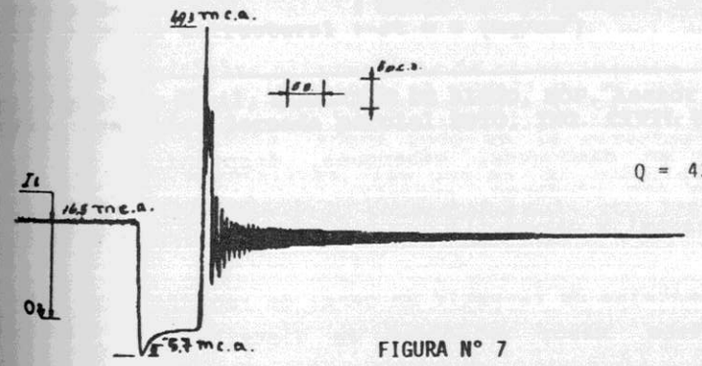

FIGURA N° 7