



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

JUÁREZ GASPAR VÍCTOR TOSHIO

DIRECTOR DE TESIS

M. C. LIBIA G. CARMONA PAREDES



CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F., Junio 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Señor

VÍCTOR TOSHIO JUÁREZ GASPAR

Presente

**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/49/2014**

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M.C. LIBIA GEORGINA CARMONA PAREDES que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

**"COMPARACIÓN DE LAS OSCILACIONES EN LA TORRE DE OSCILACIÓN DE LA C.H. LA YESCA
OBTENIDAS EN MODELO FÍSICO CON MODELOS NUMÉRICOS."**

INTRODUCCIÓN

- I. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**
- II. CENTRAL HIDROELÉCTRICA ALFREDO ELÍAS AYUB "LA YESCA"**
- III. MODELO FÍSICO PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DEL POZO DE OSCILACIÓN DE LA C. H. YESCA**
- IV. COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS DE LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL AGUA EN EL POZO DE OSCILACIÓN CON LOS NIVELES OBTENIDOS A TRAVÉS DE CÁLCULOS NUMÉRICOS**
- V. CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 26 de Marzo de 2014

EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH

Agradecimientos

Mis más profundos agradecimientos a mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme dado una oportunidad y abrirme sus puertas hace muchos años, brindándome el crecimiento intelectual que hoy poseo, mediante las enseñanzas que impartieron cada uno de sus profesores que estuvieron alguna vez frente a mí, acercarme a las personas que hoy considero amigos y dejarme hacer mis sueños realidad.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, principalmente a la M. C. Libia G. Carmona Paredes, quien confió en mí, a pesar de mis deficiencias, para realizar mi servicio social; quiero agradecer su apoyo, motivación, comprensión y el tiempo invertido en la revisión y corrección de éste trabajo; agradecerle todos sus comentarios, regaños y sugerencias para terminar esta etapa de la mejor forma posible.

De igual manera al M. I. Eduardo Rodal Canales, que no conforme al prestarme varios libros, contesto cada una de mis dudas tomándose el tiempo necesario para darme un par de lecciones a fin de satisfacer todas aquellas incertidumbres; de igual manera quiero agradecerle que revisará este trabajo, me diera sus observaciones para mejorarlo y no dejarlo incompleto.

Gracias a mi familia; papá, mamá, por mandarme siempre a la escuela y enseñarme que la perseverancia es la base para lograr lo imposible, hacerme ver que puedo ser quien yo quiera, que puedo hacer lo que yo quiera, por tener un plato caliente siempre en la mesa, por ser los mejores padres y nunca dejarme solo amándome cada momento; mi hermana Gina, por aguantarme y quererme desde que nació y llegó a casa, ayudarme cuando la necesito, y apoyarme siempre.

A mi amada, mejor amiga, compañera, Clau, por dejarme intentar ser mejor persona a su lado, porque ha perdonado mis errores, ha estado a mi lado en las buenas y en las malas, me comprende, apoya, motiva, y sobre todo me ama.

Dedicatoria

A mi familia.

Papá, quien no ha ganado ningún premio pero para mí es un héroe, rompiéndose la espalda y sudando la camiseta. Apoyándome en mis locuras, siempre y cuando le llevara buenas notas; que me llevo a todos lados de niño, me compró, me regalo, me dio, un sinfín de cosas. Me dio permiso de todo y a veces me decía “dile a tu mamá”. Quien jamás me golpeo de niño, porque sabía que con palabras tarde o temprano entendería, quien me forjó un carácter sensato, me enseñó a respetar a los demás, sobre todo a las mujeres. Que se sacrificó de muchas maneras para que nada me faltara y fuera a la escuela. Quien siempre me ha amado, querido, regañado toda mi vida. Mi viejo, mi mejor amigo.

Mamá, que siempre me ayudó a conseguir lo que quería, hizo todo lo que una madre puede hacer por un hijo y millones de cosas más. Que cuando le pedía permiso me decía “dile a tu papá”, me acompañó a todos lugares a los que tuviera que ir, me cuidó, me protegió, y no me dejaba salir hasta que hiciera la tarea. Mi madre, la mejor mujer del mundo, mi consejera, mi cómplice. Para ella, para quien siempre hemos estado mi hermana y yo antes que ella misma, se ha despajado de lo suyo para darnos a nosotros, nos consiente, nos mima y nos ama con su más profundo y hermoso cariño.

Gina, mi hermana, que a pesar de todo siempre soporta a su hermano y no ha dejado de quererlo bajo ninguna circunstancia, mi hermanita la pequeña, alegría del hogar, terror de la calle, que siempre con sus palabras demuestra lo sabía, lista e inteligente que se ha vuelto, que demuestra que será mejor que yo en todo aspecto, pero que a la vez me demuestra que sigue siendo mi hermanita.

Clau, mi amada, que me apoyo y motivo para terminar la carrera, que siempre quiso que sacara las mejores notas o que si no eran posible, por lo menos que aprendiera mejor que nadie. De la que siempre he estado orgulloso y es todo un ejemplo a seguir, inteligente, lista, linda, hermosa, trabajadora, sacrificada, estudiosa, y, con un sinfín de cualidades más. A la que siempre le estaré agradecido por el tiempo que ha estado a mi lado y todo lo que ha hecho por mí, sin duda la mejor persona que he conocido, con la que he vivido muchas experiencias y me ha dado su amor incondicional.

De su hijo, hermano y amado.

Contenido

Introducción.....	1
1. Centrales hidroeléctricas	3
1.1 Tipo de centrales hidroeléctricas	9
1.2 Torre o pozo de oscilación	13
1.3 Tipos de pozos de oscilación.....	17
2. Central hidroeléctrica Alfredo Elías Ayub “La Yesca”.....	23
2.1 Pozo de oscilación de la C. H. La Yesca.....	28
3. Modelo físico para analizar el comportamiento del pozo de oscilación de C.H. La Yesca ...	31
3.1 Régimen permanente.....	34
3.2 Régimen transitorio	36
4 Comparación de las medidas de la variación del nivel del agua en el pozo de oscilación con los niveles obtenidos a través de cálculos numéricos.....	41
4.1 Modelo de oscilación de masa.....	41
4.1.1 Comparación de los cálculos numéricos con los registros del modelo físico	47
4.2 Modelo de tubería elástica y flujo compresible.....	66
4.2.1 Consideraciones realizadas	66
4.2.2 Comparación de los cálculos numéricos con los registros del modelo físico	71
5 Conclusiones	83
Bibliografía	87

Objetivos.

- Obtener las fluctuaciones de presión en la torre de oscilación del modelo de laboratorio de La Yesca mediante los modelos de oscilación de masa y tubería elástica con flujo compresible; para diferentes condiciones de operación.
- Comparar las fluctuaciones de presiones medidas en el modelo físico del pozo de oscilación de la C.H. La Yesca con la de los modelos numéricos planteados.
- Con las comparaciones de los registros del modelo físico con los resultados numéricos, calibrar el modelo numérico del pozo oscilación con varias entradas del sistema de simulación Trans, desarrollado en el IIUNAM.

Introducción.

Una central hidroeléctrica es una instalación cuya misión es convertir la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica. El sistema toma agua de una fuente, ya sea un embalse, presa o río, y la entrega al cauce del río después de haberla aprovechado para turbinar. En nuestro país la utilización de centrales hidroeléctricas para la generación de energía aporta cerca del 20% de la demanda anual, distribuyéndose el resto en centrales de tipo termoeléctrica, nucleoeeléctrica, carboeléctrica, ciclo combinado, etc. Siendo la encargada de su administración, operación y mantenimiento la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

En la cuenca del río Grijalva se localiza el mayor desarrollo hidroeléctrico del país, con 4,800 MW. Está integrado por las centrales Angostura (Belisario Domínguez), Chicoasén (Manuel Moreno Torres), Malpaso y Peñitas (Ángel Albino Corzo). Representaba 41.7% de la capacidad hidroeléctrica total en operación a diciembre de 2010.

Sobre la cuenca del río Balsas, ubicado al occidente del país, se encuentra otro desarrollo importante, lo constituyen las centrales Caracol (Carlos Ramírez Ulloa), Infiernillo y la Villita (José María Morelos), con un total de 2,060 MW, correspondientes a 17.9% de la capacidad hidroeléctrica.

En 2007 entró en operación en la cuenca del río Santiago la central El Cajón con 750 MW, que junto con Aguamilpa se tienen 1,710 MW equivalente a 14.9 % de la capacidad total instalada.

Huites (Luis Donaldo Colosio) en el noroeste, con dos unidades de 211 MW cada una y Zimapán (Fernando Hiriart Balderrama) en el centro del país con una capacidad de 292 MW, representan 6.2% de la capacidad hidroeléctrica total.

El 19.3% restante se encuentra distribuido principalmente en cuencas de menor tamaño a lo largo y ancho del país, principalmente en las regiones del centro y sur.

En 2012 entra en operación la C.H. La Yesca (Alfredo Elías Ayub), alojada en un estrechamiento entre los sitios La Múcura y Limon IV, inmediatamente aguas arriba del embalse de la presa El Cajón, en la porción limítrofe entre las entidades federativas de Nayarit y Jalisco, localizada aproximadamente a 3.5 km aguas debajo de la confluencia de los ríos Bolaños y Santiago, sobre el cauce de éste último, 1 105 km al noroeste de la ciudad de Guadalajara y a 22 km al NNO de la población de Hostotipaquillo.

La Yesca cuenta con dos unidades generadoras tipo Francis con una potencia de 375 MW y gasto de $230.39 \text{ m}^3/\text{s}$, cada una, las cuales son suficientes para cubrir la mitad de la demanda eléctrica total de la ciudad de Guadalajara.

El propósito fundamental del proyecto de la Central Hidroeléctrica La Yesca, es el de contribuir a mantener los niveles de oferta eléctrica necesarios para el crecimiento esperado de la demanda en la zona de occidente del sistema eléctrico nacional, durante las horas de la máxima demanda, manteniendo el margen de reserva y el margen de reserva operativo regional en los niveles que cumplan con los estándares establecidos para el sistema.

El objetivo de esta tesis es comparar las medidas de las fluctuaciones de presión en el pozo de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en un modelo físico con los resultados obtenidos con los modelos matemáticos de oscilación de masa y tubería elástica.

1 Centrales hidroeléctricas.

Operación de un sistema de generación

La operación de un sistema de generación eléctrica está determinada por el tipo de arreglo que se tenga para el suministro de agua, es decir el tipo de central: de derivación o mediante embalse.

En el caso de que la toma de agua sea mediante un canal de derivación, el gasto es constante y la operación se dice es simple. Para el caso de almacenamiento, el gasto a turbinar deberá ser determinado mediante el seguimiento de una ley de extracción definida por la política de operación de la presa. Mientras se tenga una mayor cantidad de información hidrológica mejor será el conocimiento del comportamiento del río, de manera que se podrá simular el funcionamiento del sistema. Pronosticando las aportaciones que se tendrán a lo largo del año se pueden obtener, analizar y determinar ciertos parámetros mediante los cuales se maximiza la generación de energía y se minimizan los derrames a través de su vertedor de demasías, como son: el volumen de almacenamiento, capacidad del vertedor y la obra de toma, niveles de operación a lo largo del año, capacidad de regulación del vaso, potencia a instalar y la generación instalada. Con todos estos parámetros se establece la ley de extracción mencionada anteriormente.

La forma de la curva de operación de una planta hidroeléctrica indica si ésta trabaja mucho o poco tiempo con su potencia máxima. Así, se dice que una planta es de pico si trabaja fundamentalmente a mayor capacidad durante las horas de máxima demanda, aun cuando fuera de dichas horas deje de funcionar. Si la planta trabaja con una potencia que no tome muchas variaciones, se dice que es de base. Para hacer esta clasificación se usa el concepto llamado *factor de planta* f_p que se define:

$$f_p = \frac{\text{Potencia media}}{\text{Potencia máxima}} = \frac{G_{tot}}{T_o \cdot P_{m\acute{a}x}}$$

Donde si G_{tot} es la generación total en el periodo T_o , la potencia media es el cociente de G_{tot} entre T_o . El valor del factor de planta para clasificar el tipo de operación de la central varía en los diferentes países, pero puede tenerse una idea general de ellos con los siguientes:

si

$$f_p \leq 0.40 \text{ planta de pico}$$

$$f_p > 0.40 \text{ planta de base}$$

En nuestro país existen una gran cantidad de centrales hidroeléctricas con f_p bajos ya que se suministra energía mayormente en horas pico y la demanda base la suministran principalmente las centrales térmicas.

Esquema tipo de una central hidroeléctrica.

Los elementos que conforman un sistema hidroeléctrico común son (figura 1.1.):

- Cortina
- Vertedor
- Obra de toma
- Rejillas
- Compuertas deslizantes (o con ruedas)
- Lumbrera para compuertas
- Tubería de presión
- Torre o pozo de oscilación
- Válvula de seccionamiento
- Casa de máquinas
- Turbina
- Generador
- Desfogue
- Galería de oscilación (pozo de oscilación común a la descarga de varias turbinas)
- Compuertas del desfogue
- Descarga al río

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

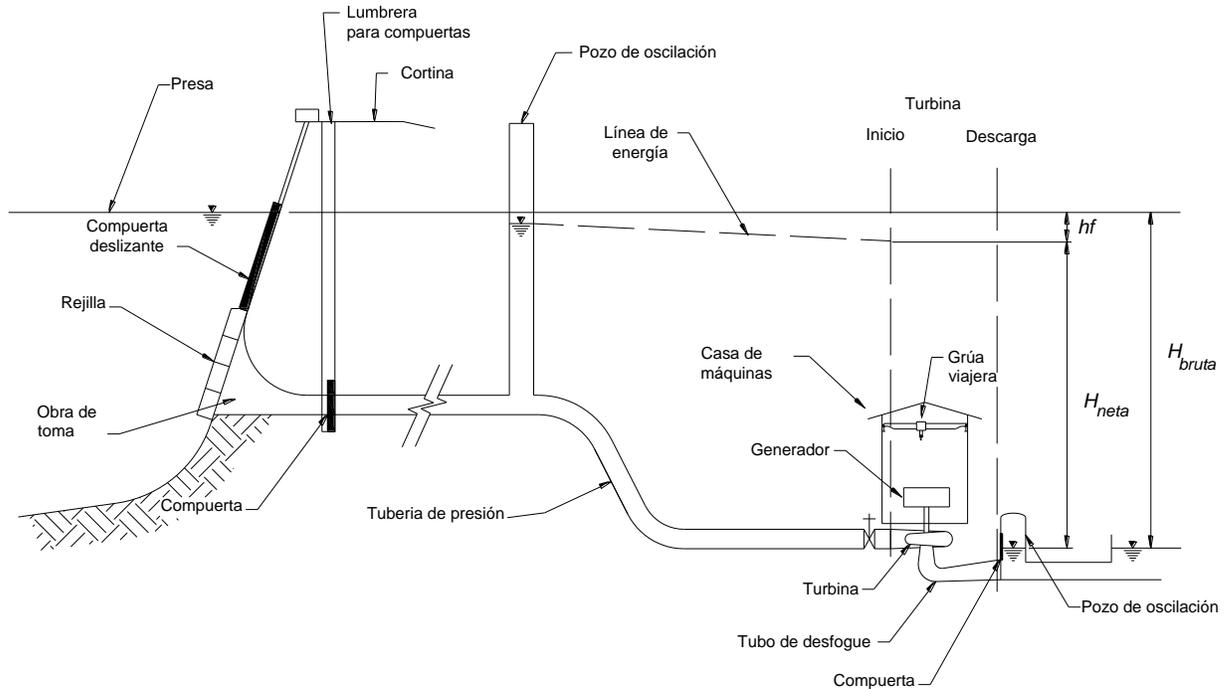


Fig. 1.1. Esquema tipo de una central hidroeléctrica.

Cortina: Es el primer elemento fundamental de una central, que se encarga de acumular la masa de agua proveniente del río, logrando así tener un nivel antes de la contención y otro después de ella, la diferencia de estos niveles es la que se aprovecha para producir energía.

Vertedor: Su principal función es dejar pasar el agua excedente evitando que sea derramada por encima de la cortina y no cause daño a ésta.

Obra de toma: Es la construcción destinada para permitir la captación de agua que será turbinada.

Rejillas: Impiden la entrada de elementos que puedan causar daños a cualquiera de las partes del sistema de generación; por ejemplo, troncos, rocas, etc.

Compuertas deslizantes y lumbrera para compuertas: Aíslan el sistema o partes del sistema, impidiendo la entrada de flujo para en un inicio permitir la construcción y montaje, y posteriormente dar mantenimiento, por ejemplo a las turbinas o tuberías.

Pozo de oscilación: Sus principales objetivos son reducir la magnitud de las fluctuaciones de presión en eventos como rechazo de carga, ayudar a la regulación de las turbinas, proporcionar la masa de agua necesaria en maniobras de arranque y asegurar el nivel de agua en la descarga de las turbinas para evitar en fenómeno de separación de columna. Las funciones que desempeña el pozo de oscilación dependen de su localización con respecto a la casa de máquinas, tema que se verá más adelante.

Válvula de seccionamiento: Son elementos utilizados para impedir el flujo en las tuberías. Deben tener un funcionamiento seguro, cierre rápido y hermético. Su función es poder aislar al sistema en caso de realizar mantenimiento.

Casa de máquinas: Puede ser exterior o subterránea. Cuando la instalación de las turbinas es vertical, comúnmente se divide en dos pisos o plantas, planta alta o piso de generadores y planta baja o piso de turbinas. En la planta alta se encuentran como su nombre lo dice los generadores con sus reguladores de velocidad, así como todos los elementos necesarios para su mantenimiento. En planta baja se localizan las turbinas, la espiral de alimentación, el distribuidor, y el rodete de las máquinas.

Turbina: Es una turbomáquina que transforma energía del fluido, en estos casos agua, en energía mecánica.

Las turbinas hidráulicas pueden clasificarse según el grado de reacción ε , el cual es un indicador de la forma en que opera el órgano que intercambia energía; en el caso de las turbinas es el cociente de la carga de presión entre la carga total que aprovecha el rotor.

Según el grado de reacción (ε), se clasifica a las turbinas en dos grupos:

- de reacción, si $0 < \varepsilon < 1$
- de acción, si $\varepsilon = 0$

En el caso de una turbina de reacción, ésta se encuentra alojada en una cámara hermética dentro de la cual las presiones cambian al paso del agua por el rodete, de esta manera la presión en la entrada es mayor que la presión a la salida. Este tipo de turbinas requiere de un tubo de aspiración, el cual es un tubo difusor y constituye un elemento adicional que ayuda a que la presión de salida sea menor que la presión atmosférica, contribuyendo a recuperar la fracción de energía cinética del flujo a la salida del rodete.

Por otro lado en las turbinas de acción, también conocidas como de impulso, el flujo es recolectado por una cámara destinada a evitar salpicaduras y se encuentra a la presión de salida, es decir, a la atmosférica.

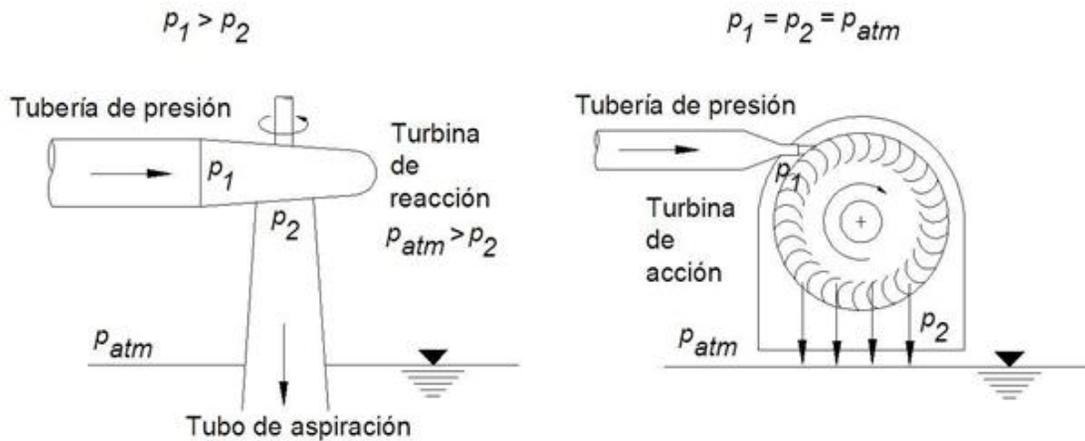


Fig. 1.2. Diferencias entre turbinas de reacción y de acción.

La clasificación de las turbinas es muy variada, dependiendo de diferentes puntos de vista, desde quién las inventó, su forma de intercambiar energía, ya descrita anteriormente, o la forma en que actúa el flujo o chorro sobre el rodete; a continuación se presenta una breve clasificación dependiendo de los parámetros mencionados.

- Patente {
 - Pelton
 - Francis
 - Hélice
 - Kaplan
 - Turgo
 - Michelle – Banki

- Grado de reacción {
 - Acción (presión constante = presión atmosférica)
 - Reacción (presión variable, diferente de la atmosférica)

- Dirección del chorro al rodete {
 - Axial (entrada paralela al eje)
 - Lateral (entrada según el radio del rodete)
 - Mixto (entrada oblicua al eje)
 - Tangencial (entrada tangencial al rodete)

- Posición del eje {
 - Vertical (plano del rodete horizontal)
 - Horizontal (plano del rodete vertical)

- Tipo de instalación {
 - Sencilla (un rodete por eje)
 - Múltiple (varios rodetes en un mismo eje)

Las turbinas que se utilizan con mayor frecuencia en aprovechamientos hidroeléctricos se clasifican de acuerdo a la siguiente tabla 1.1.

TABLA 1.1. TURBINAS MÁS UTILIZADAS EN APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS.

	Tipo de Flujo	Turbina	Álabes
Acción	tangencial	Pelton	fijos
	lateral	Turgo	fijos
	cruzado	Michell - Banki	fijos
Reacción	mixto	Francis	fijos
		Deriaz	orientables
	axial	Hélice	fijos
		Kaplan	orientables

El desnivel disponible llamado carga bruta (H_{br}), es la diferencia entre el nivel en el embalse menos el nivel a la salida del sistema. La carga neta (H_N) o caída, disponible para la generación, está determinada como:

$$H_N = H_{br} - h_r$$

Donde h_r , representa las pérdidas por fricción, estos niveles se pueden ver con más claridad en la figura 1.1. El tipo de turbina utilizada depende principalmente de la carga neta.

Las diferencias que presentan los distintos tipos de turbinas; Pelton, Francis o Kaplan, y otras más; es principalmente la capacidad de manejar diferentes cargas y gastos, ya que las recomendaciones para el uso de una Pelton no pueden ser aplicadas al uso de una turbina Kaplan; las características tanto geométricas, como la forma de sus álabes si son móviles o no, forma del rodete, etcétera; y funcionales, marcan sus diferencias de uso.

Las centrales diseñadas para grandes cargas (40 a 1,800 m) y gastos pequeños ($< 30 \text{ m}^3/\text{s}$) utilizan turbinas Pelton con tuberías de presión con diámetros pequeños y de gran longitud, por el contrario las centrales que utilizan turbinas Kaplan tienen cargas pequeñas (2 a 80 m), gastos grandes (hasta $500 \text{ m}^3/\text{s}$), diámetros grandes y longitudes cortas. Las tipo Francis, tienen características intermedias entre las Pelton y Kaplan.

Generador: Transforma la energía mecánica, que entrega la turbina, a energía eléctrica para después conducir ésta a las ciudades mediante otros dispositivos eléctricos, tales como transformadores, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, etc.

Desfogue: El tubo de desfogue tiene por función, recuperar la altura estática de succión y la carga cinemática a la salida del rodete, para este segundo propósito se requiere un tubo cónico o difusor. La forma cónica ayuda a recuperar a recuperar la energía cinética que no

aprovecho el rodete, de lo contrario esta energía se disiparía provocando el desprendimiento del flujo y la formación de flujos secundarios.

Compuertas del desfogue: Al igual que las válvulas y compuertas deslizantes, su función es seccionar parte del sistema, impidiendo la entrada de agua, para su mantenimiento.

1.1 Tipo de centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas presentan una gran diversidad en todos los aspectos, por este motivo se suelen clasificar o agrupar en diferentes tipos, en este trabajo se hará énfasis a su diferenciación en su modo de operar tratando de mencionar las más relevantes en este aspecto; de acuerdo con lo anterior se han clasificado de la siguiente manera.

Centrales de embalse.

Las centrales de este tipo contienen un embalse el cual se forma de manera artificial por la construcción de una cortina en lugares apropiados del río, la cual acumula volúmenes considerables de agua. El embalse permite la maniobrabilidad del gasto que pasa hacia las turbinas, es decir, permite la regulación del gasto la cual consiste en poder extraer un gasto constante independientemente de las aportaciones variables que transcurran a lo largo de año sobre el río, ya que la central hidráulica debe ser capaz de operar con el mismo gasto determinado tanto en época de lluvias como en época de estiaje. Dentro de este tipo se encuentran dos variantes:

Centrales a pie de presa (fig. 1.3): en un tramo de río con un desnivel apreciable se construye una cortina de una altura determinada. La casa de maquina está situada después de la cortina.

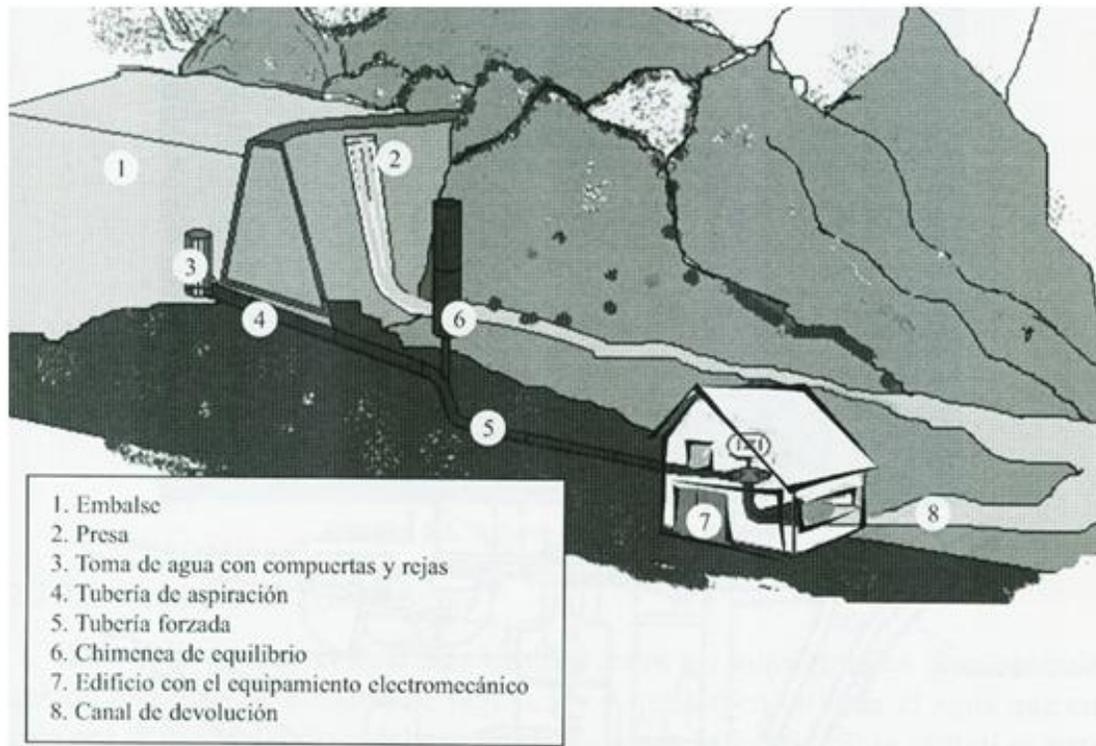


Fig. 1.3. Central a pie de presa.

Centrales de acumulación hidráulica.

También conocidas como centrales de bombeo, son un tipo especial de centrales las cuales basan su funcionamiento en el uso racional de los recursos hidráulicos. Este tipo además de disponer de una o varias turbinas, cuentan con una o varias bombas, o bien grupos de turbinas reversible. Cuenta con dos depósitos o embalses situados a diferente nivel, uno aguas arriba y otro aguas abajo (en la descarga). En nuestro país operan con factores de planta f_p bajos, turbinando el agua de forma convencional a una central hidroeléctrica, almacenando ésta en el embalse de aguas abajo, y en las horas de baja demanda, especialmente por la noche, se les suministra energía de otra fuente generadora del sistema para elevar el agua por medio de bombeo al vaso; la energía suministrada proviene de centrales con factores de planta altos, en este caso centrales termoeléctricas. Esta forma de operar es económica, ya que la energía suministrada para el bombeo proviene de las horas de baja demanda en que dicha energía cuesta menos.

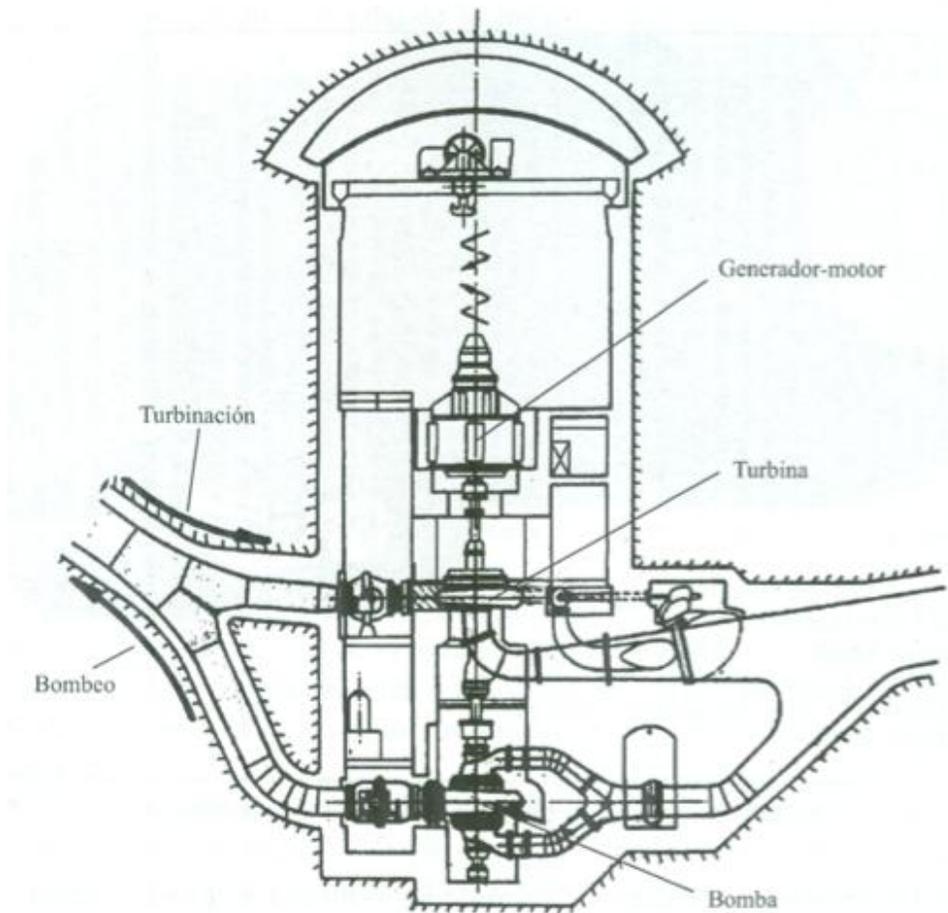


Fig. 1.4. Esquema de una central de bombeo.

Centrales de derivación o de agua fluyente (fig. 1.5).

Este tipo de centrales se construyen en sitios donde se cuenta y se puede disponer directamente de energía hidráulica que pueda accionar las turbinas. Éstas pueden diseñarse para el gasto mínimo disponible, pero de esta manera en época de precipitaciones abundantes se desaprovecha el agua excedente, aunque se trabaja a la máxima potencia. Por el contrario si se diseña para el máximo caudal, en época de sequías, la central trabaja con poca carga y el rendimiento es bajo. El caso óptimo y más económico de diseño es aquel entre estos dos extremos.

Centrales por derivación: el agua del río es desviada y conducida mediante un canal hacia un depósito llamado cámara de presión, de ésta sale un conducto a presión que lleva el agua hacia la casa de máquinas para posteriormente ser descargada al río.

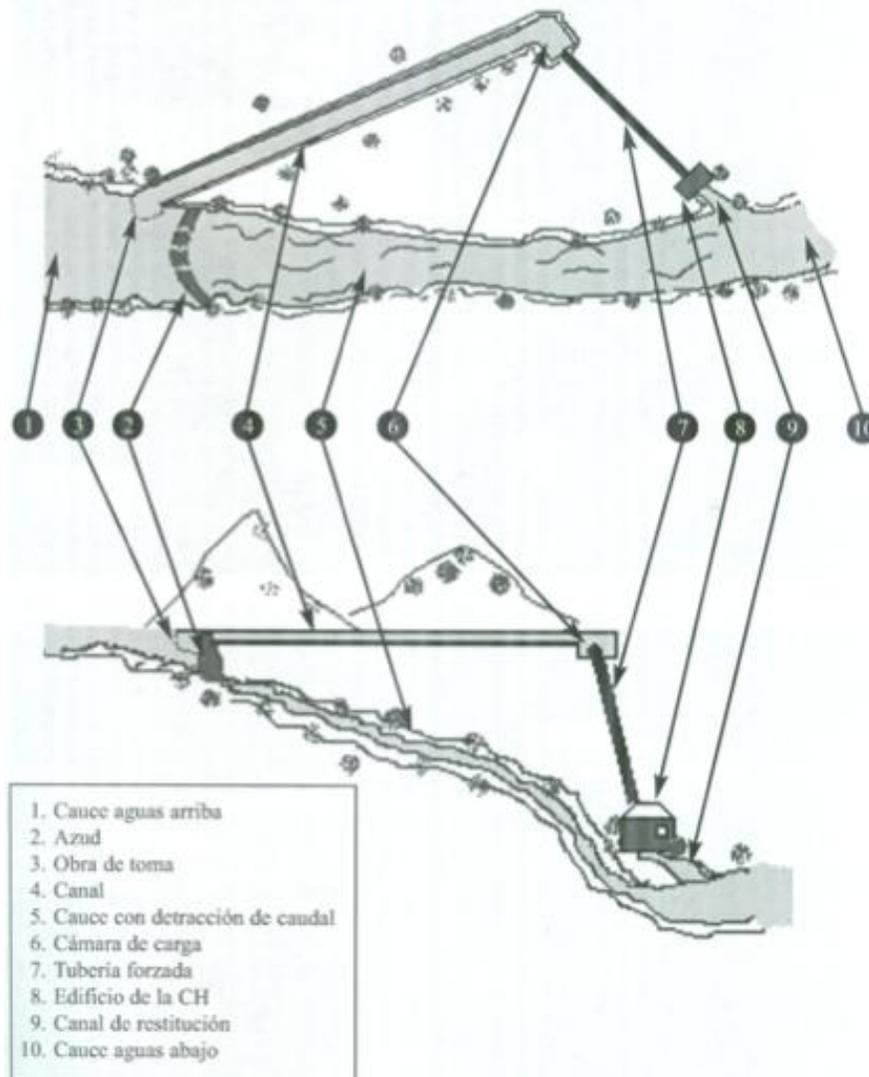


Fig. 1.5. Central con derivación.

Centrales ubicadas directamente sobre la cortina: Su configuración es muy similar a la de un pie de presa, pero de menor tamaño y potencia, son centrales ubicadas en la cortina, que no detraen ninguna cantidad de agua del cauce, y, por lo tanto no dejan ninguna seca o con bajos caudales. La existencia de la cortina permite elevar el nivel del agua, a la vez que crea una zona de aguas tranquilas para que puedan ser derivadas hacia la turbina. Por la turbina pasa todo el caudal circulante, hasta el máximo diseñado; si hay más agua pasa encima de la cortina sin ser turbinada. Si la turbina se para por cualquier motivo, el agua desborda por la cortina, continuando su camino al cauce.

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

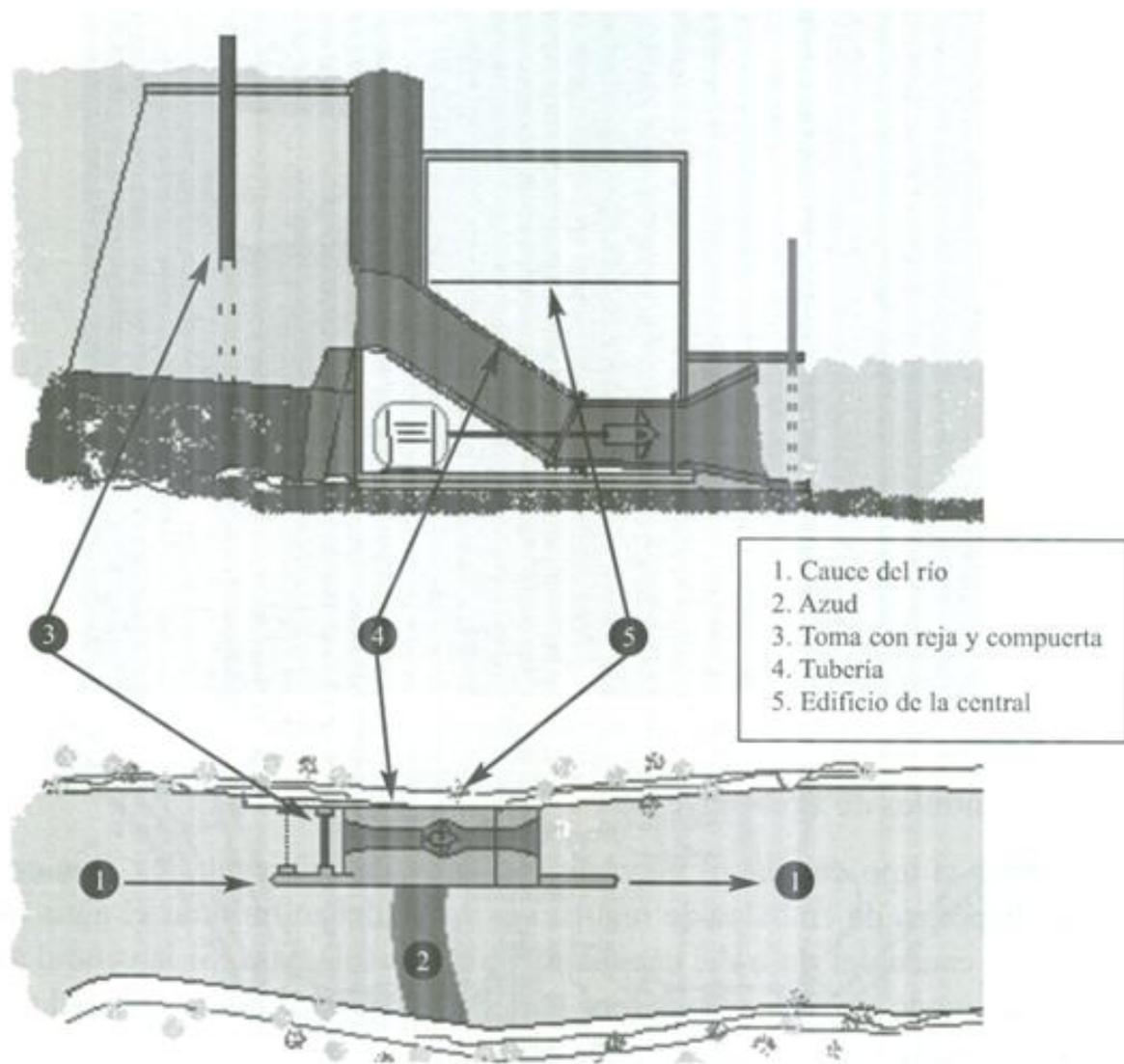


Fig. 1.6. Central hidroeléctrica ubicada directamente en la cortina.

1.2 Torre o pozo de oscilación.

Uno de los problemas fundamentales en el diseño de centrales hidroeléctricas es el análisis de las fluctuaciones de presión. Cambios bruscos del gasto en alguna parte del sistema generan grandes variaciones de presión, cuando las tuberías son de longitud considerable las sobrepresiones pueden ser de gran magnitud. El fenómeno que produce estas grandes variaciones de presión se conoce como golpe de ariete, la variación de la presión se transmite en todas las tuberías a través de ondas. Un dispositivo eficaz para evitar que la propagación de estas ondas causen daño, por ejemplo, a turbinas o la misma tubería de presión, es la torre o de oscilación. Este dispositivo también es llamado pozo, cámara o galería de oscilación; para el presente trabajo se usan indistintamente estos términos para referirse a la misma estructura, por lo cual en el lector no debe haber duda que al hablar de torre o pozo de oscilación se hace referencia al mismo dispositivo.

Antes de explicar el funcionamiento de este dispositivo es necesario definir el periodo propio del sistema o tiempo característico T , el cual es el tiempo que tarda una onda de presión que se produce en un extremo del sistema en ir al otro extremo y regresar a su lugar de origen. Dicho tiempo T se define como $2L/a$, donde L es la longitud de la tubería y a la velocidad de propagación de la onda de presión, comúnmente llamada celeridad. Considerando que la maniobra (la cual puede ser cierre o apertura de los álabes del distribuidor) que provoca el estado transitorio se realiza en T_c , se dice que ésta es rápida cuando $T_c < T$ y lenta cuando $T_c > T$.

Funcionamiento de la torre de oscilación.

Para entender el funcionamiento en los sistemas hidroeléctricos con torre de oscilación aguas arriba, supóngase que operamos con una turbina de reacción y que fluye un gasto constante y por razones de operación, en un instante dado, el anillo del distribuidor de las turbinas se cierra en forma más o menos rápida ($T_c < T$). Si no existiera pozo alguno se alteraría la velocidad del líquido bruscamente dentro de la tubería y se provocaría una transformación de energía cinética a energía de presión, esto implica la aparición de presiones locales distintas a las que había antes de la perturbación, lo que significa que se han formado ondas de presión y gradientes que las inducen a propagarse. Esta acción de cierre, de acuerdo con lo anterior, crearía una onda de sobrepresión que viajaría hacia aguas arriba de la tubería por la tubería de presión hasta el almacenamiento, donde se reflejaría para regresar a la turbina, donde de nueva cuenta se reflejaría hasta que por efecto de la fricción se detengan estas oscilaciones. Si se instala una torre de oscilación en el escenario anterior, es decir aguas arriba de la casa de máquinas, y se considera que la masa contenida dentro de la torre es lo suficientemente significativa, se crea un punto de reflexión y la onda de sobrepresión recorre únicamente el tramo entre el pozo y la casa de máquinas; el flujo en la tubería a presión se interrumpe repentinamente y el agua en la tubería se desacelera.

Mientras esto sucede, el régimen de flujo en la tubería a presión permanece prácticamente inalterado. Cuando la onda de presión llega a la torre, se completa la desaceleración de la masa de agua en la tubería de presión y el régimen establecido en el túnel comienza a alterarse. El agua, incapaz de fluir por la tubería a presión ya que en ésta queda prácticamente inmóvil, es forzada a introducirse en el pozo, por lo cual la superficie libre del agua dentro comienza a subir. El nivel del agua continuará subiendo en forma lenta y la masa en el túnel se desacelerará gradualmente hasta que el flujo dentro de éste quede prácticamente inmóvil; en este instante, el nivel del agua en la torre es el máximo. Para dicho nivel, se crea un gradiente negativo respecto al almacenamiento, por lo que el sentido del flujo dentro del túnel comienza a invertirse, disminuyendo también el nivel en la torre. Debido a la inercia de la masa de agua, el nivel continúa decreciendo hasta llegar a un mínimo; luego vuelve a ascender, y así sucesivamente. En este tipo de maniobra, las oscilaciones se atenúan por las pérdidas de fricción en el túnel, hasta que se llega a establecer un nivel que corresponde al del almacenamiento.

Para el caso contrario, es decir, cuando se inicia operación del sistema y se abren los álabes del distribuidor para admitir gasto, el agua en la tubería se acelera rápidamente. En este caso, la torre de oscilación proporciona el volumen requerido por las turbinas, más rápidamente que el almacenamiento, y el nivel de su superficie libre desciende. Esto provoca un gradiente de energía en el túnel, que acelera gradualmente el líquido; pero, debido a la inercia de éste, se rebasa el valor necesario de equilibrio y, por tanto, se crea un estado oscilatorio hasta que, como en el caso anterior, se logra un nuevo equilibrio, correspondiente al del nivel del gradiente de presiones para el régimen a gasto establecido en la torre.

Las características funcionales de éste dispositivo tienen estricta relación con su localización a lo largo de la obra de generación, así mismo como a la geometría que presenten. Los objetivos principales de una cámara de oscilación son:

Cuando se encuentra aguas arriba de la casa de máquinas:

1. Reducir la magnitud de las fluctuaciones de presión en un cierre del distribuidor de la turbina. Al colocar un pozo de oscilación en el conducto que comunica el almacenamiento con las turbinas, la longitud característica del golpe de ariete disminuye, y se reduce la sobrepresión al corresponder el cierre a un cierre lento, por tanto se protege ante este fenómeno.
2. Mejorar las características de regulación de las turbinas. El tiempo de aceleración de las turbinas es función directa de la longitud del conducto a presión, por tanto, al instalar una torre, se acorta dicha longitud y se reduce el tiempo de aceleración hidráulica de la turbina, la cual favorece la regulación de la central, es decir, la facilidad de mantener una frecuencia de generación.

3. Proporcionar la masa de agua necesaria en maniobras de arranque de la central. Si no existiera la torre de oscilación y, en un instante dado, se abre el distribuidor en forma repentina para satisfacer la demanda, el agua en la tubería a presión se acelera; sin embargo, como la inercia de la masa de agua en el túnel es significativamente mayor, dicha masa no se acelera con tanta rapidez. Esto provoca una onda de presión negativa, la cual puede ocasionar que en algún punto de la instalación el gradiente quede por debajo de la tubería y se presente separación de la columna, o bien se pueda colapsar.

Si el pozo de oscilación se encuentra aguas abajo de la casa de máquinas, como en el caso de la C.H. La Yesca:

1. Impedir el fenómeno de separación de columna en maniobras de cierre; cuando en un momento dado se cierra de forma más o menos rápida el distribuidor de la turbina, la inercia de la columna de agua es significativamente grande, en este caso el pozo de oscilación brinda la cantidad de agua requerida para evitar depresiones excesivas en el tubo de aspiración de la turbina y evitar algún daño.
2. Reduce las sobrepresiones que se pueden presentar en el caso de arranque de la central. El agua dentro del desfogue no se acelera de forma rápida, por lo que el exceso de agua proveniente de la turbina entra al pozo, elevando el nivel de agua dentro de éste.

La necesidad de la torre de oscilación se deriva, tanto de su beneficio para la operación del sistema, como de la reducción que con ella se logra de las sobrepresiones causadas por el golpe de ariete y, por tanto, del costo económico de tubería. Además evita presiones negativas en pozos aguas abajo de la casa de máquinas, lo que facilita el diseño del desfogue.

Para lograr un diseño eficiente se deben verificar las siguientes especificaciones:

- a) Ubicación.

La torre debe instalarse donde la reducción del golpe de ariete sea más efectiva y haga más económico el diseño del túnel de conducción. Debe quedar tan cerca de la casa de máquinas como las condiciones topográficas lo permitan; así se confina el efecto del golpe de ariete, se puede disminuir, por tanto, el refuerzo de la tubería a presión, y se obtiene una operación más eficiente de las turbinas.

- b) Estabilidad.

El área del pozo debe ser la mínima necesaria para que las oscilaciones sean estables. Las oscilaciones resultantes de cambios de carga totales o parciales deben ser amortiguadas y no deben, bajo ninguna condición, ser sostenidas o amplificadas.

c) Niveles mínimos.

Para los casos donde el pozo de oscilación se encuentre aguas arriba de la casa de máquinas, los niveles mínimos deben ser tales que no se permita el vaciado de la torre, es decir, las oscilaciones no deben llegar hasta la clave del túnel pues esto ocasiona la introducción de aire al sistema.

d) Niveles máximos.

A menos que el tipo de torre incluya vertedor, el pozo no debe derramar durante las oscilaciones ascendentes. El nivel máximo se obtiene considerando un cierre total instantáneo con el nivel máximo del embalse, NAME.

e) Área de la cámara.

De acuerdo con los dos incisos anteriores, se escoge el área que resulte mayor, y se revisan distintas condiciones de operación mediante una simulación numérica. En caso de que el área transversal resulte demasiado grande se puede de ver la factibilidad de usar algún tipo especial de torre, por ejemplo, con expansiones.

f) Costos y construcción.

Al seleccionar el tipo de pozo se busca una solución óptima no solo en el aspecto hidráulico, sino que se deben considerar aspectos económicos, dentro del cual los costos por volúmenes de excavación y revestimiento son fundamentales. La construcción está determinada, también, por la topografía del lugar.

Se prefieren los pozos de oscilación subterráneos por economía y seguridad, ya que los superficiales requieren un diseño estructural especial.

1.3 Tipos de Torres o Pozos de Oscilación.

La existencia de diferentes clasificaciones para pozos de oscilación se basa en diversos aspectos como geométricos, o por su localización a lo largo de la conducción; y a su vez estas agrupaciones se justifican por el funcionamiento hidráulico que ofrecen.

I. De acuerdo con su posición relativa a la casa de máquinas.

Pozo aguas arriba.

Es la posición más común, usualmente se coloca en la unión de la tubería a presión con el túnel, lo más cerca a la casa de máquinas.

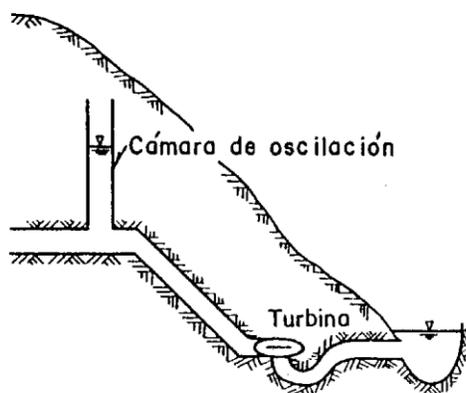


Fig. 1.7. Torre de oscilación ubicada agua arriba de la casa de máquinas.

Pozo aguas abajo.

Cuando operan los vertedores de una presa es posible que el túnel de desfogue se ahogue y trabaje a presión. Si el túnel o los túneles de descarga son muy largos, se puede presentar una separación de la columna de agua en el caso de un cierre rápido, ya que la inercia de la masa de agua en el túnel de desfogue es grande y ésta tarda en desacelerarse; o una presión excesiva en el tubo de succión y/o en el túnel de desfogue en el caso de apertura rápida. En estos casos la presencia de un pozo de oscilación aguas abajo ayuda a evitar dichos fenómenos.

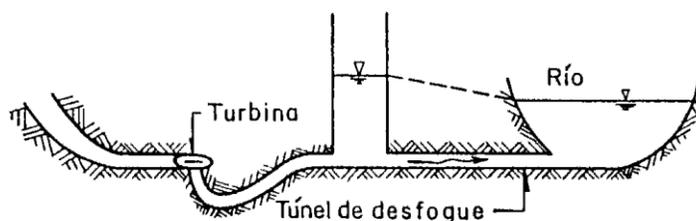


Fig. 1.8. Pozo de oscilación ubicado aguas debajo de la turbina.

Casa de máquinas con pozo a ambos lados

Se colocan pozos tanto aguas arriba como aguas abajo, cuando se tienen tuberías a presión y túneles de desfogue muy largo.

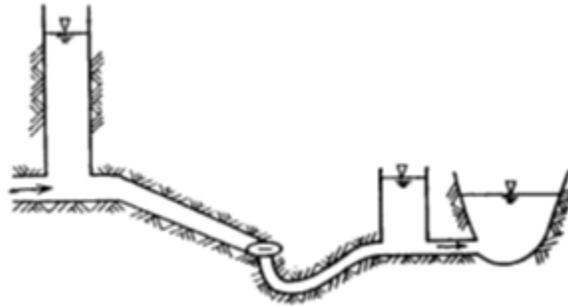


Fig. 1.9. Turbina con torres de oscilación en ambos extremos.

II. De acuerdo a su geometría.

Pozo de oscilación simple.

Su sección transversal se mantiene uniforme en toda su altura, su diseño debe ser tal que debe contener oscilaciones máximas sin derramar agua y oscilaciones mínimas sin vaciarse para impedir que entre aire al conducto. Su empleo se reduce a cargas bajas y túneles cortos.

Pozo con galerías o expansiones.

Consta de dos expansiones conectadas entre sí por una lumbrera casi siempre vertical, de sección transversal reducida lo más posible. El elevador o lumbrera posee una geometría reducida para permitir una mejor operación de la turbina y que la columna de agua en el túnel se acelere o retarde con rapidez.

En el caso de una maniobra de cierre del distribuidor, al tener expansiones ayuda a que la oscilación de sobrepresión reduzca su amplitud, y la variación rápida del nivel al alcanzar la primera galería produce desaceleración de la masa de agua en el túnel. Por el contrario en una apertura del distribuidor, la columna de agua baja rápidamente por la lumbrera, lo cual ayuda a la aceleración de la masa de agua en el túnel para alimentar la turbina, y se presentan oscilaciones menores y más lentas debido a las galerías. En operación a gasto establecido el nivel dentro de la lumbrera se mantiene por debajo de las galerías, cabe mencionar que este tipo de torres puede tener una o varias expansiones dependiendo de la topografía del lugar aprovechable.

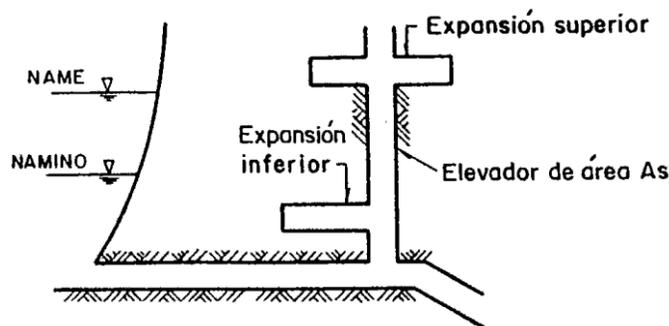


Fig. 1.10. Pozo de oscilación con expansiones.

Pozo diferencial o Johnson

Tiene dos dispositivos, un tubo central con orificios en la parte inferior y una cámara exterior o principal que contiene al primero. Su funcionamiento en maniobras de cierre se basa en dejar que el nivel de agua en el tubo central suba rápidamente, mientras que la masa de agua en la tubería a presión se desacelera y en la cámara principal el líquido responde con lentitud. El tubo central, también llamado elevador, puede llegar a derramar hacia la cámara principal. En arranques de la turbina, el tubo central brinda el líquido rápidamente ayudando a una respuesta rápida del movimiento de la masa de agua en la tubería a presión; durante la aceleración en el túnel la cámara principal alimenta al tubo central a través de los orificios.

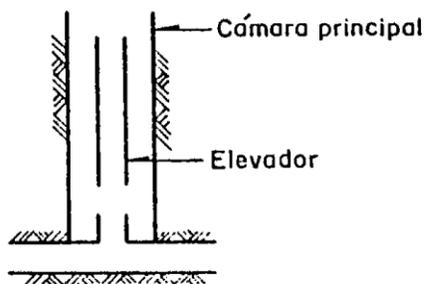


Fig. 1.11. Pozo diferencial o tipo Johnson.

Pozo vertedor

Este tipo de pozo tiene en la parte superior una cresta vertedora, la cual cuando el nivel de agua dentro del pozo la rebasa permite el derrame del agua, disminuyendo la velocidad con que el nivel sube. Cuando el agua puede ser derramada, el vertedor ayuda a amortiguar las oscilaciones, sin olvidar tener cuidado de proteger la zona donde se verterá para no afectar la obra. Esta situación ocurre en las centrales derivadoras, donde el agua se derrama cuando las turbinas están fuera de operación,

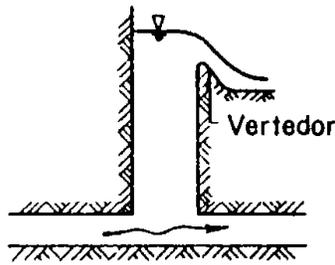


Fig. 1.12. Pozo vertedor.

Pozo con orificio.

Como su nombre lo dice, cuenta con una estrangulación u orificio en la unión de la torre con el conducto, lo cual restringe el acceso fácilmente del agua hacia dentro del pozo o viceversa. Gracias a esa geometría se producen pérdidas (proporcionales a v^2) por ende al presentarse oscilaciones grandes su amplitud se ve reducida al igual que su duración. Si las oscilaciones son de poca magnitud, el orificio no representa algún cambio significativo, siendo similar el comportamiento del pozo a uno de sección simple. Por otro lado el tamaño del orificio debe ser diseñado para que su geometría sea tal que permita la amortiguación satisfactoria del golpe de ariete, ya que si su sección es pequeña se transmite al túnel parte importante de las ondas de sobrepresión pudiendo causar daño.

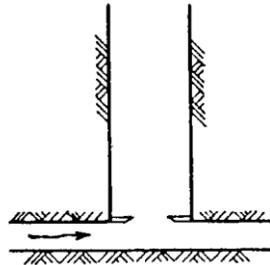


Fig. 1.13. Pozo con orificio

III. De acuerdo con su localización relativa al terreno.

Esta clasificación tiene primordial referencia de acuerdo con la topografía que se tenga presente en el sitio.

1. Pozo excavado
2. Pozo superficial
3. Pozo mixto

2 Central Hidroeléctrica Alfredo Elías Ayub “La Yesca”

La central hidroeléctrica La Yesca, se encuentra situada sobre el cauce del río Santiago en el estado de Nayarit. Se localiza en el municipio de la Yesca en el estado de Nayarit, sus coordenadas geográficas son $21^{\circ} 11' 49''$ latitud norte y $104^{\circ} 06' 21''$ longitud oeste.

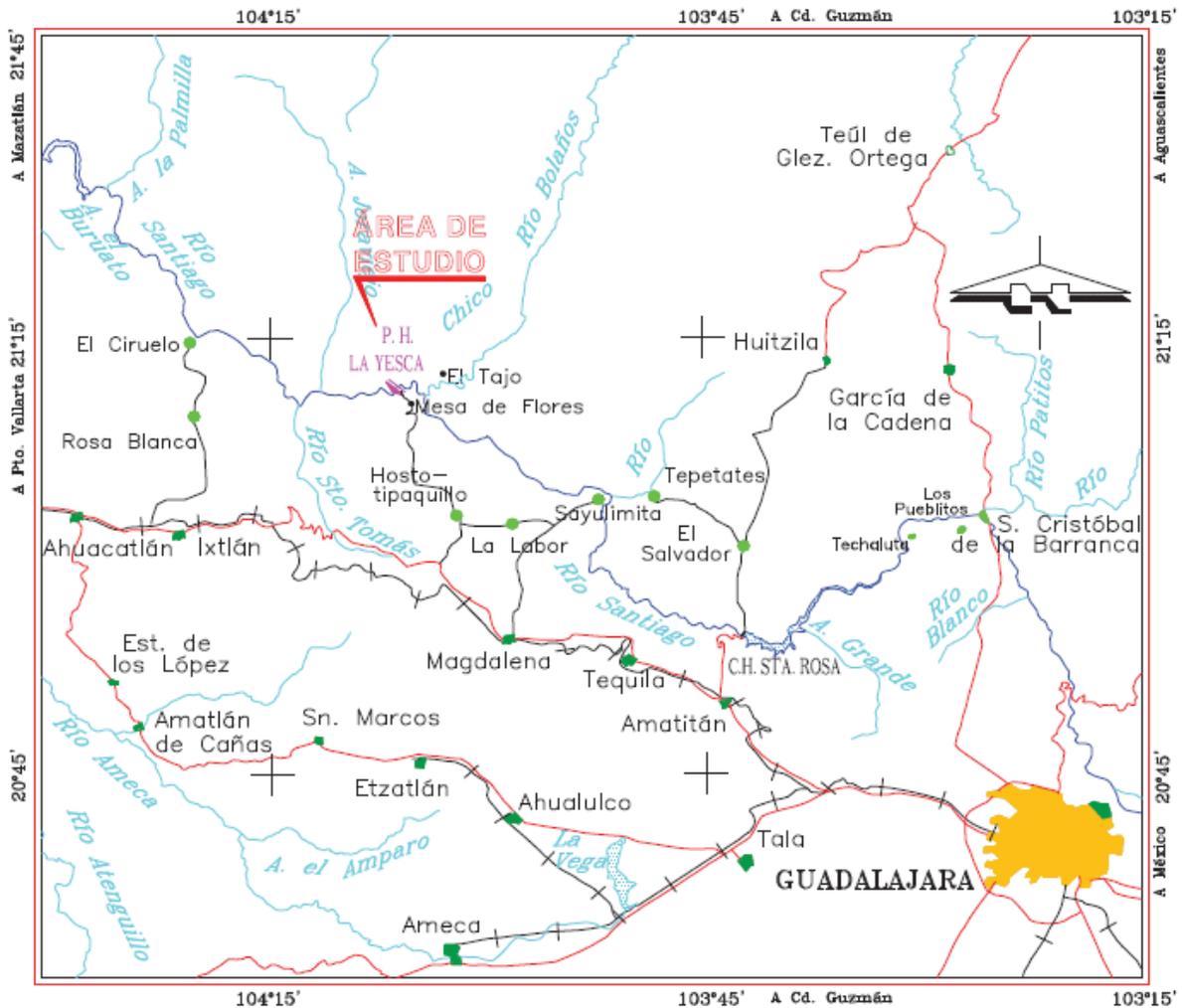


Fig. 2.1. Ubicación de la Central Hidroeléctrica La Yesca.

La central generadora cuenta dos turbinas Francis con potencia bruta conjunta de 750 MW. La generación media anual neta se estima en 1,169.75 GWh por año, de los cuales 837.18 GWh son de energía de punta y 332.57 GWh son de energía base

Es una central de embalse a pie de presa, cuyos niveles de operación se encuentran en las siguientes cotas:

NAME	578.0 m.s.n.m.
NAMO	575.0 m.s.n.m.
NAMINO	518.0 m.s.n.m.

La zona de inundación del embalse, abarca partes de los municipios de La Yesca, Nayarit y Hostotipaquillo, Magdalena, Tequila y San Pedro Analco en el estado de Jalisco, y, tiene un área al NAME de 3348 hectáreas.

Los componentes de la Central Hidroeléctrica La Yesca y sus características son las que se describen a continuación:

Cortina y ataguías.

La cortina es del tipo enrocamiento con cara de concreto como elemento impermeable, con una altura sobre el cauce del río de 195.0 m con 15 m más de desplante, longitud de corona de 878 m, ancho de 11.0 m, y borde libre de 2.0 m, con elevación de la corona en la cota 580 m. El proceso constructivo requirió una preataguía aguas arriba con una longitud de corona de 279 m y una altura de 17.5 m. Otra ataguía aguas arriba, que se integra a la corona, la cual fue necesaria para permitir el proceso constructivo. Una tercera ataguía, para garantizar la estanqueidad en el recinto de desplante de la cortina.

Vaso de almacenamiento.

La capacidad de almacenamiento útil para generación (volumen entre NAMO y NAMINO), es de 1392 millones de m^3 . El área inundada por el vaso al NAMO es de $32.5 km^2$ y de $33.4 km^2$ al NAME.

Obra de desvió.

Consta de dos túneles ubicados en la margen izquierda de sección portal de 14.0 m de ancho y 14.0 m de altura, revestidos con concreto hidráulico en su plantilla y concreto lanzado en paredes y clave del túnel; la longitud del túnel de desvió 1 es de 772 m y del túnel 2 de 806 m, aptos para manejar una avenida de diseño con un gasto de $8,653 m^3/s$ con un periodo de 200 años.

Obras de generación.

Consiste en dos obras de toma, dos tuberías de presión, casa de máquinas, galería de oscilación y desfogues.

Obra de toma.

De tipo rampa, con dos conductos con vanos de 10 m de ancho por 12 m de altura con elementos de cierre tipo rodante y con una carga hidráulica máxima en la compuesta de servicio de 83.35 m. Con una grúa pórtico para el izaje de elementos de cierre auxiliar y mecanismos de traslado entre tomas.

Tuberías a presión.

Se encuentran subterránea, siendo dos conductos a presión de 7.7 de diámetro con reducción a 5.48 m en sus últimos 32.0 m de una longitud total de 226.02 m, revestida

de concreto y blindaje metálico, diseñada para un gasto de $230 \text{ m}^3/\text{s}$, con separación entre ejes de 28.7 m.

Están alojadas en 2 túneles de sección circular de 9.10 m de diámetro, revestidos con un espesor de 0.70 m de concreto hidráulico reforzado $f'c = 250 \text{ kg}/\text{cm}^2$ y blindados con camisa de acero tipo A-537, $f'y = 3818 \text{ kg}/\text{cm}^2$ y empaque de concreto simple de 0.70 m de espesor, desde el inicio del codo inferior hasta el caracol de las turbinas.

Casa de máquinas.

Cuenta con dos unidades turbogeneradoras, tipo Francis, de 375 MW y gasto de $230.39 \text{ m}^3/\text{s}$ cada una y generan un promedio de 1210 GWH anuales, con un factor de planta de 0.19. Está alojada en una caverna de 22.0 m de ancho por 103.5 m de largo; en el extremo poniente se tiene un cárcamo de bombeo cuyo piso está en la cota 389.05 m, cuenta con una galería de inspección a la elevación 374.15 m.s.n.m, el eje del distribuidor está a 381.7 m.s.n.m, la galería de buses y el piso de los generadores se ubican en la cota 389.05 m, la playa de montaje y el piso de excitadores están a 393.25 m.s.n.m y el hongo de riel a la cota 403.5 m.

Para el izaje y mantenimiento de los equipos se tiene una grúa viajera con capacidad de levantar 660 toneladas.

Plataforma para operación de compuertas y patio de equipos de ventilación.

La zona para alojar los equipos de ventilación y para la operación de las compuertas de la obra de toma está localizada en la parte exterior, encima de la casa de máquinas y es una continuación hacia el norte del patio de transformadores y subestación.

Pozo de oscilación.

Se conecta, aguas arriba, con la descarga de las turbinas y aguas abajo con el túnel de descarga. Consiste en una estructura subterránea de 16 m de ancho por 62.5 m de largo y 60.5 m de altura máxima al eje de la galería.

Desfogues.

Consiste en una conducción en túnel con geometría de 13 x 14 m en sección portal revestido de concreto con una longitud total de desfogue de 254.58 m y un desfogue en canal tipo trapecial a cielo abierto de ancho de base entre 13 a 35 m y 60 de longitud.

Patio de transformadores y subestación.

Es una plataforma construida a cielo abierto a la elevación 580.0 m, anexa a la de operación de compuertas y patios de equipos de ventilación, que en conjunto abarcan una superficie de 2.784 ha. El patio de transformadores y subestación comprende un área suficiente para albergar 4 transformadores de servicio y 2 de emergencia, así como una subestación del tipo encapsulada y ocupa una superficie de 1.13 ha.

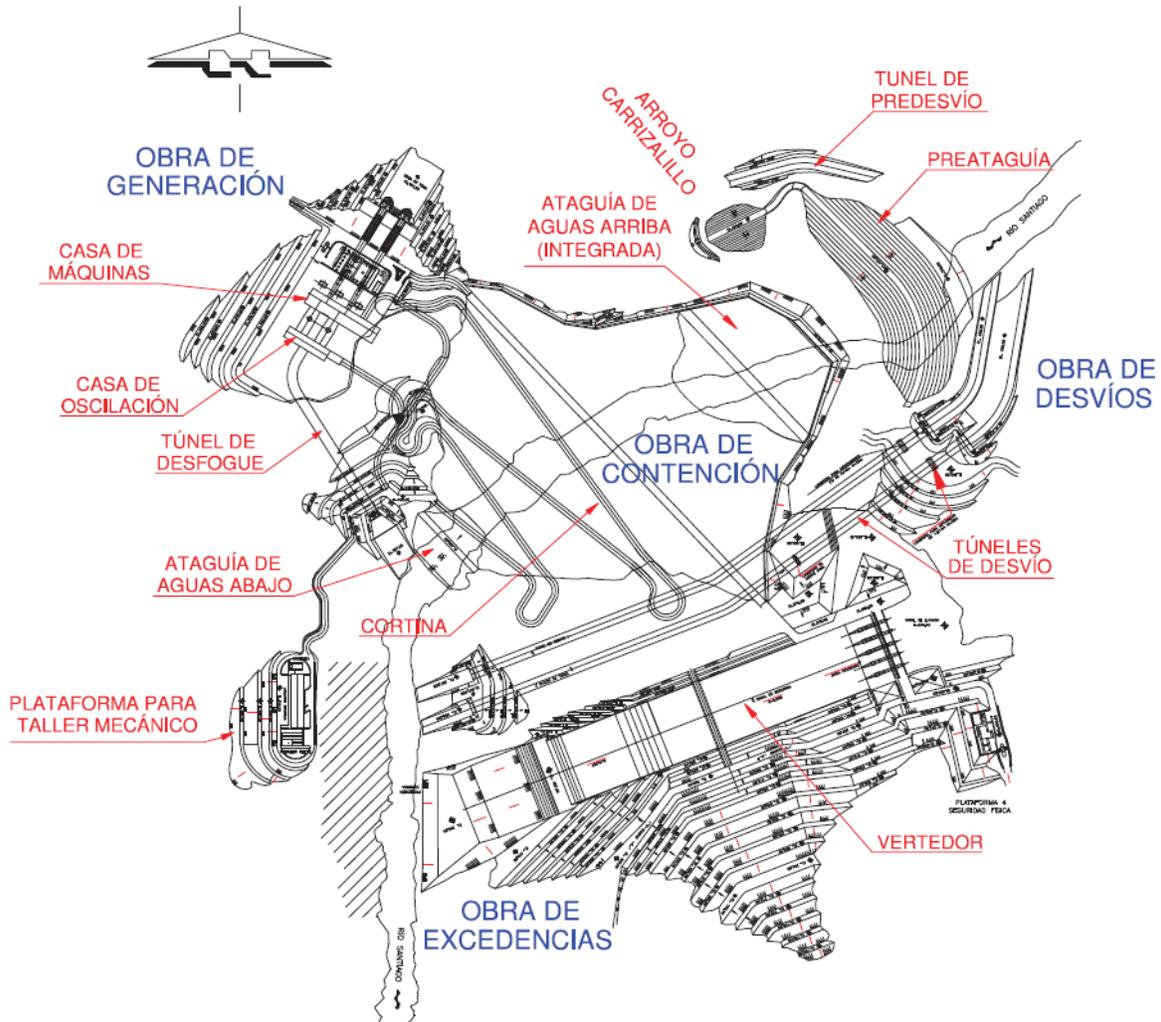


Fig. 2.2 .Central Hidroeléctrica La Yesca. Mesa de Flores, Municipio de Hostotipaquillo, Jalisco.

Obra de excedencias.

Vertedor de tipo canal a cielo abierto ubicado en la margen izquierda de la presa constituido principalmente por tres canales, para un gasto de diseño de $15110 \text{ m}^3/\text{s}$ con un periodo de retorno de 10,00 años. Cuenta con las siguientes estructuras hidráulicas:

Canal de llamada: De ancho variable para conducir la llegada de agua de manera gradual, hacia la sección vertedora.

Estructura de control:

Cimacio tipo Creager, con seis vanos de 12.0 m, pilas de 3.8 m y compuertas de 25.0 m de radio.

Aireadores.

Su geometría está constituida por un escalón y deflector, a lo ancho del canal de la rápida, con pendiente en el piso de 0.001, para el desagüe del flujo que pudiera

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

introducirse. El suministro de aire asimétrico a la plantilla de la rápida, se realiza a través de lumbreras ubicadas en los muros laterales del canal.

Estructura terminal.

El canal uno tiene un radio de 19.71 m y ángulo de lanzamiento de 45° , el canal dos con un radio de 30 m y ángulo de lanzamiento de 30° , el último canal tiene un radio de 20.09 m y ángulo de lanzamiento de 45° .



Fig. 2.3. Canal de descarga del vertedor de la Central hidroeléctrica la Yesca.

2.1 Torre de oscilación de La Yesca.

El pozo de oscilación de la C. H. La Yesca, es del tipo simple con una geometría rectangular, situado aguas abajo de la casa de máquinas. Es una caverna totalmente revestida de concreto reforzado que tiene la particularidad de admitir el flujo proveniente de las dos turbinas instaladas, es decir, aguas arriba está conectado con los dos tubos de desfogue de las unidades y aguas abajo con el túnel de descarga al río. Su colocación, ya mencionada, está justificada debido a la longitud total del túnel de descarga al río es de 254.58 m. De no existir el pozo y trabajaran los vertedores el túnel de descarga operaría a tubo lleno y cabría el riesgo en casos de cierre rápido de sufrir una separación de columna, conllevando los efectos de ésta, y en casos de apertura rápida, sobrepresiones excesivas, ambos efectos tanto en los tubos de succión o en el túnel de descarga.

Los tubos de desfogue de las turbinas son de sección rectangular, presentando el diseño típico de un desfogue para turbina de reacción, es decir, incrementa su área en función del recorrido, realizando una transición de sección circular a una rectangular a lo largo del codo. Debido a las características de gran tamaño del desfogue, la resistencia estructural de la conducción aguas abajo del codo demanda la separación en dos ductos, mediante muros verticales en cada uno de los desfogues, figura 2.5. De esta manera se tienen por cada túnel de desfogue dos ductos con sección rectangular de 7.31 m x 8.13 m, con vértices redondeados, de concreto hidráulico. Los muros que separan los ductos son de concreto hidráulico con espesor de 2.00 m, (fig. 2.4).

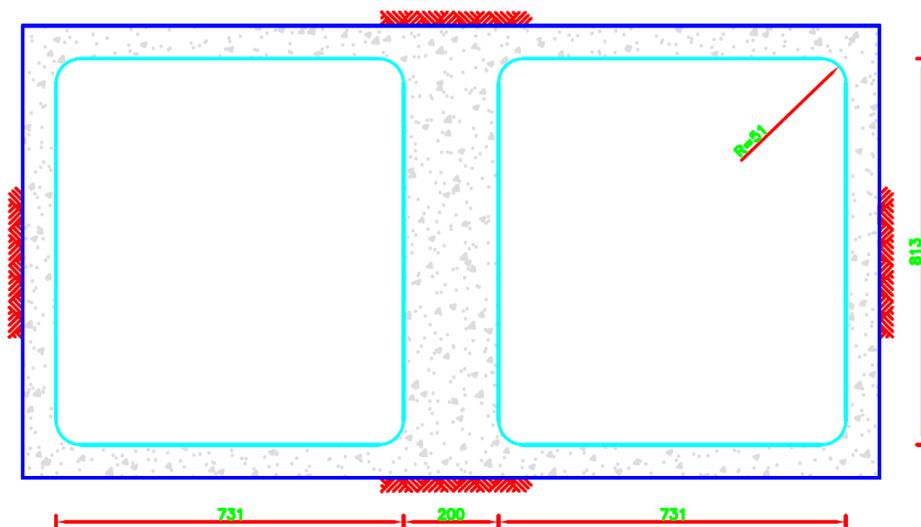


Fig. 2.4. Sección trasversal de uno de los tubos de desfogue.

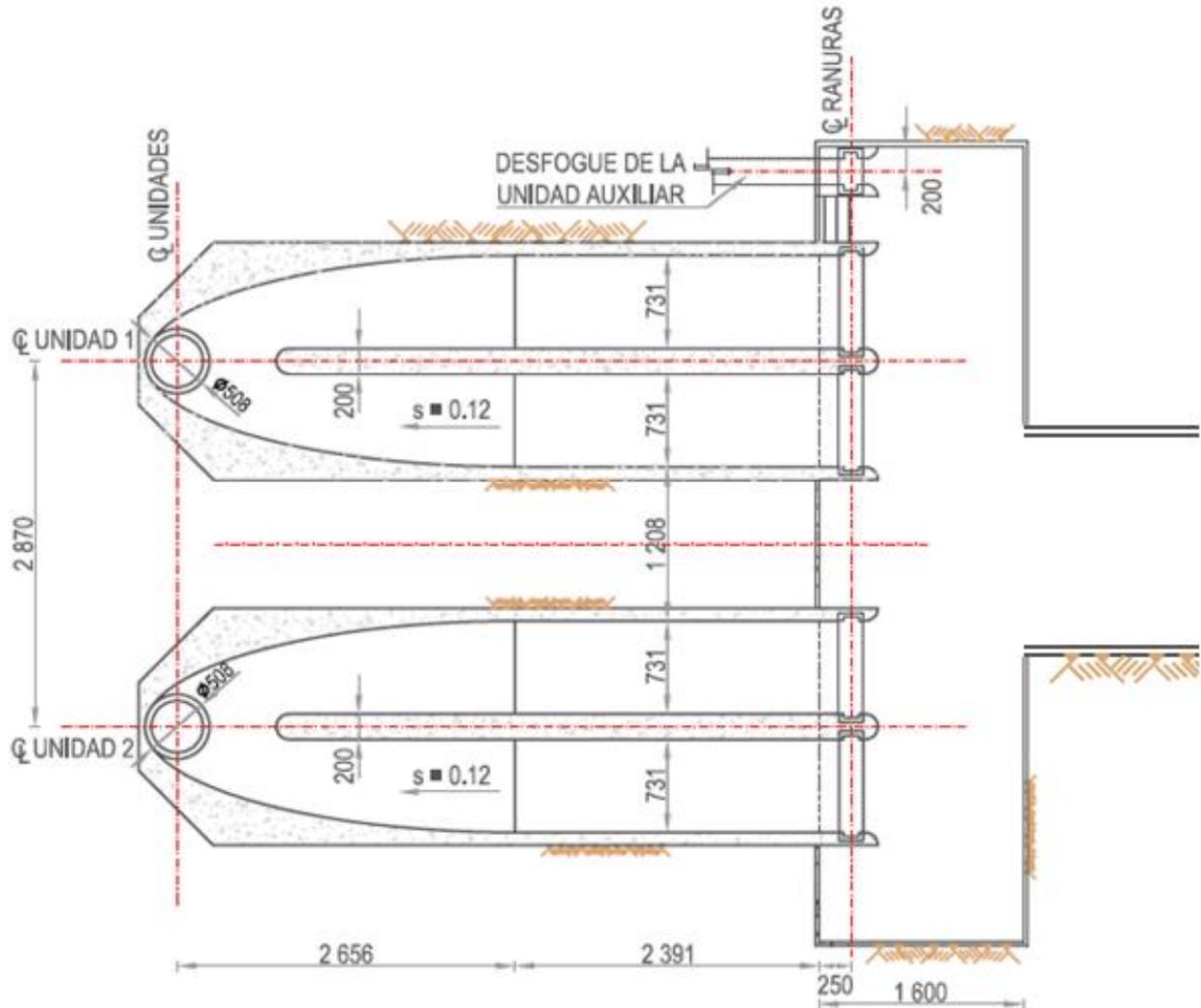


Fig. 2.5. Vista en planta de los tubos de aspiración en unión con el pozo de oscilación de la C.H. La Yesca.

La torre de oscilación, fig. 2.6, consiste en una estructura subterránea de 16 m de ancho por 62.5 m de largo y 60.5 m de altura máxima al eje de la galería, con una diferencia de niveles de oscilación de 4 m entre las condiciones son operación u operando las dos turbinas. El nivel de la superficie libre del agua dentro de la torre en régimen permanente se encuentra en la cota 391.29 m. En operación normal, la descarga no se encuentra ahogada por lo que no se generan efectos transitorios que afectan al sistema de generación. Cuando el vertedor descarga su capacidad total de gasto, de $15110,0 \text{ m}^3/\text{s}$, la descarga se encuentra ahogada por lo que se trabaja a presión, es esta la condición más desfavorable donde los fenómenos transitorios se pueden presentar, generando perturbaciones en el sistema de generación. En el interior de la torre se aloja una estructura, también de concreto, para las ranuras de las compuertas de servicio. El piso de la torre cuenta con una pendiente del 12% igual a los de los túneles de aspiración.

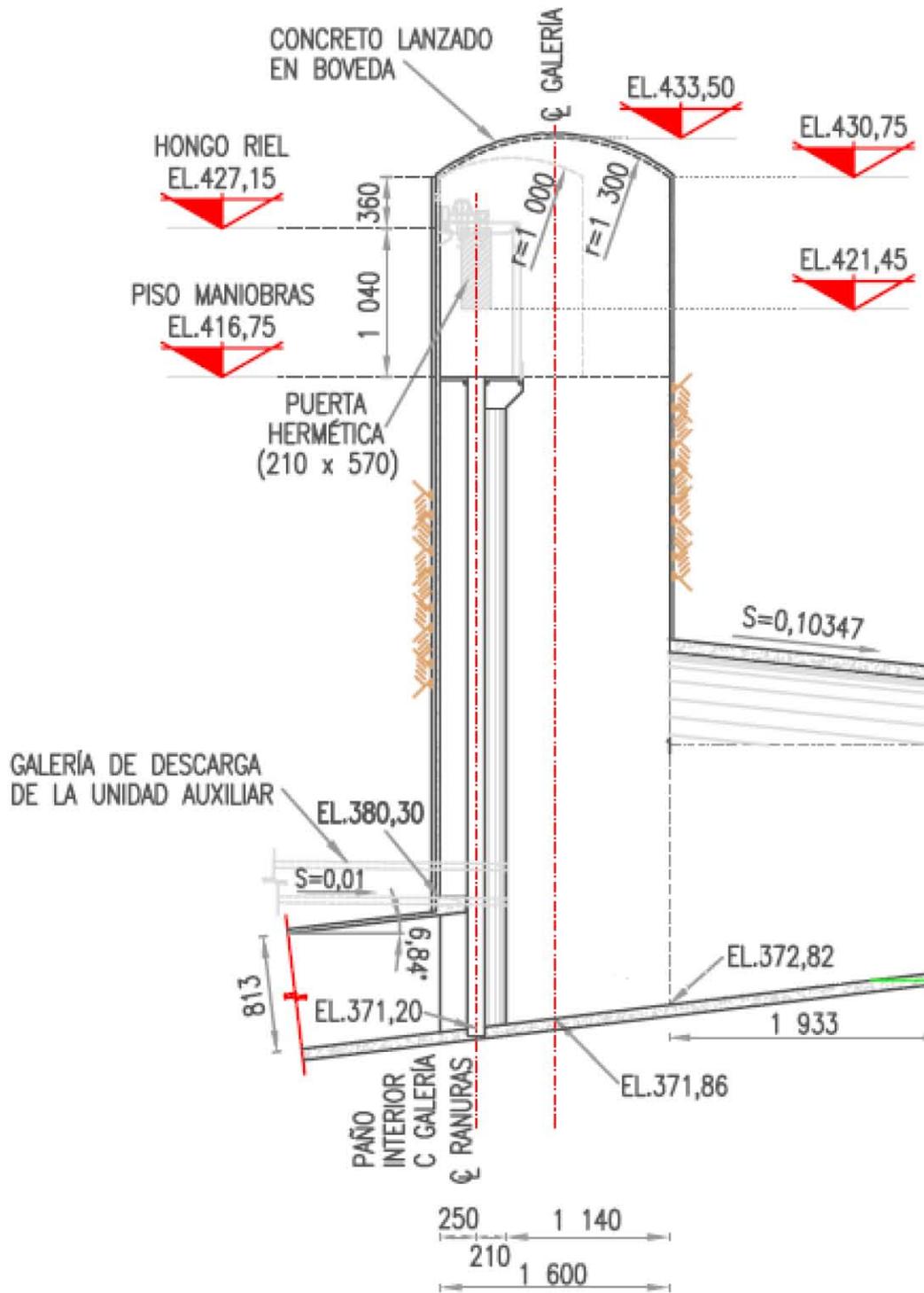


Fig. 2.6. Torre de oscilación de la C.H. La Yesca

3 Modelo físico para analizar el comportamiento de la torre de oscilación de la C.H. La Yesca.

El modelo hidráulico del desfogue de la obra de generación de la C.H. La Yesca, fue construido por el Laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad, con el fin de obtener las pérdidas de carga hidráulica en la torre de oscilación y las fluctuaciones de presión, operando en régimen permanente y transitorio.

Para la construcción del modelo hidráulico se contó con la siguiente información:

1. Planos simplificados del proyecto
2. Curva elevación – gastos del río
3. Programa de operación

En la determinación de la escala a usar para la construcción del modelo se tomó en cuenta el espacio disponible, el gasto de alimentación para su ensaye, el costo y tiempo de construcción del mismo, lo que concluyó a un valor de escala de líneas $L_e = 50$, y, de acuerdo con la similitud de Froude, se obtuvieron los valores de las escalas siguientes.

Escala	Valor
Líneas L_e	50
Velocidades V_e	7.07
Gastos Q_e	17677.67
Rugosidades η_e	1.87
Tiempos T_e	7.0

Las fluctuaciones de presión se obtuvieron mediante la representación en modelo de las principales estructuras que intervienen: las dos tuberías de descarga de las turbinas, torre de oscilación, túnel de desfogue hacia el río, y los propios niveles en el río de acuerdo a las diferentes condiciones propuestas, como se muestra en la figura 3.1 y fotos 1, 2 y 3.

Funcionamiento hidráulico del modelo físico.

Como actividades previas a la simulación de las condiciones definidas más adelante, se realizó la puesta a punto de la instalación realizando las siguientes actividades:

a. Condiciones de frontera

Se representaron las condiciones de frontera, aguas arriba y abajo del desfogue de la obra de generación para régimen permanente y para régimen transitorio.

b. Equipo de medición y su disposición.

Selección del equipo de medición y definición de las secciones de registro (celdas 1, 2, 3, y 4)

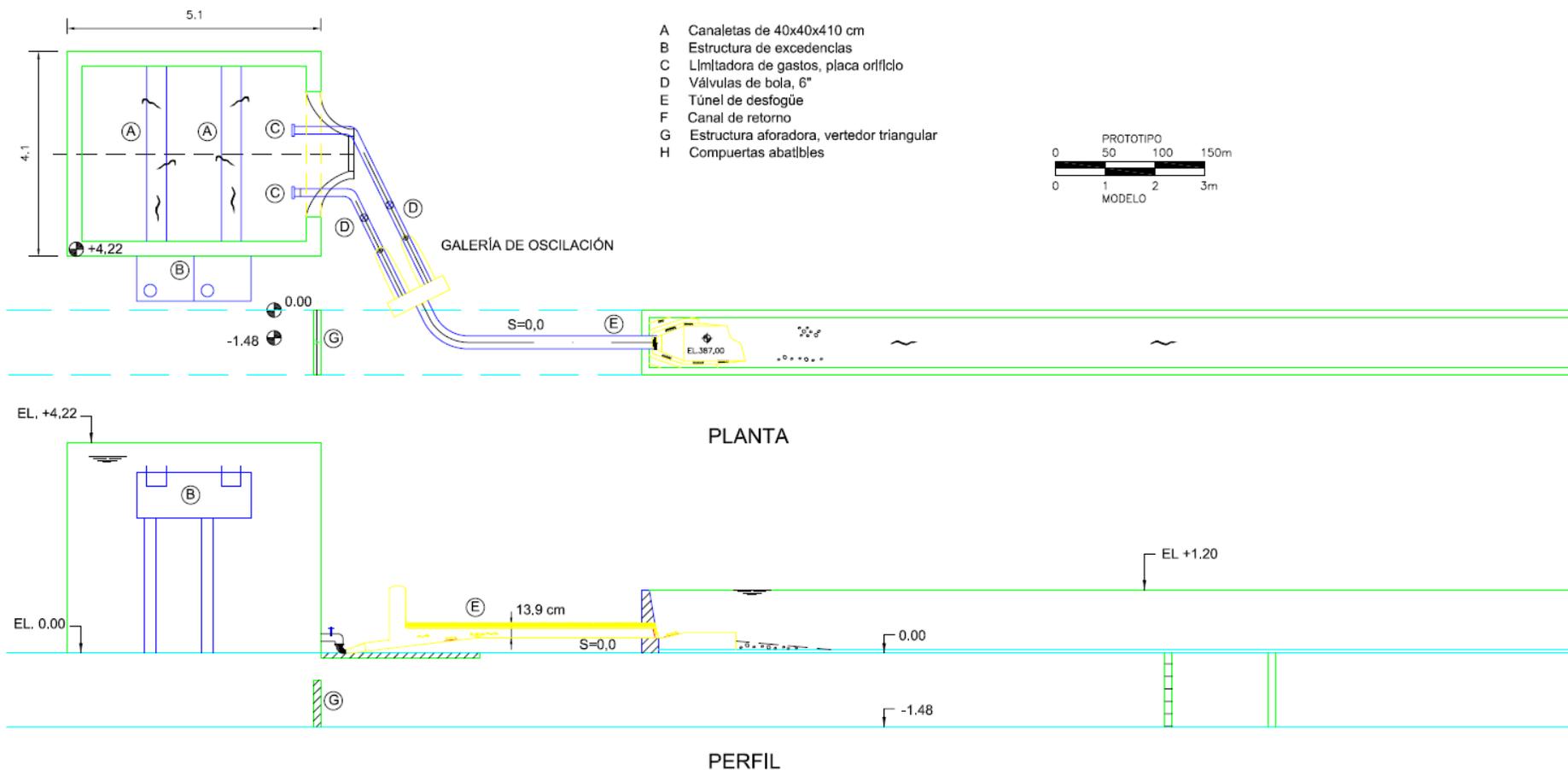


Fig. 3.1. Esquema del modelo físico en planta y perfil.

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.



Foto 1. Tubos de aspiración y válvula de bola para simular las maniobras de toma y rechazo de carga de las turbinas



Foto 2. Servomotores para simular maniobras de toma y rechazo de carga de las turbinas



Foto 3. Torre de oscilación y túnel del desfogue



Foto 4. Portal de salida del túnel de desfogue

Condiciones de operación.

La operación del modelo se basó en la representación de un programa con una serie de maniobras a realizar; para este trabajo se analizan los cuatro casos más desfavorables de rechazo de carga, los cuales permiten su estudio mediante análisis en régimen transitorio, ya que en estos casos la descarga se encuentra ahogada y la conducción trabaja a presión; así como su respectivo caso en régimen permanente, es decir, para cada ensaye se tienen las condiciones iniciales antes de la perturbación y de ello se puede comparar qué tanto aumentan o decrecen las ondas de presión en el momento del evento que genera el régimen transitorio.

Las maniobras analizables para régimen transitorio son las que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Programa de ensayos para simular cierres para la condición de operación normal

Ensayo	Escenario de ensayos	Gasto (m ³ /s)	Rechazo de carga en segundos
1	Q _{máximo} (Dos Unidades) + Q _{vertedor total}	503.00 + 15110 = 15613	6
2	Q _{máximo} (Dos Unidades) + Q _{vertedor media capacidad}	503.00 + 7555 = 8058	6
3	Q _{máximo} (Dos Unidades) + Q _{vertedor total}	503.00 + 15110 = 15615	14
4	Q _{máximo} (Dos Unidades) + Q _{vertedor media capacidad}	503.00 + 7555 = 8058	14

3.1 Régimen permanente.

Antes de señalar las condiciones en operación normal, cabe mencionar que todos los datos que se muestran tanto anteriormente como en consiguiente, han sido llevados a escala real, de prototipo, mediante la utilización de las leyes de similitud de Froude, lo que hace más fácil su comparación con la aplicación de los modelos matemáticos que más adelante se tratarán, ya que en ellos se desarrolla la solución con datos reales de la C. H. La Yesca.

La operación en régimen permanente permitió obtener las condiciones iniciales del modelo hidráulico mediante la utilización de cuatro celdas de presión para la captura de datos, la localización de estas celdas se puede ver en la figura 3.2.

De acuerdo a los escenarios que se muestran en la tabla 3.1, se puso en marcha el modelo representando las siguientes condiciones de acuerdo al régimen permanente:

1. **Prueba A:** Condiciones para los ensayos 1 ($T_c = 6$ s) y 3 ($T_c = 14$ s).

Gasto (2 Unidades): 503.00 m³/s

$$h(T.O.) = 423.17 \text{ m.} \quad h_{descarga} = 421.07 \text{ m}$$

2. **Prueba B:** Condiciones para los ensayos 2 ($T_c = 6$ s) y 4 ($T_c = 14$ s).

Gasto (2 Unidades): 503.00 m³/s

$$h(T.O.) = 411.7 \text{ m} \quad h_{descarga} = 410.46 \text{ m}$$

Una vez representadas las condiciones para los escenarios anteriores se obtuvieron los niveles correspondientes a régimen permanente en la torre de oscilación.

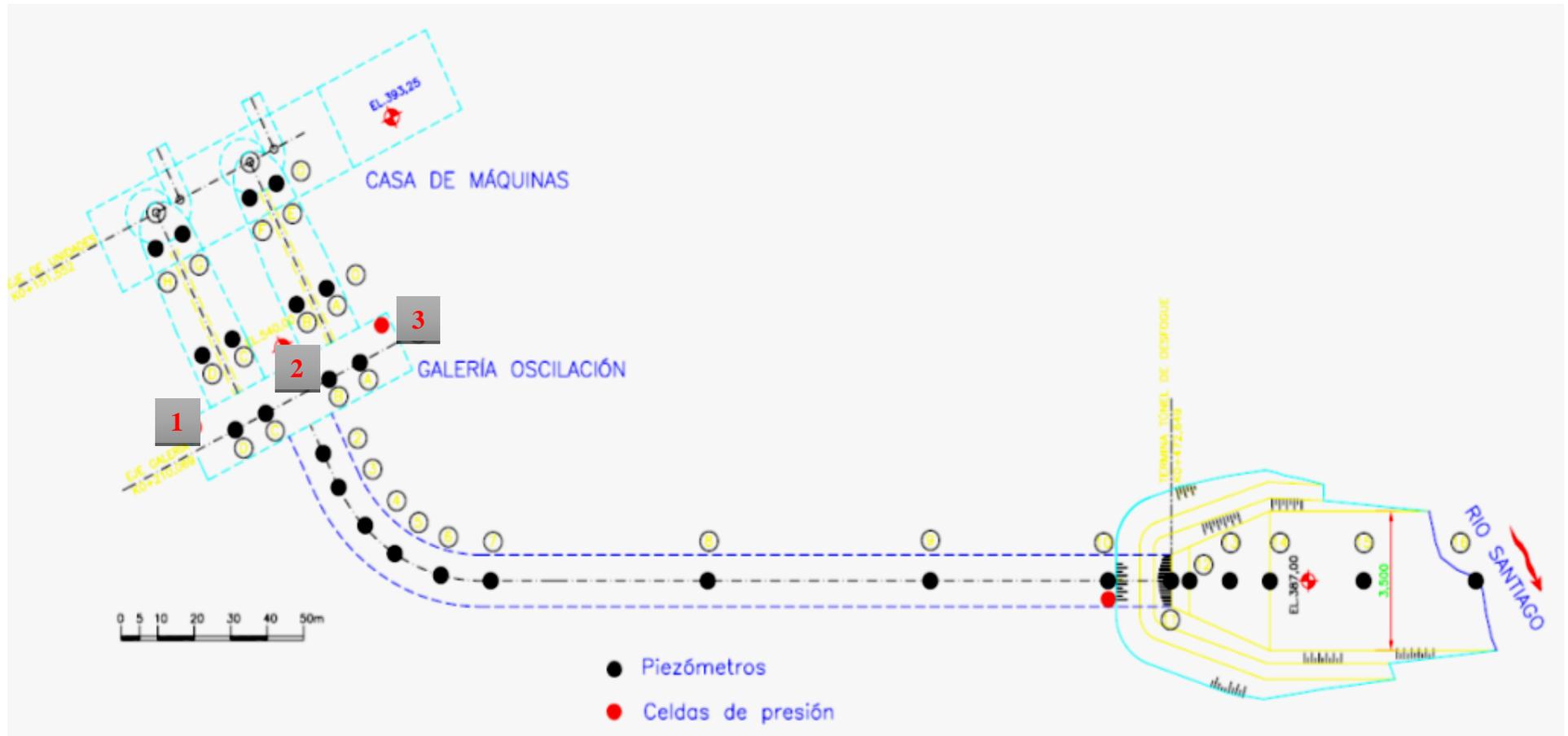


Fig. 3.2. Localización en planta de las celdas de presión, 3 celdas en la torre de oscilación y 1 celda en la descarga del túnel de desfogue.

Las celdas de presión en la torre registraron las siguientes medidas:

Prueba A:

Celda 1: 421.79 m Celda 2: 422.98 m Celda 3: 423.34 m
 Celda 1: 424.03 m Celda 2: 423.08 m Celda 3: 423.81 m Promedio: 423.17 m

Prueba B:

Celda 1: 412.38 m Celda 2: 411.96 m Celda 3: 411.54 m
 Celda 1: 410.74 m Celda 2: 411.87 m Celda 3: 411.73 m Promedio: 411.70 m

3.2 Régimen transitorio.

Para el estudio del comportamiento de la torre de oscilación de la C.H. La Yesca, se modelaron condiciones normales de operación así como los casos más desfavorables al presentarse fenómenos transitorios combinados con la operación parcial y total del vertedor de demasías.

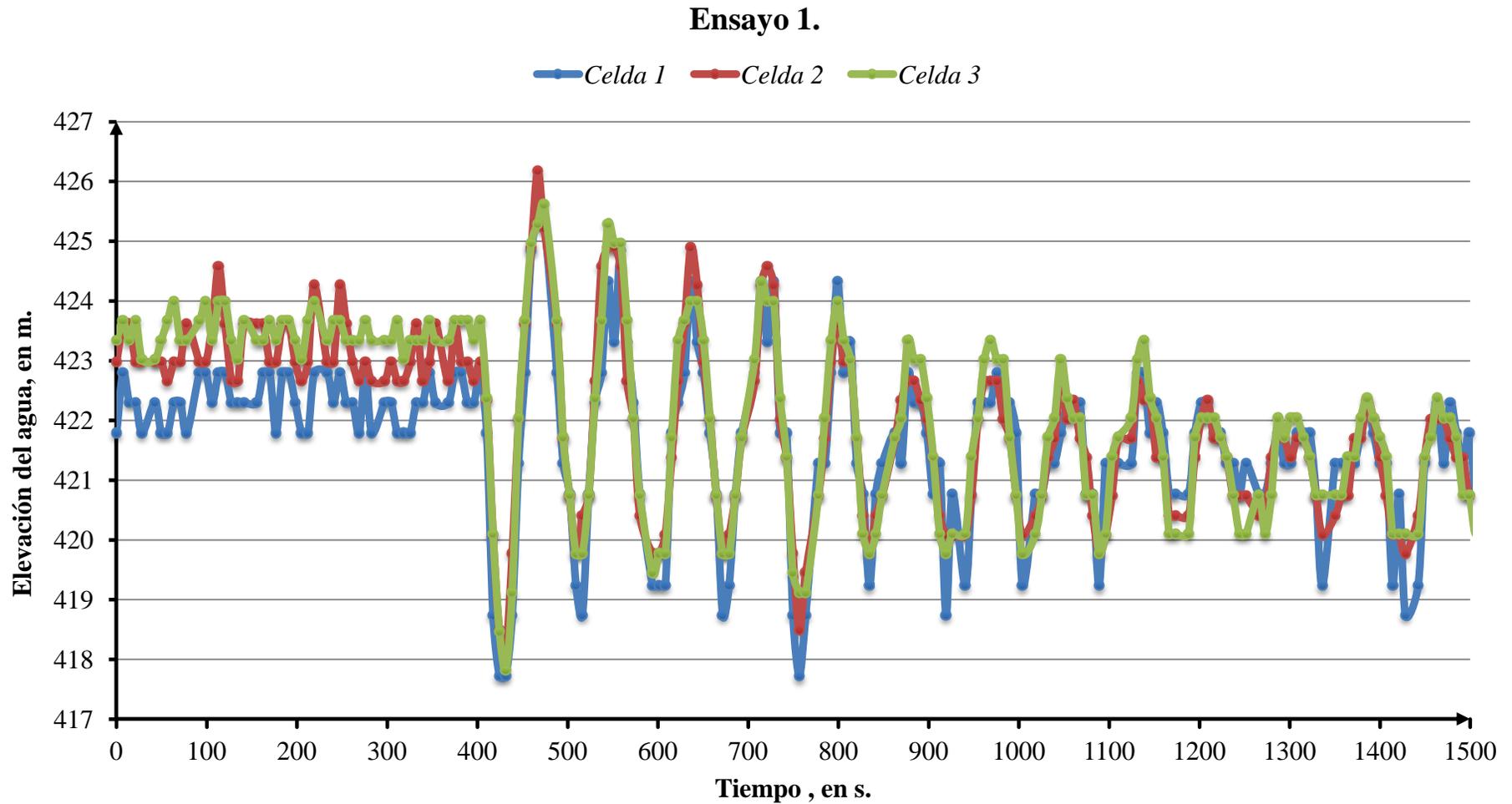
Como se mencionó con anterioridad las pruebas corresponden a los casos con descarga ahogada simulando maniobras de cierre para cada gasto máximo de turbina y tiempo de maniobra requerido, es decir, 6 y 14 segundos.

De los registros obtenidos del modelo, para las diferentes condiciones de operación (tabla 3.1), mediante celdas de presión se registraron las fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación que a continuación se muestran mediante gráficos, los resultados completos se pueden consultar en la Ref. 1.

Ensayo	Escenario de ensayos	Registro (Gráfica)
1	$Q_{\text{máximo}} (\text{Dos Unidades}) + Q_{\text{vertedor total}}$	3.1
2	$Q_{\text{máximo}} (\text{Dos Unidades}) + Q_{\text{vertedor media capacidad}}$	3.2
3	$Q_{\text{máximo}} (\text{Dos Unidades}) + Q_{\text{vertedor total}}$	3.3
4	$Q_{\text{máximo}} (\text{Dos Unidades}) + Q_{\text{vertedor media capacidad}}$	3.4

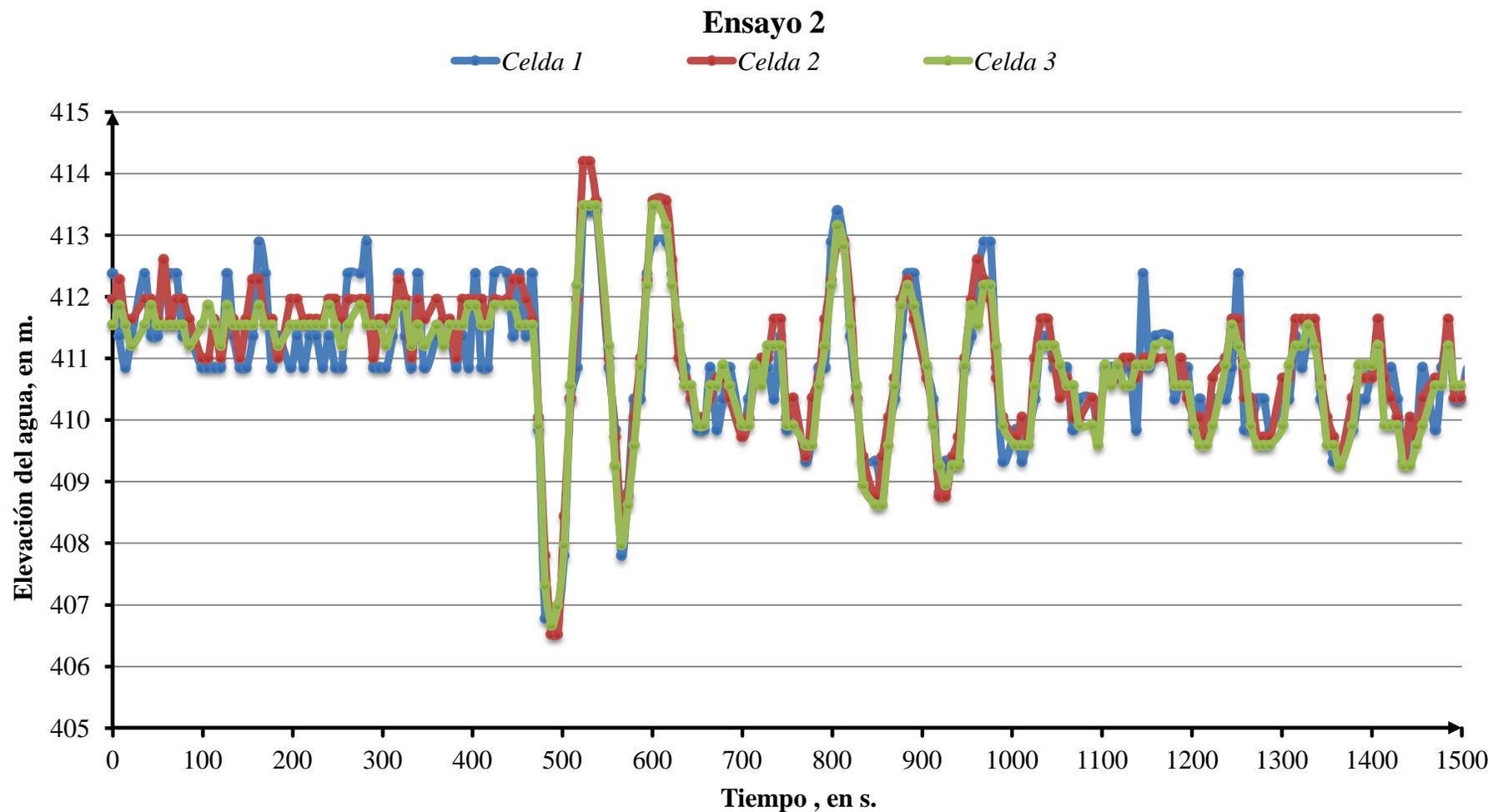
En los registros mostrados a continuación los primeros segundos representa la parte en que el modelo trabaja a régimen permanente inicialmente, para después dar paso a la maniobra de rechazo de carga la cual provoca las perturbaciones que se muestran.

Registro de ensayo 1, ($Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor total}}$).



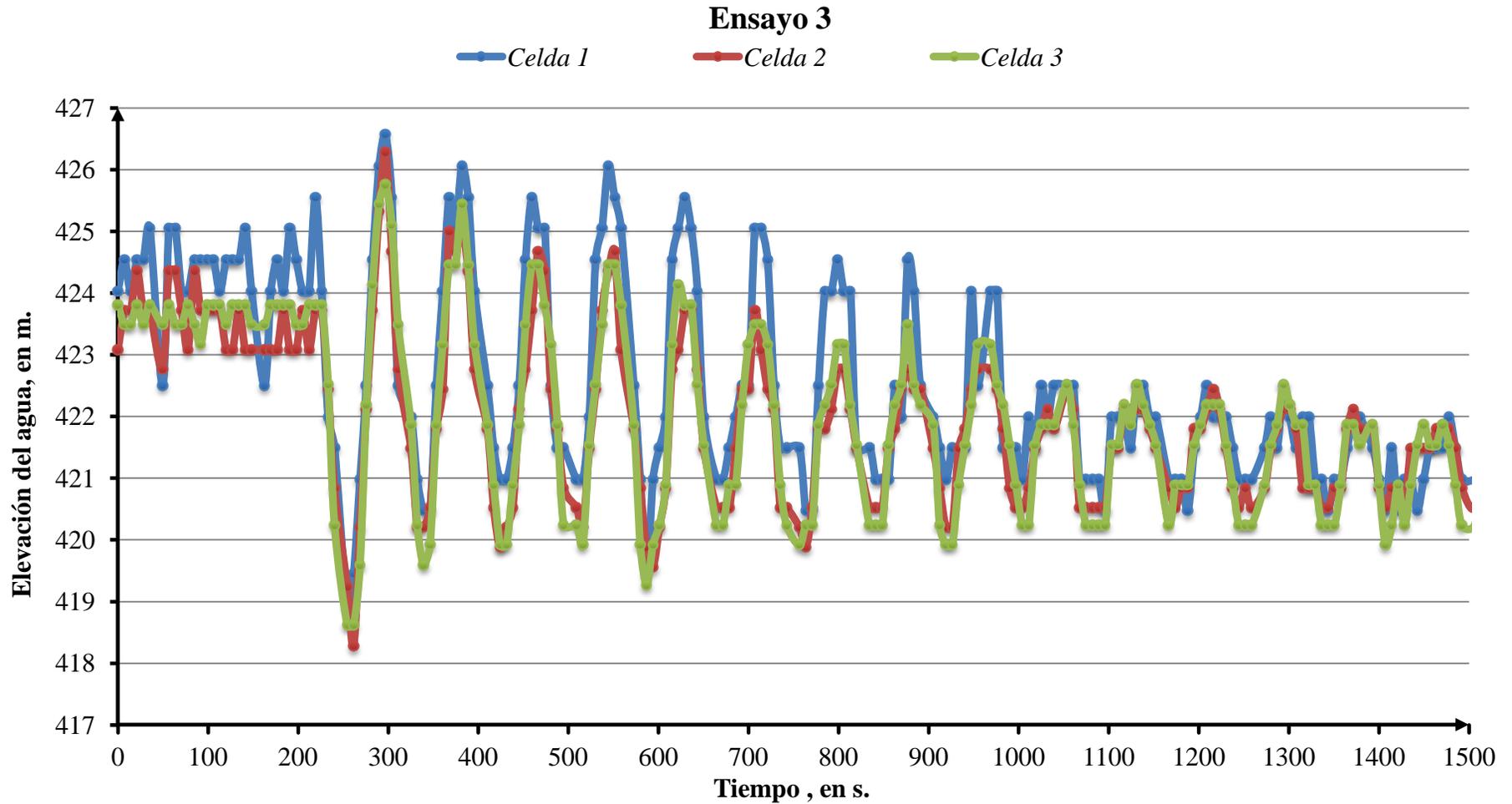
Gráfica 3.1. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 6 seg. Unidad uno y dos.

Registro de ensayo 2, ($Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor media capacidad}}$).



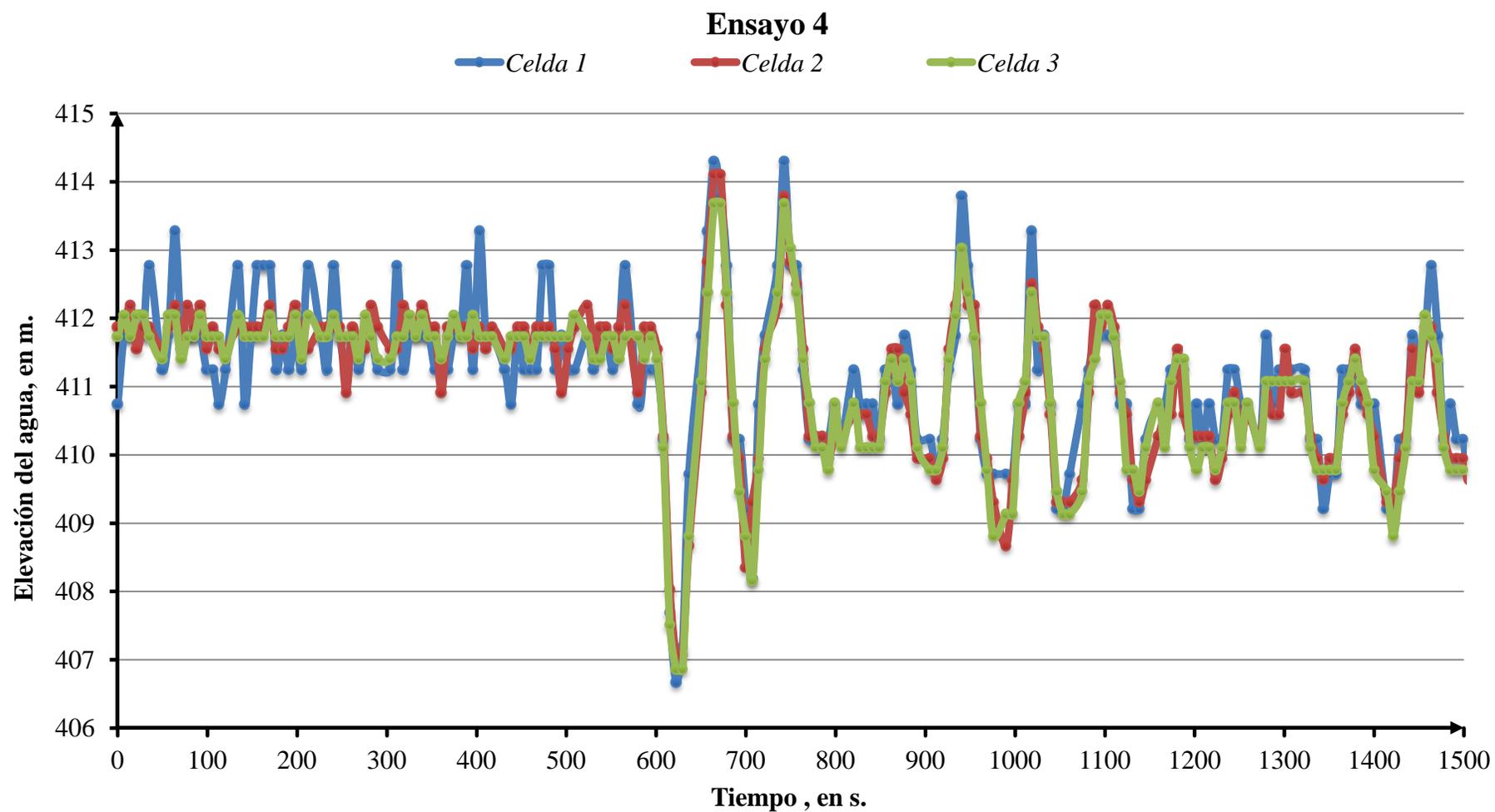
Gráfica 3.2. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q = 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 6 seg. Unidad uno y dos.

Registro de ensayo 3, ($Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor total}}$).



Gráfica 3.3. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q = 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 14 seg. Unidad uno y dos.

Registro de ensayo 4, ($Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor media capacidad}}$).



Gráfica 3.4. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 14 seg. Unidad uno y dos.

4 Comparación de las medidas de la variación del nivel del agua en el pozo de oscilación con los niveles obtenidos a través de cálculos numéricos.

En este capítulo se presentan comparaciones de los registros de la variación del nivel del agua en el pozo de oscilación obtenidos en Laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad con resultados de simulaciones numéricas realizadas con el modelo de oscilación de masa y el de tubería elástica. Para este último se utilizó el sistema de simulación de transitorios Trans desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM.)

4.1 Modelo de oscilación de masa.

A través del modelo de oscilación de masa se puede analizar la dinámica de un sistema hidráulico en el que se considera a la tubería rígida ($D = cte$) y al fluido incompresible ($\rho = cte$). Este modelo está formado por la ecuación de Bernoulli generalizada o ecuación dinámica (4.1) y la ecuación de continuidad o conservación de la masa (4.2), ésta última aplicada a los puntos cualesquiera 1 y 2 de la tubería.

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(h + \frac{V^2}{2g} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - f \frac{V|V|}{2gD} \quad (4.1)$$

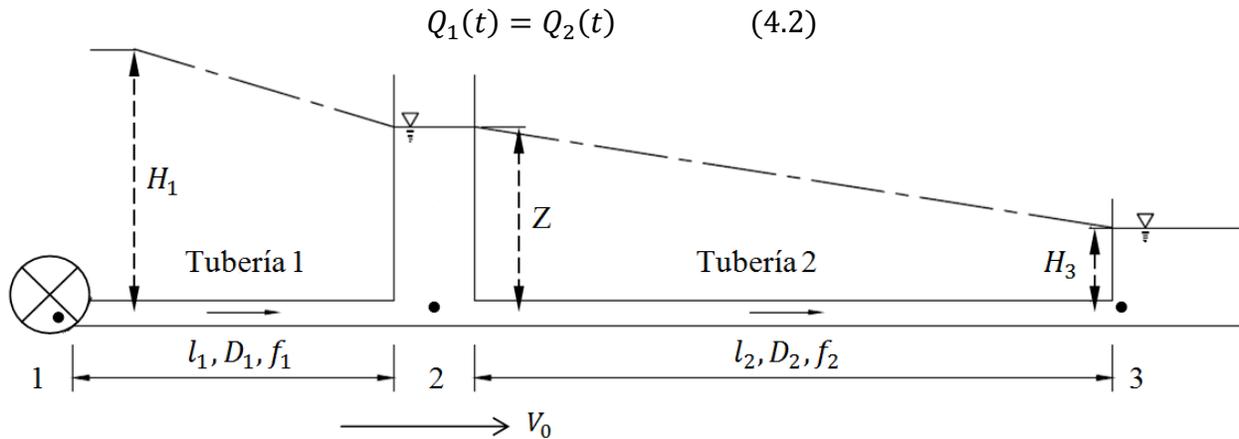


Fig. 4. 1. Sistema hidráulico modelado con oscilación de masa.

El término a la izquierda de la ecuación (4.1) se denomina carga total en la sección del tubo considerado y se suele designar como H , y está compuesta por la carga piezométrica (h) y la carga de velocidad ($V^2/2g$). La expresión (4.1) describe el proceso de pérdida de carga (término de la izquierda) debido a una pérdida inercial que depende de la aceleración de la columna líquida ($\partial V/\partial t$) y a la fricción distribuida a lo largo de la tubería. En régimen estacionario el término de pérdida inercial se reduce a cero, ya que la velocidad es

constante en todo momento, y se tiene la expresión clásica de pérdida de carga piezométrica como función del cuadrado de la velocidad.

La ecuación de continuidad (4.2) implica que la masa del fluido es constante lo quiere decir que no puede haber acumulación de fluido, en consecuencia para todo instante se verifica para dos secciones cualesquiera 1 y 2 que el gasto que atraviesa una es el mismo que pasa por la otra.

En este trabajo se consideró que tanto la tubería que une a los puntos 1 y 2 como la que une a 2 con 3, de la figura 4.1, son tuberías de diámetro constante. Por lo que integrando la ecuación 4.1 con respecto a la posición y evaluando en los puntos 1 y 2, separados una distancia l_1 , se tiene:

$$\int_0^{l_1} \partial \left(h + \frac{V^2}{2g} \right) = \left(-\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - f \frac{V|V|}{2gD} \right) \int_0^{l_1} \partial s$$

$$\left(h_2 - \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(h_1 - \frac{V_1^2}{2g} \right) = -\frac{l_1}{g} \frac{dV_1}{dt} - f_1 \frac{V_1|V_1|}{2gD_1} l_1 \quad ; V_1 = V_2 \rightarrow \text{porque } D_1 = cte$$

$$h_2 - h_1 = -\frac{l_1}{g} \frac{dV_1}{dt} - \frac{f_1 l_1}{2gD_1} V_1|V_1|$$

Dividiendo entre el área de la tubería:

$$h_2 - h_1 = -\frac{l_1}{gA_1} \frac{dQ_1}{dt} - \frac{f_1 l_1}{2gD_1 A_1^2} Q_1|Q_1| \quad (4.3)$$

De la misma manera se obtiene para los puntos 2 y 3, separados por una distancia l_2 :

$$h_3 - h_2 = -\frac{l_2}{g} \frac{dV_2}{dt} - \frac{f_2 l_2}{2gD_2} V_2|V_2|$$

$$h_3 - h_2 = -\frac{l_2}{gA_2} \frac{dQ_2}{dt} - \frac{f_2 l_2}{2gD_2 A_2^2} Q_2|Q_2| \quad (4.4)$$

Aplicando la ecuación de continuidad 4.2 se tiene:

$$Q_1(t) = Q_2(t) \quad (4.5)$$

$$Q_2(t) = Q_3(t) \quad (4.6)$$

Las ecuaciones 4.3 a 4.6 forman un sistema de 4 ecuaciones con 6 incógnitas ($h_1, h_2, h_3, Q_1, Q_2, Q_3$) que para resolverlo se deben considerar las condiciones de frontera e iniciales del sistema hidráulico.

Condiciones de frontera.

Para reproducir con el modelo de oscilación de masa las medidas tomadas en el laboratorio de CFE, se considerará la frontera aguas arriba la que determina el cierre de las válvulas que representan el cierre de los álabes del distribuidor y la condición de frontera aguas abajo como si la descarga ocurriera en un tanque de carga constante, como se muestra en la figura 4.1.

El nivel de la superficie libre del agua en la descarga cuando opera el vertedor de demasías, ya sea en su capacidad total o media, el cual se considera constante, asegura que se trabaje a presión dentro de la tubería. Dicho nivel se identificará como:

$$H_{descarga} \quad (\text{Nivel en el río}) = \text{constante}$$

Condiciones iniciales.

Las condiciones iniciales corresponden a la condición de operación en flujo permanente. La carga y el gasto de operación que se indican en la Tabla 3.1 y las válvulas que representan la operación de las turbinas completamente abiertas.

Superficie libre del agua dentro de la torre de oscilación.

Durante el flujo permanente ($t = 0$), el nivel inicial en la torre de oscilación Z , se encuentra definido por la ecuación:

$$h_2 = h_3 + \frac{f_2 l_2 V_0^2}{2gD_2} \quad (4.7)$$

siendo

V_0 la velocidad del agua dentro de la tubería en flujo permanente; es decir, antes de la maniobra, en este caso cierre de la válvula (rechazo de carga).

h_3 la carga en la descarga al río,

f_2 el coeficiente de fricción de la tubería entre la torre de oscilación y descarga al río

l_2 la distancia entre la torre de oscilación y la descarga al río

D_2 el diámetro de la tubería entre la torre y la descarga

Simulación de maniobras.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de esta tesis es comparar las medidas de la oscilación del pozo obtenidas en el modelo físico con los resultados de simulaciones numéricas cuando se realizan las maniobras descritas en la tabla 3.1.

Para esto se requiere conocer la ley de cierre $q = f(t)$ que asegure que en el tiempo correspondiente a cada una de estas maniobras el gasto sea cero, pudiendo ser ésta del tipo lineal, escalón, o en el mejor de los caso, y si fuera posible tener, la función exacta que describa el comportamiento del gasto durante el cierre. Cabe recordar que la posición de la apertura de la válvula (fig. 4.1) representa la posición de los álabes del distribuidor.

Cuando la válvula se cierra el flujo pasa de ser permanente a transitorio, la presión, el gasto y el nivel del agua en la torre varían a través de tiempo. La variación en el tiempo del nivel de la torre (H_{TO}) depende de su área transversal (A_{TO}) y el gasto (Q_{TO}) que entra y sale de ella, como lo indica la ecuación 4.8 en la que se ha considerado el gasto positivo cuando sale de la torre, como se indica en la figura 4.2.

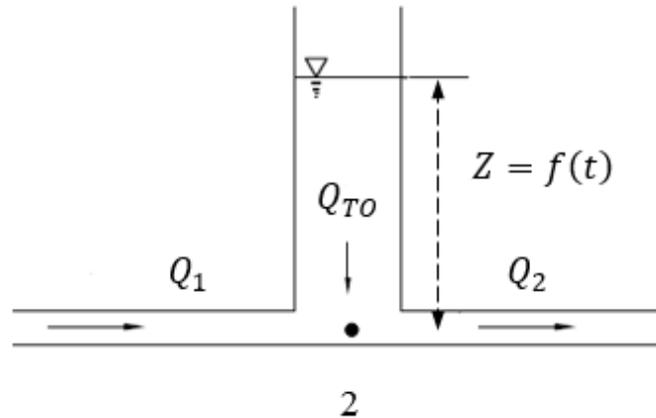


Fig. 4. 2. Gasto de salida en la torre de oscilación, considerado como positivo.

$$\frac{dH_{TO}}{dt} = -\frac{Q_{TO}}{A_{TO}} \quad (4.8)$$

Entonces, siguiendo la nomenclatura de las figuras 4.1 y 4.2, el sistema de ecuaciones con el que se puede calcular el nivel del agua en la torre de oscilación es el siguiente:

- $H_2 - H_1 = -\frac{l_1}{gA_1} \frac{dQ_1}{dt} - \frac{f_1 l_1}{2gD_1 A_1^2} Q_1 |Q_1|$
- $H_3 - H_2 = -\frac{l_2}{gA_2} \frac{dQ_2}{dt} - \frac{f_2 l_2}{2gD_2 A_2^2} Q_2 |Q_2|$
- $Q_1 + Q_{TO} = Q_2$
- $\frac{dH_{TO}}{dt} = -\frac{Q_{TO}}{A_{TO}}$

- $Z = H_2$
- $H_3 = H_{descarga} = cte$
- $Q_1 = f(t)$

Este sistema de ecuaciones formado por siete ecuaciones con siete incógnitas ($H_1, H_2, H_3, Q_1, Q_2, Q_{TO}, Z$) se puede resolver numéricamente escribiéndolo como sigue, en donde se consideró la ley de cierre de la válvula como la función lineal, $Q_1 = a + bt$.

Procedimiento de cálculo.

1. $Q_1 = a + bt$
2. $H_1(t) = Z(t - \Delta t) + K_1 Q_1(t) |q_1(t)| + I_1 Q_1(t)$
3. $Q_{TO}(t) = Q_2(t - \Delta t) - Q_1(t)$
4. $Z = Z(t - \Delta t) - Q_{TO}(t) \left(\frac{\Delta t}{A_{TO}} \right)$
5. $Q_2(t) = Q_2(t - \Delta t) + \left(\frac{\Delta t}{I_2} \right) (H_3 - Z(t) - K_2 Q_2(t - \Delta t) |Q_2(t - \Delta t)|)$
6. $H_3 = H_{descarga} = cte$
7. $H_2(t) = Z(t)$

donde

$$I_i = \frac{l_i}{gA_i} \quad y \quad k_i = f_i \frac{l_i}{2gD_i A_i^2} \quad \dots \text{para } i = 1, 2$$

Siendo (t) instante de cálculo sobre el que se quiere obtener resultados, y

$(t - \Delta t)$ instante de cálculo anterior al que se está calculando

Para aplicar el modelo de oscilación de masa al caso del modelo del laboratorio de la C.H. La Yesca se hizo las siguientes consideraciones.

Consideraciones.

La comparación de las medidas experimentales con los resultados teóricos obtenidos utilizando el modelo de oscilación de masa se realizó considerando un único tubo a lo largo de la obra de generación equivalente a los dos tubos de aspiración de las turbinas. El tubo equivalente se consideró de sección circular, su longitud igual a las de ambos tubos de aspiración y el diámetro el correspondiente para que éste contenga el mismo volumen (V) de agua que contienen los dos tubos de aspiración. El diámetro del tubo equivalente se calculó de la siguiente manera.

Tubo equivalente a los tubos de desfogue de las turbinas

Datos de las tuberías de descarga de las turbinas.

$$\text{Longitud } (L) = 23.91 \text{ m}$$

$$\text{Área por tubería } (A_r) = 118.86 \text{ m}^2$$

Obtención del diámetro equivalente a las dos tuberías.

Dado que la longitud es la misma, el cálculo se simplifica a la igualdad de áreas, de la siguiente manera:

$$A_r = A_{sc} \quad (4.9)$$

donde

A_r es el área por tubo en la descarga de las turbinas

A_{sc} es el área del tubo equivalente de sección circular; $\frac{\pi D^2}{4}$

Por lo que el diámetro equivalente a las dos tuberías necesario para la simulación, se obtiene a partir del siguiente análisis.

$$D = \sqrt{\frac{8A_r}{\pi}} \quad (4.10)$$

Sustituyendo valores en 4.10 se tiene que:

$$D = \sqrt{\frac{8(118.86)}{\pi}} = 17.3975 \text{ m}$$

Diámetro equivalente al túnel de desfogue.

El túnel de descarga al río tiene una sección en portal, que por motivos de simplificación en los cálculos se propone simularlo como un tubo de sección circular, por lo que es necesario obtener el diámetro equivalente. De igual manera que el caso anterior la longitud del tubo real y el equivalente es la misma, por lo que la equivalencia de volumen en cada tubo se reduce a una equivalencia entre las áreas de cada tubo, como se muestra a continuación.

$$A_{dp} = A_{dc} \quad (4.11)$$

donde

A_{dp} es el área del tubo de desfogue de sección portal, 166 m^2

A_{dc} es el área del tubo equivalente en sección circular, $\frac{\pi D^2}{4}$

De acuerdo a lo anterior el diámetro equivalente necesario resulta ser:

$$D = \sqrt{\frac{4A_{dp}}{\pi}} = 14.53 \text{ m}$$

4.1.1 Comparación de los cálculos numéricos con los registros del modelo físico.

Teniendo todos los datos necesarios y habiendo hecho las consideraciones para la realización y solución de este modelo, se presenta a continuación la aplicación del modelo con sus correspondientes resultados en representación grafica para cada uno de los ensayos del programa de maniobras de la tabla 3.1.

Datos de la instalación.

Gasto en flujo permanente	$Q_1 = 503 \text{ m}^3/\text{s}$ (gasto de diseño)
Nivel en la descarga	$H_3 = 421.07 \text{ m}$ (ensayo 1 y 3)
	$H_3 = 410.46 \text{ m}$ (ensayo 2 y 4)

Tubo 1

Diámetro	$D_1 = 17.39 \text{ m}$
Área	$A_1 = 237.720 \text{ m}^2$
Longitud	$l_1 = 23.91 \text{ m}$
Coef. Darcy – Weisbach	$f_1 = 1.08$

Tubo 2

Diámetro	$D_2 = 14.53 \text{ m}$
Área	$A_2 = 165.996 \text{ m}^2$

Longitud $l_2 = 254.58 \text{ m}$
 Coef. Darcy – Weisbach $f_2 = 0.136$

Torre de oscilación

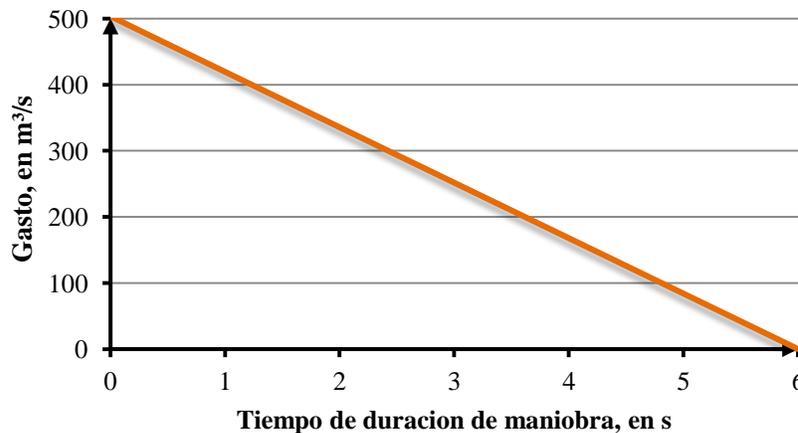
Área $A_{TO} = 1000 \text{ m}^2$
 Nivel de agua (F. Permanente) $H_2 = 423.17 \text{ m}$ (ensayo 1 y 3)
 $H_2 = 411.96 \text{ m}$ (ensayo 2 y 4)

Ensayo 1, $Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor total}}$

Ley de cierre (tiempo de maniobra 6 segundos).

Se tienen dos leyes de cierre para las 4 maniobras a analizar, puesto que el gasto es el mismo en todas las pruebas cambiando solo el tiempo de respuesta de la maniobra, es decir el gasto debe ser llevado a cero en 6 y 14 segundos, además de para este trabajo considerar leyes de cierre lineales. Para el primer y segundo ensayo se tiene un tiempo de cierre a 6 segundos, por lo que $Q_1 = f(t)$, se plantea de la siguiente forma:

La función que describa el comportamiento del gasto debe comportarse de la siguiente manera, lo cual asegura un gasto igual a cero al final de la maniobra de cierre:



Gráfica 4.1. Ley de cierre, simulación de un cierre lineal en 6 segundos.

La función que describe el comportamiento exacto de la recta mostrada en la grafica anterior (4.1), es la de una recta de la forma:

$$Q = a - bt$$

Para este caso:

a es el gasto que diseño (ordenada de origen), $503 \text{ m}^3/\text{s}$

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

b es la pendiente de la función lineal $b = \frac{500}{6} = 83.333$

Quedando la función para la ley de cierre:

$$Q_1 = 503 - 83.333t$$

Cálculos.

Se realizará un ejemplo de cálculo para los primeros segundos, entendiéndose que las demás pruebas se realizaron de la misma manera.

Se propone un Δt , el cual indicara que cada cierto tiempo se obtendrán resultados. Para todos los ensayos se ha asignado un valor de 0.5 s.

Siguiendo la metodología de solución descrita anteriormente, el primer instante de cálculo es cuando $t = 0$ s, es decir, cuando el sistema opera a gasto establecido; lo cual indica que se conocen los valores de Q_1 , H_1 , Z , Q_2 de las ecuaciones 1), 2), 3), 4), y 5) del procedimiento de cálculo, y en la torre de oscilación no ingresa, ni sale, gasto alguno.

Segundo instante de cálculo:

$$t = 0.5 \text{ s}$$

Para el segundo instante de cálculo el gasto, según la ley de cierre $Q_1 = f(t)$, cambia, por lo que se deben aplicar las ecuaciones de oscilación de masa ya que para ese momento la torre comienza a operar dando agua para cumplir con la demanda que se tenía anteriormente y por consiguiente su nivel difiere al inicial.

1. $Q_1 = 503 - 83.333(0.5) = 461.083 \text{ m}^3/\text{s}$

En los primeros 0.5 s, el gasto ha comenzado a reducirse debido a la simulación de rechazo de carga.

2. $H_1(t) = Z(t - \Delta t) + K_1 Q_1(t) |Q_1(t)| + I_1 Q_1(t) =$

$$423.17 + 1.3387E^{-6}(461.083)|461.083| + 001025(461.083) = 428.18 \text{ m}$$

3. $Q_{TO}(t) = Q_2(t - \Delta t) - Q_1(t) = 503 - 461.083 = 41.9167 \text{ m}^3/\text{s}$

La torre de oscilación comienza a funcionar brindando agua a la tubería de aguas arriba tratando de recuperar el gasto que antes se tenía.

4. $Z = Z(t - \Delta t) - Q_{TO}(t) \left(\frac{\Delta t}{A_{TO}} \right) = 423.17 - 41.9167 \left(\frac{0.5}{1000} \right) = 423.149 \text{ m}$

Indicando que el nivel en la torre comienza a descender.

$$5. Q_2(t) = Q_2(t - \Delta t) + \left(\frac{\Delta t}{I_2}\right) (H_3 - Z(t) - K_2 Q_2(t - \Delta t)|Q_2(t - \Delta t)|) =$$

$$503 + \left(\frac{0.5}{0.1563}\right)(421.07 - 423.149 - 4.4067E^{-6}(503)|503|) = 506.083 \text{ m}^3/\text{s}$$

6. $H_3 = 421.07$, constante

7. $H_2 = Z$

Siguiendo el mismo procedimiento hasta llegar al tiempo que se requiera para su análisis; dada la comparación con los resultados experimentales se calcula hasta un tiempo de 1500 s.

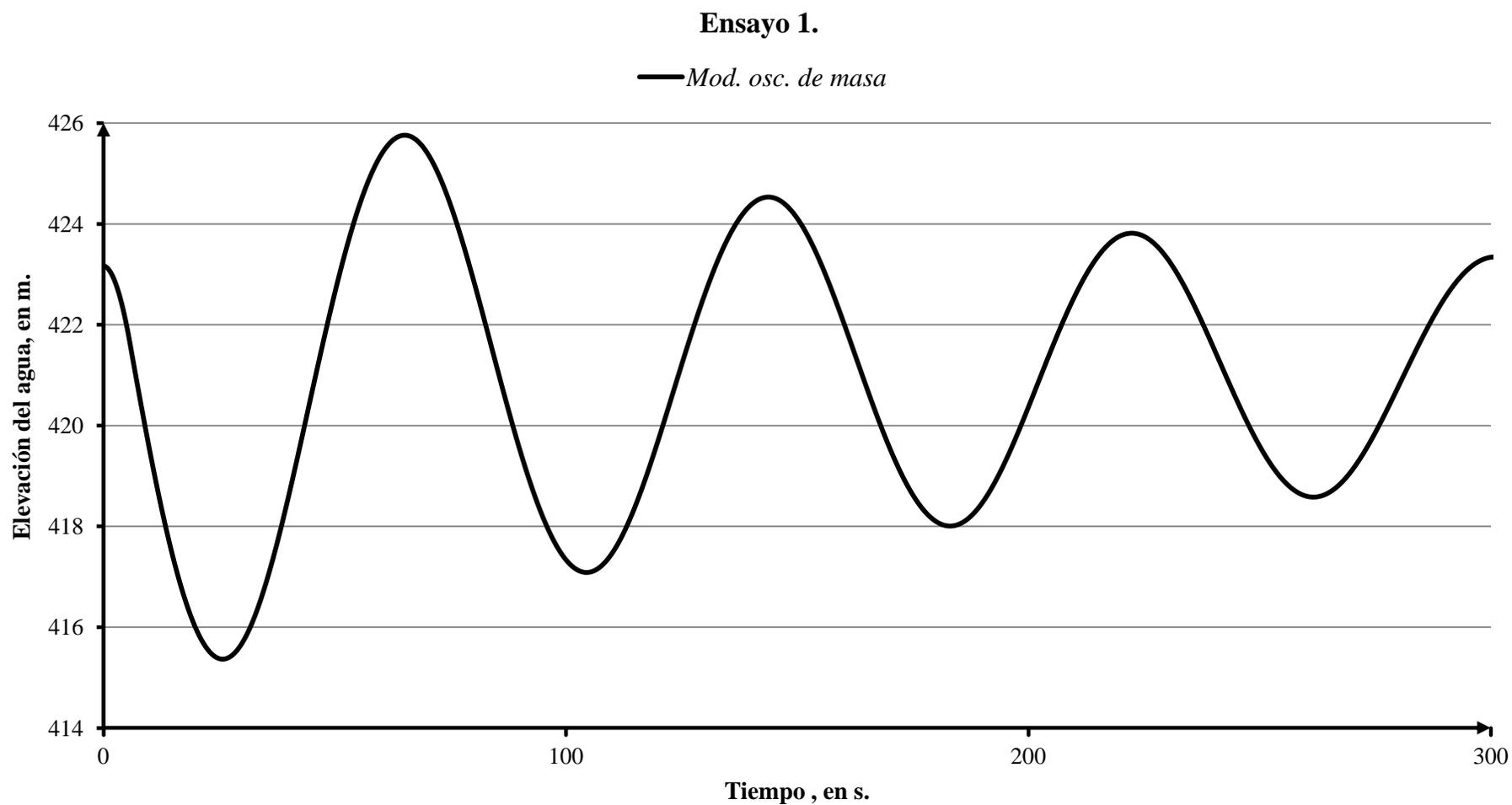
Los demás cálculos fueron fácilmente programados en una hoja de cálculo computacional, siendo mostrados a continuación sólo los primeros y últimos segundos. En la gráfica 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

TABLA 4.1. RESULTADOS DE ENSAYO I, (Q MÁXIMO (DOS UNIDADES) + Q VERTEDOR TOTAL).

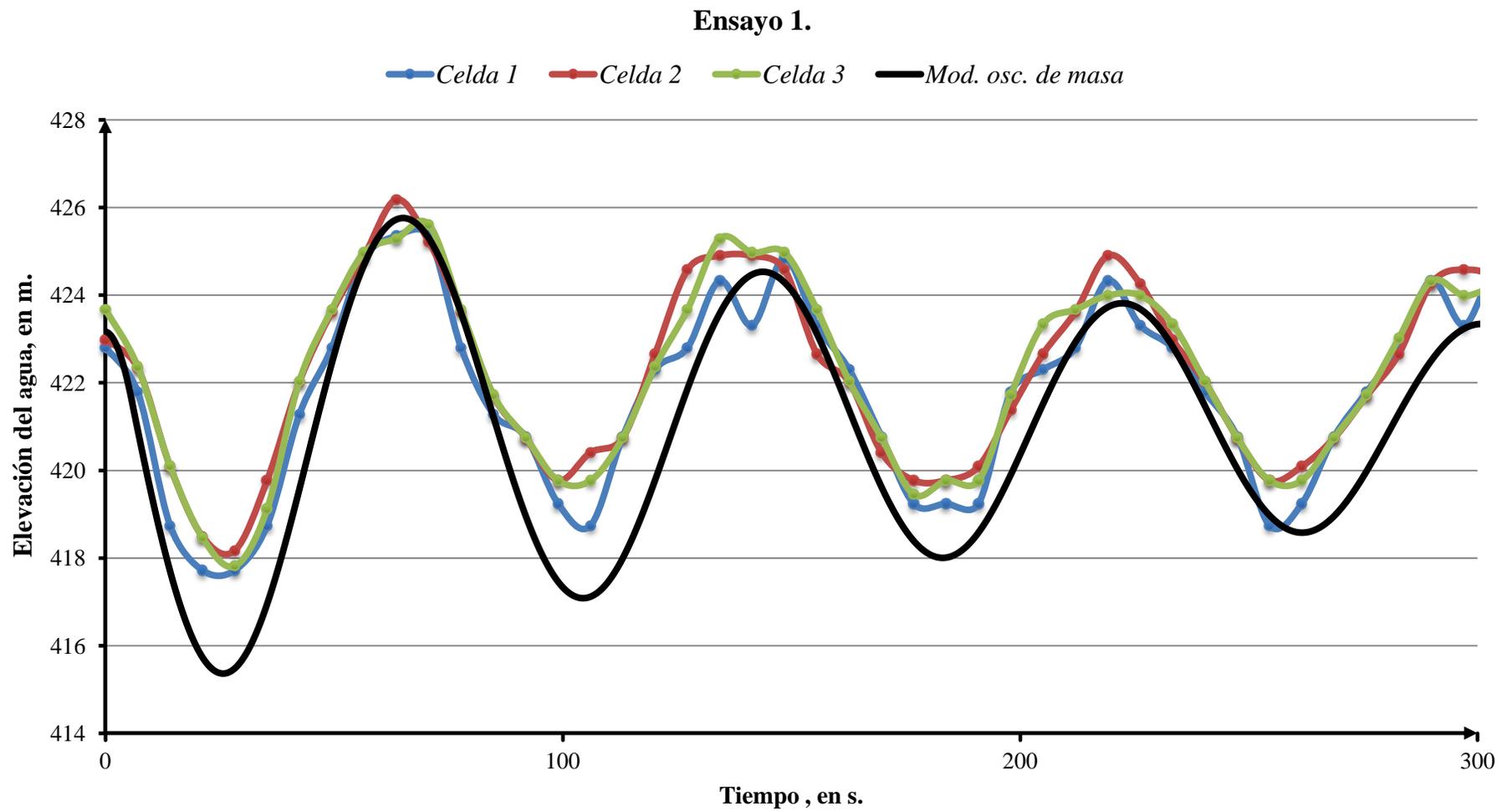
$t \text{ (s)}$	$QI=f(t)$	$\frac{HI(t)=Z(t-\Delta t)+K1Q1(t)/Q1(t)+IIQ1(t)}{I}$	$\frac{QT(t)=Q2(t-\Delta t)-Q1(t)}{I}$	$\frac{Z=Z(t-\Delta t)-QTO(t)(\Delta t/ATO)}{I}$	$\frac{Q2(t)=Q2(t-\Delta t)+(\Delta t/I2)(H3-Z(t)-K2Q2(t-\Delta t) Q2(t-\Delta t))}{I}$
0.0	503.000			423.170	503.000
0.5	461.083	428.182	41.917	423.149	506.083
1.0	419.167	427.682	86.917	423.106	508.984
1.5	377.250	427.164	131.734	423.040	511.632
2.0	335.333	426.628	176.299	422.952	513.961
2.5	293.417	426.075	220.544	422.841	515.903
3.0	251.500	425.505	264.403	422.709	517.394
3.5	209.583	424.917	307.811	422.555	518.371
4.0	167.667	424.312	350.704	422.380	518.773
4.5	125.750	423.690	393.023	422.183	518.541
5.0	83.833	423.052	434.707	421.966	517.617
5.5	41.917	422.398	475.700	421.728	515.945
6.0	0	421.728	515.945	421.470	513.473
6.5	0	421.470	513.473	421.213	510.216
7.0	0	421.213	510.216	420.958	506.190
7.5	0	420.958	506.190	420.705	501.412
8.0	0	420.705	501.412	420.455	495.900
8.5	0	420.455	495.900	420.207	489.673
9.0	0	420.207	489.673	419.962	482.749
9.5	0	419.962	482.749	419.720	475.147

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

10.0	0	419.720	475.147	419.483	466.889
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1490.0	0	421.503	38.040	421.484	39.342
1490.5	0	421.484	39.342	421.464	40.581
1491.0	0	421.464	40.581	421.444	41.753
1491.5	0	421.444	41.753	421.423	42.856
1492.0	0	421.423	42.856	421.401	43.890
1492.5	0	421.401	43.890	421.379	44.853
1493.0	0	421.379	44.853	421.357	45.742
1493.5	0	421.357	45.742	421.334	46.558
1494.0	0	421.334	46.558	421.311	47.297
1494.5	0	421.311	47.297	421.287	47.961
1495.0	0	421.287	47.961	421.263	48.546
1495.5	0	421.263	48.546	421.239	49.053
1496.0	0	421.239	49.053	421.214	49.481
1496.5	0	421.214	49.481	421.190	49.830
1497.0	0	421.190	49.830	421.165	50.098
1497.5	0	421.165	50.098	421.140	50.285
1498.0	0	421.140	50.285	421.115	50.392
1498.5	0	421.115	50.392	421.089	50.418
1499.0	0	421.089	50.418	421.064	50.364
1499.5	0	421.064	50.364	421.039	50.229
1500.0	0	421.039	50.229	421.014	50.014



Gráfica 4. 2. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 6 seg. Unidad uno y dos.



Gráfica 4. 3. Comparación de los registros del modelo físico con el modelo de oscilación de masa.

Ensayo 2, Q_{máximo} (Dos Unidades) + Q_{vertedor} media capacidad.

Ley de cierre (tiempo de maniobra 6 segundos)

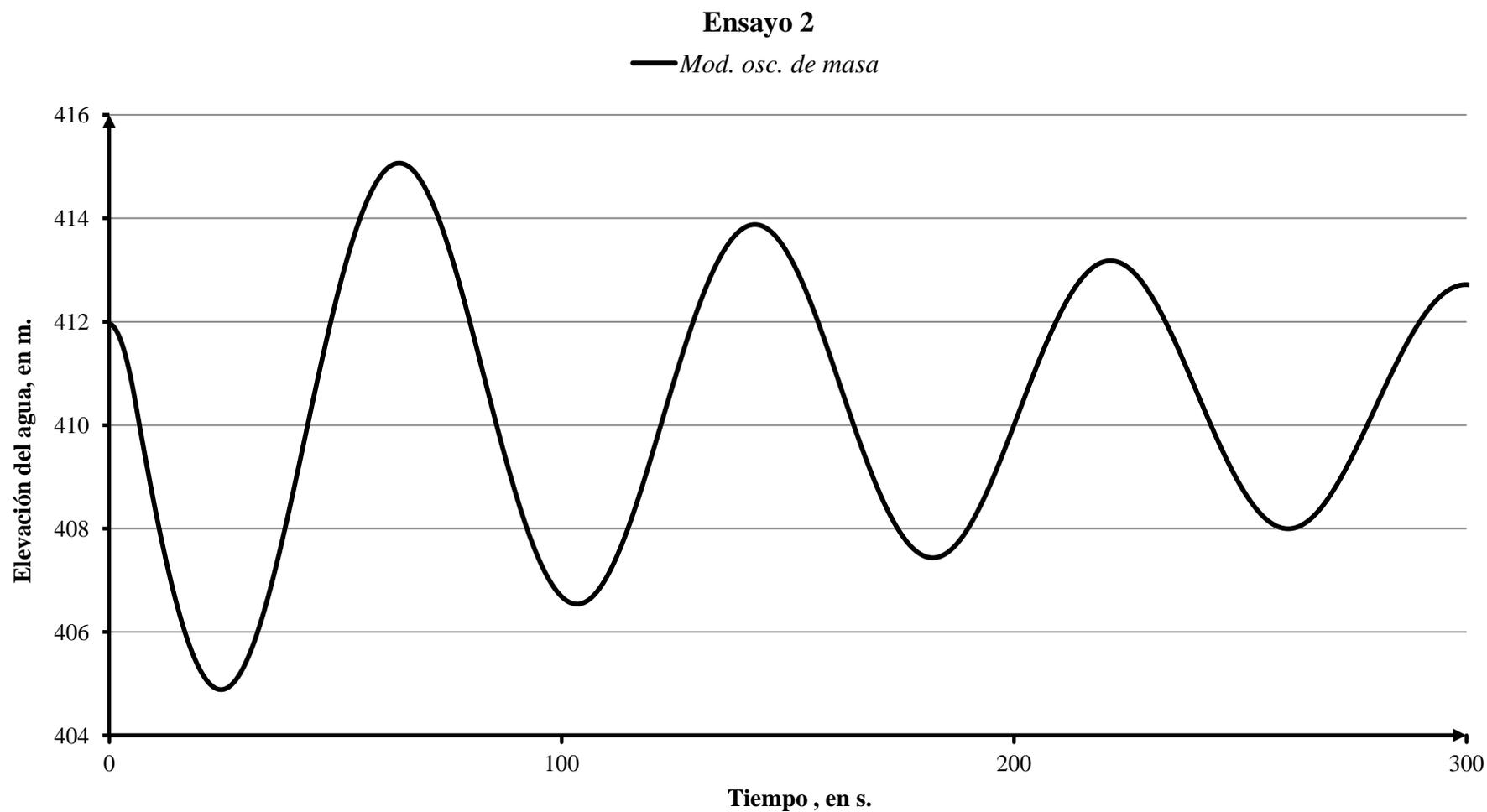
Al igual que el caso anterior el tiempo de la maniobra tarda 6 segundos, por lo que la ley de cierre correspondiente, es igualmente aplicable a éste ensayo. Siendo los datos de la tabla 4.2 los resultados para este caso, siendo resuelto idénticamente como el ensayo anterior.

TABLA 4.2. RESULTADOS DE ENSAYO I, (Q_{MÁXIMO} (DOS UNIDADES) + Q_{VERTEDOR} CAP. MEDIA).

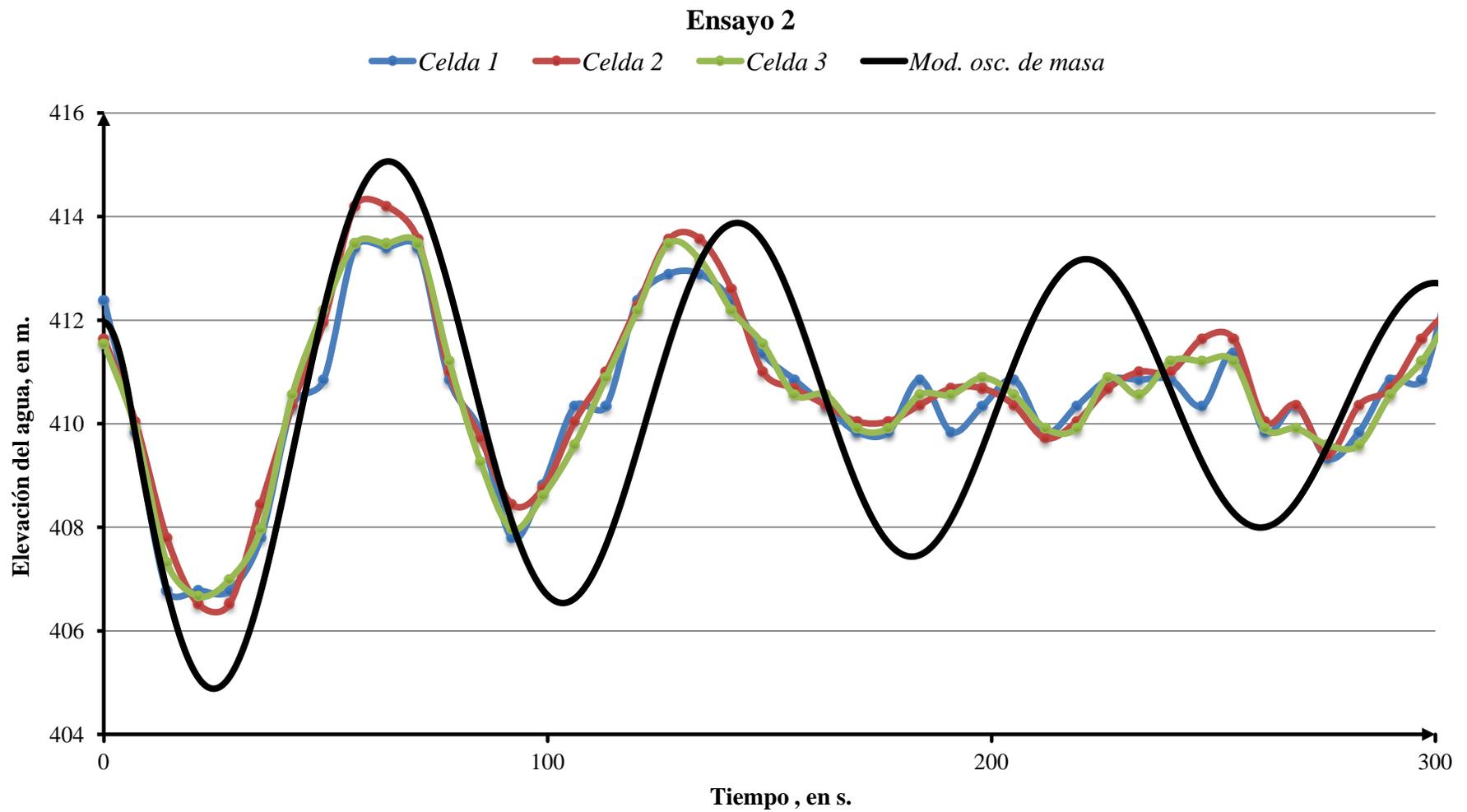
$t (s)$	$Q1=f(t)$	$H1(t)=Z(t-\Delta t)+K1Q1(t)/Q1(t)+H1Q1(t)$	$QT(t)=Q2(t-\Delta t)-Q1(t)$	$Z=Z(t-\Delta t)-QTO(t)(\Delta t/ATO)$	$Q2(t)=Q2(t-\Delta t)+(\Delta t/I2)(H3-Z(t)-K2Q2(t-\Delta t)/Q2(t-\Delta t))$
0.0	503.000			411.960	503.000
0.5	461.083	416.972	41.917	411.939	504.164
1.0	419.167	416.472	84.998	411.897	505.176
1.5	377.250	415.955	127.926	411.833	505.970
2.0	335.333	415.421	170.636	411.747	506.478
2.5	293.417	414.871	213.062	411.641	506.639
3.0	251.500	414.304	255.139	411.513	506.390
3.5	209.583	413.721	296.807	411.365	505.669
4.0	167.667	413.121	338.003	411.196	504.419
4.5	125.750	412.506	378.669	411.006	502.580
5.0	83.833	411.875	418.747	410.797	500.098
5.5	41.917	411.229	458.182	410.568	496.919
6.0	0	410.568	496.919	410.319	492.989
6.5	0	410.319	492.989	410.073	488.326
7.0	0	410.073	488.326	409.829	482.947
7.5	0	409.829	482.947	409.587	476.868
8.0	0	409.587	476.868	409.349	470.110
8.5	0	409.349	470.110	409.114	462.690
9.0	0	409.114	462.690	408.883	454.628
9.5	0	408.883	454.628	408.655	445.942
10.0	0	408.655	445.942	408.432	436.654
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1490.0	0	410.851	40.624	410.830	41.784
1490.5	0	410.830	41.784	410.809	42.877
1491.0	0	410.809	42.877	410.788	43.900
1491.5	0	410.788	43.900	410.766	44.851
1492.0	0	410.766	44.851	410.743	45.729
1492.5	0	410.743	45.729	410.721	46.533
1493.0	0	410.721	46.533	410.697	47.262

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

1493.5	0	410.697	47.262	410.674	47.914
1494.0	0	410.674	47.914	410.650	48.489
1494.5	0	410.650	48.489	410.626	48.985
1495.0	0	410.626	48.985	410.601	49.402
1495.5	0	410.601	49.402	410.576	49.740
1496.0	0	410.576	49.740	410.551	49.998
1496.5	0	410.551	49.998	410.526	50.175
1497.0	0	410.526	50.175	410.501	50.272
1497.5	0	410.501	50.272	410.476	50.288
1498.0	0	410.476	50.288	410.451	50.224
1498.5	0	410.451	50.224	410.426	50.080
1499.0	0	410.426	50.080	410.401	49.856
1499.5	0	410.401	49.856	410.376	49.552
1500.0	0	410.376	49.552	410.351	49.170



Gráfica 4. 4. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 6 seg. Unidad uno y dos.

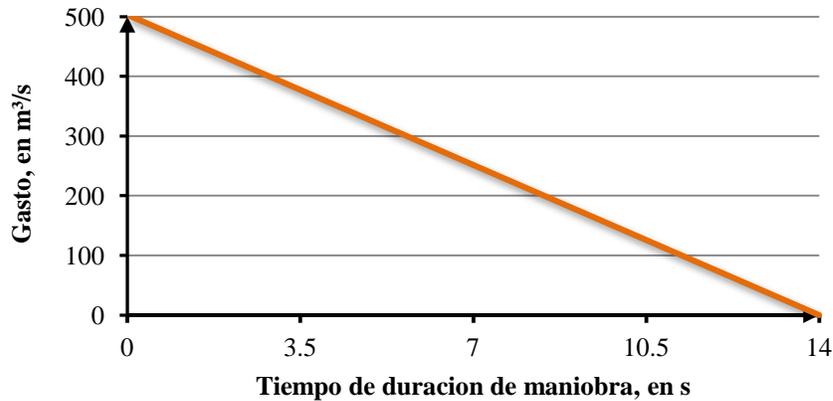


Gráfica 4. 5. Comparación de los registros del modelo físico con el modelo de oscilación de masa.

Ensayo 3 $Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor total}}$

Ley de cierre (tiempo de maniobra 14 segundos)

Tanto para el ensayo 3 como para el 4, el tiempo de maniobra es de 14 segundos, por lo que se debe definir una ley de cierre diferente a la anterior, siguiendo la misma dinámica se propone la siguiente función lineal:



Gráfica 4. 6. Ley de cierre lineal para un tiempo de 14 segundos.

Siendo la ley de cierre adecuada:

$$Q_1 = 503 - 35.928t$$

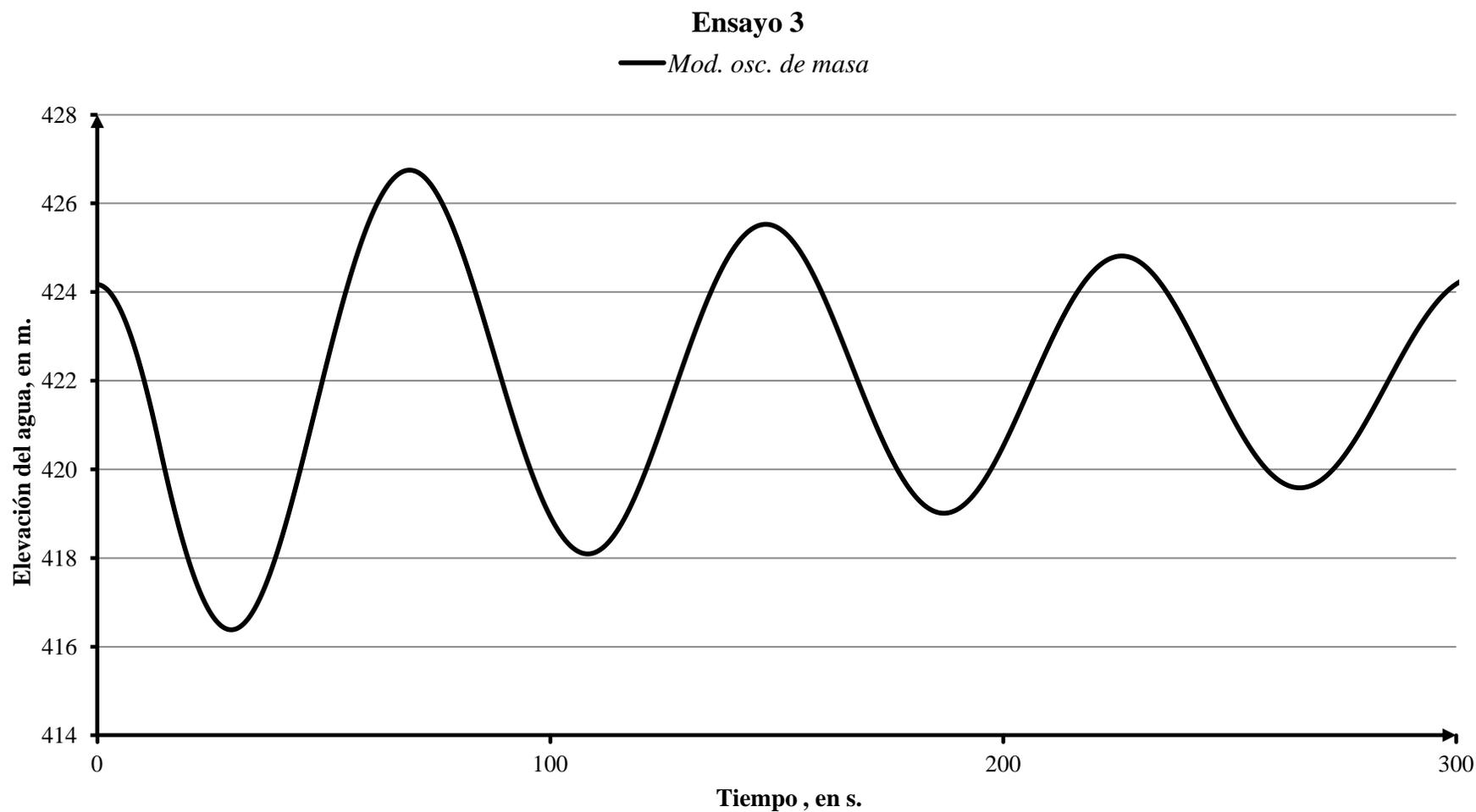
Mostrando los resultados en la siguiente tabla y en gráfica 4.5:

TABLA 4.3. RESULTADOS DE ENSAYO 3, ($Q_{\text{MÁXIMO}}$ (DOS UNIDADES) + $Q_{\text{VERTEDOR TOTAL}}$).

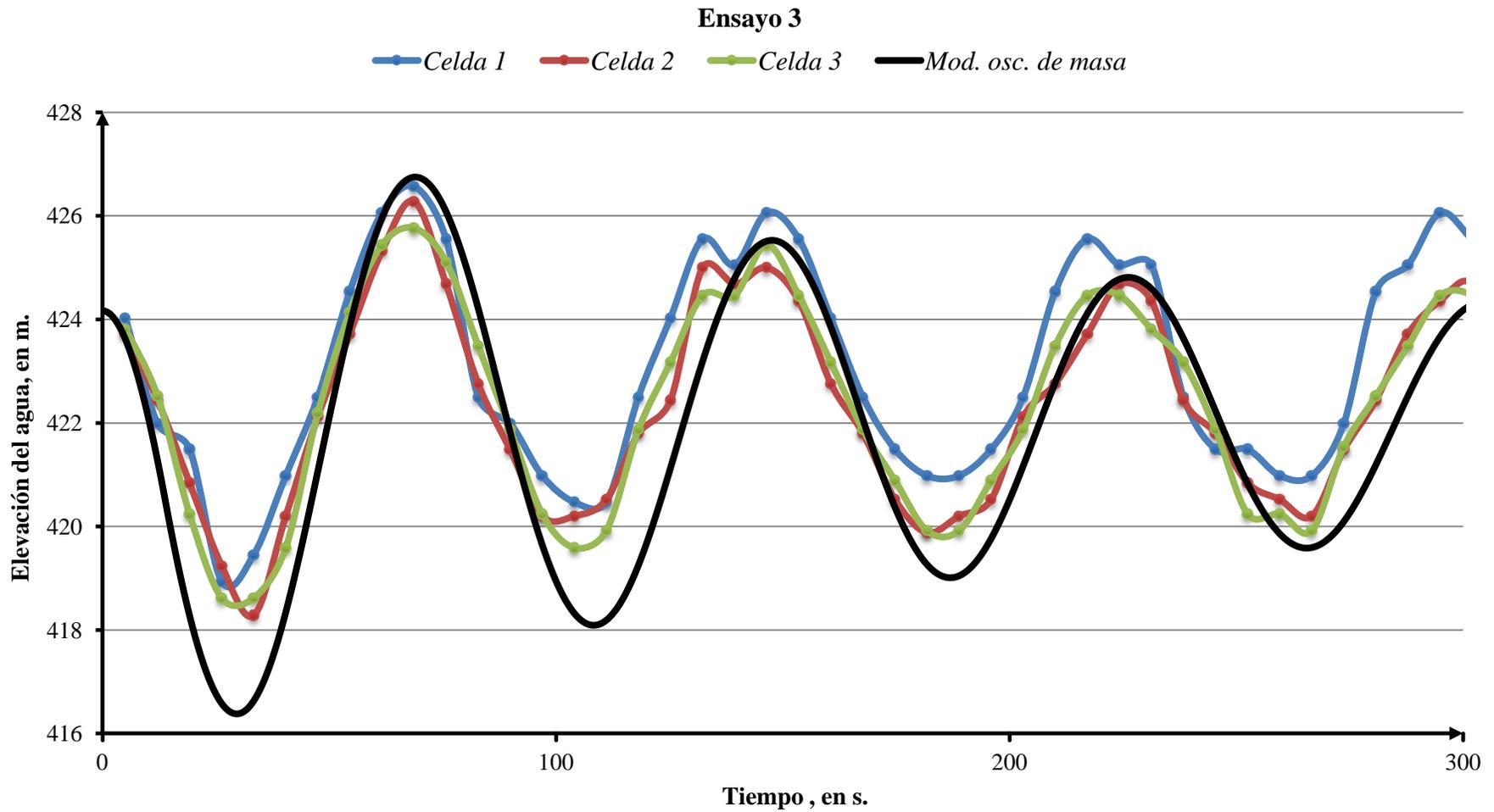
t (s)	$Q1=f(t)$	$H1(t)=Z(t-\Delta t)+K1Q1(t)/Q1(t)/+H1Q1(t)$	$QT(t)=Q2(t-\Delta t)-Q1(t)$	$Z=Z(t-\Delta t)-QTO(t)(\Delta t/ATO)$	$Q2(t)=Q2(t-\Delta t)+(\Delta t/I2)(H3-Z(t)-K2Q2(t-\Delta t)/Q2(t-\Delta t))$
0.0	503.000			423.170	503.000
0.5	485.036	428.458	17.964	423.161	506.122
1.0	467.071	428.242	39.050	423.141	509.137
1.5	449.107	428.016	60.029	423.111	512.012
2.0	431.143	427.781	80.870	423.071	514.717
2.5	413.179	427.536	101.539	423.020	517.221
3.0	395.214	427.281	122.007	422.959	519.493
3.5	377.250	427.018	142.243	422.888	521.504
4.0	359.286	426.745	162.219	422.807	523.227
4.5	341.321	426.463	181.905	422.716	524.633

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

5.0	323.357	426.171	201.276	422.615	525.696
5.5	305.393	425.871	220.304	422.505	526.392
6.0	287.429	425.563	238.963	422.386	526.695
6.5	269.464	425.246	257.231	422.257	526.582
7.0	251.500	424.920	275.082	422.120	526.031
7.5	233.536	424.587	292.495	421.973	525.021
8.0	215.571	424.246	309.449	421.819	523.530
8.5	197.607	423.897	325.923	421.656	521.541
9.0	179.643	423.541	341.898	421.485	519.033
9.5	161.679	423.177	357.355	421.306	515.992
10.0	143.714	422.807	372.277	421.120	512.399
∴	∴	∴	∴	∴	∴
1490.0	0	421.623	26.241	421.610	27.958
1490.5	0	421.610	27.958	421.596	29.628
1491.0	0	421.596	29.628	421.581	31.250
1491.5	0	421.581	31.250	421.565	32.821
1492.0	0	421.565	32.821	421.549	34.337
1492.5	0	421.549	34.337	421.532	35.797
1493.0	0	421.532	35.797	421.514	37.199
1493.5	0	421.514	37.199	421.495	38.540
1494.0	0	421.495	38.540	421.476	39.817
1494.5	0	421.476	39.817	421.456	41.029
1495.0	0	421.456	41.029	421.436	42.175
1495.5	0	421.436	42.175	421.414	43.252
1496.0	0	421.414	43.252	421.393	44.258
1496.5	0	421.393	44.258	421.371	45.192
1497.0	0	421.371	45.192	421.348	46.053
1497.5	0	421.348	46.053	421.325	46.839
1498.0	0	421.325	46.839	421.302	47.549
1498.5	0	421.302	47.549	421.278	48.182
1499.0	0	421.278	48.182	421.254	48.737
1499.5	0	421.254	48.737	421.229	49.213
1500.0	0	421.229	49.213	421.205	49.611



Gráfica 4.7. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 14 seg. Unidad uno y dos.



Gráfica 4. 8. Comparación de los registros del modelo físico con el modelo de oscilación de masa

Ensayo 4, Q_{máximo} (Dos Unidades) + Q_{vertedor} media capacidad.

Ley de cierre (tiempo de maniobra 14 segundos).

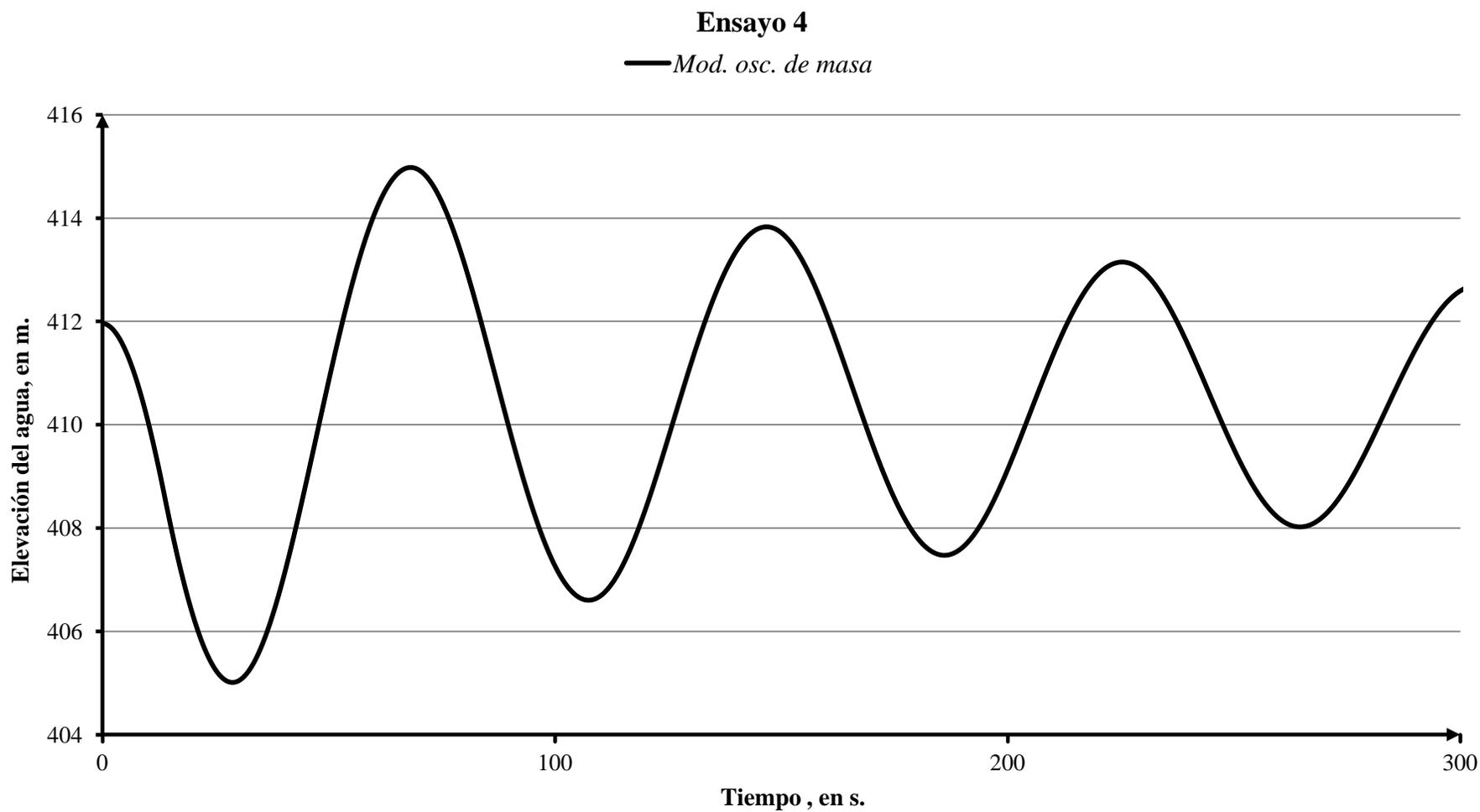
Para este último ensayo se utiliza la ley de cierre del caso anterior, dado el tiempo de maniobra igual.

TABLA 4. 4. RESULTADOS DE ENSAYO 4, (Q_{MÁXIMO} (DOS UNIDADES) + Q_{VERTEDOR} CAP. MEDIA).

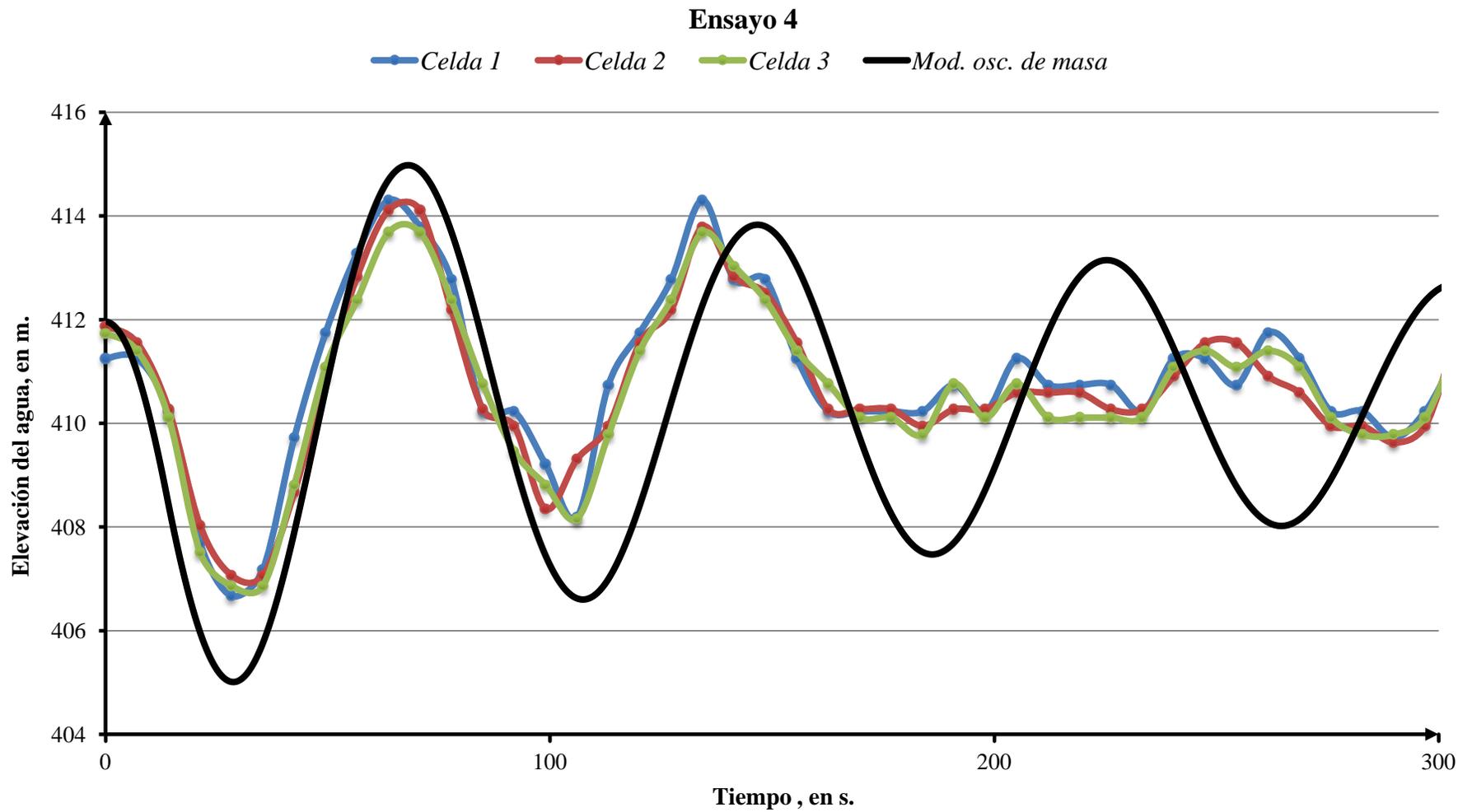
t (s)	$QI=f(t)$	$H1(t)=Z(t-\Delta t)+K1Q1(t)/Q1(t)+H1Q1(t)$	$QT(t)=Q2(t-\Delta t)-Q1(t)$	$Z=Z(t-\Delta t)-QTO(t)(\Delta t/ATO)$	$Q2(t)=Q2(t-\Delta t)+(\Delta t/I2)(H3-Z(t)-K2Q2(t-\Delta t)/Q2(t-\Delta t))$
0.0	503.000			411.960	503.000
0.5	485.036	417.248	17.964	411.951	504.203
1.0	467.071	417.032	37.131	411.932	505.329
1.5	449.107	416.807	56.222	411.904	506.349
2.0	431.143	416.574	75.207	411.867	507.235
2.5	413.179	416.332	94.056	411.820	507.958
3.0	395.214	416.081	112.743	411.763	508.489
3.5	377.250	415.822	131.239	411.698	508.804
4.0	359.286	415.554	149.518	411.623	508.875
4.5	341.321	415.278	167.553	411.539	508.676
5.0	323.357	414.994	185.319	411.447	508.185
5.5	305.393	414.703	202.792	411.345	507.376
6.0	287.429	414.403	219.947	411.235	506.227
6.5	269.464	414.095	236.763	411.117	504.716
7.0	251.500	413.780	253.216	410.990	502.821
7.5	233.536	413.458	269.285	410.856	500.523
8.0	215.571	413.128	284.951	410.713	497.801
8.5	197.607	412.791	300.194	410.563	494.638
9.0	179.643	412.448	314.995	410.405	491.015
9.5	161.679	412.098	329.336	410.241	486.916
10.0	143.714	411.742	343.202	410.069	482.324
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1490	0	410.987	29.069	410.972	30.696
1490.5	0	410.972	30.696	410.957	32.272
1491	0	410.957	32.272	410.941	33.795
1491.5	0	410.941	33.795	410.924	35.262
1492	0	410.924	35.262	410.906	36.672
1492.5	0	410.906	36.672	410.888	38.022
1493	0	410.888	38.022	410.869	39.309
1493.5	0	410.869	39.309	410.849	40.532

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

1494	0	410.849	40.532	410.829	41.689
1494.5	0	410.829	41.689	410.808	42.778
1495	0	410.808	42.778	410.787	43.797
1495.5	0	410.787	43.797	410.765	44.745
1496	0	410.765	44.745	410.742	45.621
1496.5	0	410.742	45.621	410.720	46.422
1497	0	410.720	46.422	410.696	47.148
1497.5	0	410.696	47.148	410.673	47.797
1498	0	410.673	47.797	410.649	48.370
1498.5	0	410.649	48.370	410.625	48.864
1499	0	410.625	48.864	410.600	49.279
1499.5	0	410.600	49.279	410.576	49.615
1500	0	410.576	49.615	410.551	49.871



Gráfica 4. 9. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 14 seg. Unidad uno y dos.



Gráfica 4. 10. Comparación de los registros del modelo físico con el modelo de oscilación de masa.

4.2 Modelo de tubería elástica y flujo compresible.

Cómo se mencionó anteriormente se reprodujeron las medidas de laboratorio en una serie de simulaciones utilizando el sistema Trans. El sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión, Trans, se desarrolla en el Grupo de Hidromecánica del IIUNAM, por el Dr. Rafael B. Carmona Paredes y la M.C. Libia G. Carmona Paredes.

Los resultados se obtienen resolviendo, con el método de las características, el sistema de ecuaciones hiperbólicas en derivadas parciales que modelan el golpe de ariete tomando en consideración las condiciones de frontera que imponen los elementos que forman físicamente a la conducción y los eventos que determinan la operación hidráulica del sistema.

El caso de la C.H. La Yesca tiene como evento, que genera el estado transitorio del sistema, la maniobra de rechazo de carga; el sistema Trans no cuenta con una maniobra como tal, por lo que en vez de una simulación de cierre de alabes en la turbina, se simula la maniobra como un cierre de válvulas, que como en el modelo anterior, el evento sigue una ley de cierre lineal para los tiempos de maniobra requeridos para cada caso.

4.2.1 Consideraciones realizadas.

Las simulaciones realizadas se basaron en el sistema siguiente:

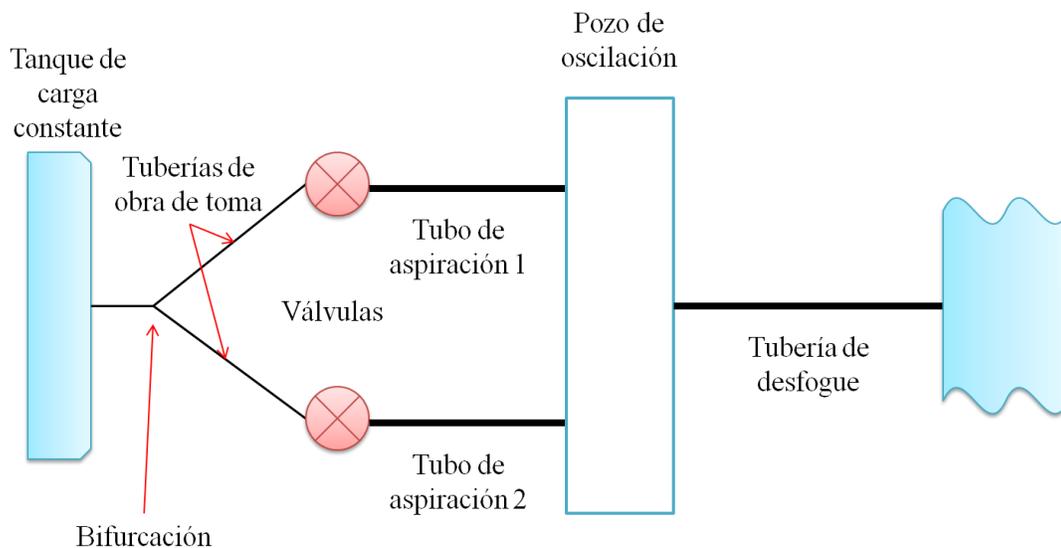


Fig. 4. 3. Sistema simulado con Trans.

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

En el modelo se considera una bifurcación inicial de la cual salen las dos tuberías a presión que alimentan a las turbinas, en este caso válvulas, para posteriormente tener los dos tubos de aspiración que se unen con la torre de oscilación de La Yesca. En tubo que da paso a la bifurcación se tiene un factor de fricción muy pequeño, no nulo ya que el sistema de simulación no acepta un valor no realista; de manera que la pérdida en este punto no sea representativa.

La simulación de la obra de generación constan de desde las características geométricas: longitud, diámetro, áreas, etc.; hasta las operacionales como el gasto y pérdidas de carga.

Dichas pérdidas de carga: locales, por accesorios, por fricción, son para el presente trabajo mayormente desconocidas, y por falta de información no es posible estimarlas, pero sí considerarlas en el factor de Darcy – Weisbach, por lo que los factores de fricción mostrados para cada tramo de tubería resultan ser muy altos.

Los coeficientes de fricción resultantes fueron obtenidos conociendo los niveles de la superficie libre del agua que se deben presentar al tener una operación a gasto establecido, en la torre de oscilación y en el río de descarga.

Mediante las siguientes ecuaciones se pueden calcular parte de las pérdidas de locales que se presentan en la central hidroeléctrica:

Pérdidas locales: Dentro de las cuales se consideran los cambios de geometría de la sección, los cambios de dirección en los tramos: tramos rectos a curvos, y los diferentes dispositivos de control: válvulas y compuertas. Y su magnitud se expresa en términos de la carga de velocidad de la sección aguas abajo donde se produjo la pérdida.

- Por entrada.
Pérdida en la entrada entre la toma de agua del vaso a la obra de generación.
Siendo el valor de la pérdida entre los valores de $K = 0.1$ a 0.5 dependiendo las diferentes formas de la entrada.
- Por rejilla.
Como se menciona anteriormente, uno de los elementos comunes a cualquier central hidroeléctrica, son las rejillas para evitar la entrada de sólidos a las tuberías o turbinas. Estos elementos obstaculizan el libre flujo y producen una pérdida. El coeficiente K puede ser calculado con la ecuación de Kirschmer, si el flujo es normal al plano de las rejillas y se encuentran éstas parcialmente sumergidas:

$$K = C_f (s/b)^{4/3} \text{sen } \theta$$

donde:

C_f es un coeficiente que depende de la forma de la reja

- s es el ancho de las barras que dan la cara al flujo
- b es la distancia entre barras por donde pasa el flujo
- θ es el ángulo de inclinación de las rejillas respecto a un plano horizontal

O si el flujo no es normal a las rejillas, se puede aplicar la formula de Monsoyi:

$$K = K_0\beta$$

donde:

- K_0 es el coeficiente de pérdida para flujo normal al plano de la reja y
- β es un coeficiente que depende del cociente s/b y del ángulo de inclinación del flujo.

Para los casos donde, como la Yesca, la toma es sumergida y por tanto las rejillas están completamente sumergidas, se puede aplicar la fórmula de Creager:

$$K = 1.45 - 0.45(A_n/A_b) - (A_n/A_b)^2$$

donde:

- A_n es el área neta del paso entre rejillas
- A_b es el área bruta de la estructura de rejillas

- Por ampliación.

Originada por producirse una ampliación de la sección transversal del tubo. El coeficiente K depende de la brusquedad de la ampliación y puede encontrarse con la fórmula de Borda – Carnot:

$$K = C_a \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$$

donde

- C_a depende del ángulo θ des difusor
- A_2 es el área de la sección transversal aguas abajo de la ampliación
- A_1 es el área de la sección transversal agua arriba de la ampliación

- Por reducción.

Se produce un fenómeno de contracción semejante al de entrada a la tubería, el conviene que se gradual. El coeficiente de pérdida depende del ángulo θ , al cual se produzca la contracción (fig. 4.4); de acuerdo con Kisieliev, para una reducción gradual se tienen los siguientes valores de la tabla 4.5.

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

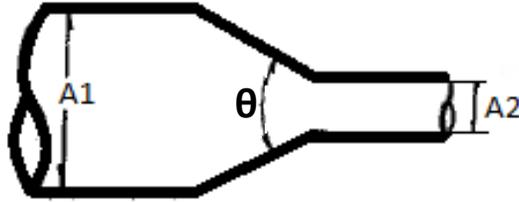


Fig. 4. 4 Reducción gradual.

TABLA 4. 5. COEFICIENTES DE PÉRDIDA POR REDUCCIÓN GRADUAL DE ÁNGULO θ , SEGÚN KISIELIEV.

θ	4° a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°
K	0.005 0.06	0.16	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35

- Por cambio de dirección.

Si se visualiza el flujo en un cambio de dirección, se observa que los filetes tienden a conservar su movimiento rectilíneo en razón de su inercia. Esto modifica la distribución de velocidades y produce zonas de separación en el lado interior y aumentos de presión en el exterior, con un movimiento espiral que persiste en una distancia de 50 veces el diámetro. Si el cambio de dirección es gradual con una curvatura circular de radio medio R y rugosidad absoluta ε , para obtener el coeficiente de pérdida se usa la grafica de Hoffman (fig. 4.5), que además toma en cuenta la fricción de la curva; y la formula:

$$K = C_o \frac{\theta^\circ}{90^\circ}$$

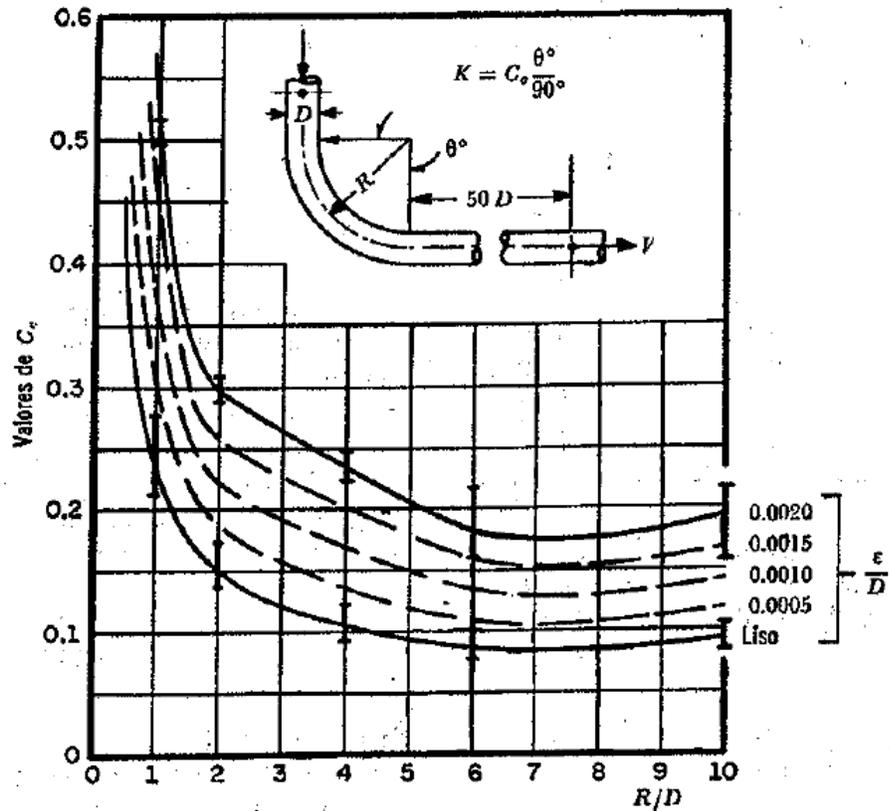


Fig. 4. 5. Coeficientes C_0 para curvas de diámetro constante y $Re > 2.2 \times 10^5$, en tubos rugosos.

- Por válvulas y compuertas.

El coeficiente de pérdida por válvulas varía según el tipo y su posición, en la mayoría de los casos es proporcionado éste valor por el fabricante.

Pérdidas por fricción.

Para un flujo permanente, en un tubo de diámetro constante, la línea de cargas piezométricas es paralela a la línea de energía e inclinada en la dirección del movimiento. Darcy, Weisbach y otros, dedujeron experimentalmente una fórmula para calcular en un tubo la pérdida por fricción (h_f):

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

donde

f es el coeficiente de fricción, adimensional

L es la longitud del tubo, en m

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

V es la velocidad media, en m/s

D es el diámetro del tubo, en m

g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2

Existen diversas formulas para obtener el valor del coeficiente de fricción, las cuales son aplicables para diferente tipos de flujo, por ejemplo, laminar o turbulento; formulas como la de Blasius, Nikuradse, Colebrook y White, y el conocido diagrama universal de Moody.

4.2.2 Comparación de los cálculos numéricos con los registros del modelo físico.

La información básica que necesita el software para reproducir los resultados es la que se muestra a continuación; posteriormente se muestran los resultados de la simulación en cada una de las pruebas mediante gráficos, así como su comparación con los registros del modelo físico.

- Tiempo de simulación
t= 1500 s
- Cadenamiento: inicio en 0 m
- Extremo aguas arriba
 - Tipo de estructura (Tanque con nivel constante)
 - Nivel S.L.A. = 578 m

- Tuberías

Tuberías a presión:

- Longitud = 226.02 m
- Diámetro = 7.7 m
- Celeridad = 1000 m/s
- Coef. Darcy – Weisbach = 3.5
- Gasto 251.5 m^3/s

Tuberías de aspiración

- Longitud = 50.57 m
- Diámetro = 12.30 m
- Celeridad = 1000 m/s
- Coef. Darcy – Weisbach = 2.38
- Gasto 251.5 m^3/s

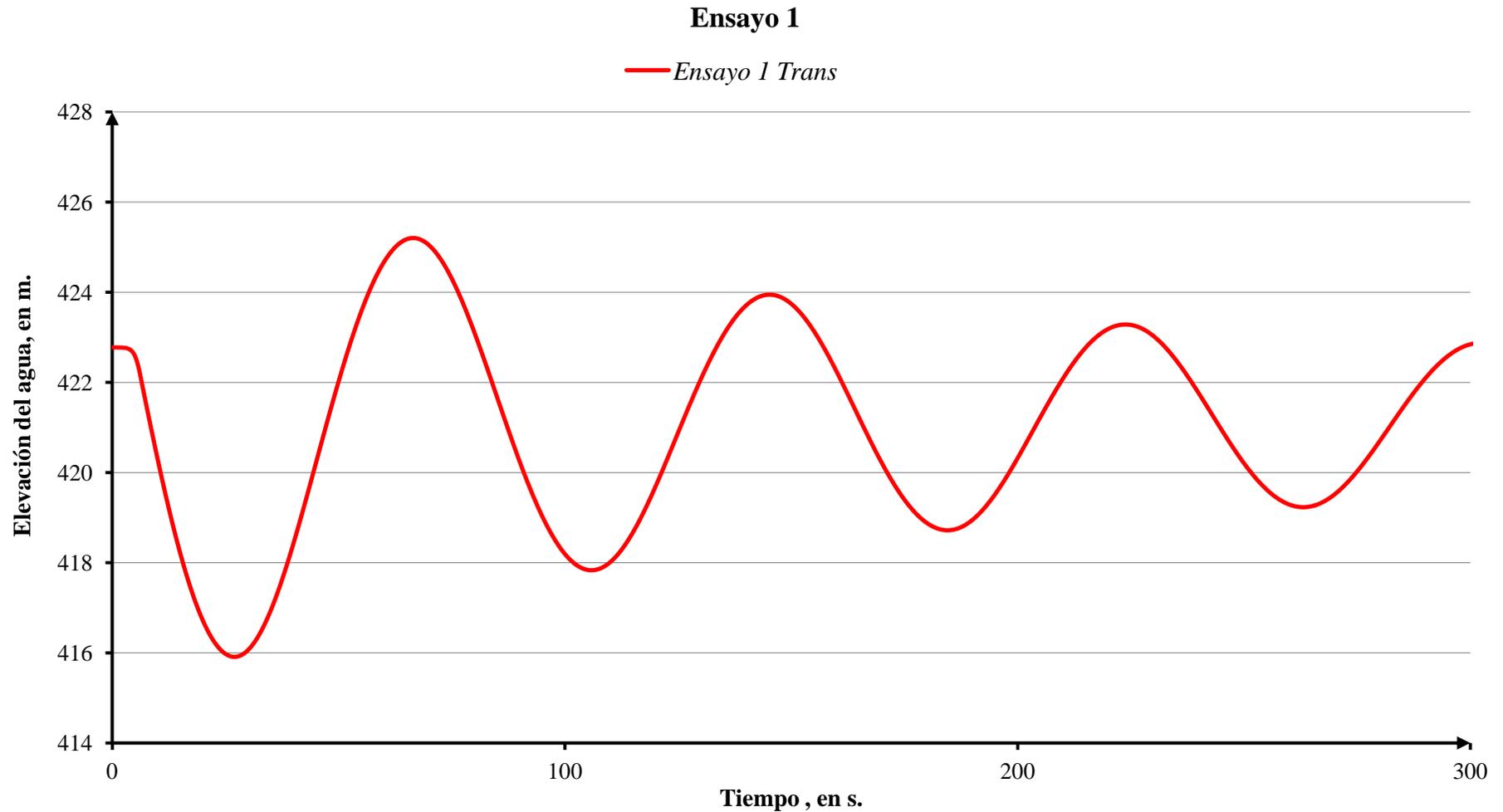
Tubo de desfogue

- Longitud = 254.58 m
- Diámetro = 14.54 m
- Celeridad = 1000 m/s
- Coef. Darcy – Weisbach = 0.199
- Gasto 503 m³/s

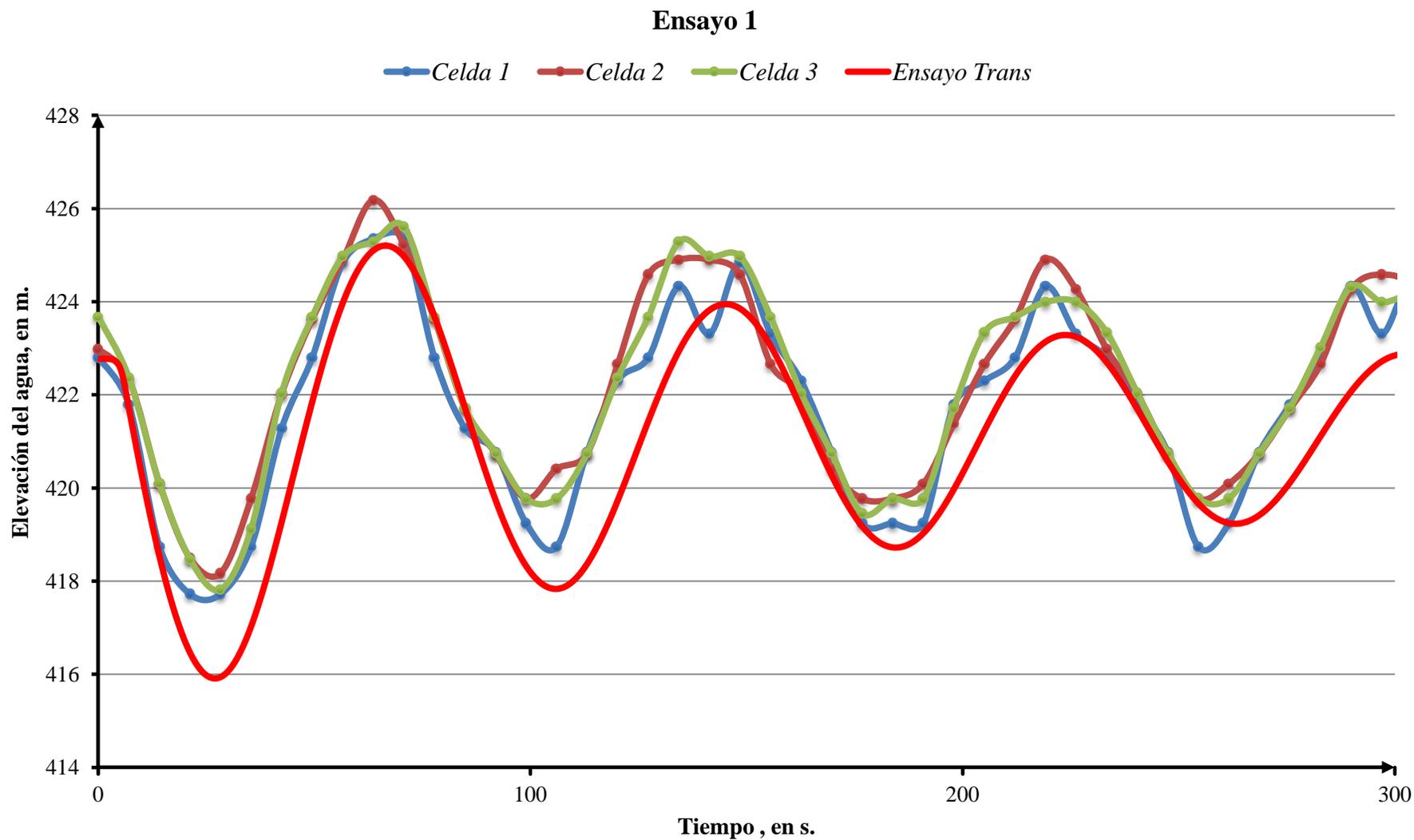
- Válvulas
 - Tipo de maniobra : Cierre
 - Tiempo de duración de la maniobra = 6 y 14 s
 - Instante en el que inicia la maniobra = 0
 - Coef. mínimo de pérdida
 - Válvula de bola

- Pozo de oscilación.
 - Altura de desplante = 366.5 m
 - Área = 1000 m²
 - Altura = 60.5 m

Ensayo 1 Trans, $Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor total}}$

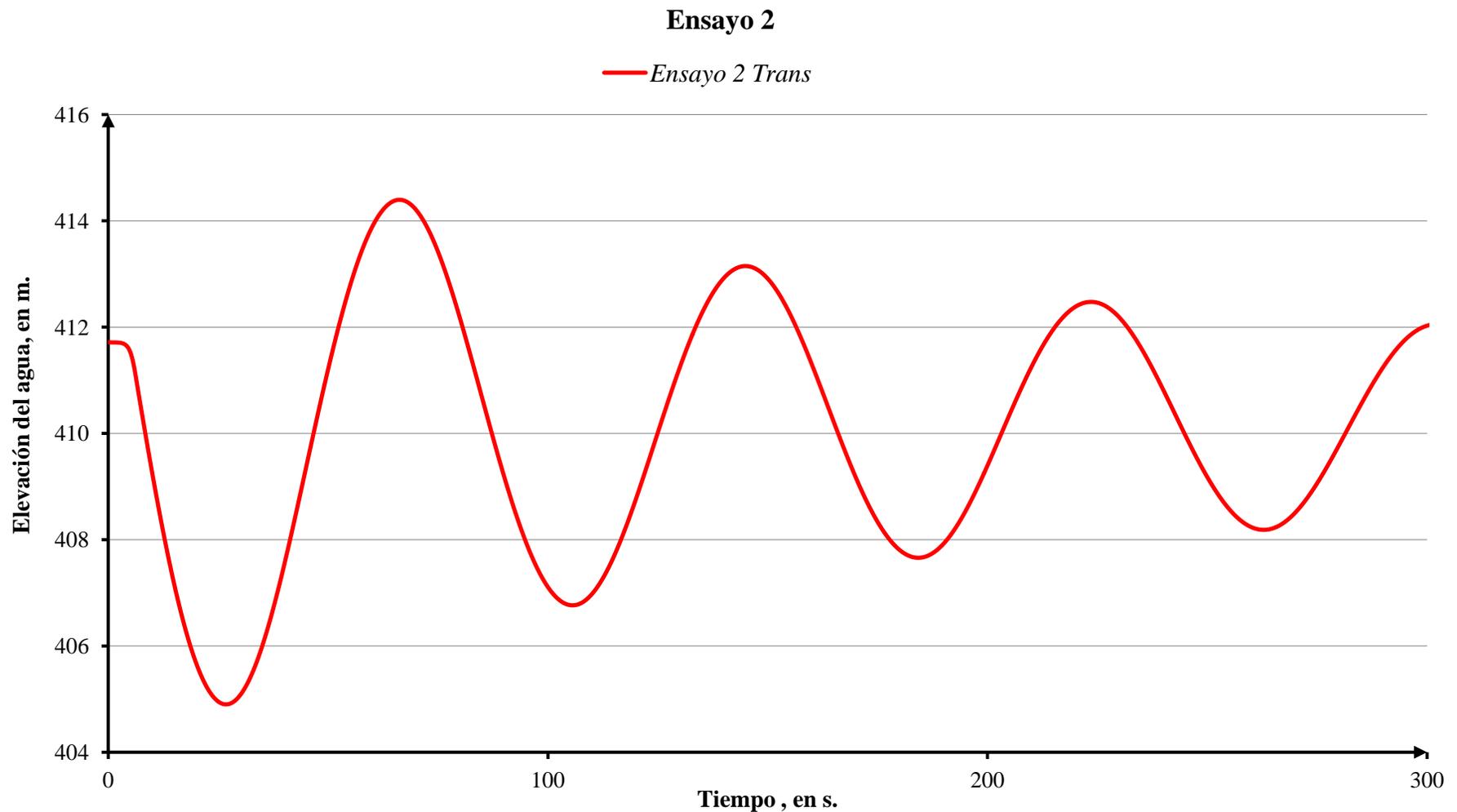


Gráfica 4. 11. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación usando Trans, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 6 seg. Unidad uno y dos.

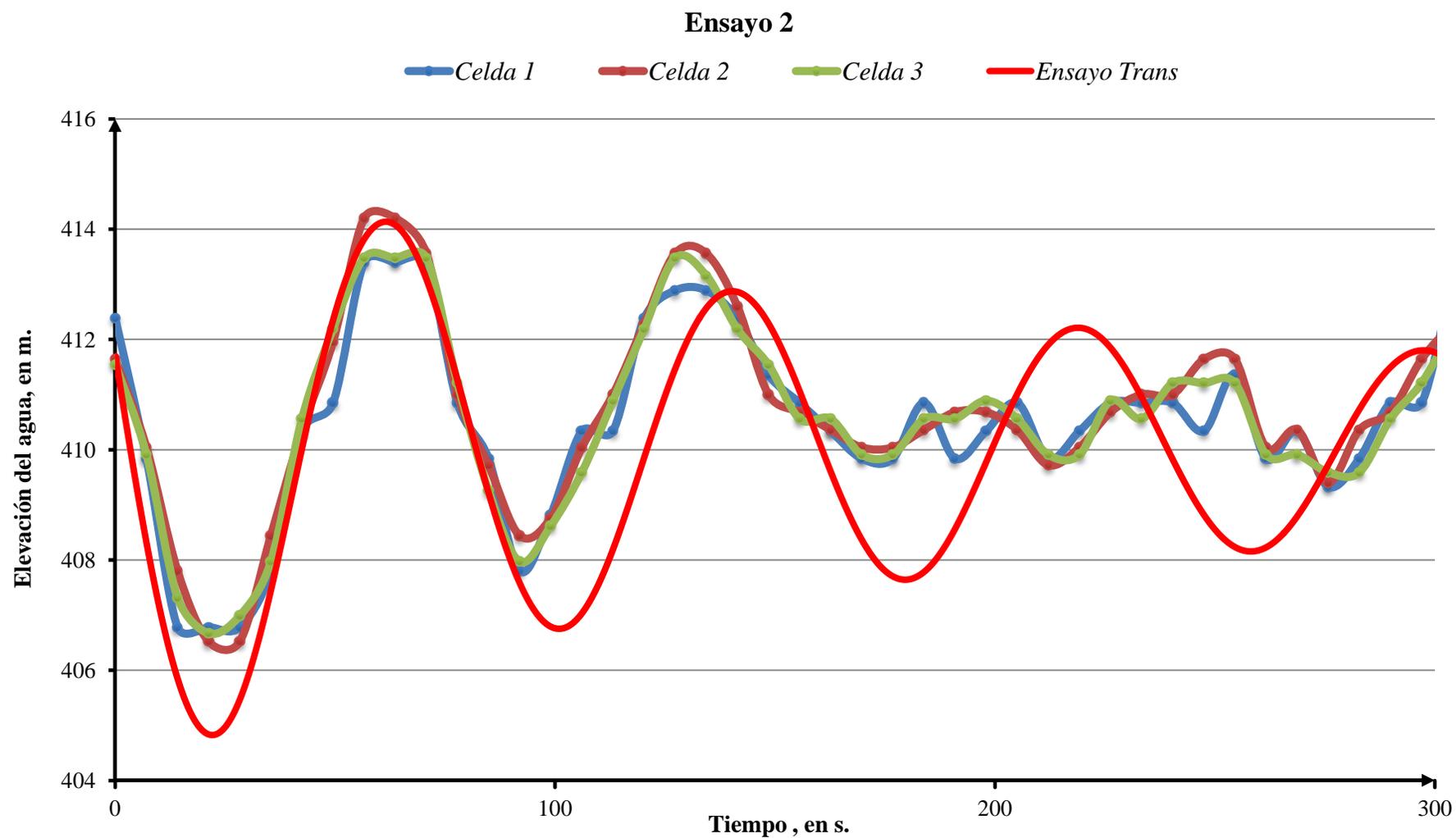


Gráfica 4. 12. Ensayo 1, comparación de los registros del modelo físico con el modelo de tubería elástica y flujo compresible.

Ensayo 2 Trans, $Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor media capacidad}}$.

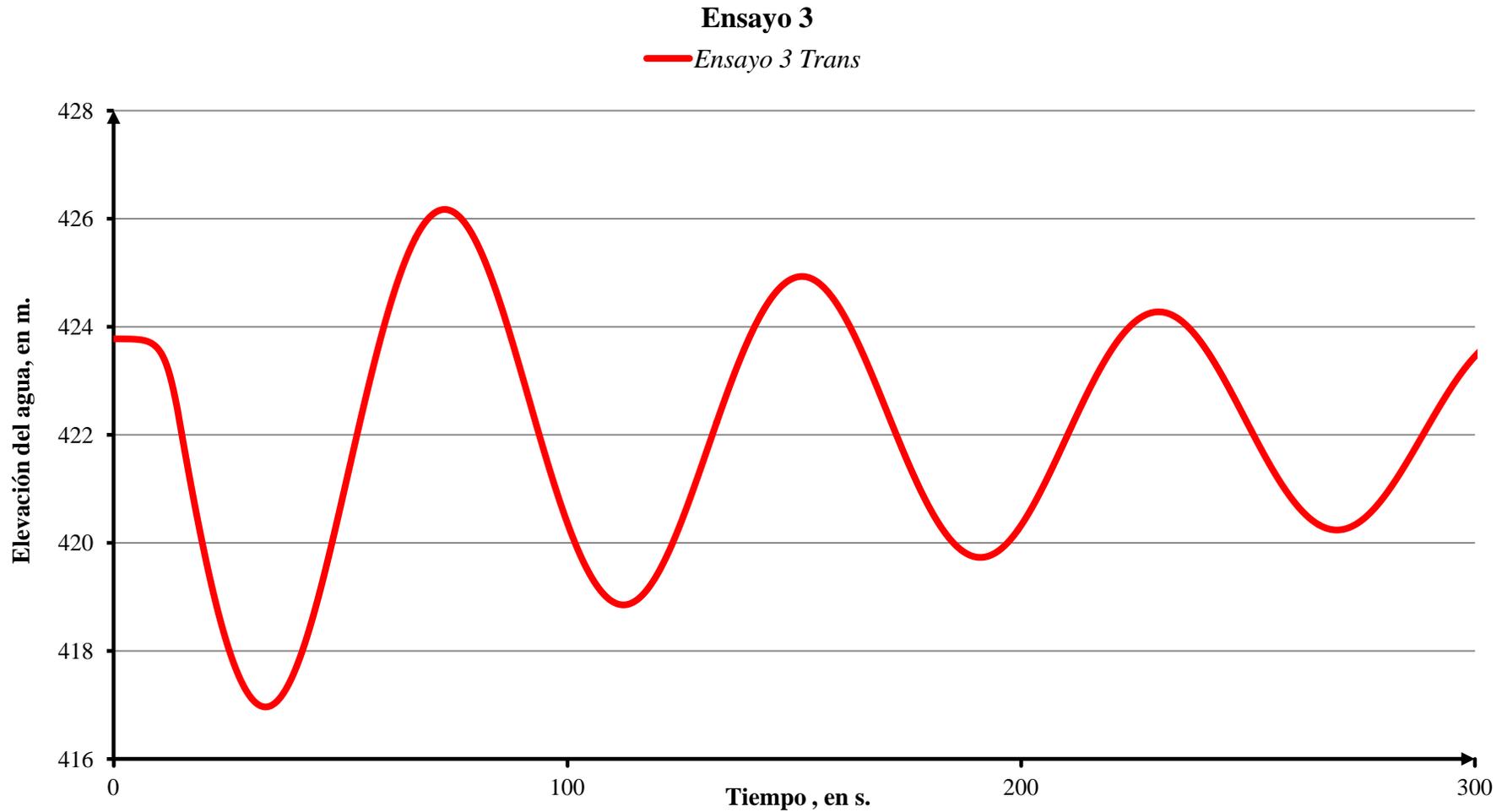


Gráfica 4. 13. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación usando Trans, $Q = 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 6 seg. Unidad uno y dos.

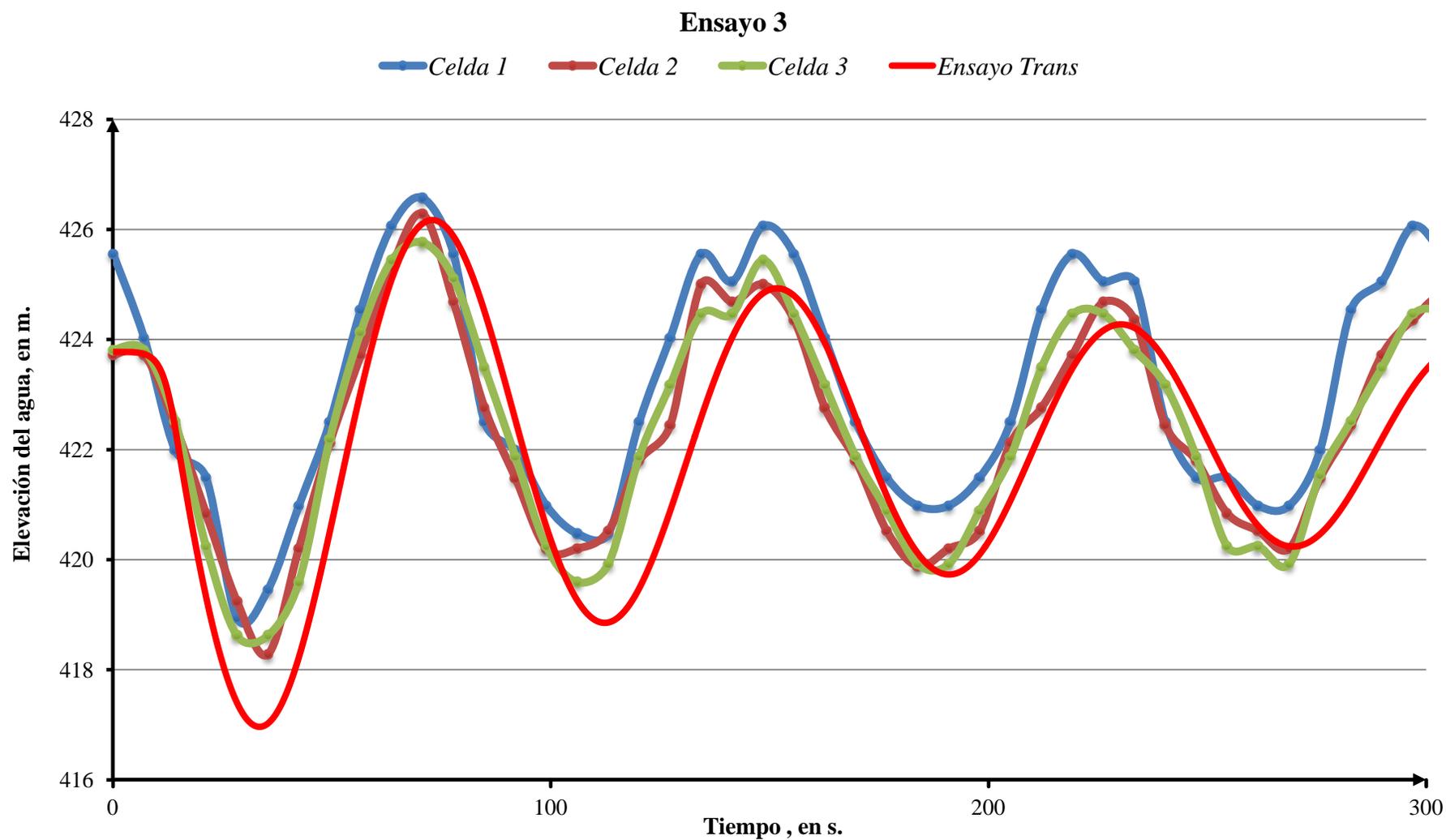


Gráfica 4. 14. Ensayo 2, comparación de los registros del modelo físico con el modelo de tubería elástica y flujo compresible.

Ensayo 3 Trans, $Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor total}}$

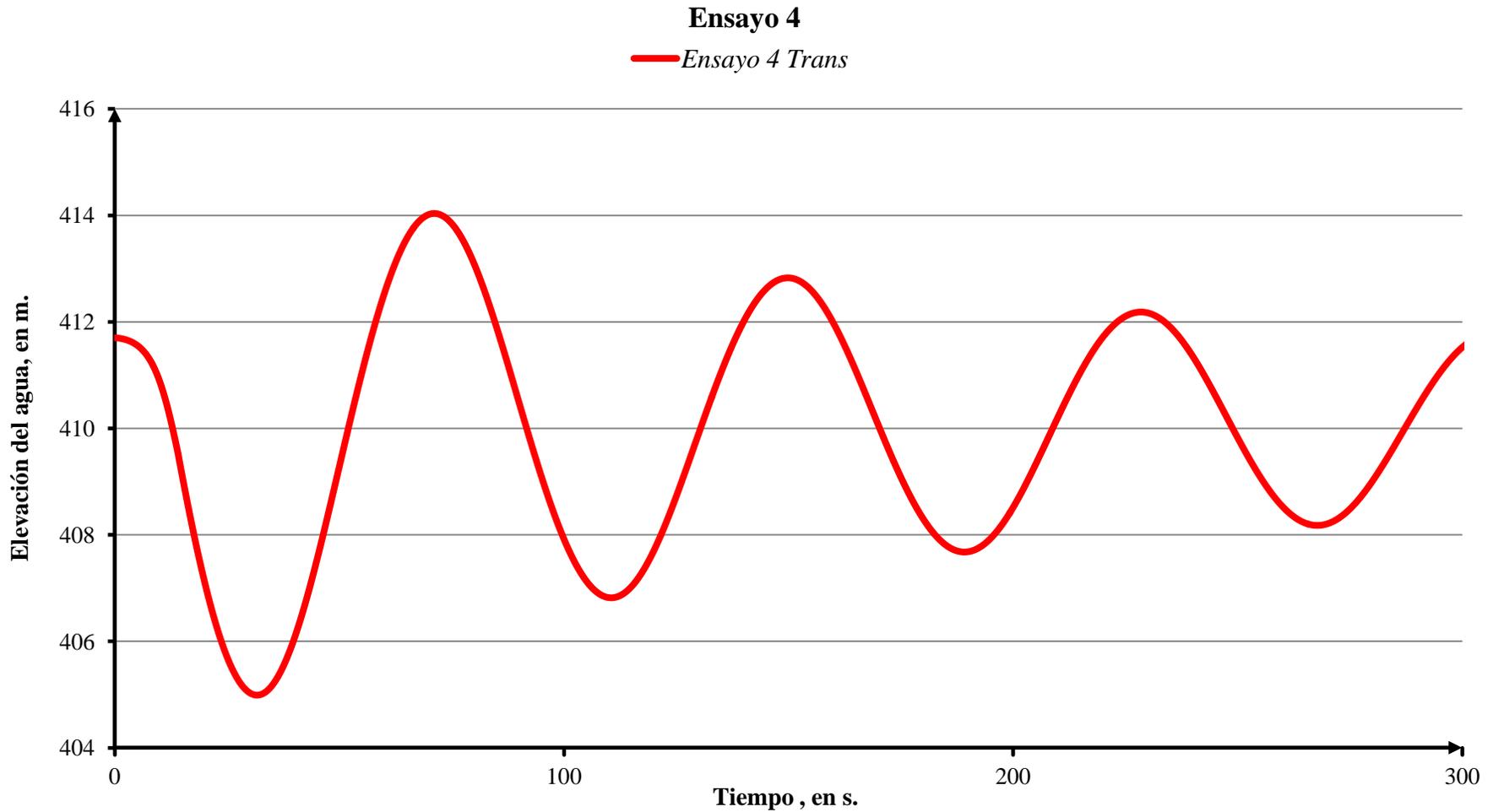


Gráfica 4. 15. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación usando Trans, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 14 seg. Unidad uno y dos.

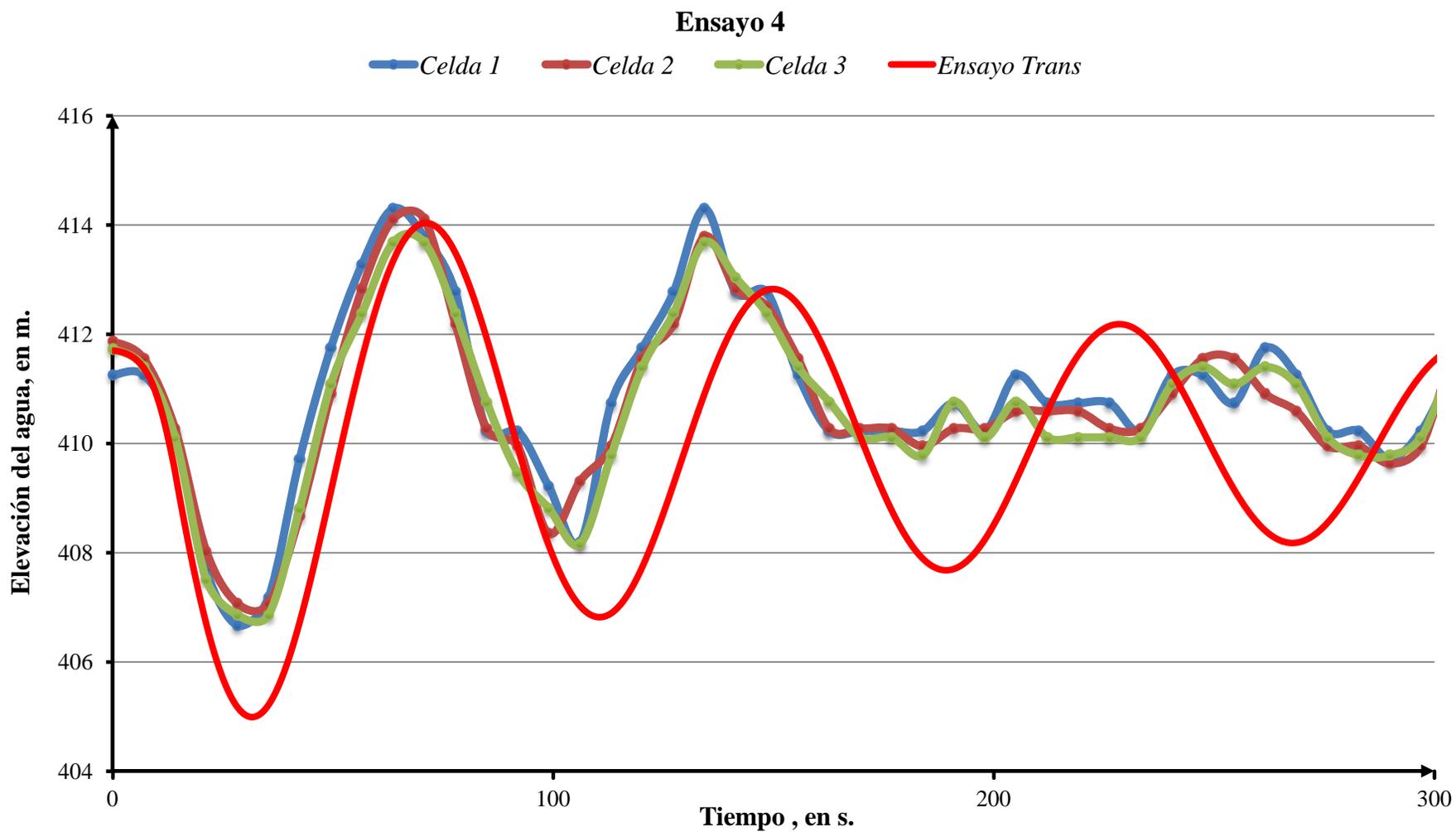


Gráfica 4. 16. Ensayo 3, comparación de los registros del modelo físico con el modelo de tubería elástica y flujo compresible.

Ensayo 4 Trans, $Q_{\text{máximo}}$ (Dos Unidades) + $Q_{\text{vertedor media capacidad}}$.



Gráfica 4. 17. Fluctuaciones de presión en la cámara de oscilación usando Trans, $Q= 503 \text{ m}^3/\text{s}$, rechazo de carga con un tiempo de 14 seg. Unidad uno y dos.



Gráfica 4. 18. Ensayo 4, comparación de los registros del modelo físico con el modelo de tubería elástica y flujo compresible.

Comparación de las oscilaciones en la torre de oscilación de la C.H. La Yesca obtenidas en modelo físico con modelos numéricos.

Los resultados de ambos modelos, como se puede apreciar en sus representaciones gráficas, son semejantes en cuanto a su comparación con los registros del modelo físico.

Dado el parecido entre los diferentes resultados en cada uno de los ensayos con su respectivo modelo numérico, en el capítulo siguiente se aclarará las diferencias que existen entre estos modelos, así como su aplicación y limitaciones mismas; además, basándose en un criterio de selección sobre el uso de un modelo u otro, se da una recomendación de aplicación la cual tiene directa relación con lo que se denominara tiempo de maniobra, el cual es la duración del evento que genera el estado transitorio; comparado con el tiempo que tarda una onda de presión en viajar del punto donde se originó la perturbación hasta el punto donde es reflejada, y que para el caso de la C.H. La Yesca la onda se encuentra confinada entre la turbina y el pozo de oscilación.

De esta manera se concluye al respecto sobre la utilización en el presente trabajo del modelo de oscilación de masa y, el modelo de tubería rígida y fluido compresible, para la obtención de las fluctuaciones de presión en el pozo de oscilación y su posterior comparación de ambos modelos con los registros obtenidos para el modelo físico de la obra de generación.

5 Conclusiones.

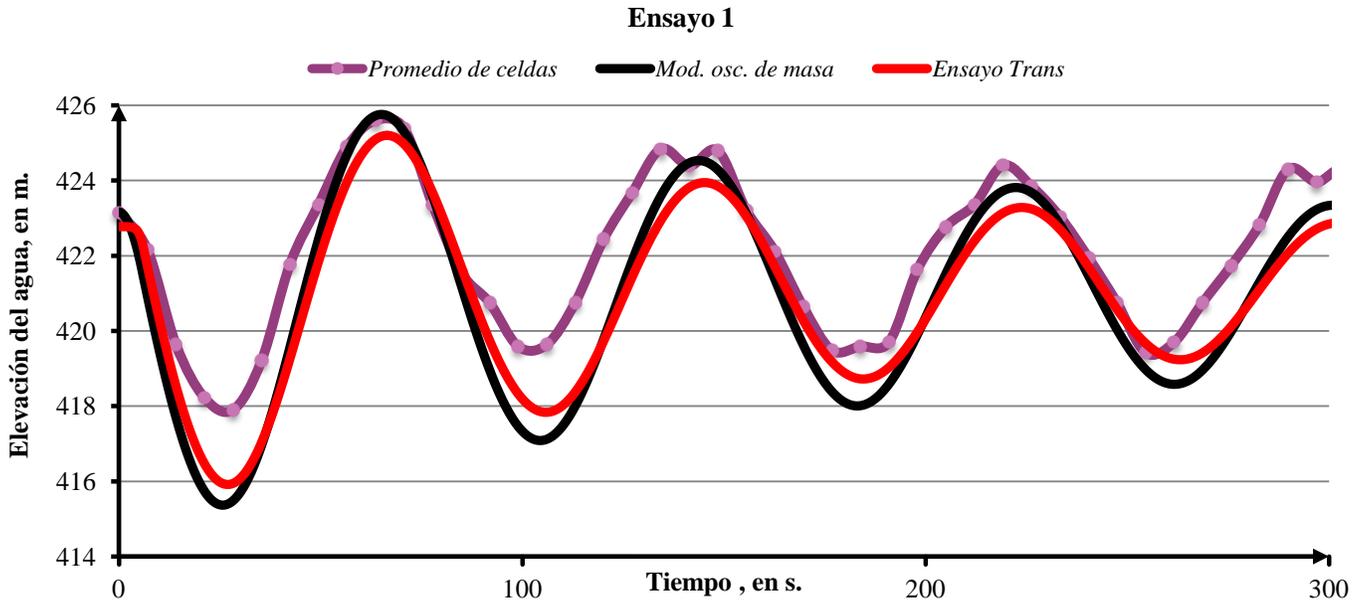
La realización de este trabajo tiene como principales objetivos aplicar los modelos matemáticos de oscilación de masa y el de tubería elástica y flujo compresible para obtener la variación del nivel del agua dentro del pozo de oscilación de la C.H. La Yesca durante un régimen transitorio ocasionado por la maniobra de rechazo de carga para diferentes condiciones de operación en donde el sistema trabaja a presión y comparar los resultados con los registros del laboratorio. Cabe aclarar que la maniobra de rechazo de carga se simuló tanto en el laboratorio como en los modelos matemáticos a través del cierre de una válvula.

A pesar de que para aplicar ambos modelos matemáticos al modelo físico de la C.H. La Yesca, fue necesario realizar una serie de consideraciones tales como: trabajar con una tubería equivalente a los tubos de desfogue, considerar tuberías de sección circular y las pérdidas hidráulicas que se presentan en todo el sistema se asignaron al coeficiente de fricción de Darcy- Weisbach, la variación del nivel del agua en el pozo de oscilación que se obtiene con ellos representan de manera adecuada las variaciones registradas en los ensayos del laboratorio.

La comparación de los resultados de los modelos matemáticos con los registros obtenidos en el modelo físico, permite realizar un análisis cualitativo de la utilización de cada uno de ellos. De esta manera se muestra cuál de los dos modelos aplicados se ajusta mejor a los resultados del modelo físico y las diferencias que existen entre ellos.

Debido a que los resultados obtenidos tienen patrones similares, únicamente se harán comentarios referentes al ensayo 1. En la gráfica 5.1 se comparan el promedio de los registros obtenidos con las celdas de presión y los resultados obtenidos con los modelos de oscilación de masa y golpe de ariete. Se aprecia que con el modelo de oscilación de masa las oscilaciones de presión son de mayor amplitud que las obtenidas con el modelo de golpe de ariete y se obtiene la misma frecuencia de oscilación.

Tanto en la misma gráfica 5.1 como en las 4.2, 4.5, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 y 4.18 se observa que con ambos modelos se obtiene que el nivel del agua en el pozo de oscilación desciende más que el nivel registrado en el laboratorio, este hecho indica la posible existencia de una pérdida a la salida de la torre.



Gráfica 5.1. Ensayo 1, comparación entre los modelos numéricos y el registro del modelo físico.

Según los resultados obtenidos, ambos modelos son igualmente válidos para la obtención de los niveles máximos y mínimos en las oscilaciones de la torre. Sin embargo, la aplicación de un modelo u otro tiene sus limitaciones las cuales se comentaran más adelante.

El modelo de oscilación de masa es aplicable en sistemas en los que se considera el diámetro de la tubería constante y el flujo incompresible; por lo que en el sistema de ecuaciones no se considera la deformación de la tubería por efecto de la presión ejercida por el flujo sobre las paredes de la tubería.

En el modelo de tubería elástica y flujo compresible el hecho de considerar los efectos elásticos en la tubería implica tomar en cuenta que el área transversal de la sección sea variable respecto a su posición y al tiempo; es decir $A(s, t)$, este mismo hecho implica que la presión dentro de la tubería no es constante a lo largo de ella por lo que $p(s, t)$. Al tener gradientes de presión, la densidad del fluido al ser dependiente de ésta tampoco es constante $\rho(s, t)$. La variación de los parámetros mencionados se debe tomar en cuenta en las ecuaciones del modelo, lo que lo convierte en un modelo más complejo que el de oscilación de masa.

Para resolver el sistema de ecuaciones que determina el modelo de golpe de ariete se debe considerar un par de ecuaciones adicionales. Estas dos ecuaciones son precisamente las mencionadas ecuaciones constitutivas, las cuales consideran la compresibilidad del fluido y el comportamiento elástico de la tubería.

El modelo de oscilación de masa admite que la celeridad en la onda de propagación de las perturbaciones es infinita ($a = \infty$), el de golpe de ariete considera la existencia de una celeridad a finita.

El criterio para asegurar que a través del modelo de oscilación de masa se obtendrán resultados confiables consiste en comparar el tiempo (T_c) en el cual se lleva a cabo la maniobra que genera el transitorio y el tiempo (T) que tarda una onda de presión en recorrer la tubería y regresar al punto donde se generó la perturbación. Cuando se trata de una maniobra lenta, $T_c > T$, se pueden emplear ambos modelos, cuando es una maniobra rápida, $T_c < T$, únicamente se debe utilizar el modelo de golpe de ariete.

Para el caso de este trabajo, las maniobras se realizan en $T_c = 6$ s y 14 s y el flujo transitorio se confina entre la válvula y la torre de oscilación, por lo que

$$T = 0.0022 \text{ s}$$

Debido a que $T_c > T$ se trata de una maniobra lenta. Es por esta razón que los resultados que se obtienen con los modelos de oscilación de masa y golpe de ariete son muy parecidos.

Uno de los objetivos de este trabajo fue verificar el desarrollo del modelo matemático para simular la operación del pozo de oscilación con varias tuberías de entrada y una de salida y su implementación en el sistema de simulación Trans. A través de las comparaciones que se muestran en las gráficas 4.12, 4.14, 4.16 y 4.18 de los resultados obtenidos con el sistema Trans y los registros del laboratorio, se observa que el modelo matemático y su implementación reproducen satisfactoriamente las primeras oscilaciones (las más importantes) del nivel del agua en la torre de oscilación a pesar de las consideraciones que se tuvieron que tomar en cuenta para realizar las simulaciones correspondientes.

Bibliografía.

1. Ochoa Álvarez F., Hidalgo Toledo I., Córtes Córtes C., Aguirre Tello S. (2009), *P.H. La Yesca. Funcionamiento de la cámara de oscilación del desfogue de la obra de generación, en modelo hidráulico*. Comisión Federal de Electricidad, México, 146 pp.
2. Gardea Villegas H., (1992), *Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo*, Trillas: UNAM, Facultad de Ingeniería, México, DF, 290 pp.
3. Rodal Canales E., et , (2011), *Manual de diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad, Sección A. Hidrotecnia, Tema 2. Hidráulica, Capítulo 4. Máquinas Hidráulicas*.
4. Cafaggi Félix A. A., Rodal Canales E., y Sánchez Huerta A, (2011), *Sistemas de bombeo*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, DF, 336 pp.
5. Viejo Zubicaray M., Alonso Palacios P, (1977), *Energía hidroeléctrica, turbinas y plantas generadoras*, Limusa, México, DF, 330 pp
6. Berezowsky Verdusco M. y Ramírez León H., (1988), *Cámaras de oscilación, análisis y diseño hidráulico*, Universidad Nacional Autónoma de México, Series del Instituto de Ingeniería UNAM, núm. D-28, México, DF, 136 pp.
7. Cuesta Diego L. y Vallarino E., (2000), *Aprovechamientos hidroeléctricos, Tomo I*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España, 518 pp.
8. Sanz Osorio J. F., (2008), *Energías renovables, energía hidroeléctrica*, Prensas Universitarias de Zaragoza, España, 402 pp.
9. Sotelo Ávila G., (1997), *Hidráulica general vol. 1, fundamentos*, Limusa, Grupo Noriega editores, México, DF. 560 pp.