

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Análisis comparativo de transitorios en una chimenea de equilibrio con orificio y una chimenea de equilibrio de sección compuesta

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Civil


Autores:

Manuel Alejandro Villavicencio Fernández

Doménica Giselle Reyes Zuña

Director:

Esteban Alonso Pacheco Tobar

ORCID:  0000-0001-9292-7193

Cuenca, Ecuador

2025-09-24

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un análisis comparativo del comportamiento hidráulico entre una chimenea de equilibrio con orificio y una chimenea de equilibrio de sección compuesta frente a fenómenos transitorios generados por eventos de cierre y apertura brusca de válvulas. Se emplea un procedimiento numérico-iterativo basado en el modelo inercial rígido, el cual permite simular la dinámica del flujo y las oscilaciones del nivel piezométrico en una chimenea de equilibrio. Ambas configuraciones se aplican y evalúan mediante escenarios críticos adaptados a condiciones hidráulicas específicas, definidas a partir de un caso de estudio ubicado en Ecuador. La metodología incluye la definición de parámetros hidráulicos y geométricos para cada tipo de chimenea, considerando variaciones en el diámetro del orificio y en el ensanchamiento superior de la sección compuesta. Se analizan las variables clave del fenómeno transitorio, tales como las oscilaciones del nivel de agua, tiempos de estabilización y amplitudes generadas durante los eventos estudiados. Este trabajo pretende proporcionar criterios técnicos claros que permitan una selección adecuada de la configuración de chimenea según las particularidades operativas del sistema hidráulico y las condiciones de flujo, contribuyéndose así al diseño eficiente y seguro de conducciones presurizadas en regiones con alta complejidad topográfica.

Palabras clave del autor: modelo inercial rígido, amortiguación hidráulica, columna piezométrica



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This study presents a comparative analysis of the hydraulic behavior of two surge tank configurations—a surge tank with an orifice and a composite-section surge tank—under transient flow conditions caused by sudden valve closures and openings. A numerical-iterative procedure based on the rigid water column model is employed to simulate flow dynamics and piezometric level oscillations within the surge tanks. Both configurations are evaluated through critical scenarios adapted to specific hydraulic conditions, derived from a case study located in Ecuador. The methodology includes the definition of hydraulic and geometric parameters for each surge tank type, accounting for variations in the orifice diameter and the upper widening of the composite section. Key variables associated with transient phenomena, such as water level oscillations, stabilization times, and amplitude of fluctuations during the events, are analyzed. This work aims to provide clear technical criteria for selecting the appropriate surge tank configuration based on the operational characteristics of the hydraulic system and flow conditions, thereby contributing to the efficient and safe design of pressurized conduits in regions with high topographical complexity.

Palabras clave del autor: rigid inertial model, hydraulic damping, piezometric column



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1.	Introducción.....	10
1.1.	Contextualización del problema	10
1.2.	Objetivos	11
1.2.1.	Objetivo general	11
1.2.2.	Objetivos específicos	11
1.3.	Justificación y alcance.....	12
2.	Marco teórico: transitorios hidráulicos.....	13
2.1	Causas y efectos de los transitorios hidráulicos	14
2.4	Chimenea de equilibrio: descripción de su funcionamiento	22
2.4.1	Chimenea de Equilibrio de Orificio.....	24
2.4.2	Chimenea de Equilibrio de Sección Compuesta.....	26
2.5	Modelos matemáticos para estudio de oscilaciones.....	29
3.	Caso de estudio y descripción del proyecto	34
3.1	Descripción de parámetros hidráulicos.....	36
3.2	Adaptación del procedimiento numérico-iterativo	41
3.2.1	Adaptación del proceso para chimenea de orificio.....	44
3.2.2	A Adaptación del proceso para chimenea de sección compuesta	46
3.3	Escenarios de simulación y aplicabilidad.....	47
3.3.1	Estudio para cierre brusco de una válvula ($Q_{max} \rightarrow Q = 0$)	49
3.3.2	Estudio para abertura brusca de una válvula ($Q_0 = 0 \rightarrow Q = Q_{max}$):	51
3.3.3	Escenarios de Simulación	52
	Chimeneas de Sección Compuesta.....	55
4	Resultados y discusión.....	57
4.1.1	Estudio para cierre brusco de una válvula ($Q_{max} \rightarrow Q=0$)	57
	Chimenea de sección compuesta ($r_2 = 10 r_1$):	57
	Chimenea de sección compuesta ($r_2 = 3r_1$):	58
	Chimenea con Orificio $D_1 = 0.7m$	59
	Chimenea con Orificio $D_2 = 0.8 m$	60
4.1.3	Tabla Resumen de resultados obtenidos	67
4.2	Discusión.....	68
5	Conclusiones y recomendaciones.....	69
5.1	Conclusiones:.....	70
5.2	Recomendaciones	74

Índice de figuras

Figura 1. Válvula en la descarga que alimenta un deposito	19
Figura 2. Esquema de simulación de la fase de depresión tras el cierre de la válvula	20
Figura 3. Esquema de simulación de la fase de retroceso	20
Figura 4. Esquema de simulación de la fase de sobrepresión en el deposito	21
Figura 5. Esquema de simulación de la fase de recuperación	21
Figura 6. Esquema de chimenea con orificio.....	25
Figura 7. Esquema Chimenea Compuesta con aumento de la sección transversal superior (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.)	27
Figura 8.. Esquema de una Chimenea Compuesta con aumento de la sección en diferentes zonas (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.)	28
Figura 9. Esquema de Chimenea Compuesta con cámaras laterales en las tramos inferior e intermedio (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.)	28
Figura 10. Transferencia de agua entre dos depósitos.....	33
Figura 11. Ubicación Geográfica del proyecto (ELECAUSTRO S.A., s.f.)	35
Figura 12. Nomenclatura para Chimeneas de Orificio	39
Figura 13. Parámetros geométricos para ajuste de radio, sección compuesta	46
Figura 14. Gráfico técnico explicativo para el proyecto Ocaña 1 (ELECAUSTRO S.A., s.f.)	47
Figura 15. Geometría del caso de simulación con radio superior diez veces mayor	55
Figura 16. Geometría del caso de simulación con radio superior tres veces mayor	56
Figura 17. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $10r_1$, en un cierre de válvula.....	57
Figura 18. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $3r_1$ en un cierre de válvula.....	58
Figura 19. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_1 = 0.7m$ en un cierre de válvula.....	59
Figura 20. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_2 = 0.8m$ en un cierre de válvula.....	60
Figura 21. Resumen de curvas de las 4 chimeneas para cierre brusco de válvula.....	61
Figura 22. Oscilaciones en chimenea de equilibrio simple en un cierre de válvula con $\Delta t = 5$ s (Torres Delgado, 2025)	62
Figura 23. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $10r_1$ en una apertura de válvula	62
Figura 24. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $3r_1$ en una apertura de válvula	63
Figura 25. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_1 = 0.7m$ en una apertura de válvula	64
Figura 26. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_2 = 0.8m$ en una apertura de válvula	65
Figura 27. Resumen de curvas de las 4 chimeneas para apertura brusca de válvula.....	66
Figura 28. Oscilaciones en chimenea de equilibrio simple en una apertura brusca de válvula con $\Delta t = 5$ s (Torres Delgado, 2025)	67
Figura 29 Oscilaciones en chimenea de equilibrio simple en un cierre brusco de válvula con $\Delta t = 5$ s (Torres Delgado, 2025)	67

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los sistemas transitorios hidráulicos existentes según el tipo de sistema.....	15
Tabla 2. Clasificación de los sistemas transitorios hidráulicos existentes según la velocidad de ocurrencia.....	16
Tabla 3. Datos iniciales de trabajo para el caso de estudio.....	48
Tabla 4. Resultados finales de los 4 escenarios, tanto en apertura como en cierre.....	67

Dedicatoria

Dedico este trabajo, con el corazón lleno de gratitud y amor, a quienes marcaron mi vida de una forma inolvidable.

A Gustavo y Sebastián, mis amigos que partieron antes de tiempo. Su recuerdo habita en mi memoria y su amistad sigue siendo una fuente de fuerza y motivación. Este logro también les pertenece.

A mi madre, Alba, por su amor incondicional, su fortaleza inquebrantable y su ejemplo diario de entrega y perseverancia. Su fe en mí fue un faro que me guio incluso en los momentos más inciertos.

A mi padre, Manuel, por su paciencia y su apoyo constante. A mi hermano Paul, con quien comparto la raíz de todo lo que soy y también el deseo de crecer y construir un futuro con esfuerzo y dedicación. A mi hermano Sebastián, por su forma de acompañarme sin hacer ruido, con ese cariño sencillo que siempre reconforta. A mis sobrinos, por estar siempre ahí cuando más lo necesité, incluso en silencio; por sus abrazos, sus risas espontáneas y por recordarme, sin saberlo, que todo esfuerzo vale la pena.

Y a mis amigos, los que estuvieron en los días luminosos y en los oscuros, los que caminaron conmigo en la universidad y en la vida. Gracias por dar sentido al trayecto y hacer que cada paso valiera la pena; su compañía fue esencial para no rendirme.

Este trabajo es para ustedes, con todo mi corazón.

Manuel Alejandro

Dedicatoria

A Dios, por escucharme y darme fuerzas en esas largas noches en las que sentí que iba a tirar la toalla. Por sostenerme incluso cuando yo misma dudaba de seguir.

A mi madre, Rosa Zuña, mi guerrera, mi guía, mi mayor ejemplo. Sin ella, absolutamente nada de esto hubiera sido posible. Por ser mi sostén incondicional en cada etapa de esta lucha que, por fin, empieza a mostrar su recompensa.

A mi hermana menor, Kimberly, compañera de casa y de vida, por estar ahí en los días buenos y malos, por compartir el silencio, la risa, la lealtad, y berrinches, gracias por estar. Y a Gabriela, mi hermana del alma, aunque no de sangre, por enseñarme lo que es el amor incondicional de una amiga que se convierte en familia, por ser mi contacto de emergencia, mi dupla, y por quererme sin condiciones.

A la ingeniera Verónica Carrillo, por su disposición constante y por demostrar que una dirección académica también puede ser humana y comprometida con los estudiantes. Su apoyo marcó una diferencia real en mi camino universitario.

A mi pequeño amor peludo, mi Taffy, que empezó esta carrera conmigo, se amaneció a mis pies, y vivió tantas noches largas a mi lado, y que hoy, también, ve cómo la termino. Y a cada una de las mascotas que llenaron mi vida y mi casa de amor: Chiquita, Ragnar, Lola, Fifi... todos, sin saberlo, acompañaron y suavizaron este proceso.

A toda mi familia, que me dio raíces y abrigo en cada paso, especialmente: A mis bisabuelitos Rigoberto y Rosa, por brindarme techo en mis primeros años de estudio. A mi abuelito Lauro, siempre pendiente, siempre cariñoso. A mis tíos Nery y Bella y a su hermosa familia, por convertirse en segundos padres cuando los míos no estaban físicamente presentes, y acogernos como hijas. A mi tío Beto, por asumir desde el primer momento el rol de segundo padre, por socorrerme, por escucharme, por estar. Y a mis tías Rufina y Yury, por su cariño constante y su apoyo silencioso, pero firme.

A mis amigos del alma: Karen, Ximena, Michelle, Schneider, Danny, Estefanía, Belén, Marco, Jocelyne y muchos más me sabrán disculpar no poder citar a todos... algunos presentes incluso desde antes del inicio, pero todos firmes hasta el final. Gracias por su amor, su compañía, por soportarme y cuidarme, por demostrarme el valor de una amistad, y que esta no se mide en tiempo, sino en amor, en presencia y en lealtad.

A todos ustedes, gracias. Esta meta también es suya.

Doménica Giselle

Agradecimientos

A nuestras familias, por el apoyo incondicional brindado a lo largo de este proceso. A nuestros amigos y compañeros, por su compañía constante y por hacer más llevadera la carga académica con su apoyo y ánimo.

A todos nuestros docentes y autoridades universitarias, por su dedicación, orientación y compromiso durante nuestra formación profesional.

De manera especial, al Ing. Esteban Pacheco, director de esta tesis, por su guía, paciencia y valioso acompañamiento en el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente, a la Universidad de Cuenca, por la educación recibida y por ser el espacio que hizo posible nuestra formación como profesionales.

Manuel y Doménica

1. Introducción

1.1. Contextualización del problema

En el diseño de sistemas hidráulicos a presión, particularmente en zonas con características topográficas complejas, como lo son los entornos montañosos, los fenómenos transitorios representan un desafío técnico que requiere atención especial. Estos eventos, que alteran bruscamente las condiciones de presión dentro del sistema, exigen soluciones estructurales capaces de absorber sus efectos sin comprometer la integridad operativa. Aunque existen diversas configuraciones de chimeneas de equilibrio concebidas para mitigar estas oscilaciones, no siempre se dispone de criterios técnicos claros que guíen su elección en función del contexto. Esta carencia se vuelve aún más crítica cuando los proyectos se ubican en áreas con alta variabilidad de caudales y elevaciones, donde un diseño inadecuado puede acentuar las sobrepresiones, generando riesgos estructurales importantes.(Boillat & De Souza, 2004; Chaudhry, 2014). Estas condiciones generan sobrepresiones o depresiones que pueden comprometer la integridad estructural de las conducciones (Chaudhry, 2014). Cuando no se controlan adecuadamente estos efectos, pueden producirse fallos como: el colapso de tramos, deformaciones en uniones, filtraciones o daños en galerías de baja carga.

Para tratar de mitigar efectos adversos, se utilizan las chimeneas de equilibrio, cuya función principal es absorber la energía de las oscilaciones de presión y disiparla de manera controlada, evitando así daños estructurales fuertes o fallos en la operación del sistema. En la práctica actual, se emplean distintas configuraciones de estas estructuras, siendo particularmente relevantes las chimeneas con orificio, que incorporan una restricción en su base para amortiguar las oscilaciones y las chimeneas de sección compuesta que poseen una geometría variable que está diseñada para responder mejor ante diferentes condiciones de caudal (Pacheco, E. y Carrillo, V. 2024). Las chimeneas con orificio permiten amortiguar con mayor eficacia las oscilaciones, por otro lado, las chimeneas de sección compuesta facilitan una mejor adaptación a variaciones de caudal (Bardini, 2018; Martínez Alzamora et al., 1995). A pesar de diversidad de experiencias en su implementación, la información comparativa sobre el rendimiento hidráulico de ambas configuraciones bajo condiciones similares es limitada (Boillat & De Souza, 2004). Este vacío técnico plantea interrogantes significativas sobre el tipo de chimenea que resulte más eficiente para disipar ondas de presión sin inducir presiones mínimas no deseadas ni oscilaciones prolongadas.

Bajo esta perspectiva, resulta fundamental validar y comparar modelos matemáticos que reflejen con precisión el comportamiento hidráulico de estas estructuras frente a eventos transitorios.

El análisis de este tipo de estructuras ha evolucionado desde enfoques analíticos y empíricos tradicionales (Wylie & Streeter, 1982) hasta modelos numéricos avanzados capaces de simular con alta fidelidad los fenómenos transitorios. No obstante, a pesar de estos avances, aún persiste una importante falta de estandarización en los métodos de cálculo y diseño. Esta ausencia de criterios normativos claros genera incertidumbre técnica, sobre todo al momento de seleccionar la tipología más adecuada de chimenea para condiciones hidráulicas específicas. A ello se suma la escasa literatura especializada que compare de forma sistemática el comportamiento de distintos tipos de chimeneas bajo condiciones transitorias similares, lo que constituye una clara limitación en el ámbito de la ingeniería aplicada.

En respuesta a esta problemática en (Pacheco, E. 2019) se propone un modelo simplificado de simulación hidráulica basado en el enfoque inercial unidimensional, que permite representar adecuadamente el comportamiento dinámico de chimeneas de equilibrio ante eventos como el cierre o la apertura rápida de válvulas. Este modelo, complementado con los lineamientos técnicos expuestos por (Pacheco, E. y Carrillo, V. 2024), constituye la base teórica y metodológica del presente trabajo. A partir de lo expuesto, se lleva a cabo un análisis comparativo del comportamiento hidráulico de una chimenea de equilibrio con orificio y una chimenea de equilibrio con sección compuesta mediante la simulación y comparación de resultados que permitan establecer criterios técnicos para seleccionar la configuración estructural más adecuada, considerando tanto las características operativas del sistema como las particularidades de flujo. El trabajo realizado permite contribuir a los procedimientos de diseño seguro y eficiente en conducciones a presión en proyectos hidroeléctricos y de abastecimiento de agua potable en zonas de montaña.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Comparar el comportamiento hidráulico de chimeneas de equilibrio con orificio y sección compuesta ante fenómenos transitorios, mediante el uso de un procedimiento numérico-iterativo basado en el modelo rígido.

1.2.2. Objetivos específicos

- Aplicar el modelo rígido para simular el comportamiento hidráulico de chimeneas con orificio y compuestas.
- Desarrollar simulaciones numéricas ante eventos de cierre y apertura brusca de válvulas para ambos tipos de chimenea para las condiciones del caso de estudio.

- Comparar los resultados obtenidos en cuanto a oscilación de nivel, tiempo de estabilización y eficiencia amortiguadora.

1.3. Justificación y alcance

El diseño de aprovechamientos hidroeléctricos implica múltiples decisiones técnicas, entre las cuales destaca la configuración del sistema de conducción. Tradicionalmente, estas infraestructuras inician con una obra de retención en cabecera, que cumple el doble propósito de regular el régimen del río y permitir la toma de agua. A partir de esta obra, el recurso se canaliza hasta la central eléctrica, tratando de minimizar las pérdidas hidráulicas en comparación con el salto bruto de manera que la diferencia entre este y las pérdidas, represente el salto neto disponible que es la energía efectiva para accionar las turbinas (Pacheco, 2019).

La selección del tipo de central dependiendo sea a pie de presa, de agua fluyente o en derivación con canalizaciones a presión, influye directamente en la flexibilidad operativa y en la respuesta del sistema ante cualquier contrariedad o fallo. Particularmente, los esquemas con canalizaciones completamente a presión permiten un mejor aprovechamiento energético y mayor rapidez de maniobra. Aunque requieren mecanismos adicionales de control como las chimeneas de equilibrio para proteger la infraestructura frente a oscilaciones súbitas de caudal (Pacheco, 2019).

Uno de los principales retos en el diseño de sistemas hidráulicos presurizados es la escasez de estudios comparativos sobre el comportamiento dinámico de las diferentes configuraciones de chimeneas de equilibrio, especialmente bajo condiciones operativas similares. Esta falta de investigaciones específicas dificulta una toma de decisiones fundamentada en la etapa de diseño, sobre todo en contextos geotécnicamente complejos o de alta pendiente (Pacheco & Carrillo, 2024; Ramos & Almeida, 2001; Wylie & Streeter, 1982)

El presente estudio tiene como propósito realizar un análisis comparativo entre dos configuraciones representativas de chimeneas de equilibrio: la chimenea con orificio y la chimenea de sección compuesta. El análisis se enfoca en escenarios de cierre y apertura rápida de válvulas, que representan condiciones típicas de generación de golpe de ariete, utilizando un modelo unidimensional de régimen inercial rígido. La metodología se basará en un procedimiento numérico-iterativo simplificado (Pacheco, 2019), que permite abordar la solución de las ecuaciones de continuidad y movimiento considerando pérdidas por fricción y variaciones de caudal.

El propósito principal es establecer una base comparativa técnica que facilite la selección adecuada de la configuración de chimenea más apropiada según parámetros como la magnitud del transitorio, la disipación de energía y las restricciones físicas del entorno. El estudio está dirigido a proporcionar herramientas útiles tanto para ingenieros civiles dedicados al diseño y operación de sistemas hidráulicos a presión, como para investigadores interesados en el modelado aplicado de fenómenos transitorios.

Alcances y limitaciones del estudio:

- El modelo hidráulico es unidimensional (1D), con supuestos de conductos rígidos y fluido incompresible.
- Se aplican condiciones ideales de cierre para inducir el fenómeno de golpe de ariete.
- Las simulaciones se realizan bajo similares condiciones para ambas configuraciones: misma altura de chimenea, volumen disponible y coeficientes de pérdida.
- No se considera cavitación, fricción variable, elasticidad de las paredes, ni efectos térmicos.
- El análisis se limita al comportamiento hidráulico comparativo, sin incluir costos constructivos ni viabilidad estructural.

2. Marco teórico: transitorios hidráulicos.

En los sistemas hidráulicos a presión las condiciones de flujo no siempre permanecen constantes, existen circunstancias en las que una alteración repentina en la velocidad del fluido se desestabiliza, cuando esto ocurre se genera una onda de presión que se propaga a lo largo de la conducción; si no se controla adecuadamente puede originar grandes problemas e incluso fallas estructurales significativas (Chaudhry, 2014; Wylie & Streeter, 1982). Estas ondas son resultado de cambios súbitos en las condiciones hidráulicas del sistema. Dependiendo de su magnitud, estas perturbaciones pueden superar los límites estructurales del sistema, comprometiendo su integridad y funcionalidad. Este fenómeno es de considerable importancia en sistemas, donde las condiciones transitorias ocurren con mayor frecuencia. El estudio de estos eventos permite evaluar la seguridad operativa del sistema y optimizar el diseño de dispositivos de protección (Chaudhry, 2014; Ramos & Almeida, 2001).

El análisis del golpe de ariete y otros transitorios se fundamenta en las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, adaptadas al régimen no permanente. Habitualmente, estas ecuaciones se resuelven mediante el método de las características, por otra parte, la modelación avanzada de estos fenómenos requiere

considerar cada vez más variables, sobre esta base, diversos estudios han desarrollado modelos unidimensionales capaces de representar con precisión la evolución del flujo y la presión en conducciones cerradas, permitiendo diseñar sistemas capaces de resistir o disipar la energía asociada al transitorio (Boillat & De Souza, 2004; Wylie & Streeter, 1982)

2.1 Causas y efectos de los transitorios hidráulicos

Los transitorios o perturbaciones, considerados como tal, pueden alcanzar niveles que superan los límites estructurales de diseño, las consecuencias de estos eventos pueden ser severas. Entre los efectos más comunes se encuentran las sobrepresiones, que pueden provocar roturas en tuberías o accesorios; presiones negativas, capaces de inducir cavitación o ingreso de aire; y fatiga estructural, lo que puede derivar en fallas en válvulas, conexiones, soportes o equipos rotativos (Boillat & De Souza, 2004; Chaudhry, 2014). Asimismo, pueden generarse vacíos parciales, desprendimientos de elementos mecánicos, y desgastes prematuros en la infraestructura hidráulica.

Según diversos estudios (Chaudhry, 2014; Karney & McInnis, 1992; Pacheco, 2019; Wylie & Streeter, 1982), las causas principales de estos fenómenos incluyen:

- Cierre o apertura rápida de válvulas y compuertas.
- Arranque o parada súbita de bombas.
- Cambios bruscos en la carga hidráulica.
- Ingreso de aire al sistema o aparición de cavitación.
- Vibraciones en rotores, impulsores o ventiladores.
- Esguimientos intensos por tormentas.
- Variaciones en el nivel de embalses, debido a ondas o cambios de elevación.
- Fallas estructurales como colapso de presas o desprendimiento de rodamientos.

2.2 Tipos de transitorios hidráulicos

Existen diferentes clasificaciones generales dependiendo del sistema, y dentro de los sistemas cerrados se condicionan de acuerdo a la velocidad de ocurrencia, por lo que tenemos la siguiente agrupación:

2.2.1 Según el tipo de sistema

Pueden manifestarse en distintos tipos de sistemas, cuya configuración influye directamente en su comportamiento y modelación.

Tabla 1. Clasificación de los sistemas transitorios hidráulicos existentes según el tipo de sistema

Tipo de sistema	Descripción general	Características principales	Suposiciones del modelo	Aplicaciones típicas
Sistemas cerrados	Conductos completamente presurizados que trabajan a presión positiva de manera continua	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo a presión - No hay superficie libre - Tuberías cerradas 	<ul style="list-style-type: none"> - Se considera la presión en todo momento - No hay interacción con la atmósfera - Las paredes son rígidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Redes de agua potable - Impulsiones de bombeo - Turbinas en sistemas hidroeléctricos
Sistemas abiertos	El flujo se encuentra a superficie libre, es decir, en contacto con la atmósfera	<ul style="list-style-type: none"> - Flujos gravitacionales - Presión atmosférica - Canalizaciones o cauces naturales 	<ul style="list-style-type: none"> - El flujo está regido por la pendiente y rugosidad del canal - La presión es hidrostática - Flujo superficial 	<ul style="list-style-type: none"> - Canales de riego - Ríos y quebradas - Vertederos y canales de desagüe
Sistemas combinados	Sistemas que pueden cambiar entre flujo a presión y flujo a superficie libre	<ul style="list-style-type: none"> - Régimen transitorio - Cambios en condiciones de presión - Flujos mixtos 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere modelos especiales para transiciones - Considera ondas de presión y nivel libre - Flujo variable 	<ul style="list-style-type: none"> - Alcantarillas pluviales - Colectores sanitarios en tormenta - Túneles de descarga de presas.

Fuente: Elaboración propia basada en (Karney & McInnis, 1992; Martínez Alzamora et al., 1995; Thorley, 2004)

2.2.2 Según la dinámica del flujo o velocidad de ocurrencia

En sistemas hidráulicos cerrados, los transitorios se clasifican de acuerdo con la rapidez del cambio y el tipo de respuesta del sistema.

Esta clasificación es clave para seleccionar el modelo matemático apropiado.

Tabla 2. *Clasificación de los sistemas transitorios hidráulicos existentes según la velocidad de ocurrencia*

Tipo de transitorio	Descripción general	Características principales	Suposiciones del modelo	Aplicaciones típicas
Transitorio cuasi-estático	Representa variaciones muy lentas en caudales o presiones, características del comportamiento ordinario de redes a presión, donde predominan los efectos estáticos. No se generan ondas de presión.	-Cambios graduales en presión o caudal - Se modela como flujo permanente variable. - Ignora inercia y elasticidad.	- Los efectos inerciales y elásticos son despreciables - Las condiciones de contorno cambian lenta y gradualmente - La energía invertida en acelerar/decelerar el fluido es despreciable - El flujo es estacionario	- Análisis y gestión de redes de agua -Dimensionamiento de depósitos -Análisis de largo plazo en sistemas donde los transitorios rápidos no son relevantes
Transitorio rápido (oscilación en masa)	Se produce cuando ocurren variaciones bruscas (aunque no instantáneas) de caudal en sistemas cerrados. Aunque no se generan ondas de presión, pueden producirse oscilaciones de nivel significativas	- Cambios rápidos, pero no instantáneos. - Fluido incompresible - Tuberías rígidas - Genera oscilaciones en nivel - Se modela con el modelo inercial rígido	- Se desprecia la compresibilidad del fluido - No se considera elasticidad de la tubería - Las variaciones se representan mediante ecuaciones de oscilación en masa.	- Evaluación de chimeneas de equilibrio - Diseño de estructuras de control transitorio - Estudios operativos de turbinas.
Transitorio muy rápido	Se trata del fenómeno más crítico y violento dentro de los transitorios hidráulicos.	-Cambios casi instantáneos - Generación de ondas de presión	- Se considera la compresibilidad del fluido - Se modela la elasticidad de la tubería - La onda de presión se propaga según la velocidad de onda acústica	- Análisis de sobrepresiones - Diseño de válvulas de alivio y protección - Simulación de eventos de emergencia

	<p>Ocurre ante perturbaciones abruptas como el cierre inmediato de válvulas o la parada repentina de bombas. En este caso, se generan ondas de presión que se propagan a gran velocidad.</p>	<p>- Fluido compresible - Paredes elásticas.</p>		
--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia basada en (Abreu et al., 1995; Chaudhry, 2014; Pacheco, 2019; Wylie & Streeter, 1982)

2.3 Breve descripción de las ecuaciones básicas para estudio de transitorios

El análisis de los fenómenos transitorios en sistemas hidráulicos se basa en un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento dinámico del flujo no permanente y que permiten modelar la interacción entre la velocidad del flujo, la presión ejercida y la geometría del sistema (Abreu et al., 1995). Las ecuaciones están basadas en los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento, complementadas con expresiones empíricas y analíticas que simplifican su comprensión sin perder precisión mediante las cuales se estudian variaciones de flujo que se transmiten a lo largo del sistema a través de ondas de compresión y expansión que dependen tanto de las propiedades del fluido como del material de la tubería.

2.3.1 Pulso de Joukowski como modelo básico para estudio de sobrepresión

Una de las expresiones más representativas del fenómeno del golpe de ariete, establece una relación directa entre la variación de presión y el cambio de velocidad del flujo, permite estimar la magnitud de la sobrepresión inducida por una perturbación rápida, como el cierre repentino de una válvula (Abreu et al., 1995). Se establece una relación causa-efecto que se constituye en la base para determinar los máximos esfuerzos internos que debe soportar una conducción, y resulta especialmente útil en el diseño de medidas de control como válvulas de alivio, chimeneas de equilibrio o tanques de oscilación. Para el golpe de ariete, conocido también como pulso de Joukowski, se establece la siguiente relación:

$$\Delta P = -\rho a \Delta v$$

donde:

ΔP : cambio de presión (Pa)

ρ : densidad del fluido (kg/m³)

a : celeridad de onda (m/s)

Δv : cambio en la velocidad del flujo (m/s)

La celeridad de onda, representa la velocidad a la que se propaga una perturbación de presión a lo largo de una tubería, depende de la elasticidad del fluido y de las propiedades mecánicas del material que conforma la conducción (Abreu et al., 1995). La expresión general es:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left(1 + \frac{KD}{eE}\right)}}$$

donde:

a : celeridad de onda (m/s)

ρ : densidad del fluido (kg/m³)

K : módulo de elasticidad del fluido (Pa)

D : diámetro de la tubería (m)

E : módulo de elasticidad del material de la tubería (Pa)

e : espesor de la pared de la tubería (m)

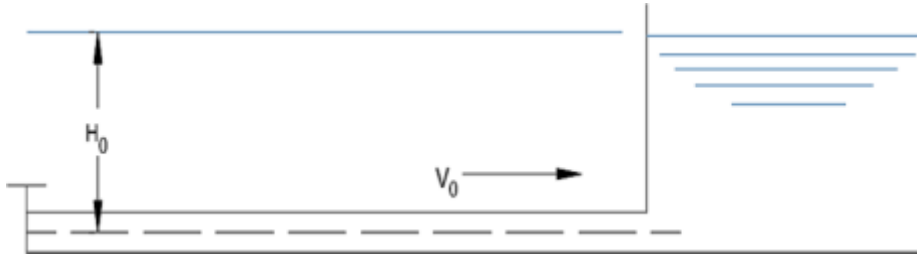
2.3.2 Golpe de ariete:

Es un tipo particular de transitorio muy rápido, ocurre cuando una válvula se cierra repentinamente, provocando una compresión del fluido y la generación de una onda de presión. Este fenómeno implica una transformación cíclica de energía cinética en energía elástica tanto del fluido como de las paredes del conducto (Abreu et al., 1995).

Antes de la aparición del golpe de ariete, el sistema hidráulico se encuentra en un estado de equilibrio definido por condiciones iniciales estables. Tal como se observa en la Figura 1, el flujo se desplaza con una velocidad constante V_0 , mientras que la carga piezométrica permanece uniforme a lo largo de la conducción, representada por la altura H_0 . No existen variaciones abruptas ni oscilaciones en la presión, lo que permite asumir un régimen

Figura 1. Válvula en la descarga que alimenta un depósito

estacionario. En esta fase previa, las válvulas permanecen abiertas y el sistema está completamente lleno, garantizando un flujo continuo sin perturbaciones (Wylie & Streeter, 1982). Estas condiciones son fundamentales para definir el punto de partida del fenómeno transitorio, ya que cualquier alteración en este equilibrio (como la apertura o cierre súbito de una válvula) desencadenará una onda de presión que modificará la dinámica del sistema.



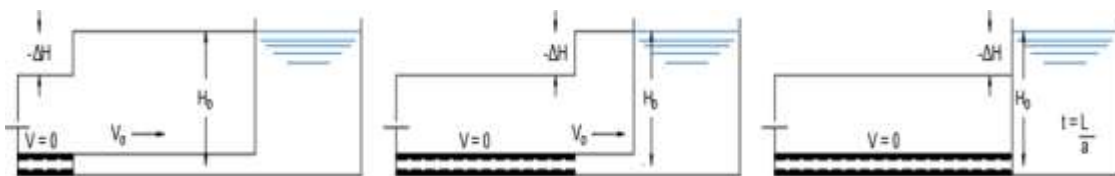
Su análisis físico puede simplificarse bajo ciertas suposiciones razonables:

- Se desprecia la fricción.
- No se considera la altura cinética ($V^2/2g$) del fluido.
- El fenómeno es cíclico, con un período aproximado de $4L/a$, donde L : longitud de la tubería y a : celeridad de onda.

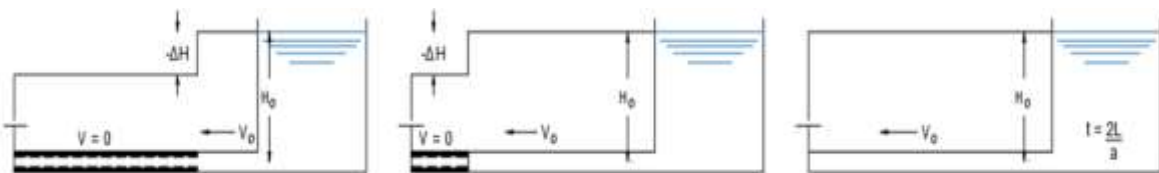
El ciclo completo del golpe de ariete puede describirse en cuatro fases:

1. **Fase de depresión:** tras el cierre de la válvula, una onda de baja presión viaja hacia el depósito. En un tiempo L/a , la tubería alcanza un estado de depresión total y el flujo se detiene.

Figura 2. Esquema de simulación de la fase de depresión tras el cierre de la válvula

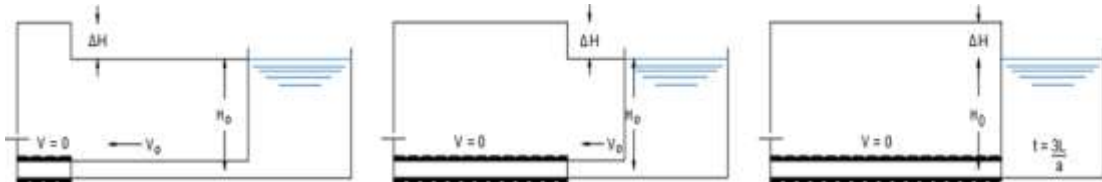


2. **Fase de retroceso:** la diferencia de presión provoca una inversión del flujo. Al cabo de $2L/a$, la presión vuelve a su valor inicial, pero con la velocidad invertida ($-V_0$).



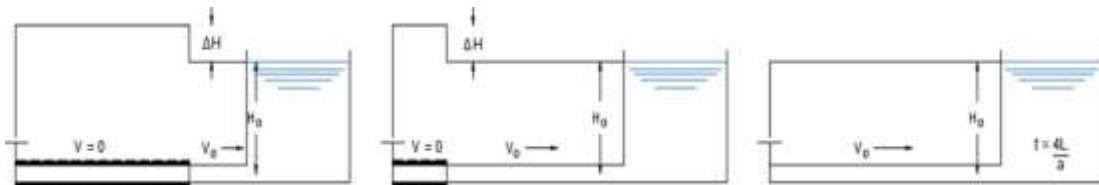
3. **Fase de sobrepresión:** el retroceso del fluido genera una onda de sobrepresión que viaja nuevamente hacia el depósito. A los $3L/a$, la presión máxima se iguala en magnitud a la depresión inicial.

Figura 4. Esquema de simulación de la fase de sobrepresión en el depósito



4. **Fase de recuperación:** el flujo se estabiliza gradualmente, la tubería recupera el equilibrio inicial cuando el fluido retoma su velocidad V_0 en la dirección original, con un período de $4L/a$. El ciclo puede repetirse hasta que la fricción amortigüe las oscilaciones.

Figura 5. Esquema de simulación de la fase de recuperación



2.3.3 Ecuación de la continuidad

La conservación de la masa en un flujo no permanente se representa mediante la ecuación de continuidad adaptada a condiciones transitorias, la cual incluye la influencia de la pendiente del sistema y la celeridad de la onda (Abreu et al., 1995).

$$\frac{g}{a^2} * \frac{dh}{dt} + \frac{dV}{dx} + \frac{g}{a^2} V \sin \theta = 0$$

donde:

g : gravedad (m/s^2)

a : celeridad de onda (m/s)

H : altura piezométrica (m)

t : tiempo (s)

V : velocidad del flujo (m/s)

x : posición a lo largo de la tubería (m)

θ : ángulo de inclinación (°)

Esta ecuación representa la relación entre las variaciones temporales del nivel piezométrico y los gradientes de velocidad, siendo esencial para evaluar la distribución espacial del flujo durante un evento transitorio.

2.3.4 Ecuación general de movimiento

La ecuación que representa la conservación de la cantidad de movimiento en sistemas hidráulicos describe cómo las variaciones de velocidad están influenciadas por la fricción, el gradiente de presión y la inclinación del sistema (Abreu et al., 1995).

$$\frac{dV}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} + g \frac{dH}{dx} = 0$$

donde:

V : velocidad del flujo (m/s)

t : tiempo (s)

f : coeficiente de fricción

D : diámetro de la tubería (m)

g : gravedad (m/s²)

H : altura piezométrica (m)

x : posición a lo largo de la tubería (m)

Esta formulación permite evaluar la dinámica del fluido bajo condiciones no permanentes, proporcionando la base para simular eventos complejos como golpes de ariete, oscilaciones de carga o fluctuaciones transitorias.

2.4 Chimenea de equilibrio: descripción de su funcionamiento

Son estructuras utilizadas en los sistemas de conducción a presión de aprovechamientos hidroeléctricos, su principal función; proteger mediante el intercambio entre energía cinética

y potencial. En operaciones de cierre rápido, la energía cinética del flujo se convierte en energía potencial al elevarse la columna de agua en la chimenea; en operaciones de apertura, el proceso se invierte. Esta transformación permite reducir los esfuerzos a los que se somete la infraestructura, prolongando su vida útil (Pacheco & Carrillo, 2024).

Generalmente, las chimeneas se proyectan excavadas en tierra o roca, situándose al final del túnel de carga y al inicio de la tubería de presión, a distancia mínima de la casa de máquinas. En pequeñas instalaciones pueden ser sustituidas por tanques elevados, dependiendo de las condiciones topográficas y operativas (Ferrovia, s.f.; Pacheco & Carrillo, 2024).

Funcionamiento y parámetros de diseño:

- Régimen permanente: Cuando el sistema opera bajo caudal constante, el nivel del agua en la chimenea se mantiene estable, ligeramente por debajo de la línea de carga estática, debido a las pérdidas hidráulicas normales del sistema (Pacheco & Carrillo, 2024).
- Condiciones transitorias: Se genera una onda de presión que se propaga por la tubería hacia la chimenea. Al mismo tiempo, desde el embalse sigue llegando el caudal que estaba previamente establecido. Esta confluencia provoca una elevación del nivel de agua en la chimenea por encima de la carga estática, generando un contrapendiente que ralentiza la afluencia de agua. Luego, se inicia un proceso oscilatorio que se amortigua gradualmente hasta alcanzar un nuevo equilibrio (Chaudhry, 2014; Pacheco & Carrillo, 2024).
- Validación del diseño: Las posiciones extremas que alcanza el nivel de agua en la chimenea durante estos transitorios proporcionan información clave para validar el diseño hidráulico (Pacheco & Carrillo, 2024).
- Casos críticos: En el escenario más desfavorable, en el que se produce una transición rápida desde el caudal máximo a cero, el comportamiento dinámico del sistema está determinado por la inercia de la masa de agua y la capacidad de la chimenea para amortiguar el golpe de ariete.

El estudio de este fenómeno se realiza mediante modelos numéricos unidimensionales que permiten simular oscilaciones piezométricas. Las chimeneas de equilibrio presentan diferentes configuraciones según sus características geométricas y funciones hidráulicas, clasificándose en diversos tipos, de los cuales dos resultan particularmente relevantes para el desarrollo de este estudio:

2.4.1 Chimenea de Equilibrio de Orificio

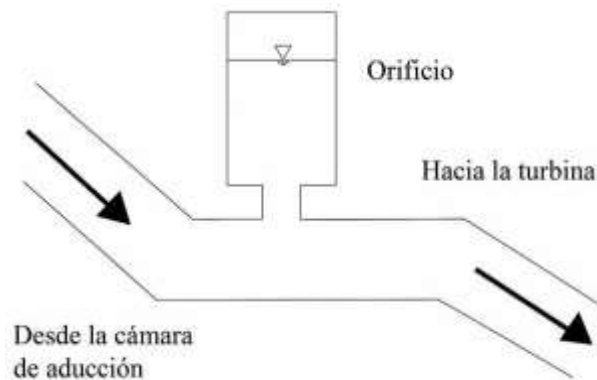
Constituye una variante del sistema tradicional, diseñada para ofrecer una mayor optimización mediante la introducción de una restricción localizada en la base de conexión entre la galería de presión y la chimenea. Esta restricción, que puede tomar la forma de una placa con abertura circular u otra configuración geométrica, limita el intercambio de flujo entre la tubería y la chimenea, permitiendo así un amortiguamiento más gradual de las oscilaciones piezométricas (Gomsrud, 2015; Pacheco, 2019).

Este tipo de chimenea ha sido ampliamente valorado por su simplicidad constructiva y su eficacia en ciertos escenarios de operación con transitorios de corta duración. Al introducir una pérdida de carga localizada, se logra controlar la velocidad con la que el agua entra o sale de la chimenea, lo que se traduce en una disminución en la amplitud de las oscilaciones de presión. No obstante, esto también implica que las aceleraciones y desaceleraciones del flujo en la galería principal serán más rápidas, y si el orificio es excesivamente reducido, puede transmitirse parcialmente el golpe de ariete hacia las conducciones, generando esfuerzos adicionales no deseados (Pacheco, E. 2019).

En cuanto al diseño hidráulico, es fundamental calibrar con precisión el coeficiente de descarga del orificio, debido a que este parámetro define la pérdida local y, por tanto, el comportamiento dinámico del sistema. El diseño debe buscar un equilibrio entre la reducción del volumen estructural de la chimenea y la protección eficaz de la galería de presión (Pacheco, E. 2019).

Desde un punto de vista analítico, la incorporación del orificio requiere la modificación de las ecuaciones que describen el sistema. En particular, se agrega un término adicional de pérdida localizada en la ecuación diferencial de movimiento, dependiente del caudal de entrada/salida de la chimenea. Este término debe modelarse de manera que su signo varíe con el sentido del flujo, reflejando el comportamiento real del sistema. La complejidad introducida por este término hace que no exista una solución analítica directa, por lo que se recurre a métodos numéricos para su resolución, como los de diferencias finitas o de características (Pacheco, E. 2019). La estrangulación de la comunicación entre chimenea y galería, según se muestra en la siguiente figura.

Figura 6. Esquema de chimenea con orificio.



Consideraciones básicas para el diseño de chimeneas de orificio

La chimenea con orificio permite reducir la sección transversal o altura total, lo que representa un ahorro importante en obras civiles. Sin embargo, una reducción excesiva del diámetro del orificio puede generar los siguientes fenómenos:

- Las aceleraciones en la galería pueden ser excesivas.
- Las sobrepresiones pueden transmitirse parcialmente al sistema aguas arriba.
- Las condiciones de regulación de la turbina se ven afectadas negativamente, debido al mayor consumo de energía al acelerar o desacelerar el fluido.

Por estas razones, el coeficiente de descarga del orificio debe ser rigurosamente calibrado para garantizar el comportamiento deseado. Sin embargo, la ausencia de una solución analítica directa para el sistema de ecuaciones que describe su funcionamiento hace necesario el uso de métodos numéricos iterativos para simular el sistema (Chaudhry, M. 2014; Pacheco, E, 2019).

La variación del nivel de agua en la chimenea se determina mediante la ecuación de continuidad (Pacheco, E. 2019):

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{A_s} (Q_t - Q_{tur})$$

donde:

Q_t : caudal de la galería de presión (m^3/s)

Q_{tur} : caudal de la tubería forzada (m^3/s)

z : desnivel de la chimenea respecto al embalse (m)

Esta ecuación se fundamenta en la conservación de masa, estableciendo que cualquier diferencia entre el caudal que entra al sistema (Q_i) y el que sale hacia la turbina (Q_{tur}) generará un cambio en el volumen de agua almacenado en la chimenea.

2.4.2 Chimenea de Equilibrio de Sección Compuesta

Su diseño responde a la necesidad de mejorar la estabilidad del sistema ante oscilaciones severas de presión. Esta configuración se distingue por combinar dos o más geometrías o diámetros a lo largo de su altura, integra las ventajas de varias geometrías estructurales en una sola solución. (Basha & Gharabaghi, 2006).

Puede incorporar cámaras laterales que actúan como reservorios adicionales. Este tipo de chimeneas es especialmente útil en sistemas donde los fenómenos transitorios pueden alcanzar una elevada magnitud, ya sea por condiciones topográficas exigentes, alta carga hidráulica, o por la longitud de la galería de presión. La geometría compuesta permite así un equilibrio entre rapidez de respuesta y capacidad de absorción de volumen, permite una respuesta más gradual frente a variaciones bruscas de carga.

Modelación de una chimenea de sección compuesta y criterios básicos de diseño

Para representar hidráulicamente este tipo de chimeneas, pueden emplearse dos enfoques:

1. Modelo por tramos: donde se definen ecuaciones y condiciones diferenciadas para cada sección, lo que permite un mayor control numérico sobre el comportamiento hidráulico en cada zona.
2. Modelo continuo, con cambio de pendiente: útil en representaciones numéricas simplificadas, permite simular la geometría compuesta a través de una curva volumen-carga con dos pendientes, representando los cambios de sección sin necesidad de definir discontinuidades explícitas.

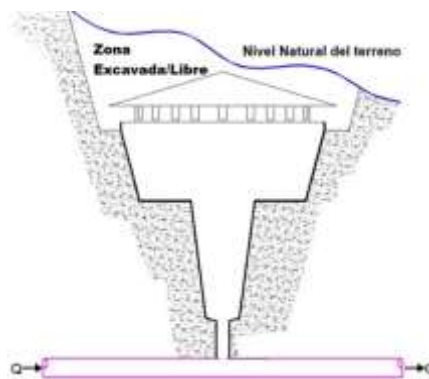
Además, en las etapas preliminares de diseño, se estima que el volumen total de la chimenea debe ser entre 2 y 4 veces el volumen de agua movilizado durante la oscilación máxima. Esta proporción permite asegurar que la estructura tenga capacidad suficiente para absorber los extremos de presión sin desbordamientos ni pérdidas de eficiencia hidráulica. No obstante, estos valores deben ser validados siempre mediante simulación dinámica (Basha & Gharabaghi, 2006).

Algunas de las formas de chimeneas compuestas son (CFE, 1981):

- La chimenea de equilibrio de sección compuesta: Se caracteriza por una ampliación de la sección transversal en su parte superior, próxima al nivel del terreno, donde se produce el contacto con la atmósfera.

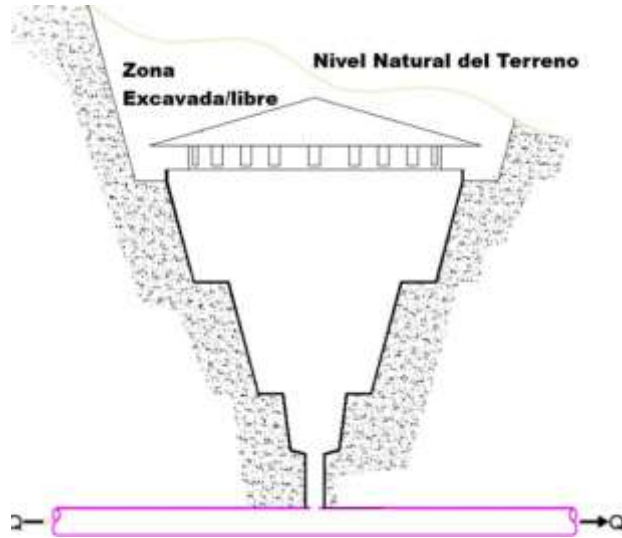
Esta configuración, permite mitigar los efectos de las oscilaciones extremas del flujo, especialmente en situaciones en que el nivel piezométrico supera la cota superior de la conducción (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.). Esta tipología constructiva se representa esquemáticamente en la Figura 7.

Figura 7. Esquema Chimenea Compuesta con aumento de la sección transversal superior (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.)



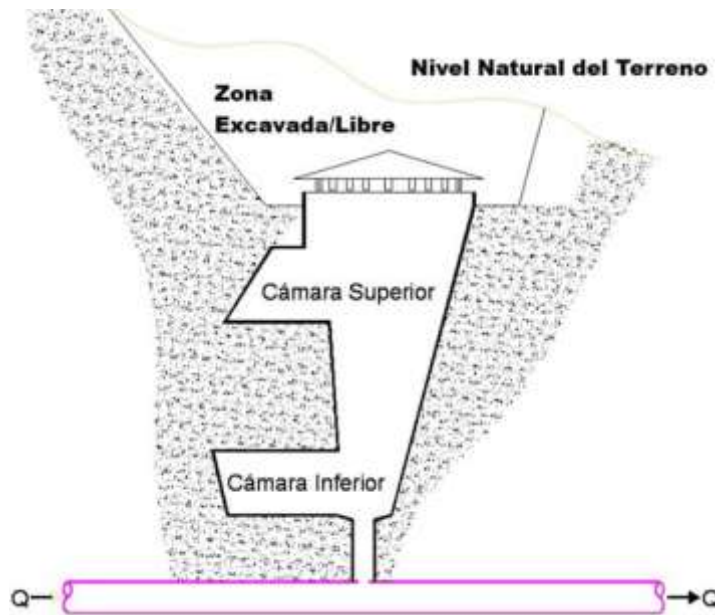
- Chimenea de equilibrio de sección compuesta con particiones verticales internas: Corresponde a una estructura tubular dispuesta verticalmente, en cuyo interior se incorporan divisiones longitudinales. Esta configuración permite un control más preciso de las condiciones hidráulicas transitorias, favoreciendo la disipación de energía y el amortiguamiento de las oscilaciones de presión (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.).
- Chimenea de equilibrio de sección compuesta con variación de diámetros: Se compone de varios tramos de tubería dispuestos verticalmente, cuyos diámetros incrementan progresivamente conforme se aproximan a la superficie (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.). Esta disposición facilita la disipación del exceso de energía hidráulica durante los eventos transitorios. Su esquema se representa en la Figura 8.

Figura 8. Esquema de una Chimenea Compuesta con aumento de la sección en diferentes zonas (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.)



- Chimenea de equilibrio compuesta con cámaras laterales en los tramos inferior e intermedio: Se trata de una tubería vertical equipada con cámaras ubicadas lateralmente en su parte inferior e intermedia. Las inferiores actúan como reservorios que evitan la succión cuando el nivel del agua desciende durante oscilaciones mínimas. Al tomarse carga, el nivel cae rápidamente hasta la cámara inferior, lo que acelera el flujo en el conducto. Luego, esta cámara se vacía lentamente, amortiguando el fenómeno transitorio (CFE, 1981). Su esquema se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Esquema de Chimenea Compuesta con cámaras laterales en las tramos inferior e intermedio (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.)



Las chimeneas de equilibrio compuestas se diseñan con el objetivo de adaptar la respuesta hidráulica del sistema a una amplia gama de caudales y presiones, especialmente ante condiciones transitorias severas. Este tipo de estructuras integra diversas formas geométricas dentro de un solo cuerpo, permitiendo optimizar tanto la estabilidad como la eficiencia del sistema en diferentes escenarios operativos (Martínez Alzamora et al., 1995).

Una de las configuraciones más comunes es la que combina una sección inferior angosta con una sección superior ensanchada. Esta disposición geométrica favorece una respuesta hidráulica más gradual frente a los cambios bruscos de caudal, y actúa como elemento estabilizador durante grandes oscilaciones de presión (CFE, 1981).

Desde el punto de vista constructivo y económico, el diseño de chimeneas compuestas resulta una solución viable siempre que las condiciones geológicas del terreno permitan realizar excavaciones con relativa facilidad. Cuando esto se cumple, los costos de ejecución pueden ser incluso menores que los asociados a otros tipos de chimeneas más complejas (Calderon Vasquez & Enriquez Paredes, s. f.).

2.5 Modelos matemáticos para estudio de oscilaciones

El análisis de los fenómenos transitorios hidráulicos ha sido objeto de múltiples investigaciones en el campo de la ingeniería, desarrollándose distintos enfoques teóricos que permiten representar de forma precisa la dinámica del flujo y las variaciones de presión en sistemas hidráulicos a presión.

Los modelos empleados para este propósito pueden clasificarse de acuerdo con la representación física y la temporalidad de los cambios que experimenta el sistema, en función de la velocidad con que ocurren los eventos y los efectos que deben considerarse en el análisis (Abreu et al., 1995).

En términos generales, se distinguen tres categorías principales de modelos: el modelo cuasi-estático (o no inercial), el modelo rígido (o inercial simplificado), y el modelo elástico (o inercial completo). Cada uno de ellos presenta diferentes niveles de aproximación y complejidad, adaptándose a distintos escenarios. A continuación, se describe los modelos aplicables al fenómeno de golpe de ariete y sus efectos.

2.5.1 Modelo rígido

El modelo rígido, aunque más completo que el modelo cuasi-estático, simplifica el análisis al ignorar los efectos de la elasticidad y la compresibilidad en sistemas hidráulicos. Además, plantea como suposiciones principales (Abreu et al., 1995):

- Flujo incompresible.
- Tubería indeformable.
- Cambios de presión y velocidad graduales.
- Pérdidas por fricción constantes.
- Las sobrepresiones/depresiones por cambios rápidos se omiten.
- El modelo contempla la ecuación de Euler y la ecuación de la continuidad (Abreu et al., 1995):

$$1g \frac{dV}{dt} + \frac{dH}{dx} + \frac{f}{D} \frac{V|V|}{2g} = 0 \quad y \quad A \frac{dH}{dt} = -VA$$

Como principales aplicaciones de este modelo se indica:

- Tiempo de vaciado de un depósito.
- Oscilaciones entre dos depósitos interconectados (oscilación entre chimenea de equilibrio y embalse, unidos mediante una galería de conducción).
- Tubería de impulsión de escasa pendiente protegida (mediante ventosas).
- Cierres de válvulas más o menos lentos.
- Tiempo de establecimiento de una corriente.

2.5.2 Modelo elástico

El modelo elástico proporciona una representación más precisa de los fenómenos transitorios en sistemas hidráulicos sometidos a variaciones muy rápidas de presión y flujo. Este modelo plantea como suposiciones principales (Abreu et al., 1995):

- Elasticidad del sistema, fluido y paredes son deformables.
- Compresibilidad del fluido, permite la propagación de ondas de presión con celeridad a finita.
- Alta intensidad y rápida variación.
- Pérdidas por fricción, pérdidas de energía en términos de velocidad y longitud.
- El modelo elástico se basa en dos ecuaciones principales: la ecuación de la continuidad y de movimiento (Abreu et al., 1995):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} + \frac{a^2}{g} \frac{dV}{dx} &= 0 \\ \left\{ \frac{dV}{dt} + g \frac{dH}{dx} + \frac{f|V||V|}{2D} \right\} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Como principales aplicaciones de este modelo se indica:

- Análisis de sobrepresiones y depresiones generadas por maniobras rápidas con golpe de ariete (Chaudhry, 2014).
- Diseño de sistemas de protección de chimeneas de equilibrio, válvulas de alivio y cámaras de aire (Abreu et al., 1995).
- Evaluación de la respuesta dinámica de redes ante fluctuaciones de demanda o fallas (Wylie & Streeter, 1982).
- Simulación numérica de flujos transitorios.

2.5.3 Solución de modelos, alcance de su aplicación y fronteras entre modelos

El análisis detallado de los fenómenos transitorios en sistemas hidráulicos requiere no solo la formulación de modelos adecuados, sino también la aplicación de métodos numéricos que permitan su resolución de manera eficiente y precisa. Estos métodos, al discretizar el tiempo y el espacio, simulan la propagación de ondas de presión y velocidad a lo largo del sistema de conducción, permitiendo evaluar el comportamiento hidráulico bajo condiciones no permanentes.

Entre los procedimientos numéricos más empleados se encuentran:

a. El método de las características

Ampliamente utilizado en la resolución de ecuaciones hiperbólicas, especialmente eficiente para modelar con precisión la propagación de ondas de presión y velocidad a través del tiempo y el espacio. Su capacidad para representar los frentes de onda y sus reflexiones lo convierte en una herramienta confiable en el estudio del golpe de ariete (Abreu et al., 1995).

b. El método de las diferencias finitas

Basado en la discretización de las derivadas parciales mediante mallas temporales y espaciales, permite obtener soluciones aproximadas de los modelos. No obstante, puede introducir errores de dispersión numérica, sobre todo en la representación de ondas abruptas (Chaudhry, 2014).

c. El método de los elementos finitos

Aunque poderoso en muchos campos de la ingeniería, presenta limitaciones en el contexto de los transitorios hidráulicos debido a la dificultad para representar de forma eficiente ondas de presión abruptas, lo que lo hace menos adecuado frente a los métodos anteriores (Abreu et al., 1995).

2.5.4 Criterios para la selección de modelos hidráulicos

La elección del modelo teórico más adecuado depende fundamentalmente de la naturaleza del fenómeno transitorio que se desea estudiar, de las condiciones de contorno del sistema, y de la escala temporal de la maniobra. Los modelos inerciales (como el modelo rígido y el modelo elástico) son recomendados para maniobras rápidas que inducen cambios significativos en un corto período de tiempo, tales como el cierre o la apertura repentina de válvulas.

Por otro lado, los modelos no inerciales (como el cuasi-estático) resultan apropiados cuando el sistema evoluciona lentamente y permanece cerca del equilibrio hidrodinámico (Abreu et al., 1995; Chaudhry, 2014).

Con el fin de delimitar el ámbito de validez de cada modelo, diversos autores han propuesto parámetros adimensionales que permiten identificar con claridad la transición entre enfoques. A continuación, se detallan los principales criterios empleados para distinguir entre modelos:

1. Escala temporal adimensional τ

Este parámetro compara el tiempo de maniobra de la válvula (TM) con el tiempo de inercia rígida (TW), que representa el tiempo necesario para que una columna de agua de longitud L alcance una velocidad inicial (V_0), bajo una altura motriz (H_0), despreciando la fricción y teniendo presente la gravedad (g).

$$\tau = \frac{TM}{TW} = \frac{TM}{\frac{LV_0}{gH_0}}$$

2. Parámetro elástico de Allievi ρ

Este valor cuantifica la influencia de los efectos elásticos en el sistema, relacionando la celeridad de onda (a), la velocidad inicial (V_0) y la altura motriz (H_0).

$$\rho = \frac{aV_0}{2gH_0}$$

3. Parámetro de fricción ϕ_0

Este parámetro considera la influencia de las pérdidas por fricción, relacionando el coeficiente de fricción (f) la longitud L , el diámetro de la tubería (D), y el coeficiente de la válvula abierta (K_0).

$$\phi_0 = \frac{f \frac{L}{D}}{K_0}$$

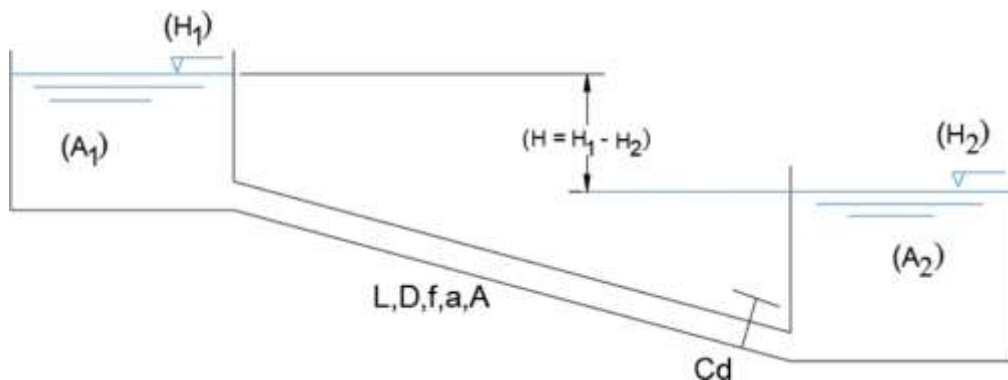
4. Relación elástica-temporal θ

Relaciona el tiempo de maniobra de la válvula (T_M) con el tiempo característico elástico, definido como $(2L/a)$, y se puede expresar también como el producto de ρ y τ .

$$\theta = \frac{T_M}{2L/a} = \rho\tau$$

El análisis de las gráficas de los Anexos A, B y C (Abreu et al., 1995) permite establecer la frontera entre los modelos elástico y rígido. En dichos gráficos se observa que el modelo elástico debe aplicarse especialmente cuando $\Delta H/H_0$ es constante y los valores de ρ y θ son bajos, lo que indica la presencia de maniobras rápidas y efectos compresibles significativos. A medida que estos parámetros aumentan, se aproxima el rango de validez del modelo rígido. Por otro lado, el Anexo D permite analizar cómo el parámetro de fricción ϕ_0 afecta la velocidad del flujo. Se evidencia que variaciones abruptas en este parámetro amplían el dominio de validez del modelo elástico, ya que intensifican la disipación de energía y los efectos dinámicos del sistema.

Figura 10. Transferencia de agua entre dos depósitos



En contraste, el modelo cuasi-estático es más apropiado cuando las evoluciones del sistema son lentas, y el análisis se enfoca en la diferencia de niveles entre depósitos. No obstante, si estas variaciones en la carga hidráulica (H) ocurren de manera rápida, se hace necesario

emplear el modelo rígido para evitar errores considerables en el análisis. Este criterio se resume mediante el parámetro Φ , el cual delimita la frontera entre ambos modelos:

$$\Phi = \frac{f}{2D} - \frac{H}{A \left[\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right]}$$

donde:

H : diferencia de niveles en $t = 0$ (m)

f : coeficiente de fricción D : diámetro de la tubería (m)

A : área de la sección transversal de la tubería (m²)

A_1, A_2 : área de la sección transversal de los depósitos (m²)

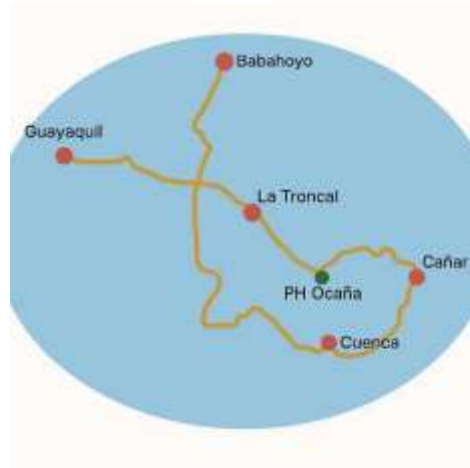
El análisis de los Anexos E y F (Abreu et al., 1995) revela que cuando $\Phi=1$, existe una gran discrepancia entre los resultados obtenidos con modelos distintos. Sin embargo, a medida que Φ aumenta, las diferencias disminuyen significativamente. Para valores de $\Phi \geq 20$, los resultados se consideran prácticamente equivalentes entre modelos. De esta manera, se establece que la frontera aceptable se encuentra en $\Phi=10$, valor a partir del cual el uso del modelo cuasi-estático es válido con buen grado de precisión.

A lo largo del tiempo, el estudio de los transitorios hidráulicos ha evolucionado desde enfoques empíricos y analíticos, basados en observaciones simplificadas, hasta modelos numéricos dinámicos más robustos. Estos avances han sido posibles gracias al desarrollo de la teoría y al crecimiento de las capacidades computacionales, lo que ha permitido representar con mayor precisión fenómenos como la propagación de ondas, las pérdidas localizadas y los efectos inerciales complejos (Chaudhry, 2014; Wylie & Streeter, 1982).

3. Caso de estudio y descripción del proyecto

Para ilustrar el procedimiento de diseño y evaluación propuesto, se ha seleccionado la chimenea de equilibrio del proyecto hidroeléctrico Ocaña I. Esta central se encuentra ubicada en las parroquias San Antonio de Paguancay y Ducur, en el cantón Cañar, dentro de la provincia del mismo nombre, en Ecuador. El proyecto forma parte de la estrategia nacional orientada a diversificar las fuentes de generación eléctrica, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles y promoviendo un desarrollo sustentable tanto ambiental como económico (ELECAUSTRO S.A., s.f.).

Figura 11. Ubicación Geográfica del proyecto (ELECAUSTRO S.A., s.f.)



El aprovechamiento del río Cañar, localizado en la vertiente occidental del Pacífico, ha constituido un elemento clave para la ejecución de esta obra, gracias a su significativo potencial hidráulico. El proyecto, operado por ELECAUSTRO S.A., inició operaciones comerciales en el año 2012 y se integró al Sistema Nacional Interconectado (SNI), destacándose por su eficiencia y diseño técnico.

Desde el punto de vista de infraestructura, el sistema se compone de los siguientes elementos clave:

- Captación: localizada en el río Cañar, aproximadamente a 150 m aguas abajo de su confluencia con el río Corazón y a unos 25 km al noreste del poblado de Cochancay. Se emplea un azud tipo Creager de 5 m de altura y 35.5 m de longitud, diseñado para derivar el caudal hacia un túnel de conducción.

Además, cuenta con una escalera para peces, compuertas de fondo, desarenadores y un pequeño reservorio de regulación horaria.

- Tanque de presión: funciona como un componente de regulación que conecta el reservorio con la conducción de baja presión, permitiendo el control del flujo hacia la casa de máquinas. Tiene una altura total de 12.70 m, una profundidad operativa de 10.70 m y una sección de 122 m² (11 m x 11 m).
- Conducción de baja presión: esta tubería transporta el agua desde el tanque de presión hacia el resto del sistema hidráulico. Aunque opera a menor presión, sigue siendo esencial para el desempeño del sistema. Su longitud es de 146.15 m con un diámetro constante de 1.9 m.

- Túnel de conducción: también denominado galería de presión, cuenta con una longitud de 6,385.78 m y fue construido para trasladar el caudal desde el punto de captación hasta la central. Es de sección baúl, diseñado para operar a baja presión, con una altura de 3.05 m, ancho de 2.7 m y un radio de arco de 1.35 m.
- Chimenea de equilibrio: estructura subterránea con orificio restringido, cuya función es atenuar las oscilaciones de presión provocadas por transitorios hidráulicos. Tiene un diámetro que varía entre 1.15 m y 3.8 m, y una altura total de 45.27 m.
- Tubería de presión: conduce el flujo hacia las turbinas, con una longitud de 1,083.95 m. Su diámetro se reduce progresivamente de 1.9 m a 1.6 m, aprovechando la caída neta de 373 m disponible.
- Casa de máquinas: equipada con dos turbinas Pelton, cada una diseñada para un caudal de 4.1 m³/s y una potencia de 13.05 MW, lo que suma un caudal total de diseño de 8.2 m³/s y una potencia instalada de 26.1 MW. Estas turbinas transforman la energía potencial del agua en energía mecánica.
- Línea de transmisión: la energía generada se envía hacia las subestaciones de Cañar (a 41 km) y La Troncal (a 21 km), utilizando una línea de transmisión de 69 kV para integrarse eficientemente al SNI.
- Producción energética: se estima que la central produce anualmente 176,811 MWh, capacidad suficiente para abastecer a un número significativo de hogares ecuatorianos (ELECAUSTRO S.A., s.f.).

3.1 Descripción de parámetros hidráulicos.

El modelo inercial rígido, por su parte, es ideal para representar oscilaciones entre embalses y chimeneas conectadas mediante galerías, especialmente cuando los transitorios son rápidos, pero no tan intensos como para requerir el tratamiento de elasticidad. En el presente estudio se ha optado por utilizarlo, una decisión respaldada tanto por la literatura técnica como por su comprobada eficacia en simulaciones de oscilaciones en sistemas con chimeneas (Alemany & Navarro, 1995; Martínez Alzamora et al., 1995; Pacheco & Carrillo, 2024). Este modelo permite capturar adecuadamente el intercambio dinámico de caudal entre el embalse y la chimenea, así como los efectos disipadores del orificio (cuando lo hay), sin requerir un tratamiento excesivamente complejo.

El comportamiento del sistema se modela mediante un par de ecuaciones diferenciales acopladas:

- La ecuación de movimiento, que relaciona el gradiente piezométrico, la fricción en la galería y la pérdida localizada en el orificio con la aceleración del flujo.
- La ecuación de continuidad, que describe cómo varía el nivel de agua en la chimenea en función del desequilibrio entre el caudal que entra y el que sale del sistema.

Estas ecuaciones serán adaptadas y usadas en el método (Pacheco, 2019). Esta herramienta es especialmente útil en la comparación entre chimeneas con orificio y chimeneas de sección compuesta, ya que permite analizar en detalle su comportamiento ante eventos críticos como el cierre rápido de válvulas (Abreu et al., 1995; Pacheco, 2019).

Según (Martínez Alzamora et al., 1995), se parte del planteamiento del modelo rígido:

- Paredes rígidas y fluido incompresible
- Despreciar la inercia del agua en la chimenea
- Pérdidas tratadas como en régimen permanente

Como punto de partida general, se consideran las ecuaciones planteadas por (Martínez Alzamora et al., 1995), las cuales han sido ampliamente utilizadas para describir el comportamiento oscilatorio de sistemas hidráulicos a presión con chimeneas de equilibrio. Aunque estas formulaciones no representan con detalle las particularidades de las configuraciones que se analizan en este estudio, ofrecen una base conceptual útil desde la cual se desarrollan posteriormente los modelos específicos para cada tipología.

La ecuación de Euler a lo largo de la galería de presión, se expresa como:

$$\frac{dQ_t}{dt} = \frac{gA_t}{L} (-z - cQ_t |Q_t|)$$

donde:

z : desnivel de la chimenea respecto al embalse (m)

A_t : área de la sección transversal de la galería a presión (m²)

Q_t : caudal de la galería de presión (m³ /s)

t : tiempo (s)

g : gravedad (m/s²)

c : coeficiente de pérdidas por fricción, en la entrada, por la velocidad

L : longitud de la galería a presión (m)

Que se complementa, con la ecuación de continuidad, aplicada en la intersección entre la galería y la chimenea:

$$Q_t = Q_s + Q_{turb} \quad \rightarrow \quad \frac{dz}{dt} = \frac{1}{A_s} (Q_t - Q_{turb})$$

donde:

Q_t : caudal de la galería de presión (m^3/s)

Q_s : caudal de la chimenea de equilibrio (m^3/s)

Q_{turb} : caudal de la tubería forzada (m^3/s)

z : desnivel de la chimenea respecto al embalse (m)

A_s : área de la sección transversal de la chimenea (m^2)

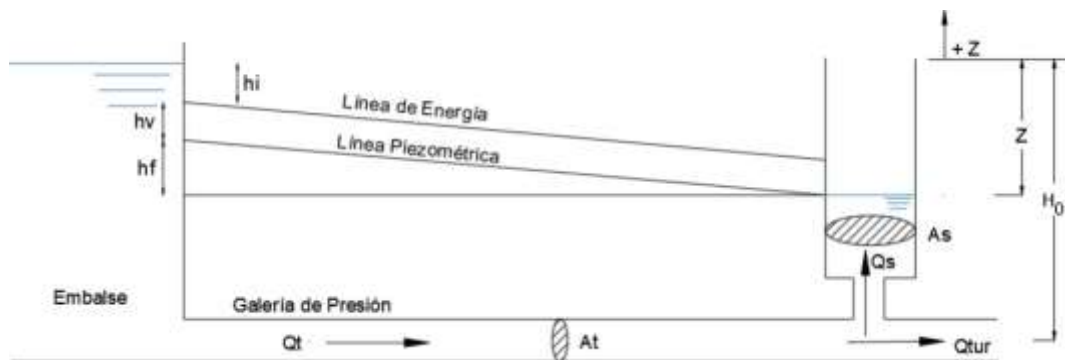
t : tiempo (s)

Si bien este conjunto de ecuaciones resulta útil para comprender el comportamiento general del sistema, en las siguientes secciones se presentarán los modelos específicos que responden a las particularidades de las chimeneas con orificio y de sección compuesta, las cuales requieren un tratamiento más detallado y adaptado a su configuración geométrica y funcional (Martínez Alzamora et al., 1995).

3.1.1 Chimenea de orificio como modelo de análisis

El modelo considera una resistencia hidráulica en la base que introduce una pérdida localizada proporcional al cuadrado del caudal que atraviesa el orificio. Este término actúa como un elemento disipador, lo cual es clave para el amortiguamiento de las oscilaciones. En la práctica, esto significa que cuando el flujo entra en la chimenea, el nivel del agua asciende; y cuando sale, desciende, siendo este comportamiento regulado por el diámetro y coeficiente de pérdida del orificio (Martínez Alzamora et al., 1995). Además, las condiciones de regulación de la turbina no son tan buenas como con una chimenea simple debido al mayor consumo de energía en acelerar y decelerar el fluido. Para comprobar estas afirmaciones, es necesario establecer primeramente establecer las ecuaciones de comportamiento para este tipo de chimenea.

Figura 12. Nomenclatura para Chimeneas de Orificio



Refiriéndonos, la ecuación de la dinámica o de movimiento se escribirá ahora como:

$$\frac{dQ_t}{dt} = \frac{gA_t}{L} \left(-z - c \frac{Q_t}{t} |Q_t| - c_{orf} \frac{Q_s}{s} |Q_s| \right)$$

donde:

z : desnivel de la chimenea respecto al embalse (m)

L : longitud de la galería de presión (m)

A_t : área de la sección transversal de la galería a presión (m^2)

Q_t : caudal de la galería de presión (m^3/s)

Q_s : caudal de la chimenea de equilibrio (m^3/s)

t : tiempo (s)

g : gravedad (m/s^2)

c : coeficiente de pérdidas por fricción, en la entrada, por la velocidad

c_{orf} : coeficiente de pérdidas en el orificio (Martínez Alzamora et al., 1995)

Esta ecuación describe cómo varía el caudal principal en función del tiempo, tomando en cuenta las pérdidas por fricción y la transferencia de energía debida a las diferencias de nivel entre la chimenea y el embalse. Esta ecuación es clave para modelar el comportamiento dinámico de la columna de agua durante eventos de transitorio:

Donde la notación empleada es similar a la introducida en el caso anterior. Tan solo se ha añadido un nuevo término que modeliza las pérdidas en el orificio como producto del coeficiente C_{orf} por el caudal de la chimenea Q_s y su valor absoluto, de modo que el signo de estas pérdidas resulte también afectado por el sentido del caudal, como debe suceder.

Este término es dependiente de la dirección del caudal (positiva o negativa), por lo que actúa simétricamente durante fases de entrada o salida de agua en la chimenea (Pacheco, 2019).

3.1.2 Chimenea de sección compuesta como modelo de análisis

La correcta selección e implementación del modelo matemático resulta fundamental para el éxito de cualquier análisis hidráulico transitorio. La aplicación rigurosa del modelo inercial rígido en esta investigación proporciona una base sólida para evaluar comparativamente el comportamiento de distintos tipos de chimeneas, aportando criterios técnicos valiosos para la toma de decisiones en proyectos de conducción a presión, especialmente en entornos complejos como los sistemas de montaña en América Latina.

A diferencia del modelo con orificio, donde la disipación de energía se concentra en un punto mediante una restricción localizada, la chimenea de sección compuesta distribuye gradualmente la disipación a lo largo de su altura, gracias a una transición en el área transversal del conducto. Este cambio geométrico tiene un impacto significativo en el comportamiento dinámico del sistema, ya que modifica la relación entre volumen almacenado y nivel piezométrico, haciendo que el sistema responda de forma más suave ante perturbaciones transitorias (Bardini, 2018; Pacheco & Carrillo, 2024)

El ensanchamiento progresivo, que comienza a partir de una cota predefinida, actúa como una cámara de expansión diseñada para absorber fluctuaciones hidráulicas críticas. Al incrementarse el nivel del agua dentro de la chimenea, también lo hace el área efectiva disponible, lo que reduce los aumentos de presión requeridos para almacenar un determinado volumen adicional. Esta característica es especialmente útil en sistemas con oscilaciones significativas, ya que permite atenuar los picos de sobrepresión y al mismo tiempo prolongar los tiempos de estabilización (Martínez Alzamora et al., 1995).

La incorporación de esta variación geométrica exige un tratamiento específico dentro del modelo numérico iterativo, pues la relación entre nivel y volumen deja de ser lineal, esta adaptación se traduce en la modificación del área efectiva de la chimenea en cada paso del tiempo, en función de la altura alcanzada y aunque este ajuste puede complejizar el proceso iterativo, los beneficios en términos de estabilidad y amortiguamiento justifican su aplicación. Una forma práctica de estimar la capacidad de almacenamiento adicional es mediante la derivada del volumen respecto a la altura:

$$\frac{dV}{dh} = A(h)$$

Esta expresión permite obtener el área en función de la altura sin necesidad de una fórmula explícita de radio, se ajusta automáticamente la continuidad en cada iteración, asegurando coherencia en el modelo, y en la simulación del comportamiento dinámico (Bardini, 2018; Basha & Gharabaghi, 2006).

3.2 Adaptación del procedimiento numérico-iterativo.

En este análisis se aplicó un procedimiento iterativo basado en el modelo inercial rígido, dada su eficacia técnica y operativa para representar las oscilaciones en el nivel de agua dentro de una chimenea de equilibrio. El procedimiento adoptado corresponde al método numérico simplificado propuesto por (Pacheco, 2019), que permite abordar de forma sistemática las ecuaciones de continuidad y de movimiento involucradas en el comportamiento hidráulico del sistema. Dicho enfoque considera que las variaciones del nivel en la chimenea dependen del tiempo y están fuertemente influenciadas por variables interrelacionadas como el caudal, la velocidad del flujo y las pérdidas de energía generadas por fricción. Una de las claves del procedimiento es la elección del intervalo de tiempo Δt , el cual permite representar con mayor precisión la evolución de las oscilaciones a lo largo del tiempo; no obstante, se ha observado que, en función del nivel de detalle requerido, el desarrollo del procedimiento puede volverse considerablemente más complejo. el cual permite captar con mayor fidelidad las fluctuaciones del sistema. No obstante, cuanto menor sea el intervalo seleccionado, mayor será el esfuerzo computacional necesario para ejecutar la simulación (Pacheco, 2019).

En dicho procedimiento, se ha conceptualizado que los niveles en la chimenea de equilibrio varían con el tiempo y está influenciadas por variables interdependientes de caudal, velocidad del flujo y pérdidas de energía. Para el procedimiento, se ha identificado como parámetro influyente los intervalos de tiempo Δt a seleccionarse. Este aspecto facilita capturar la evolución de las oscilaciones con precisión y realismo, sin embargo, se ha identificado que según su resolución, el procedimiento será más laborioso (Pacheco, 2019).

El método numérico-iterativo simplificado utilizado en este estudio presenta como una de sus principales ventajas la adaptabilidad a diferentes condiciones tanto iniciales como de contorno. Esta flexibilidad permite incorporar variables como los niveles iniciales de agua en la chimenea, los caudales de operación de arranque, los caudales objetivo del sistema, así como las pérdidas de carga específicas de la infraestructura bajo análisis. Durante cada ciclo de cálculo, el procedimiento actualiza de manera continua las pérdidas por fricción, además de las pérdidas locales asociadas con los puntos de entrada y salida de la galería, lo que contribuye a mejorar la precisión con la que se modelan los efectos de amortiguación y estabilidad del sistema (Pacheco, 2019).

Gracias a esta herramienta numérica, es posible simular condiciones operativas desfavorables, como cierres o aperturas súbitas de válvulas, escenarios considerados críticos dentro del diseño de obras hidráulicas. Esta capacidad de simulación permite identificar los niveles máximos y mínimos que puede alcanzar el agua en la chimenea, asegurando que

dichos valores permanezcan dentro de márgenes seguros para la operación. Las hipótesis en las que se basa este enfoque resultan clave tanto para simplificar el proceso de cálculo como para asegurar que el algoritmo numérico converja de manera adecuada. Según lo descrito por (Pacheco, 2019), el planteamiento parte de los siguientes supuestos:

- El flujo que se desarrolla en la chimenea es oscilatorio, y está gobernado por la inercia del agua junto con las pérdidas de energía generadas en la galería.
- Se incorporan las pérdidas por fricción a lo largo de la conducción y las pérdidas puntuales que ocurren en la entrada de la galería.
- Las simulaciones se ejecutan en intervalos de tiempo cortos, con el fin de capturar la dinámica del sistema con alta resolución temporal.

Este procedimiento se sustenta en la formulación de ecuaciones diferenciales expresadas mediante diferencias finitas, lo que permite aproximar soluciones a problemas hidráulicos complejos. En este marco, el modelo propuesto plantea la siguiente expresión para calcular la variación de velocidad del flujo en cada intervalo (Pacheco, 2019):

$$\Delta v = \frac{g}{L} \Delta t (Z - h)$$

donde:

Δv : variación de la velocidad (m/s)

g : gravedad (m/s²)

L : longitud de la galería de presión (m)

Δt : intervalo de tiempo (s)

Z : desnivel entre el embalse y la chimenea de equilibrio (m)

h : pérdida de carga en la galería (m)

Para la variación de masa de la chimenea, en el método se ha planteado además:

$$\Delta Z = \frac{(Q - vF)\Delta t}{F_s}$$

donde:

ΔZ : variación del nivel (m)

Q : caudal (m³ /s)

v : velocidad de la galería (m/s)

F : área de la galería (m²)

F_s : área de la chimenea (m²)

Para las pérdidas por fricción y en la entrada de la galería, el procedimiento ha contemplado (Pacheco, 2019):

$$h = h_f + h_e = \left(\frac{vn}{R^{2/3}}\right)^2 L + \frac{v^2}{2g\mu^2}$$

donde:

h : pérdida de carga en la galería (m)

h_f : pérdida por fricción (m)

h_e : pérdidas en la entrada de la galería (m)

v : velocidad en la tubería (m/s) R : radio hidráulico de la tubería (m)

n : número de Manning

L : longitud de la tubería (m)

g : gravedad (m/s²)

μ : coeficiente de derrame

En cuanto al coeficiente de derrame, se recomienda adoptar un valor de $\mu = 0.80$ cuando la entrada presenta una geometría redondeada tipo embudo y cuenta con una rejilla compuesta por barrotes espaciados, ya que esta configuración facilita un flujo más eficiente (Pacheco & Carrillo, 2024).

Por otra parte, al analizar los niveles extremos que puede alcanzar el sistema en el caso de estudio, se identifican dos escenarios clave. En situaciones de cierre abrupto de una válvula, donde el caudal pasa de su valor máximo al nulo ($Q_0 = Q_{\max} \rightarrow Q = 0$), el procedimiento propuesto considera una condición de rugosidad mínima. Esta elección se debe a que la menor resistencia favorece una estimación más conservadora del nivel máximo en la chimenea. En contraste, para el caso de una apertura repentina de válvula, en el cual el caudal pasa de cero a su valor máximo ($Q_0 = 0 \rightarrow Q = Q_{\max}$), se adopta una rugosidad elevada, buscando representar de forma más precisa la mayor resistencia que el sistema puede ofrecer al incremento repentino del flujo (Pacheco, 2019).

El procedimiento numérico-iterativo implementado en el presente análisis ha sido estructurado en una secuencia de pasos que permiten simular el comportamiento hidráulico de la chimenea de equilibrio con base en el modelo inercial rígido. Esta metodología, adoptada por su eficacia y precisión, sigue las siguientes etapas:

1. En primer lugar, se definió un intervalo de tiempo de 5 segundos para el análisis, seleccionado por su capacidad de captar con precisión la evolución de las variables del sistema sin comprometer la estabilidad numérica del procedimiento. Esta elección responde a un criterio de balance entre detalle temporal y eficiencia computacional, en concordancia con lo recomendado por (Pacheco, 2019) para este tipo de estudios.
2. Posteriormente, se impone una velocidad estimada inicial para el primer instante temporal ($t_1 = \Delta t$), lo que permite iniciar el proceso iterativo.
3. Con esa velocidad propuesta, se calcula la variación del nivel piezométrico en la chimenea (ΔZ_1) y se actualiza su valor para el siguiente instante, dependiendo si se analiza una condición de cierre o apertura brusca del sistema.
4. Se procede a recalcular las pérdidas de carga en la galería, incluyendo las asociadas a la entrada, ajustando el valor de la resistencia hidráulica.
5. Luego, se determina la nueva variación de velocidad del flujo y se actualiza el valor correspondiente, nuevamente dependiendo del tipo de evento transitorio modelado.
6. Este procedimiento se repite iterativamente hasta que la velocidad impuesta inicialmente coincida con la velocidad calculada, es decir, hasta que la diferencia entre ambas sea nula ($v^*_1 - v_1 = 0$), asegurando así la convergencia del método.
7. Finalmente, una vez alcanzada la coincidencia, se evalúa la diferencia entre la línea de energía hidráulica de la galería y el nuevo nivel alcanzado en la chimenea, lo cual permite verificar la estabilidad del sistema en cada instante.

3.2.1 Adaptación del proceso para chimenea de orificio

Para modelar el comportamiento de una chimenea de equilibrio que incorpora un orificio en su base, se adaptó el procedimiento iterativo considerando la resistencia hidráulica introducida por dicho elemento.

Esta resistencia se expresa mediante un coeficiente de pérdida C_{orfi} , el cual se vincula con el coeficiente de descarga C_d y las dimensiones del orificio. La formulación parte de la ecuación clásica para orificios con descarga sumergida:

$$Q_s = \pm C_d * A_{orif} * \sqrt{2 * g * (\Delta H)}$$

donde:

Q_s : Caudal que pasa por la chimenea. (m³/s)

C_d : Coeficiente de descarga del orificio (0.7-0.9)

A_{orif} : Área del orificio restringido (m²)

ΔH : Pérdida de carga debido al orificio.

Asumiendo que la pérdida de energía se relaciona directamente con la elevación del nivel del agua sobre el orificio, se establece la siguiente expresión:

$$\Delta H = C_{orif} * Q_s^2$$

demás, se plantea, de esta relación, puede deducirse el coeficiente de pérdida:

$$\frac{\Delta H}{Q_s^2} = C_{orif}$$

De la ecuación general de orificios, de los parámetros físicos del sistema:

$$Q_s = \pm C_d * A_{orif} * \sqrt{2 * g * (\Delta H)}$$

$$\frac{Q_s}{C_d * A_{orif}} = \sqrt{2 * g * (\Delta H)}$$

$$\frac{1}{C_d * A_{orif}} = \frac{\sqrt{2 * g * (\Delta H)}}{\sqrt{Q_s^2}}$$

$$\frac{1}{C_d * A_{orif}} = \sqrt{2 * g * C_{orif}}$$

$$C_{orif} = \frac{1}{2 * g} * \left(\frac{1}{C_d * A_{orif}} \right)^2$$

Este enfoque permite determinar C_{orif} como una función dependiente de la geometría del orificio y del coeficiente de descarga. En el marco del procedimiento numérico, este valor es recalculado en cada iteración, de modo que pueda reflejar de forma precisa las variaciones del caudal que entra o sale de la chimenea.

Así, se logra estimar dinámicamente la evolución del nivel piezométrico en la chimenea durante eventos transitorios como un cierre brusco de válvulas, hasta alcanzar una condición de equilibrio.

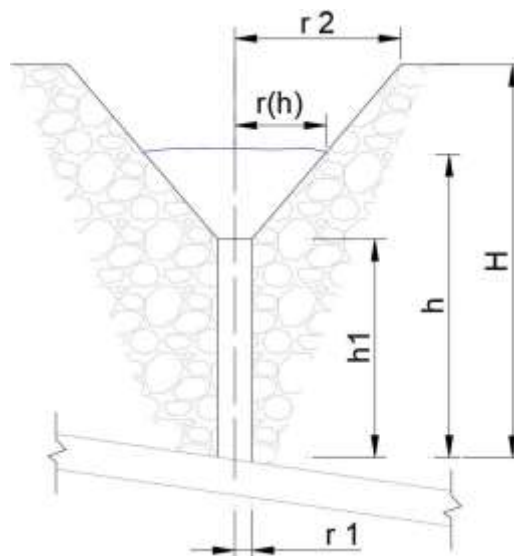
3.2.2 A Adaptación del proceso para chimenea de sección compuesta

Por otra parte, para representar una chimenea de sección compuesta, es necesario incorporar en el modelo una variación del área transversal de la estructura.

Este cambio geométrico afecta directamente la ecuación de continuidad, ya que modifica la relación entre el volumen almacenado y la altura piezométrica. En estos casos, se utilizan funciones escalonadas o continuas que simulan el ensanchamiento de la chimenea, permitiendo evaluar la variación del nivel piezométrico ante distintos escenarios de caudal y operación hidráulica (Bardini, 2018).

La siguiente expresión permite calcular el área transversal en cada instante y, por lo tanto, actualizar el volumen acumulado ante cada variación de caudal. Para su implementación computacional, se ha dividido la estructura en tramos discretizados, dentro de los cuales se aplica la ecuación de continuidad ajustada a la sección correspondiente. Esto permite integrar de manera secuencial las variaciones de nivel, considerando el volumen incremental aportado por cada franja de altura.(Basha & Gharabaghi, 2006).

Figura 13. Parámetros geométricos para ajuste de radio, sección compuesta



$$r(h) = r_1 + \left(\frac{r_2 - r_1}{H - h_1}\right) * (h - h_1)$$

donde:

$r(h)$: Radio de la chimenea a una altura conocida $h(m)$

r_1 : Radio inferior, del cilindro hasta la base del cono (m)

r_2 : Radio superior, en la parte más alta del cono.

h_1 : Altura hasta la base del cono, es decir, hasta donde llega el cilindro inferior (m)

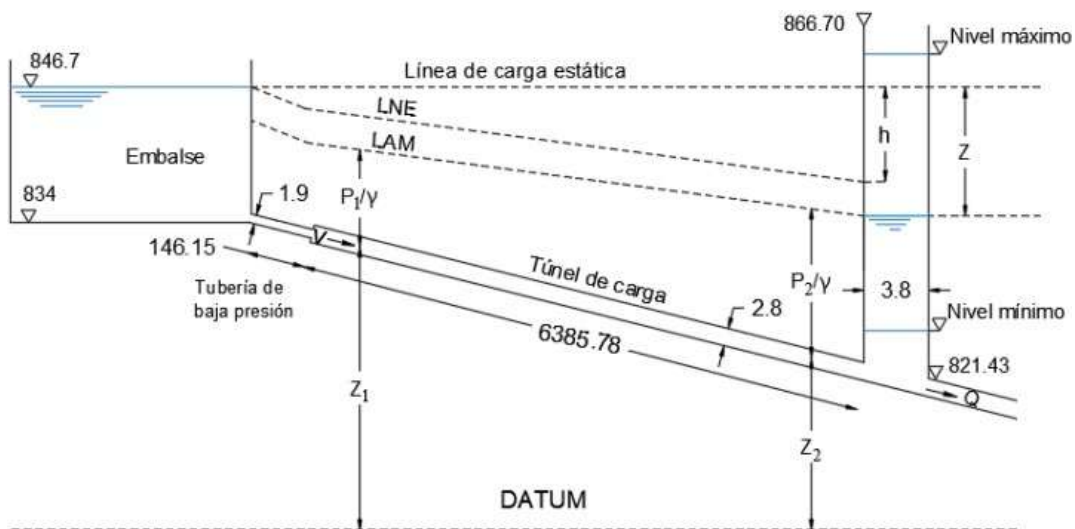
H : Altura total de la chimenea, cilindro + cono (m)

h : Altura específica dentro del tramo del cono, es decir, $h > h_1$ (m)

3.3 Escenarios de simulación y aplicabilidad.

A continuación, se expone un esquema representativo del caso de estudio, el cual servirá como base para la aplicación del método numérico en el análisis de una chimenea de equilibrio simple. Esta representación se utiliza como referencia inicial para facilitar la comprensión del procedimiento, y será aplicada también en la comparación con otras configuraciones de chimeneas, específicamente una con orificio en su base y otra con sección compuesta. De esta forma, se evaluarán las diferencias en el comportamiento hidráulico de cada tipo de estructura bajo condiciones transitorias similares.

Figura 14. Gráfico técnico explicativo para el proyecto Ocaña 1 (ELECAUSTRO S.A., s.f.)



Para analizar el comportamiento del caudal distribuido en el sistema, se recurrió a los registros horarios proporcionados por la empresa (ELECAUSTRO S.A., s.f.), los cuales abarcan desde las 05:00 del 1 de enero de 2023 hasta las 15:00 del 23 de diciembre de 2024. Con el fin de evaluar el escenario más crítico posible, se identificó el valor máximo de caudal

registrado dentro de ese periodo. Posteriormente, se calculó el promedio de dichos valores máximos, el cual se utilizó como caudal de referencia para el presente análisis:

$$Q_{\max prom} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{\max i} = 5.307 \text{ m}^3/\text{s}$$

En función de este valor, se consideraron dos situaciones transitorias opuestas para el análisis: por un lado, el cierre abrupto de una válvula (donde el caudal pasa de su valor máximo a cero: $(Q_{\max} \rightarrow Q = 0)$ y por otro, la apertura rápida de una válvula a $(Q_0 = 0 \rightarrow Q = Q_{\max})$. Estas condiciones permitieron determinar tanto las fluctuaciones en el nivel piezométrico como los valores máximos y mínimos alcanzados por el agua en la chimenea de equilibrio. (Pacheco, 2019)

Para cada escenario, se aplica un intervalo de tiempo usado $\Delta t = 5$ con fines comparativos, permitiendo observar cómo varía la respuesta dinámica del sistema en función del tamaño del paso temporal. Además, se consideró un conjunto de datos complementarios relevantes para el análisis, los cuales se detallan a continuación.

Tabla 3. Datos iniciales de trabajo para el caso de estudio

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal máximo registrado	Qmax	5.307	m ³ /s
Cota del embalse lleno	—	846.7	msnm
Cota del fondo de la chimenea	—	821.43	msnm
Diámetro de la chimenea de equilibrio	Dc	3.8	m
Diámetro de la tubería de baja presión	Dtb	1.9	m
Longitud de la tubería de baja presión	Ltb	146.15	m
Longitud total de la galería de presión	L	6385.8	m
Altura de la galería de presión	H	3.05	m
Ancho de la galería de presión	B	2.7	m
Radio del arco inferior de la galería	R	1.35	m

Se ha determinado los distintos valores de las áreas y perímetros de las distintas secciones de las chimeneas hidráulicas con los datos base y en las cuales son de forma genérica para el estudio comparativo, por lo tanto, tenemos:

Área de la galería:

$$F = B \times (H - R) + \pi \frac{R^2}{2} = 2.7 \times (3.05 - 1.35) + \pi \frac{1.35^2}{2} = 7.453 \text{ m}^2$$

Área de la tubería de baja presión:

$$F_{tb} = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{1.9^2}{4} = 2.835 \text{ m}^2$$

Perímetro mojado de la galería:

$$Pm_g = B + 2 \times (H - R) + \pi \times R = 2.7 + 2 \times (3.05 - 1.35) + \pi \times 1.35 = 10.341 \text{ m}$$

Perímetro mojado de la tubería de baja presión:

$$Pm_{tb} = \pi \sqrt{\frac{F_{tb} \times 4}{\pi}} = \pi \sqrt{\frac{2.835 \times 4}{\pi}} = 5.969 \text{ m}$$

3.3.1 Estudio para cierre brusco de una válvula ($Q_{max} \rightarrow Q = 0$)

Se ha calculado las condiciones iniciales, velocidad de la galería, velocidad de la tubería de baja presión y las pérdidas, por fricción y en la entrada de la galería, v_o y h_o , y la cota de equilibrio en el instante cero para Q_{max} adoptándose $\mu = 0.8$ y $n = 0.011$ para analizar el caso más desfavorable.

Velocidad de la galería:

$$v = \frac{Q_{max}}{F} = \frac{5.307}{7.453} = 0.712 \text{ m/s}$$

Velocidad de la tubería de baja presión:

$$v_{tb} = \frac{Q_{max}}{F_{tb}} = \frac{5.307}{2.835} = 1.872 \text{ m/s}$$

Pérdidas por fricción de la tubería de baja presión:

$$h_{ftb} = \left(\frac{v_{tb}}{2} \frac{n}{Pm_{tb}} \right)^2 \times L_{tb} = \left(\frac{1.872 \times 0.011}{2 \times 5.969} \right)^2 \times 146.15$$

Pérdidas por fricción de la galería:

$$h_{fg} = \left(\frac{v}{2} \frac{n}{Pm_g} \right)^2 \times L = \left(\frac{0.712 \times 0.011}{2 \times 5.969} \right)^2 \times 6385.78$$

Pérdidas en la entrada:

$$h_e = \frac{v_{tb}^2}{2g\mu^2} = \frac{1.872^2}{2 \times 9.8 \times 10.8^2}$$

Por lo tanto, Pérdidas totales:

$$h_o = h_{ftb} + h_{fg} + h_e = 0.998 \text{ m}$$

Con $\Delta t = 5 \text{ s}$ se impone un v^* con el cual se calcula $v^*F\Delta t$ y $Q\Delta t$, para calcular ΔZFs con la ecuación (Pacheco, 2019):

$$\Delta ZFs = Q\Delta t - vF\Delta t$$

Luego se ha calculado ΔZ , el cual se debe tener en cuenta el signo con el cual trabajar:

$$\Delta Z = \frac{\Delta ZFs}{Fs} = \frac{Q\Delta t - vF\Delta t}{Fs}$$

Se ha calculado: $Z_1 = Z_0 - \Delta Z_1$

Siguiendo el procedimiento previamente establecido, se estimó la velocidad en la tubería de baja presión aplicando el principio de conservación de la masa. Esta ley fundamental de la hidráulica permite relacionar las variaciones de caudal con la velocidad del flujo a lo largo del tiempo, siendo una herramienta esencial para el análisis dinámico del sistema (Chaudhry, 2014), por lo tanto, velocidad correspondiente al tiempo con:

$$v_{tb} = \frac{Fv_1}{F_{tb}}$$

Se ha calculado las pérdidas de carga:

$$h_1 = h_{ftb} + h_{fg} + h_e$$

Se ha calculado Δv , el cual se debe verificar antes de trabajar el signo (Pacheco, 2019):

$$\Delta v = \frac{g}{L} \Delta t (Z_1 - h_1)$$

Se ha obtenido:

$$v_1 = v_0 + \Delta v_1$$

Se llevaron a cabo las iteraciones necesarias hasta lograr que la diferencia entre la velocidad impuesta y la calculada fuera prácticamente nula, es decir, $v^*1 - v_1 = 0$. Una vez alcanzada

esta condición, se determinó la diferencia entre la línea de energía de la galería y el nuevo nivel piezométrico en la chimenea, representada por $Z_1 - h_1$.

El procedimiento se repitió de forma progresiva para cada instante $t_{i+1} = t_i + \Delta t$, hasta que la velocidad en la galería alcanzó un valor nulo, lo que equivale a un caudal de análisis $Q = 0$. Este punto marca el nivel máximo alcanzado por el agua dentro de la chimenea de equilibrio durante un cierre brusco del sistema. (Pacheco, 2019)

Posteriormente, se aplicó nuevamente el método para simular el descenso del nivel piezométrico, invirtiendo únicamente los signos de las variaciones ΔZ , Δv teniendo:

$$Z_1 = Z_0 + \Delta Z_1 \qquad v_1 = v_0 - \Delta v_1$$

El procedimiento fue replicado aplicando nuevamente las ecuaciones correspondientes al ascenso del nivel piezométrico dentro de la chimenea de equilibrio, extendiéndose hasta el punto en que la velocidad en la galería se redujo completamente, es decir, cuando el caudal de análisis alcanzó $Q = 0$. (Pacheco, 2019)

De forma análoga, se repitieron los cálculos para el descenso del nivel de agua, considerando que la velocidad de la galería debía aproximarse a la del último pico bajo, sin superarlo ni igualarlo exactamente, reflejando así una disminución progresiva del flujo.

Este proceso fue desarrollado de manera recursiva, evaluando los cambios en cada intervalo de 5 segundos, conforme la velocidad tendía a cero y el sistema se estabilizaba en un nuevo nivel de equilibrio. Esta doble evaluación permitió captar tanto los picos máximos como mínimos del comportamiento hidráulico en condiciones transitorias, siguiendo el enfoque propuesto por (Pacheco, 2019).

3.3.2 Estudio para abertura brusca de una válvula ($Q_0 = 0 \rightarrow Q = Q_{max}$):

Adoptando $n = 0.015$ y con las condiciones iniciales obtenidas registradas de $Q_0 = 0$

Velocidad de la galería:

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{0}{7.453} = 0 \text{ m/s}$$

Velocidad de la tubería de baja presión:

$$v_{tb} = \frac{Q}{F_{tb}} = \frac{0}{2.835} = 0 \text{ m/s}$$

Pérdidas por fricción de la tubería de baja presión:

$$h_{ftb} = \left(\frac{v_{tb}}{2} \right)^2 \times L = \left(\frac{0 \times 0.015}{2} \right)^2 \times 146.15$$

$$\frac{F_{tb}^3}{Pm_{tb}} = \frac{2.835^3}{5.969}$$

Pérdidas por fricción de la galería:

$$h_{fg} = \left(\frac{v_m}{2} \right)^2 \times L = \left(\frac{0 \times 0.015}{2} \right)^2 \times 6385.78$$

$$\frac{F^3}{Pm_g} = \frac{7.453^3}{10.341}$$

Pérdidas en la entrada:

$$h_e = \frac{v_{tb}^2}{2g\mu^2} = \frac{0^2}{2 \times 9.8 \times 10.8^2}$$

Pérdidas totales:

$$h_o = h_{ftb} + h_{fg} + h_e = 0 \text{ m}$$

El procedimiento fue nuevamente ejecutado utilizando un intervalo de tiempo de $\Delta t = 5$ s, ajustando los signos en las expresiones de variación del nivel y de la velocidad, de modo que $Z_1 = Z_0 + \Delta Z_1$ y $v_1 = v_0 + \Delta v_1$. Esta etapa permitió identificar el nivel mínimo alcanzado por la chimenea de equilibrio durante la fase de vaciado. Posteriormente, se retomó el proceso correspondiente al ascenso del nivel, invirtiendo los signos de los parámetros involucrados: $Z_1 = Z_0 - \Delta Z_1$ y $v_1 = v_0 - \Delta v_1$. Este procedimiento fue aplicado de manera recursiva, en concordancia con la metodología iterativa descrita por (Pacheco, 2019), hasta estabilizar el sistema hidráulico en un nuevo nivel de equilibrio.

3.3.3 Escenarios de Simulación

Con el propósito de analizar el comportamiento del sistema ante diferentes configuraciones geométricas, se han definido cuatro escenarios de simulación. Cada uno representa una variación específica en el diseño de la chimenea de equilibrio, permitiendo comparar su respuesta frente a condiciones transitorias similares.

Los dos primeros casos corresponden a chimeneas equipadas con orificios de distinto diámetro, lo que permite evaluar cómo influye esta restricción localizada en la dinámica del flujo y el cambio del mismo. Los otros dos escenarios incorporan chimeneas de sección

compuesta, donde se modifica progresivamente el área transversal mediante un tramo superior cónico. Esta variación busca explorar el efecto del volumen adicional en la atenuación de oscilaciones y en la estabilidad del sistema.

La comparación entre los escenarios permitirá identificar ventajas y limitaciones de cada configuración en términos de regulación hidráulica.

Chimeneas de orificio (diámetro $D_1 = 0.7\text{m}$)

En este primer escenario se analiza una chimenea de equilibrio provista de un orificio de menor diámetro, lo que implica una mayor restricción al paso del caudal.

Parámetros planteados a utilizar:

Se ha optado por trabajar con un diámetro de orificio (D_1) de 0.7 m, por lo tanto.

Área del orificio:

$$A_{orif1} = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 0.7^2}{4} = 0.385 \text{ m}^2$$

Para el coeficiente de descarga se seleccionó de 0.9, denotado como representativo para orificios redondos con condiciones de borde bien definidas y flujo sumergido. Según v, este rango permite varios autores, simular de manera realista la transferencia de energía entre la galería y la chimenea, capturando adecuadamente el comportamiento oscilatorio del fluido, (Martínez Alzamora et al., 1995) también señalan que este tipo de configuración favorece una respuesta hidráulica más predecible, aspecto clave en el diseño de sistemas de regulación.

Por lo cual se obtuvo un área del orificio calculado de 0.385 m^2

Por Ultimo, coeficiente del orificio:

$$C_{orif1} = \frac{1}{2 \times g} \times \left(\frac{1}{d_{orif}} \right)^2 = \frac{1}{2 \times 9.81} \times \left(\frac{1}{0.9 \times 0.385} \right)^2 = 0.425$$

Esta configuración busca simular una condición de control más rígido, donde la pérdida localizada que se genera en la base cumple una función amortiguadora significativa. Tal diseño permite observar cómo el sistema responde ante variaciones rápidas del flujo,

evaluando su capacidad para disipar energía y estabilizar el nivel piezométrico durante oscilaciones (Martínez Alzamora et al., 1995; Pacheco, 2019)

Chimeneas de orificio (diámetro $D_2= 0.8\text{m}$)

En el segundo caso, se considera una chimenea con un orificio de mayor diámetro, lo cual reduce la pérdida de carga localizada y permite un flujo más libre entre la galería y la chimenea.

Escenario: Se trabajó con un diámetro de orificio (D_2) de 0.8 m,

Área del orificio:

$$A_{orif2} = \frac{\pi \times D_2^2}{4} = \frac{\pi \times 0.8^2}{4} = 0.503 \text{ m}^2$$

Por lo cual se obtuvo un área del orificio calculado de 0.503 m^2 , se puede ver que a pesar de que el crecimiento del diámetro es pequeño, el aumento en el área es bastante alto, el aumento del área con respecto al caso anterior representa una disminución en la resistencia hidráulica impuesta en la base de la chimenea, favoreciendo un intercambio de flujo más libre entre la galería y el volumen de agua almacenado.

El coeficiente de descarga decrece y se selecciona de 0.6 Esta elección responde al comportamiento hidráulico real observado en orificios de mayor tamaño que presentan bordes menos definidos o transiciones menos favorables al flujo, generando condiciones que reducen la eficiencia de descarga (Bardini, 2018; Pacheco, 2019). De acuerdo con (Martínez Alzamora et al., 1995), este tipo de condiciones puede encontrarse en estructuras de control que priorizan volumen por encima de precisión hidráulica.

La combinación de un mayor diámetro con un coeficiente de descarga más bajo permite analizar cómo la reducción en las pérdidas localizadas influye en la capacidad de amortiguamiento y en el tiempo de estabilización del sistema. En particular, este enfoque contribuye a evaluar escenarios en los que se busca una menor disipación energética y una respuesta más rápida del nivel piezométrico ante eventos transitorios. Así, se establece una base comparativa robusta frente al primer caso y al comportamiento proyectado de chimeneas de sección compuesta.

Por último, se calcula el Coeficiente del orificio:

$$C_{orf2} = \frac{1}{2 \times g} \times \left(c_d \times \frac{1}{A_{orif}} \right)^2 = \frac{1}{2 \times 9.81} \times \left(\frac{1}{0.6 \times 0.503} \right)^2 = 0.56$$

Esta variante se estudia con el fin de identificar cómo la disminución en la resistencia hidráulica afecta la respuesta del sistema, particularmente en términos de tiempo de estabilización y magnitud de las oscilaciones. La comparación con el caso anterior proporciona información valiosa sobre la sensibilidad del sistema ante cambios en esta geometría puntual (Martínez Alzamora et al., 1995; Pacheco, 2019).

Chimeneas de Sección Compuesta

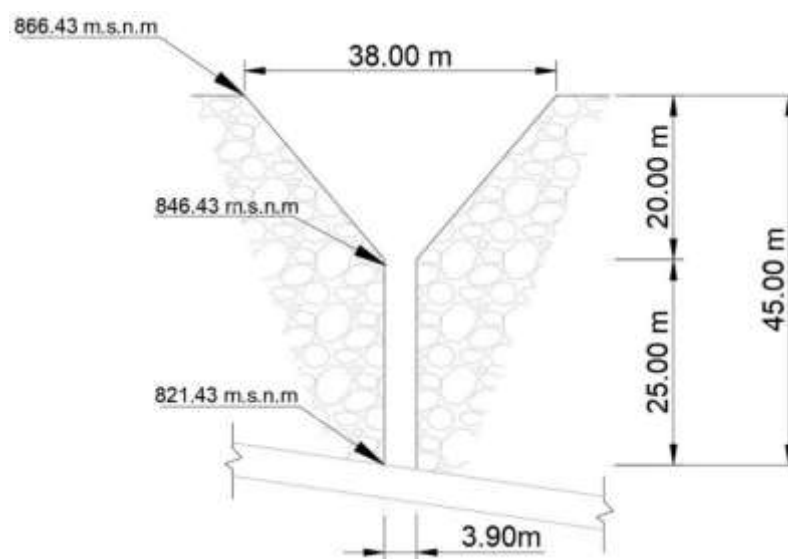
Parámetros generales del diseño:

- Radio Inicial (r_1) = 1.9 m
- Cota del fondo de la chimenea = 821.43 m
- Cota embalse lleno (donde empieza sección compuesta) = 846.43 m
- Dimensión de la chimenea (h_1) = 25 m
- Distancia total de la chimenea H = 45 m
- Radio final (r_2) = variable a calcular

El tramo superior de la chimenea corresponde a una sección cónica para mejor comprensión de parámetros revisar esquema de la Figura 13 capítulo 3, y su perfil se definió mediante la siguiente expresión, que permite calcular el radio a una altura h cualquiera dentro de la zona de ensanchamiento:

Radio final de la sección compuesta $r_2 = 10 r_1$

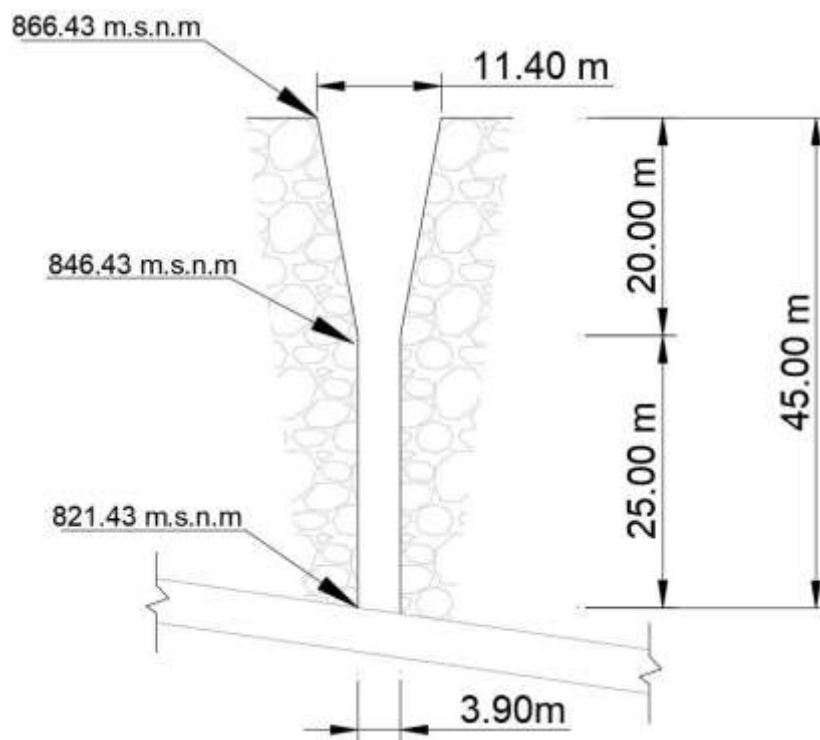
Figura 15. Geometría del caso de simulación con radio superior diez veces mayor.



En este modelo, se analiza una chimenea de equilibrio cuya sección superior se expande hasta alcanzar un radio diez veces mayor al de la sección inferior. Esta configuración busca representar una cámara de expansión más amplia, capaz de absorber grandes volúmenes de agua durante eventos transitorios críticos. Al incrementar el área disponible en la parte superior, se espera un mejor amortiguamiento de las oscilaciones y un efecto de estabilización más marcado, lo cual resulta relevante para infraestructuras sujetas a perturbaciones intensas (Bardini, 2018; Basha & Gharabaghi, 2006)

Radio final de la sección compuesta $r_2 = 3 r_1$

Figura 16. Geometría del caso de simulación con radio superior tres veces mayor.



En esta variante, la chimenea de sección compuesta presenta un ensanchamiento más moderado, en el cual el radio superior es solo tres veces mayor que el inferior. Esta configuración ofrece una respuesta intermedia, equilibrando los requerimientos estructurales con la funcionalidad hidráulica. La comparación con el caso anterior permitirá evaluar hasta qué punto una mayor expansión geométrica mejora el comportamiento oscilatorio del sistema, considerando además el cambio en las cotas internas que esto implica (Bardini, 2018; Pacheco & Carrillo, 2024).

4 Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas desarrolladas del método inercial utilizando el proceso numérico-iterativo aplicado a las diferentes configuraciones de chimeneas de equilibrio bajo condiciones de transitorios generados por cierre y apertura brusca de válvulas. Se analizan las oscilaciones del nivel piezométrico en la chimenea, tiempos de estabilización del sistema y amplitudes máximas.

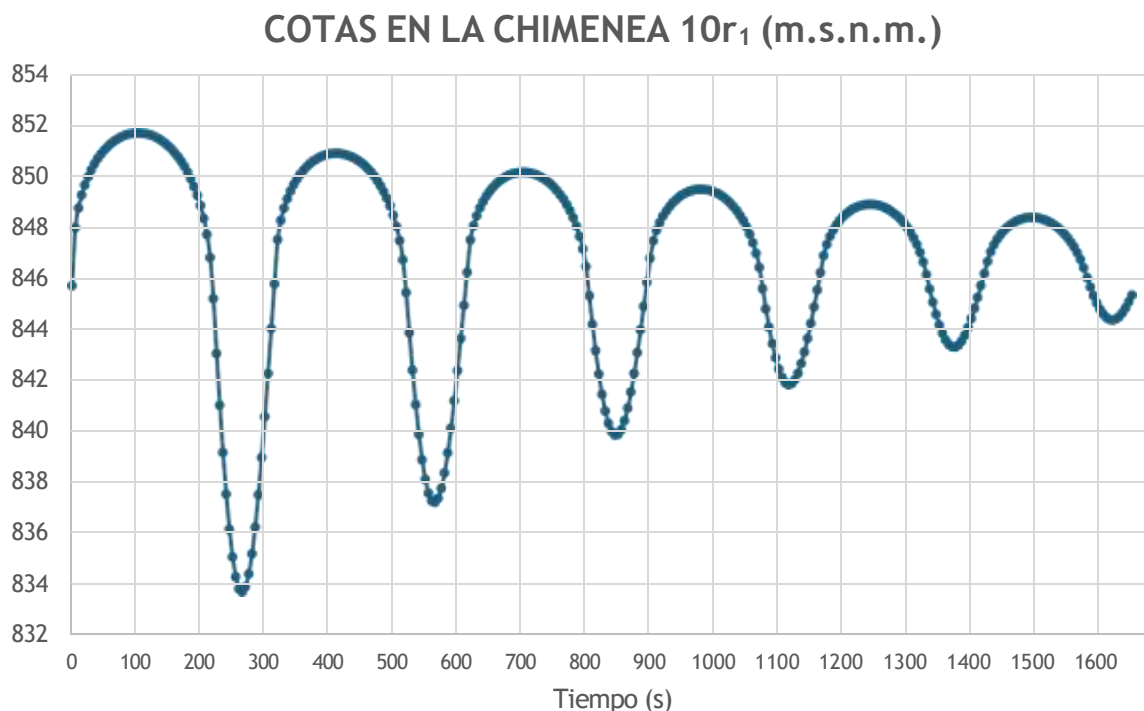
4.1 Resultados de simulación numérica según escenarios de análisis

4.1.1 Estudio para cierre brusco de una válvula ($Q_{\max} \rightarrow Q=0$):

Con las condiciones iniciales consideradas, que se detallan en el apartado 3.2 del capítulo 3, tomando en cuenta una cota de equilibrio para un instante cero para Q_{\max} , con una hoja de cálculo se realizó el proceso iterativo con un paso en el tiempo de cinco segundos partiendo desde $t=0$ seg hasta $t=1600$ seg.

Chimenea de sección compuesta ($r_2 = 10 r_1$):

Figura 17. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $10r_1$, en un cierre de válvula



La figura 17 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea de radio superior equivalente a 10 veces el radio de la tubería en caso de un cierre brusco.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 851.693 m.s.n.m.

Cota mínima: 833.716 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 17.98 m.

Tiempo de estabilización: Mayor a 1650 segundos.

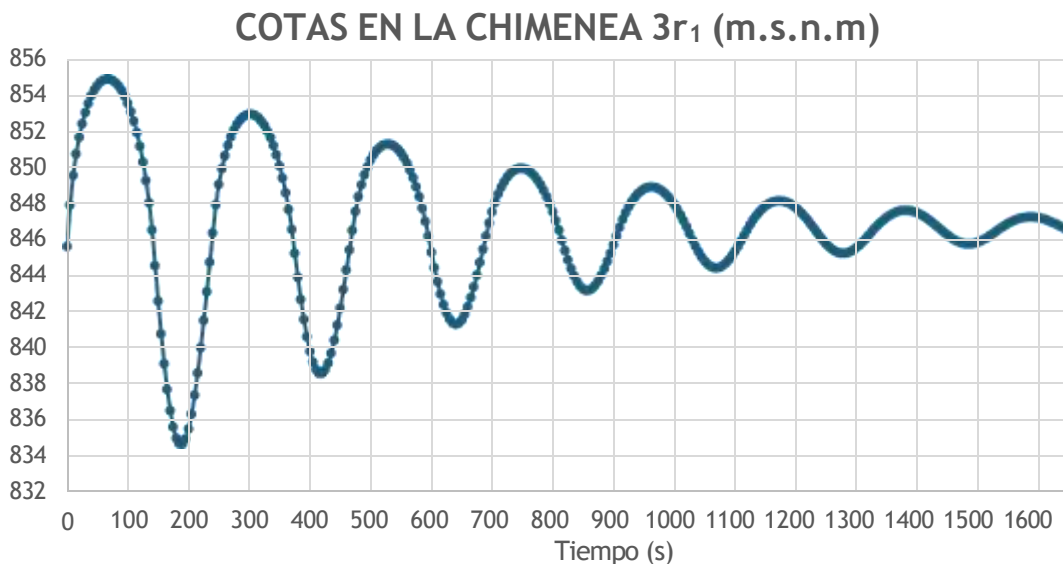
Numero de oscilaciones notables: 6

Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 280 segundos.

El mayor volumen de almacenamiento en la parte superior de la chimenea contribuyó a una amortiguación efectiva del fenómeno transitorio. Las oscilaciones iniciales, aunque amplias, disminuyeron rápidamente en magnitud, y el sistema alcanzó un comportamiento cuasi estable en seis ciclos. El período de oscilación, medido entre máximos sucesivos, fue de aproximadamente 280 segundos. Esta configuración demostró una buena capacidad de disipación de energía, con un comportamiento suave y controlado.

Chimenea de sección compuesta ($r_2 = 3r_1$):

Figura 18. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $3r_1$ en un cierre de válvula



La figura 18 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea de sección compuesta de radio superior equivalente a 3 veces el radio de la tubería en caso de un cierre brusco.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 854.961 m.s.n.m.

Cota mínima: 834.776 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 20.19 m.

Tiempo de estabilización: Alrededor de 1400 segundos.

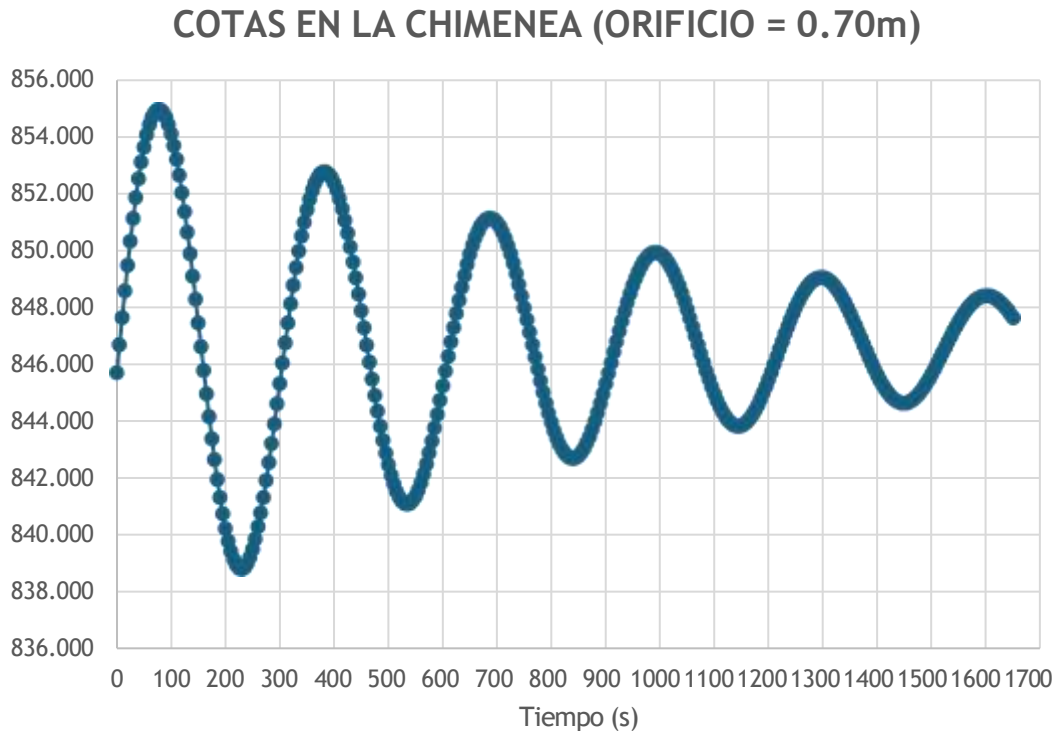
Numero de oscilaciones notables: 8

Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 230 segundos.

La menor sección superior condicionó un comportamiento más agitado. Aunque el sistema alcanza la estabilización en un tiempo similar al de $10r_1$, lo hace con mayor número de oscilaciones y una oscilación inicial más intensa. El período dominante más corto (230 s) evidencia un sistema más reactivo, pero menos amortiguado. Esta configuración es menos efectiva en disipar la energía del evento transitorio, generando mayores sollicitaciones hidráulicas durante el proceso de estabilización.

Chimenea con Orificio $D_1 = 0.7m$:

Figura 19. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_1 = 0.7m$ en un cierre de válvula



La figura 19 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea con orificio de diámetro 0.70 m en caso de un cierre brusco.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 854.95 m.s.n.m.

Cota mínima: 838.801 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 16.15 m.

Tiempo de estabilización: Mayor a 1650 segundos.

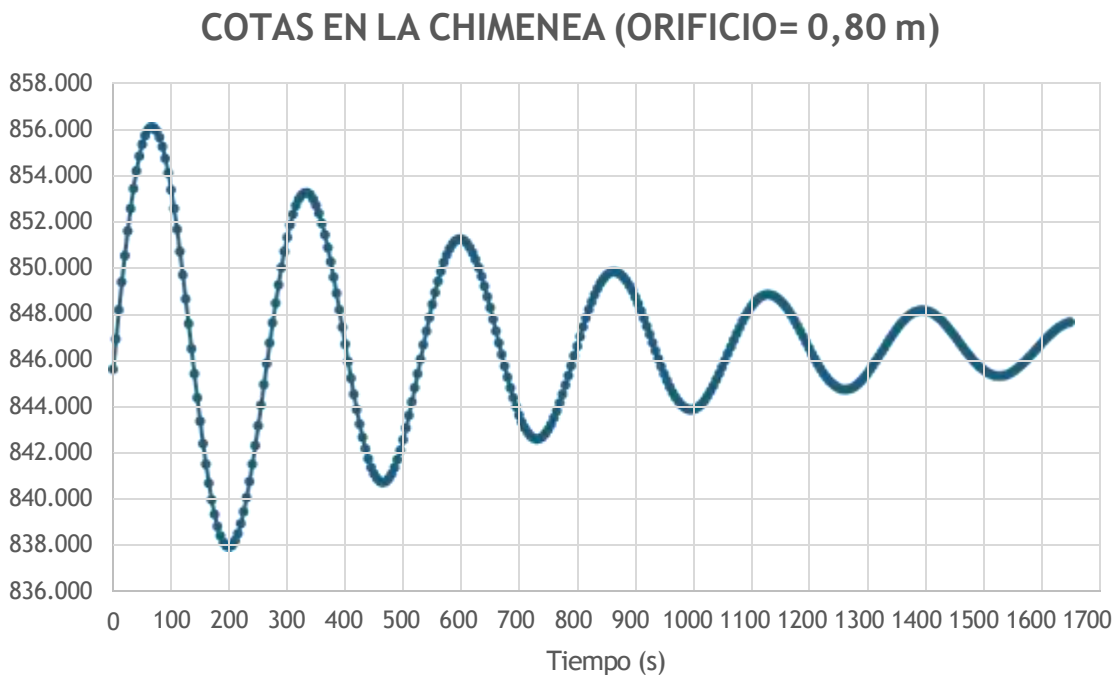
Numero de oscilaciones notables: 6

Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 310 segundos.

Este escenario presentó oscilaciones notable regularidad y amortiguación progresiva. El diámetro reducido del orificio limitó el intercambio de flujo, lo cual alargó el período de cada ciclo y contribuyó a una respuesta relativamente estable pero más lenta. A pesar de su moderada amplitud inicial, el sistema requirió varios ciclos para disipar en gran medida la energía generada por el cierre.

Chimenea con Orificio $D_2=0.8$ m:

Figura 20. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_2 = 0.8m$ en un cierre de válvula



La figura 20 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea con orificio de diámetro 0.80 m en caso de un cierre brusco.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 856.155 m.s.n.m.

Cota mínima: 838.0.17 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 18.14 m.

Tiempo de estabilización: Mayor a 1650 segundos.

Numero de oscilaciones notables: 6

Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 300 segundos.

Con un orificio ligeramente más amplio que en el caso anterior, esta chimenea permitió un intercambio más rápido de caudales, lo que se tradujo en una oscilación inicial de mayor amplitud, pero también en un leve acortamiento del período de oscilación. El comportamiento general fue similar al caso de 0.7 m, aunque con un ligero incremento en la respuesta.

Figura 21. Resumen de curvas de las 4 chimeneas para cierre brusco de válvula

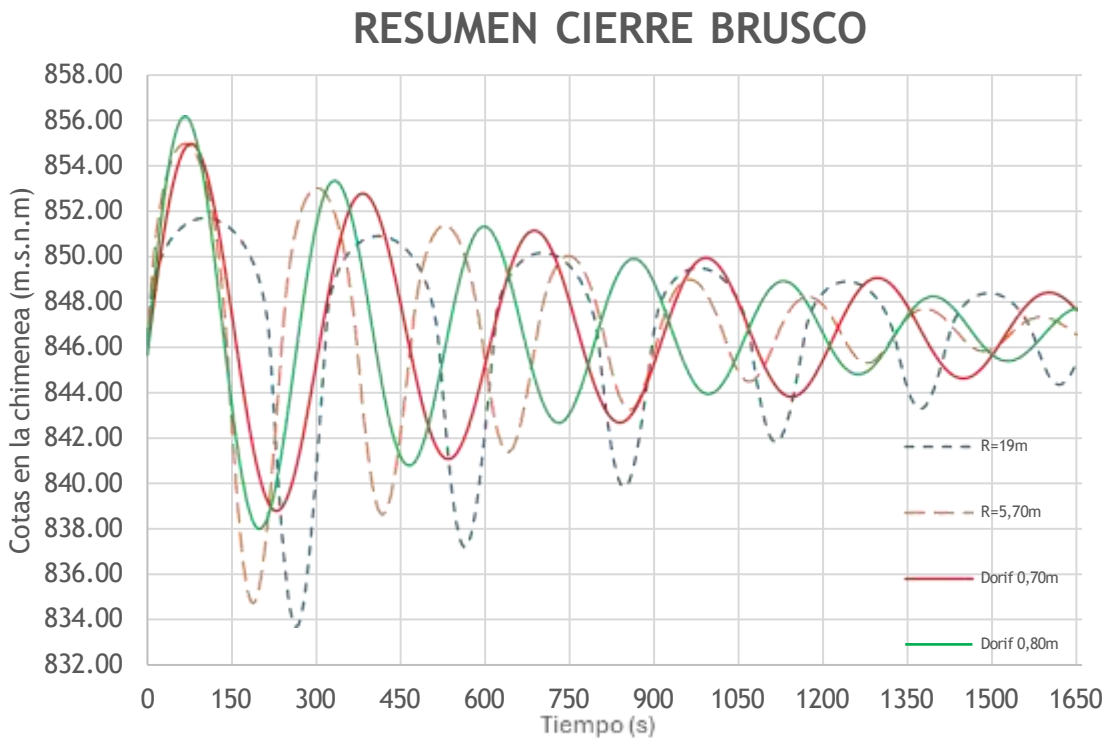
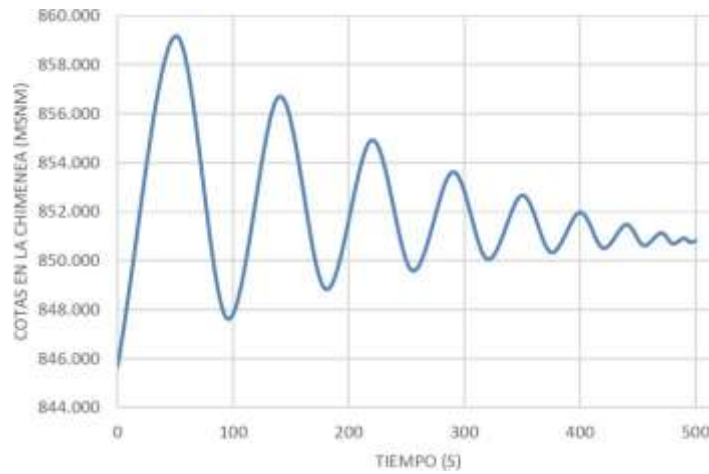


Figura 22. Oscilaciones en chimenea de equilibrio simple en un cierre de válvula con $\Delta t = 5$ s (Torres Delgado, 2025)

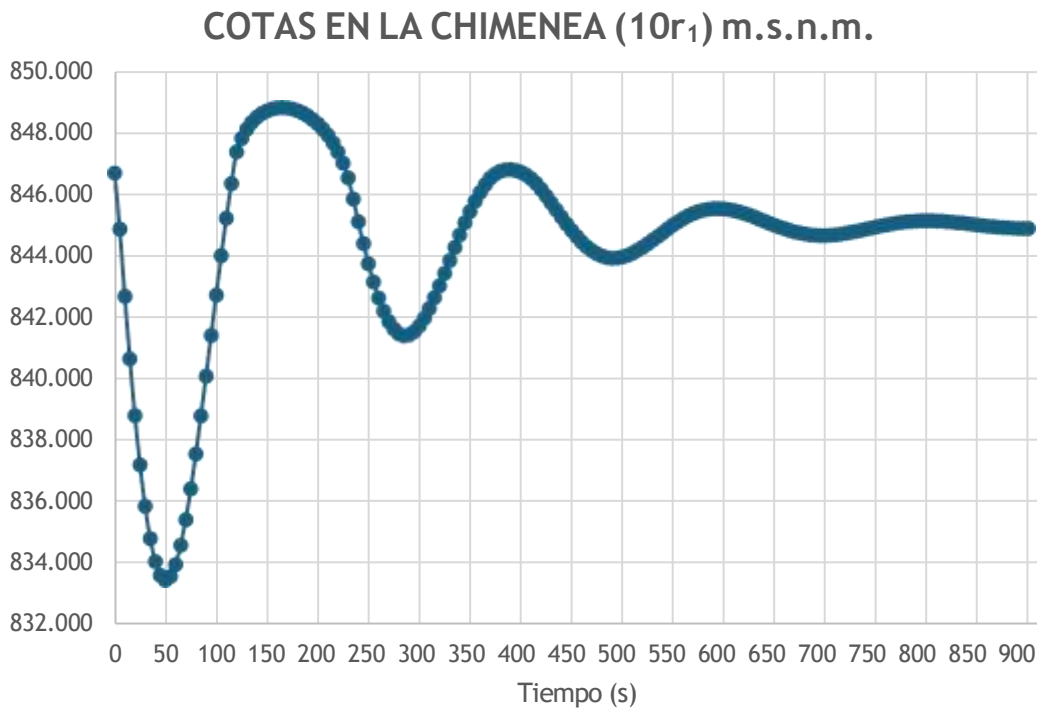


4.1.2 Estudio de caso para apertura brusca de una válvula ($Q_0 = 0 \rightarrow Q = Q_{max}$):

Se realiza un proceso análogo al caso de cierre brusco, esta vez en un menor intervalo de tiempo ya que la cota se estabiliza en un menor lapso de tiempo.

Chimenea de sección compuesta ($r_2 = 10 r_1$):

Figura 23. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $10r_1$ en una apertura de válvula



La figura 23 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea de sección compuesta de radio superior equivalente a 10 veces el radio de la tubería en caso de una apertura brusca.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 848.839 m.s.n.m.

Cota mínima: 833.421 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 15.42 m.

Tiempo de estabilización: Alrededor de 700 segundos.

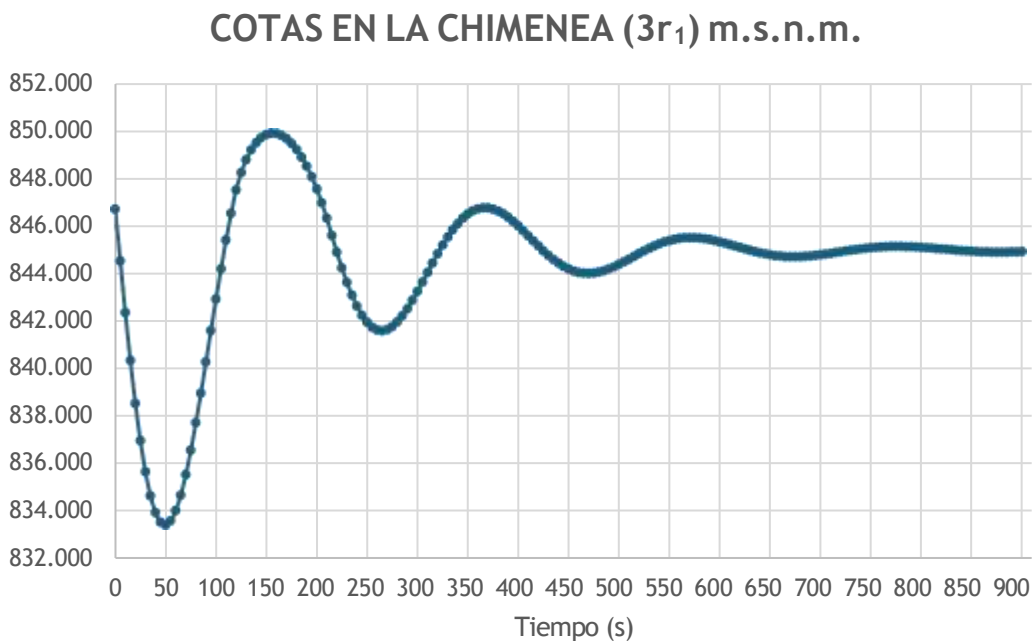
Numero de oscilaciones notables: 4

Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 250 segundos.

La configuración $10r_1$ amortiguó eficazmente la perturbación inducida por la apertura. La oscilación inicial fue moderada, con una rápida reducción de magnitud a lo largo de los primeros cuatro ciclos. El sistema alcanzó la estabilidad en menos de 15 minutos, lo que demuestra un comportamiento muy favorable ante este tipo de evento transitorio.

Chimenea de sección compuesta ($r_2 = 3r_1$):

Figura 24. Oscilaciones en chimenea de equilibrio de sección compuesta con radio máximo $3r_1$ en una apertura de válvula



La figura 24 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea de sección compuesta de radio superior equivalente a 10 veces el radio de la tubería en caso de una apertura brusca.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 849.899 m.s.n.m.

Cota mínima: 833.415 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 16.484 m.

Tiempo de estabilización: Alrededor de 600 segundos.

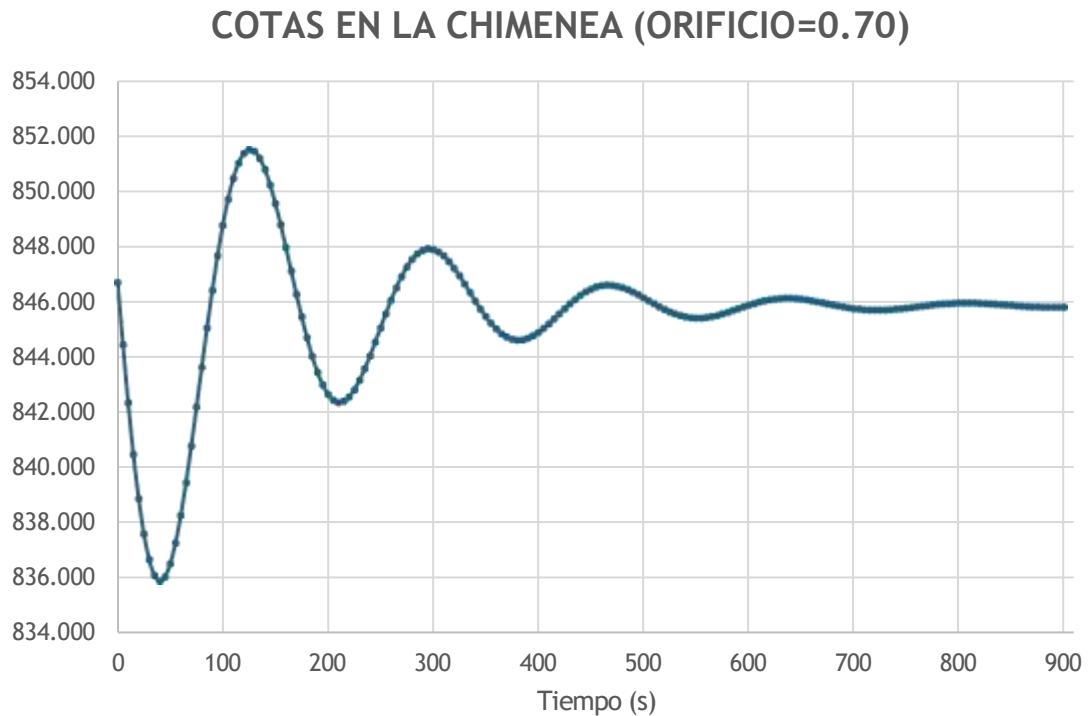
Numero de oscilaciones notables: 4

Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 240 segundos.

En este caso, la oscilación inicial fue más amplia que en 10D, lo cual se esperaba debido al menor volumen superior. Sin embargo, el sistema logró amortiguar la perturbación en un número similar de ciclos. Aunque la recuperación fue eficiente, el pico inicial más alto sugiere una menor capacidad de contención hidráulica ante el ingreso repentino de flujo.

Chimenea con Orificio $D_1=0.7m$:

Figura 25. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_1 = 0.7m$ en una apertura de válvula



La figura 25 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea con orificio de diámetro 0.70 m en caso de una apertura brusca.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 851.502 m.s.n.m.

Cota mínima: 835.884 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 15.618 m.

Tiempo de estabilización: Alrededor de 600 segundos.

Numero de oscilaciones notables: 4

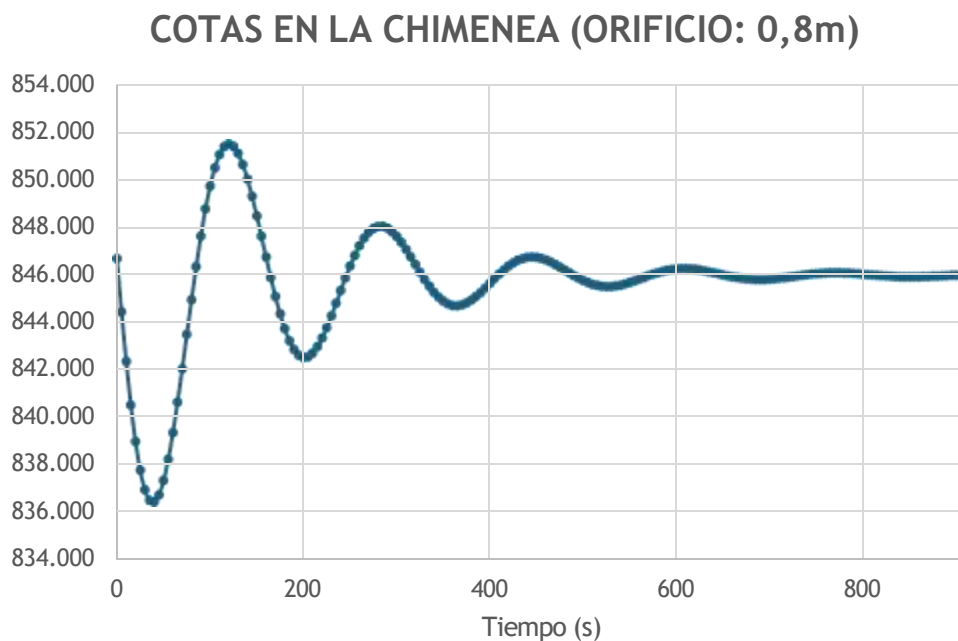
Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 250 segundos.

Esta configuración mostró una respuesta moderada y eficiente. El orificio de menor diámetro genera una mayor restricción al paso de caudal, lo que contribuyó a una oscilación suavizada y estable. El sistema mostró un equilibrio adecuado entre amplitud y amortiguación.

Chimenea con Orificio $D_2=0.8$ m:

La figura 25 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea con orificio de diámetro 0.70 m en caso de un cierre brusco.

Figura 26. Oscilaciones en chimenea de orificio con $D_2 = 0.8m$ en una apertura de válvula



La figura 26 muestra el desarrollo del nivel piezométrico en la chimenea con orificio de diámetro 0.80 m en caso de una apertura brusca.

Métricas Hidráulicas:

Cota máxima: 851.525 m.s.n.m.

Cota mínima: 836.463 m.s.n.m.

Amplitud máxima: 15.06 m.

Tiempo de estabilización: Alrededor de 550 segundos.

Numero de oscilaciones notables: 4

Periodo dominante (entre picos): Aproximadamente 250 segundos.

El mayor diámetro del orificio permitió una oscilación inicial de mayor magnitud. A pesar de ello, el sistema mostró un comportamiento muy parecido al del caso con orificio 0.7 m. La amortiguación fue efectiva, y el sistema se estabilizó tras cuatro ciclos, con una evolución suave hacia la cota media.

Figura 27. Resumen de curvas de las 4 chimeneas para apertura brusca de válvula

RESUMEN APERTURA BRUSCA

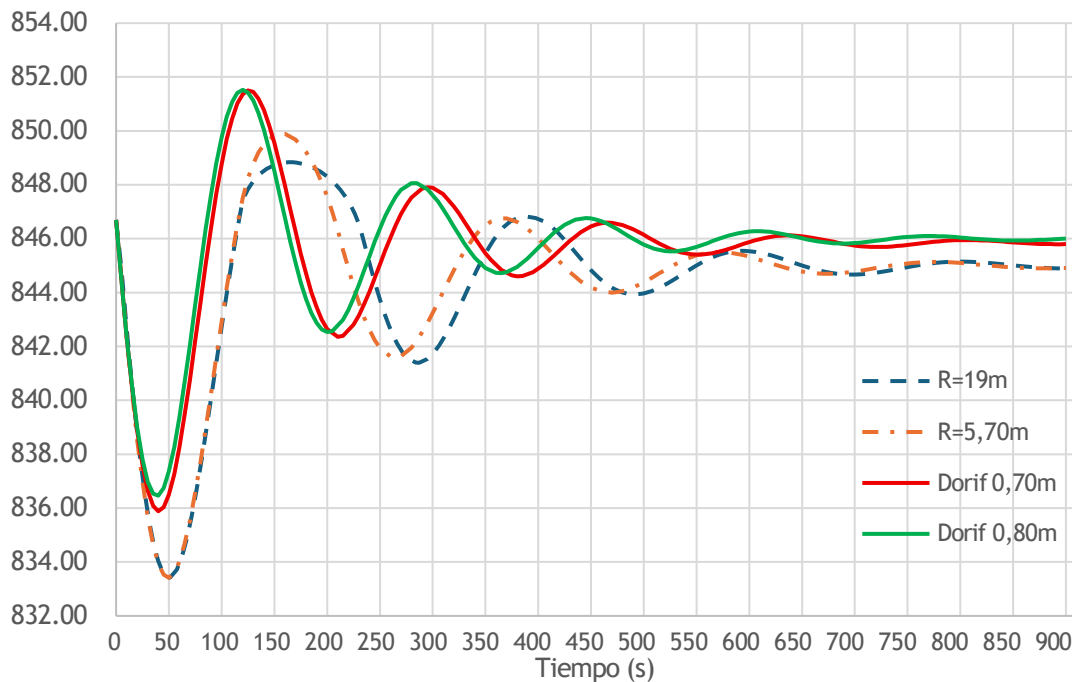


Figura 28. Oscilaciones en chimenea de equilibrio simple en una apertura brusca de válvula con $\Delta t = 5$ s (Torres Delgado, 2025)

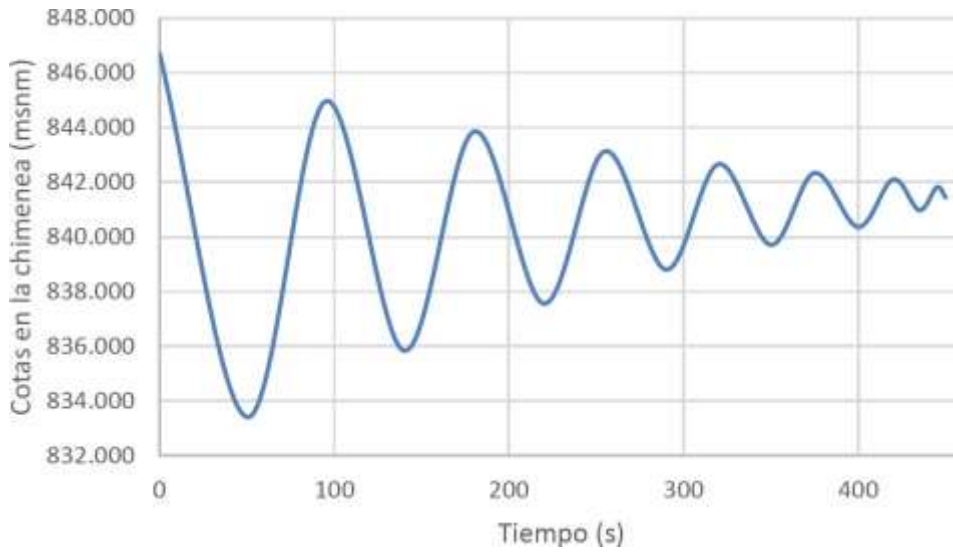
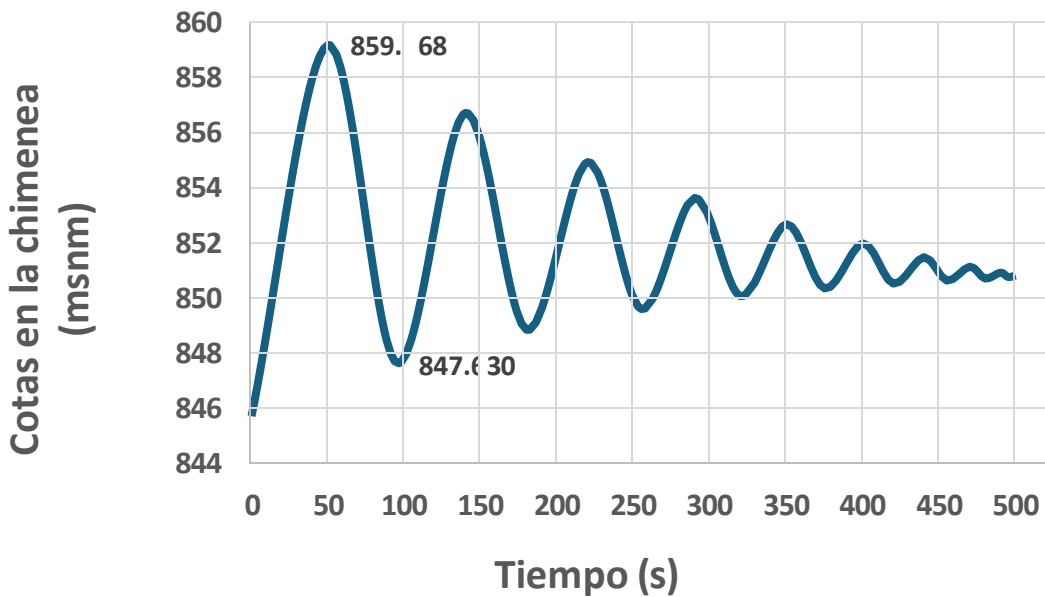


Figura 29 Oscilaciones en chimenea de equilibrio simple en un cierre brusco de válvula con $\Delta t = 5$ s (Torres Delgado, 2025)



4.1.3 Tabla Resumen de resultados obtenidos

Tabla 4. Resultados finales de los 4 escenarios, tanto en apertura como en cierre.

	Caso	Cierre	Apertura
Cota máxima (m)	Compuesta 10r ₁	851,693	848,839
	Compuesta 3r ₁	854,961	849,899
	Orificio 0.7 m	854,950	851,502
	Orificio 0.8 m	856,155	851,525

Cota mínima (m)	Compuesta $10r_1$	833,716	833,421
	Compuesta $3r_1$	834,776	833,415
	Orificio 0.7 m	838,801	835,884
	Orificio 0.8 m	838,017	836,463
Amplitud máxima (Δh) (m)	Compuesta $10r_1$	17,977	15,418
	Compuesta $3r_1$	20,185	16,484
	Orificio 0.7 m	16,149	15,618
	Orificio 0.8 m	18,138	15,062
Período dominante (s)	Compuesta $10r_1$	280	250
	Compuesta $3r_1$	230	240
	Orificio 0.7 m	310	250
	Orificio 0.8 m	300	250
Tiempo de estabilización (s)	Compuesta $10r_1$	>1650	700
	Compuesta $3r_1$	≈1400	600
	Orificio 0.7 m	>1650	600
	Orificio 0.8 m	>1650	550

4.2 Discusión:

Los resultados obtenidos para los cuatro diseños de chimeneas de equilibrio, sometidos a eventos transitorios de cierre y apertura brusca de válvula, revelan diferencias significativas en su comportamiento hidráulico, particularmente en cuanto a la amplitud de oscilación, el período dominante y el tiempo necesario para alcanzar la estabilización.

En el evento de cierre, la chimenea de sección compuesta con radio superior $10r_1$ evidenció un desempeño favorable en términos de amortiguación, presentando una amplitud máxima de 17,98 m y un período de oscilación de 280 s. Sin embargo, su tiempo de estabilización fue superior a 1650 s, lo que indica que, a pesar de controlar bien la energía inicial, el sistema tardó más en disipar completamente las oscilaciones.

Por otro lado, la chimenea compuesta de $3r_1$ mostró el mayor valor de amplitud en este escenario (20,19 m), con un período más corto (230 s) y un tiempo de estabilización menor (~1400 s). Esto sugiere que, si bien su oscilación fue más energética, la disipación ocurrió en un intervalo de tiempo más corto, posiblemente por un efecto más dinámico del flujo contenido en una geometría más reducida.

El diseño con orificio de 0.7 m tuvo la menor amplitud máxima (16,15 m) y el período más largo (310 s), lo que indica un comportamiento más amortiguado, aunque su tiempo de estabilización también superó los 1650 s. En cambio, el orificio de 0.8 m registró una amplitud

de 18,14 m y un período de 300 s, con estabilización también prolongada. En general, ambas mostraron una disipación de energía más lenta, pero con oscilaciones más contenidas que las chimeneas compuestas.

En los eventos de apertura, todas las configuraciones presentaron un comportamiento más controlado en comparación con los casos de cierre. La chimenea $10r_1$ tuvo la menor amplitud (15,42 m) y un tiempo de estabilización de 700 s, mientras que la de $3r_1$ se estabilizó aún más rápido (600 s), con una amplitud levemente mayor (16,48 m) y un período de 240 s.

Por su parte, las chimeneas con orificio nuevamente mostraron diferencias sutiles. El modelo de 0.7 m tuvo una amplitud de 15,62 m, mientras que el de 0.8 m presentó la más baja del grupo (15,06 m) y el tiempo de estabilización más corto: 550 s. Esto sugiere que, a pesar de generar mayores oscilaciones en el caso de cierre, ante apertura estas configuraciones fueron altamente eficaces en amortiguar rápidamente la perturbación. En conjunto, los datos confirman que los eventos de cierre son más críticos, generando mayores amplitudes y tiempos de recuperación más largos. En contraste, la respuesta a la apertura fue más eficiente en todos los casos, destacando especialmente la chimenea con orificio de 0.8 m y la compuesta de $3r_1$ por su rápida estabilización.

En términos generales, la chimenea compuesta de $10r_1$ mantiene el mejor balance entre amplitud moderada y oscilación controlada, siendo ideal para atenuar transitorios de cierre. Para escenarios de apertura, las chimeneas con orificio (especialmente la de 0.8 m) ofrecen una excelente respuesta con tiempos de estabilización mínimos, lo que las posiciona como una alternativa eficaz en sistemas donde predominan estos eventos.

5 Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se ha realizado un análisis comparativo del comportamiento hidráulico de chimeneas de equilibrio con orificio y sección compuesta mediante un estudio de caso aplicado a la chimenea de equilibrio del proyecto Ocaña I.

En el estudio se ha aplicado el modelo rígido para simular el comportamiento hidráulico de chimeneas con orificio y de sección compuesta.

Se ha desarrollado simulaciones numéricas ante eventos de cierre y apertura brusca de válvulas para ambos tipos de chimenea según condicionantes establecidas como de interés para propósitos del proyecto de aplicación.

Se compara los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de aplicación en términos del comportamiento simulado para oscilación de nivel, tiempo de estabilización y eficiencia amortiguadora.

5.1 Conclusiones:

El modelo inercial rígido fue aplicado de manera exitosa para simular el comportamiento hidráulico de cuatro configuraciones distintas de chimeneas de equilibrio: dos con orificio (de 0.7 m y 0.8 m de diámetro) y dos de sección compuesta (con radios superiores equivalentes a $3r_1$ y $10r_1$). Este modelo permitió replicar con suficiente precisión la respuesta oscilatoria del nivel piezométrico en la chimenea tras perturbaciones generadas por cierres y aperturas bruscas de válvulas.

Gracias a su formulación matemática relativamente simple pero físicamente representativa, el modelo inercial rígido demostró ser una herramienta robusta para predecir los fenómenos transitorios. Su capacidad para captar la dinámica del sistema permitió identificar y cuantificar variables clave como las cotas máximas y mínimas alcanzadas, la amplitud de oscilación, el período dominante y el tiempo necesario para alcanzar una condición de cuasi - estabilidad. Esto resulta especialmente útil para ingenieros que necesitan evaluar el desempeño de diferentes diseños sin recurrir inicialmente a modelos más complejos o costosos computacionalmente.

Se llevaron a cabo simulaciones numéricas bajo dos escenarios operativos extremos: el cierre rápido de una válvula y su apertura brusca, utilizando un intervalo de tiempo de 5 segundos para representar ambos eventos. Estas simulaciones se desarrollaron con condiciones adaptadas al contexto del proyecto hidroeléctrico Ocaña I, lo que asegura la aplicabilidad directa de los resultados al caso de estudio real.

Durante el cierre de válvula, se evidenció una respuesta hidráulica más severa en términos de amplitud de oscilación y tiempo de estabilización, como era de esperarse debido a la acumulación rápida de energía en el sistema. Por su parte, los eventos de apertura provocaron oscilaciones de menor magnitud, lo que refuerza la idea de que los cierres representan un escenario más crítico desde el punto de vista transitorio. Las cuatro configuraciones de chimeneas respondieron de manera distinta en ambos casos, revelando cómo las características geométricas y los mecanismos de disipación (como el orificio) influyen directamente en la atenuación del fenómeno.

Este análisis permitió evaluar no solo la magnitud de las oscilaciones, sino también la velocidad con la que cada configuración retornó a condiciones estables, lo que es fundamental para seleccionar la alternativa más adecuada según el criterio de diseño hidráulico y estructural.

En términos comparativos, se observó que la chimenea compuesta con radio superior equivalente a $10r_1$ presentó el mejor desempeño general. Durante el cierre de válvula, esta configuración alcanzó una amplitud máxima de 17,977 m y un período dominante de 280 s, sin llegar a estabilizarse por completo hasta los 1650 segundos de la simulación. En el caso de apertura, los valores disminuyeron notablemente, con una amplitud de 15,418 m y un tiempo de estabilización de solo 700 s, lo que evidencia su alta eficiencia para disipar energía hidráulica.

Por otro lado, la chimenea compuesta de $3r_1$, aunque también mostró un buen comportamiento, presentó las mayores amplitudes tanto en cierre como en apertura (20,185 m y 16,484 m, respectivamente), indicando una respuesta más energética y menos amortiguada. Las chimeneas con orificio mostraron un desempeño intermedio. La de 0.7 m alcanzó la menor amplitud en cierre (16,149 m), lo que sugiere una disipación efectiva, aunque con un período más largo (310 s) y tiempos de estabilización superiores a 1650 s. La de 0.8 m, en cambio, presentó amplitudes mayores y un tiempo de estabilización más corto en apertura (550 s), pero menos favorable en el evento de cierre.

Estos resultados permiten establecer que, desde una perspectiva de control hidráulico y seguridad, las chimeneas compuestas con mayor volumen (como la de $10r_1$) son más adecuadas, especialmente en escenarios donde se anticipan cierres bruscos. Las chimeneas con orificio, por su parte, ofrecen un comportamiento aceptable con diseños más compactos, siendo una alternativa viable donde existan restricciones de espacio o costos.

Al comparar los resultados con una configuración de chimenea simple tomada como referencia de (Torres Delgado, 2025), se confirman los beneficios del rediseño del sistema de disipación. En el escenario de cierre brusco, la chimenea simple alcanzó una cota máxima de 859,168 m y una mínima de 847,630 m, con una amplitud de oscilación menor que cualquiera de los casos analizados en esta tesis, más sin embargo no por mucho y con periodos mucho más cortos. Esta amplitud un tanto menos elevado, pero con periodos más cortos implica un riesgo potencial más alto de cavitación, sobrepresión o pérdida de eficiencia en el sistema hidráulico.

En el evento de apertura, la chimenea simple osciló entre 833,410 m y 844,957 m, también con una amplitud menor al compararla con los diseños compuestos y con orificio evaluados.

Esto indica debido a su capacidad de disipación, que las configuraciones alternativas no solo ofrecen mejoras en la eficiencia hidráulica del sistema, sino que también reducen los impactos operativos y estructurales durante eventos transitorios.

Este contraste refuerza la importancia de la optimización geométrica de las chimeneas de equilibrio, ya que incluso cambios aparentemente sencillos, como incorporar un orificio o ampliar el diámetro superior, pueden tener efectos significativos en la respuesta dinámica del sistema.

Aunque las chimeneas estudiadas (compuesta y con orificio) presentan amplitudes mayores respecto a la chimenea simple, lo cual implica mayor oscilación vertical del nivel de agua, estas alcanzan cotas máximas notablemente menores (entre 4 y 7 metros más bajas) en comparación con la chimenea simple (859,168 m), en el caso de cierre, que es el más crítico.

En el análisis del comportamiento transitorio ante eventos de cierre brusco de válvula, se observó que las chimeneas modificadas reducen significativamente la magnitud de la oscilación piezométrica respecto a la chimenea de equilibrio simple. La chimenea de sección compuesta con $10r_1$ fue la más eficiente, logrando una disminución del 55.5 % en la elevación máxima alcanzada. Las chimeneas con orificio de diámetro 0.70 m y 0.80 m mostraron mejoras del 31.3 % y 22.3 %, respectivamente.

Por otro lado, durante los eventos de apertura rápida, la variación en la cota mínima fue un poco menos evidente en las chimeneas con orificio, donde el modelo con orificio de 0.80 m obtuvo una desmejora del 24.8 %, mientras que las chimeneas de sección compuesta apenas modificaron su comportamiento en comparación con la chimenea simple, con mejoras inferiores al 0.1 %, sin embargo revisando sus amplios periodos en comparación, así como su tiempo de estabilización, se podría decir que el choque es menos violento y por lo tanto menos dañino.

Estos resultados evidencian que la inclusión de un orificio puede ser más efectiva para amortiguar descensos de presión, mientras que las secciones compuestas son altamente eficientes para reducir elevaciones de presión tras cierres bruscos del sistema.

Esta reducción en la cota máxima alcanzada es particularmente relevante para el dimensionamiento estructural, dado que permite disminuir considerablemente la altura total requerida para la chimenea. Al reducirse la altura necesaria, disminuyen significativamente los costos asociados a construcción, excavación y materiales, además de facilitar la ubicación del sistema hidráulico en terrenos con limitaciones topográficas.

El incremento en la amplitud total (Δh) de las chimeneas estudiadas respecto a la simple es compensado por períodos de oscilación considerablemente más largos (310 s en la chimenea de 0.7 m y 280 s en la chimenea compuesta $10r_1$ frente a los aproximadamente 90 s en la simple). Esto implica que, aunque se generen desplazamientos más amplios, estos ocurren de forma más gradual, permitiendo una gestión hidráulica más efectiva en términos prácticos y reduciendo riesgos inmediatos en la infraestructura.

En el caso del evento de apertura, nuevamente, aunque la amplitud en los casos estudiados es algo mayor, las cotas máximas obtenidas en ambas configuraciones analizadas (848,839 m y 851,525 m) están dentro de un rango aceptable cercano a la cota máxima obtenida en la chimenea simple (844,957 m). Además, estas chimeneas operan con períodos considerablemente más prolongados (250 s vs 90 s), lo que contribuye a amortiguar significativamente la respuesta hidráulica y minimizar picos de presión que puedan dañar el sistema.

El período prolongado en estos diseños implica menor frecuencia de impacto hidráulico sobre la infraestructura, facilitando así la gestión del flujo y reduciendo los esfuerzos sobre las paredes y el cimientado de la estructura hidráulica. Además, el reducido tiempo de estabilización (550–700 s) en comparación con el evento de cierre garantiza una rápida recuperación del sistema tras la perturbación inicial.

Comparando directamente los datos obtenidos con la chimenea simple, es claro que las configuraciones estudiadas pueden diseñarse con dimensiones menores en altura, al disminuirse la cota máxima esperada para eventos críticos (principalmente en cierre). Esto se traduce en:

- **Menor requerimiento de material constructivo:** la reducción de la altura total implica menor volumen de hormigón o acero requerido, bajando costos significativamente.
- **Mayor facilidad constructiva:** dimensiones más reducidas facilitan los procesos constructivos, generando ahorros importantes en tiempo y recursos humanos.

En síntesis, los resultados del presente estudio validan claramente que, si bien las chimeneas con orificio o de sección compuesta pueden presentar una amplitud de oscilación algo superior en comparación con una chimenea simple, la significativa reducción en las cotas máximas alcanzadas durante eventos críticos justifica ampliamente su implementación, generando ventajas sustanciales en costos, eficiencia hidráulica y seguridad operativa.

5.2 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones establecidas, se plantean las siguientes recomendaciones técnicas y prácticas para futuros estudios, trabajos de titulación y proyectos relacionados con chimeneas de equilibrio y análisis de transitorios hidráulicos:

1. Profundizar en el modelo numérico

El presente estudio utilizó una discretización temporal cada 5 segundos para las simulaciones numéricas. Para estudios futuros se recomienda evaluar otras discretizaciones más finas o adaptativas que puedan mejorar aún más la precisión de los resultados. Asimismo, se sugiere realizar estudios complementarios empleando modelos más complejos, como el modelo inercial-elástico, que permiten considerar la interacción fluido-estructura y evaluar con mayor detalle aspectos dinámicos, especialmente en sistemas hidráulicos más complejos.

2. Optimizar configuraciones geométricas

Dado que las chimeneas de sección compuesta, especialmente aquellas con un radio superior equivalente a $10r_1$, mostraron la mejor eficiencia amortiguadora, se recomienda explorar configuraciones geométricas intermedias que podrían reducir aún más la altura necesaria, conservando niveles adecuados de amortiguación y control hidráulico.

3. Realizar estudios económicos comparativos

Se sugiere llevar a cabo un análisis económico detallado para comparar los costos asociados a cada una de las configuraciones estudiadas. Esto permitirá a los diseñadores tomar decisiones informadas sobre la selección óptima de la configuración desde el punto de vista económico, equilibrando eficiencia hidráulica y costos constructivos.

4. Estudios experimentales y validación en campo

Finalmente, es recomendable llevar a cabo estudios experimentales y pruebas de campo que permitan validar los resultados numéricos obtenidos en este trabajo. Las validaciones empíricas contribuirán a mejorar la confiabilidad del modelo utilizado y a generar mejores prácticas en futuros diseños hidráulicos.

Referencias

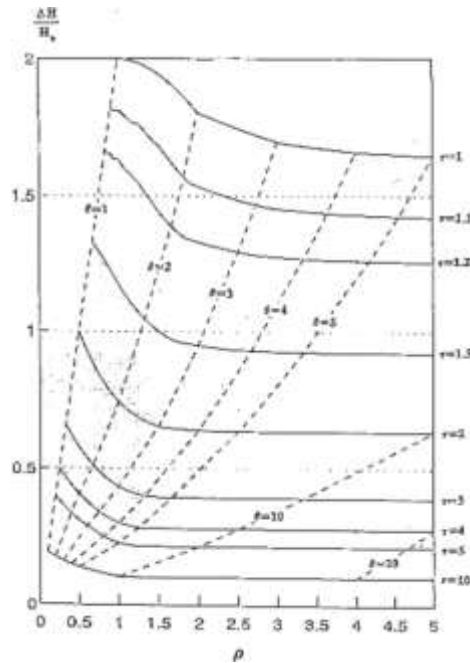
- Abreu, J., Acosta, M., Andreu, A., Cabrera, M., Cataldo, E., Espert, J., Fuertes, V. B., García, V. S., García Serra, A., Guarga, J., Iglesias, R., & Izquierdo, P. I. (1995). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión* (1.ª ed.).
- Alemaný, J., & Navarro, A. (1995). *Ingeniería hidráulica. Volumen II: Transitorios hidráulicos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Bardini, D. (2018). *Direct Simulation of Surge Tank Stability* [MSc thesis]. Norwegian University of Science and Technology.
- Basha, I., & Gharabaghi, B. (2006). *Mechanistic modeling of hydraulic transients in water distribution systems*. 132.
- Boillat, J., & De Souza, P. (2004). *Modélisation des systèmes hydrauliques à écoulements transitoires*. EPFL-LCH.
- Calderon Vasquez, D. N., & Enriquez Paredes, D. F. (s. f.). *DISEÑO Y OPTIMIZACION DE UNA HOJA DE CALCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO*.
- CFE, C. F. de Electricidad. (1981). *Diseño de obras hidráulicas: Chimeneas de equilibrio*. Subdirección de Generación.
- Chaudhry, M. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Co.
- ELECAUSTRO S.A. (s.f.). *Empresa Electro Generadora del Austro*.
- Ferrovial. (s.f.). *Chimeneas de equilibrio en túneles hidráulicos*.
- Gomsrud, D. (2015). *Design of a Surge Tank Throttle for Tonstad Hydropower Plant* [MSc thesis]. Norwegian University of Science and Technology.
- Karney, B. W., & McInnis, D. A. (1992). Transient analysis of water distribution systems. *Journal of the American Water Works Association*, 7.
- Martínez Alzamora, F., Alemany, V. E., & Navarro, V. A. (1995). Chimeneas de equilibrio. El problema de la estabilidad hidráulica en las centrales. En *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión* (p. 762). Imprenta Sichert.

- Pacheco, E. (2019). *Procedimiento simplificado para el dimensionamiento de una chimenea de equilibrio mediante el modelo inercial*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca.
- Pacheco, E., & Carrillo, V. (2024). *Chimenea de equilibrio*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca.
- Ramos, H. M., & Almeida, A. B. (2001). Parametric study of surge tanks performance for water hammer control using a numerical model. *Journal of Hydraulic Research*, 39(4), 429-436.
- Thorley, A. R. D. (2004). *Fluid transients in pipeline systems* (2.^a ed.). ASME Press.
- Torres Delgado, E. M. (2025). *Análisis de transitorios para el diseño o evaluación de una columna piezométrica*.
- Wylie, B., & Streeter, V. L. (1982). *Fluid Transients*. Ann Arbor Science.

Anexos

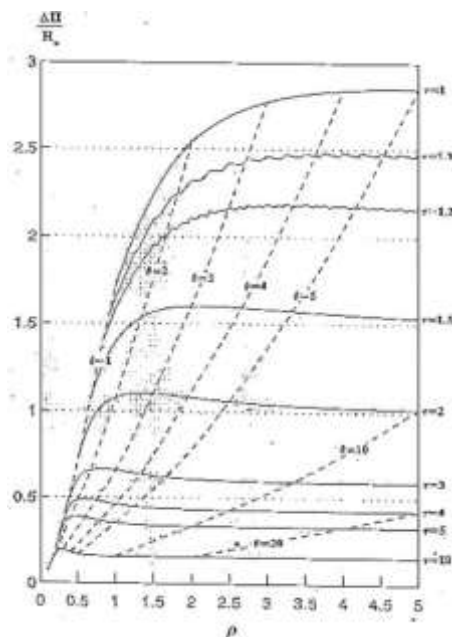
Anexo A:

Figura 27 Fronteras entre modelo rígido y elástico para cierre ($\varphi_0 = 0$) (Abreu et al., 1995)



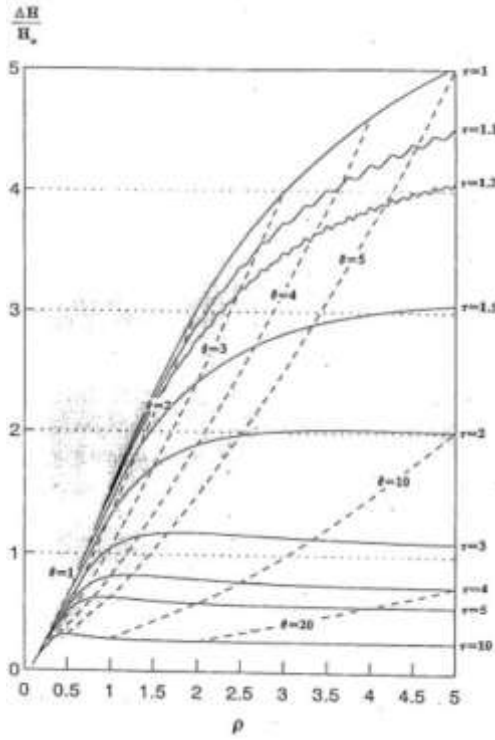
Anexo B:

Figura 28 Fronteras entre modelo rígido y elástico para cierre ($\varphi_0 = 1$) (Abreu et al., 1995)



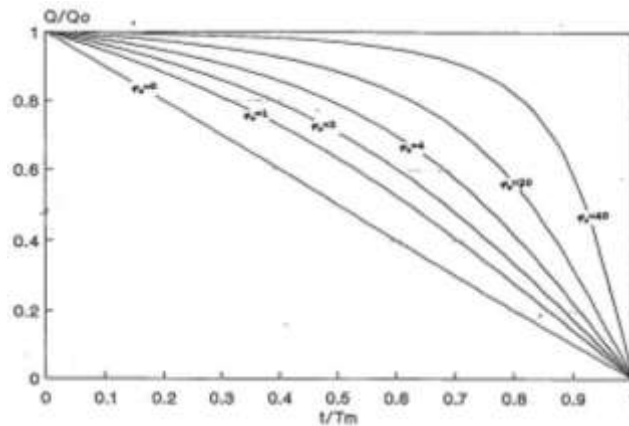
Anexo C:

Figura 29 Fronteras entre modelo rígido y elástico para cierre ($\varphi_0 = 4$) (Abreu et al., 1995)



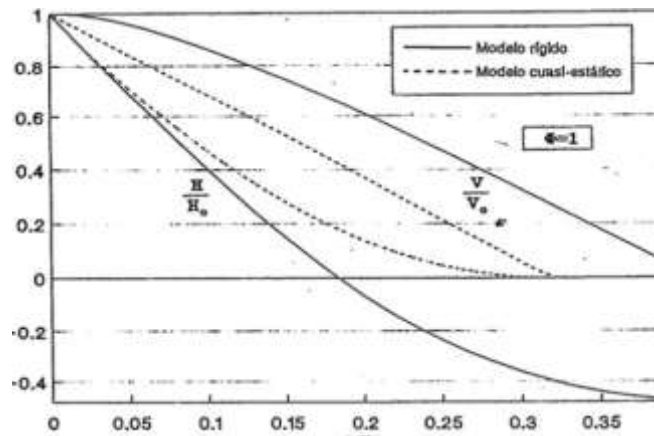
Anexo D:

Figura 30 Variación del caudal en un cierre en función de (φ_0) (Abreu et al., 1995)



Anexo E:

Figura 31 Modelo rígido y cuasi-estático, flujo entre dos depósitos ($\phi = 1$) (Abreu et al., 1995)



Anexo F:

Figura 31 Modelo rígido y cuasi-estático, flujo entre dos depósitos ($\phi = 20$) (Abreu et al., 1995)

