



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

EVALUACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE EN EL
CIRCUITO HIDRÁULICO DE POTENCIA DEL
LABORATORIO DE FLUIDOS DEL ICAI

Autor: Valeria López Otero

Director: Luis Manuel Mochón Castro

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Evaluación del golpe de ariete en el circuito hidráulico de potencia del laboratorio de
fluidos del ICAI

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2019/20 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

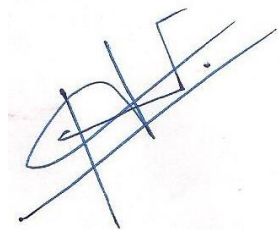


Fdo.: Valeria López Otero

Fecha: 28/ 08/ 2020

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Luis Manuel Mochón Castro

Fecha: 30/08/2020



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

EVALUACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE EN EL CIRCUITO HIDRÁULICO DE POTENCIA DEL LABORATORIO DE FLUIDOS DEL ICAI

Autor: Valeria López Otero

Director: Luis Manuel Mochón Castro

Madrid

Agradecimientos

A mi director Luis Mochón Castro, por la formación que me ha procurado durante estos años, además de haber sido mi guía y mi estímulo durante la redacción del TFG.

A mi madre, gracias a quien soy, sólo puedo expresar mi sincero agradecimiento por apoyarme durante la etapa académica, por haber fomentado el desarrollo de mi curiosidad y por su dedicación a sus hijas.

EVALUACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE EN EL CIRCUITO HIDRÁULICO DE POTENCIA DEL LABORATORIO DE FLUIDOS DEL ICAI

Autor: Lopez Otero, Valeria.

Director: Mochón Castro, Luis.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: Golpe de Ariete, Régimen transitorio, Régimen Permanente, Central hidráulica, Turbina Pelton, Turbina Francis, Turbina Kaplan, Bomba Weise, Bomba Emica, Circuito hidráulico, Altura Piezométrica, Presión, Envolvente de alturas piezométricas, Envolvente de presiones, Celeridad, perturbación, equilibrio, caudal.

1. Introducción

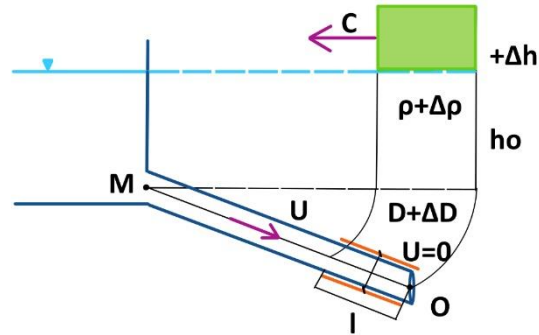
Debido a variaciones en las condiciones de operación de un sistema se originan transitorios hidráulicos. Las perturbaciones sobre un sistema en equilibrio provocan un régimen transitorio que va evolucionando hasta estabilizarse de nuevo.

Un sistema en equilibrio tiene un caudal y presión determinados en cada uno de los puntos del sistema. Una perturbación induce cambios en el sistema, oscilaciones de presión que se atenúan con el tiempo. Una vez se alcance de nuevo el equilibrio, las condiciones no tienen por qué coincidir con las iniciales.

La magnitud de esta perturbación determina la velocidad de transitorio y por lo tanto su efecto. Los cambios bruscos en la velocidad de la tubería son originados por maniobras rápidas, y sus consecuencias pueden llegar a ser graves, por ello se realiza un análisis exhaustivo. A este fenómeno se le denomina golpe de ariete, cuando la variación de presiones es tal que da lugar a oscilaciones grandes. Se trata de un caso particular de transitorios.

El proceso transitorio se da en 4 fases:

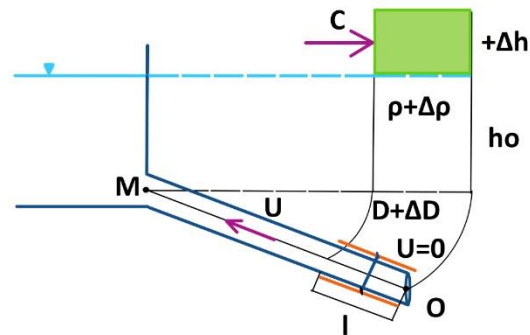
- Primera fase: La válvula se encuentra totalmente cerrada, el agua comienza a detenerse en las inmediaciones del punto O ($U=0$).



$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{l}{c}$$

Figura 1. Propiedades de la Primera fase del golpe de ariete

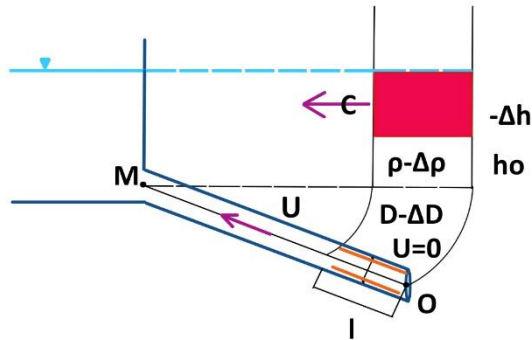
- Segunda fase: El agua comienza a volver al depósito, la celeridad tiene dirección opuesta.



$$t = t_0 + \frac{L}{c} + \frac{l}{c}$$

Figura 2. Propiedades de la Segunda fase del golpe de ariete

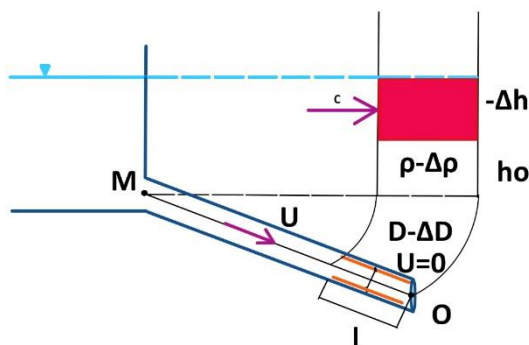
- Tercera fase: Las partículas de agua tienen una velocidad U hacia el depósito que el caudal no puede mantener, por lo que a medida que avanza la onda las partículas de agua tendrán una velocidad nula.



$$t = t_0 + \frac{2L}{c} + \frac{l}{c}$$

Figura 3. Propiedades de la Tercera fase del golpe de ariete

- Cuarta fase: El agua de la tubería comienza su movimiento aguas abajo con velocidad U , el incremento de presión que experimenta la tubería en este caso es positivo, por lo que se recupera la altura piezométrica inicial del depósito.



$$t = t_0 + \frac{3L}{c} + \frac{l}{c}$$

Figura 4. Propiedades de la Cuarta fase del golpe de ariete

Las consecuencias de los transitorios pueden ser:

- Presiones excesivas: Las ondas de presión pueden llegar a alcanzar dimensiones que provoquen la rotura de las tuberías, este problema se incrementa en los puntos débiles que están parcialmente corroídos.
- Presiones inferiores a la atmosférica: Una tubería está diseñada para trabajar bajo presión, por lo tanto, resiste acción axial o circunferencial, no están preparadas para presiones negativas, dado que este caso no se suele contemplar.
- Presiones inferiores a la tensión de vapor: Da lugar a la separación de columna líquida. Si se alcanza la presión de vapor de líquido en algún punto de la tubería, el fluido entraría en ebullición, creando una bolsa de vapor en el interior de la conducción, que colapsa de forma brusca. También denominado cavitación.

Con el fin de mitigar los transitorios y, por lo tanto, reducir sus consecuencias, en algunos casos catastróficas, se puede proponer la instalación de dispositivos de protección en el circuito hidráulico. Los dispositivos de acción indirecta actúan una vez se ha producido el transitorio con el fin de mitigar sus efectos. Sus características se eligen en función de las necesidades de protección del sistema:

- Calderín: Actúa como un colchón a modo de resorte, amortiguando las oscilaciones de presión. Se trata de un depósito con fluido y un gas (aire o nitrógeno) cuya presión está determinada en función del circuito, y es la que va a definir su actuación.

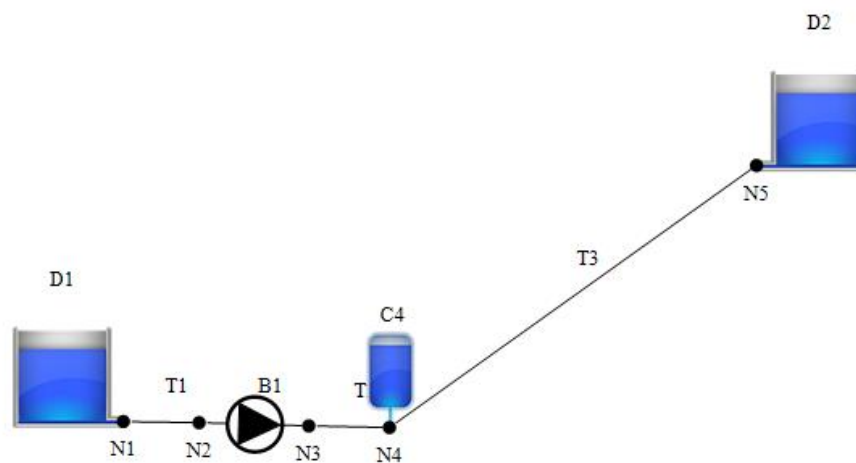


Figura 5. Circuito con calderín

- Chimeneas de equilibrio: Especialmente útil en estaciones de bombeo con poca altura de impulsión y con una tubería de gran longitud o que tenga algún punto elevado en su perfil. Su función es similar a la de un calderín, pero abierto por la atmósfera. Tanque abierto, por lo tanto, donde este colocado impone que la presión sea la altura piezométrica del nivel de agua en su interior, impidiendo valores negativos.

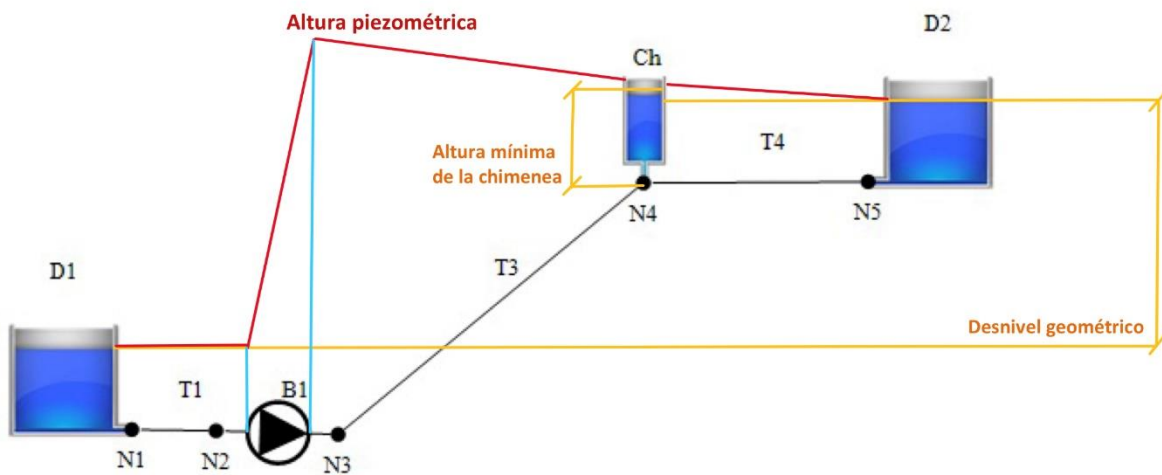


Figura 6. Circuito con chimenea de equilibrio

- Tanques unidireccionales: Se trata de un dispositivo de protección similar a la chimenea de equilibrio, pero con una válvula de retención que impide el flujo de entrada. Controlando las depresiones, al aportar agua al sistema, pero no las sobrepresiones.

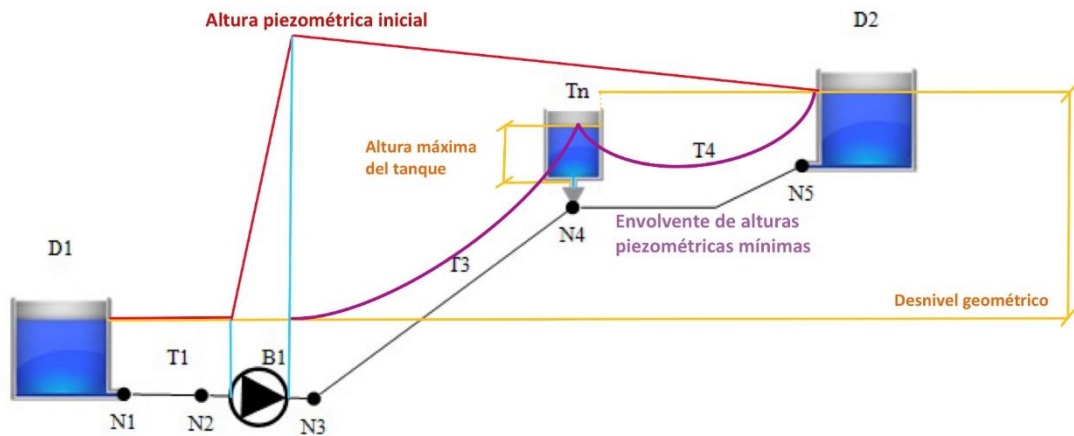


Figura 7. Circuito con tanque unidireccional

- Ventosa: Se pueden disponer a lo largo de una tubería y permiten controlar las depresiones en su entorno de influencia. Cuando la presión cae por debajo de la atmosférica se permite la entrada de aire en la conducción. De esta manera se evita que las presiones descieran por debajo de la atmosférica.

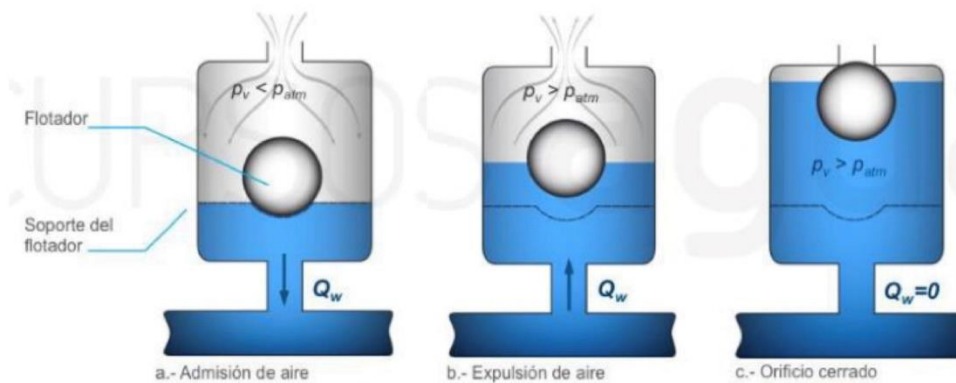


Figura 8. Fases de las ventosas

Otras opciones para mitigar transitorios son: aumentar la resistencia mecánica del sistema o aumentar los tiempos de maniobra. Pero ninguna de estas dos opciones es factible

dado que el circuito ya está diseñado y que los golpes de ariete de alta intensidad han sido causados por maniobras rápidas involuntarias.

2. Definición del proyecto

En este trabajo se realiza un estudio de cinco circuitos hidráulicos, y cómo la parada repentina de la bomba o un cierre brusco de una válvula puede afectar a los distintos elementos del sistema.

Para el análisis de transitorios hidráulicos es necesario el uso de software avanzado. El Programa usado para analizar las distintas situaciones es Allievi. La forma más efectiva de analizar un transitorio es a través de la simulación.

Los circuitos son los siguientes:

- Canal con bomba Weise

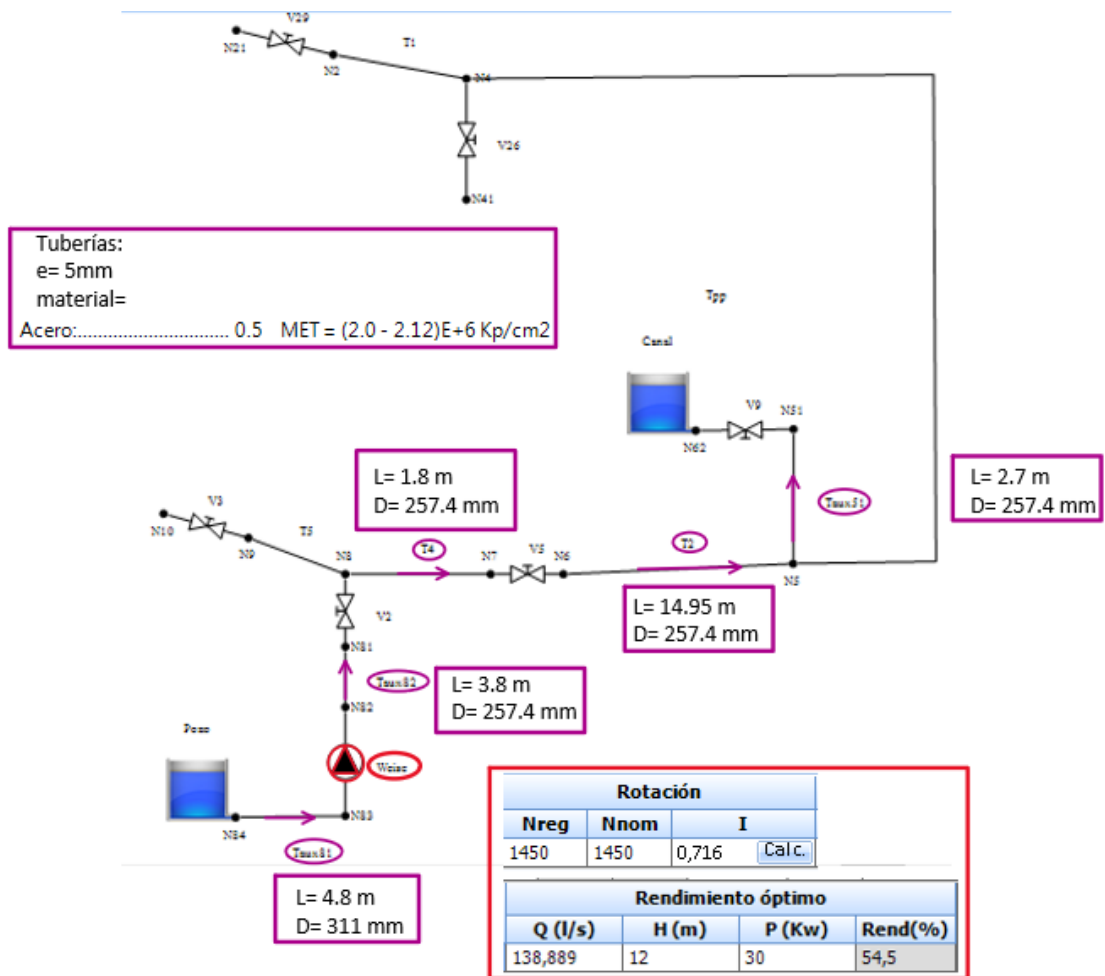


Figura 9. Circuito 1, Canal con Bomba Weise

- Canal con bomba Emica

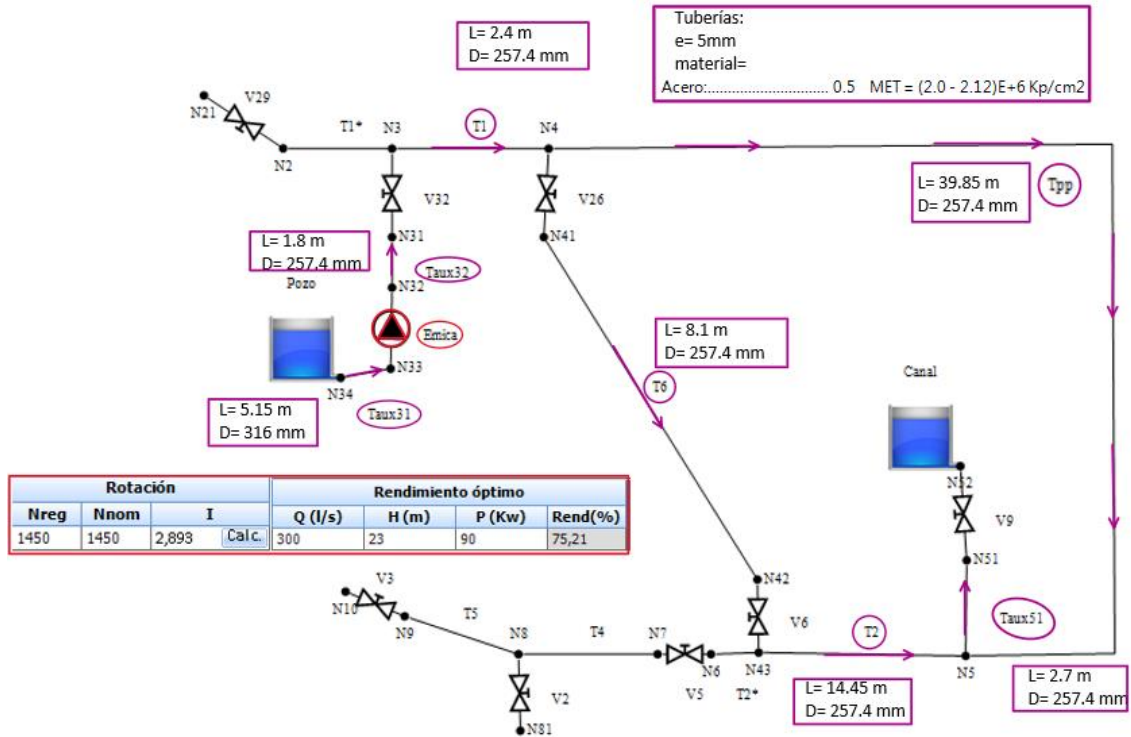


Figura 10. Circuito 2, Canal con Bomba Emica

- Turbina Kaplan con bomba Weise

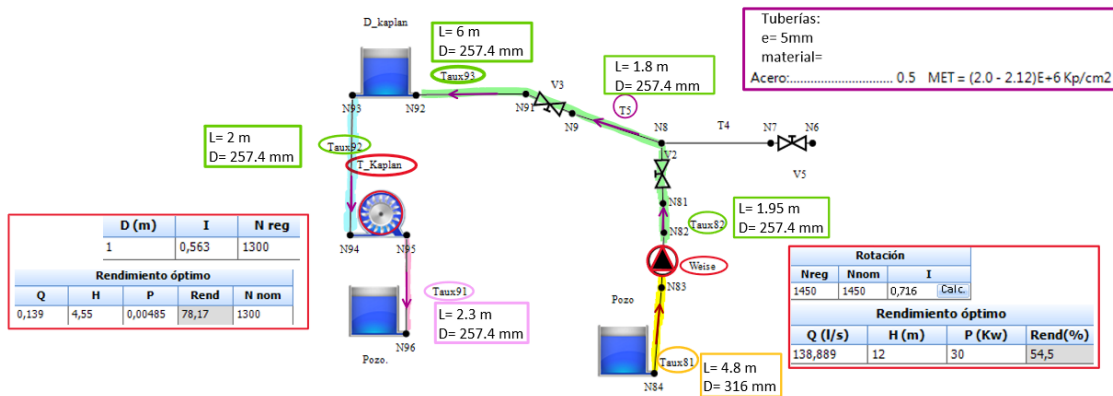


Figura 11. Circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise

- Turbina Pelton con bomba sumergida

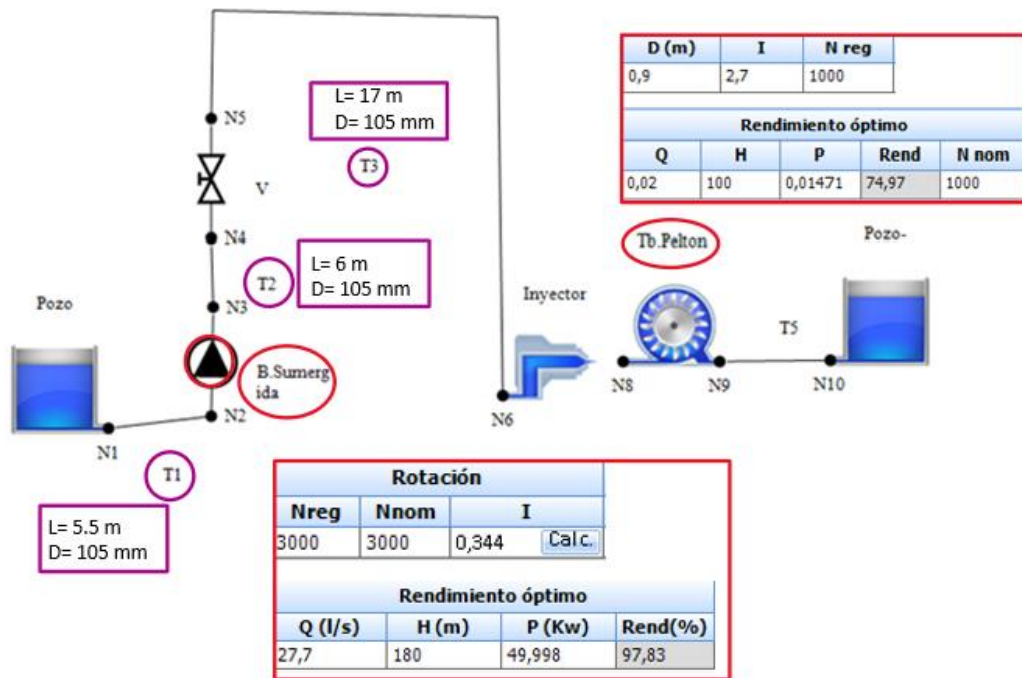


Figura 12. Circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida

- Turbina Francis con salto de agua

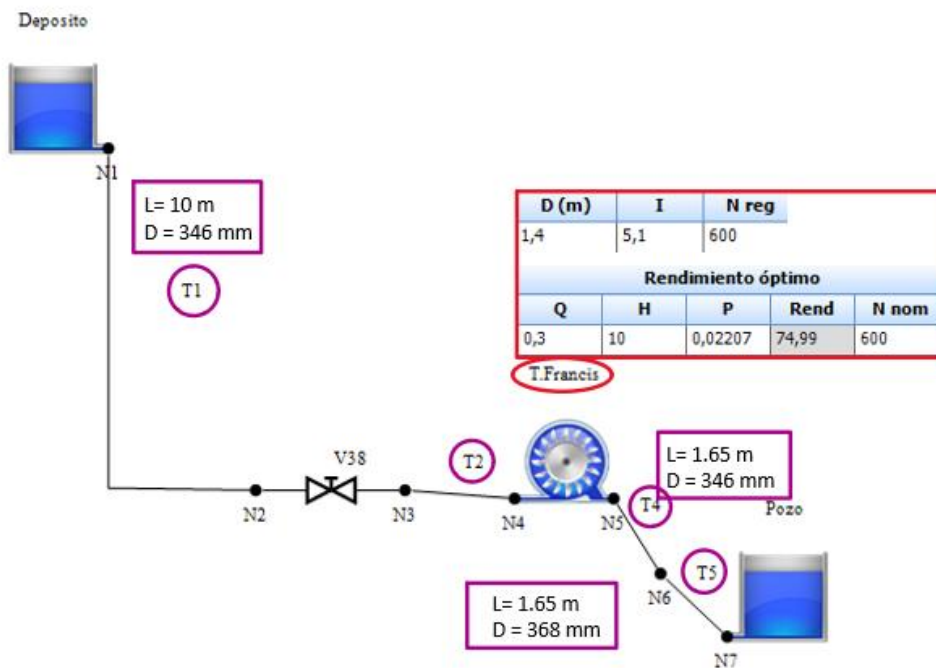


Figura 13. Circuito 5, Turbina Francis con salto de agua

3. Resultados

- Canal con bomba Weise

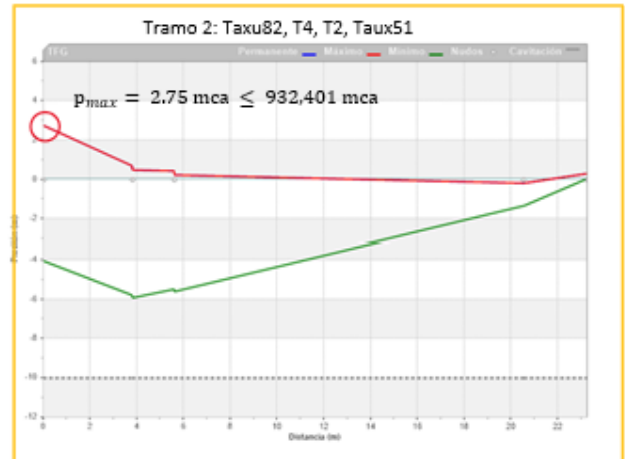
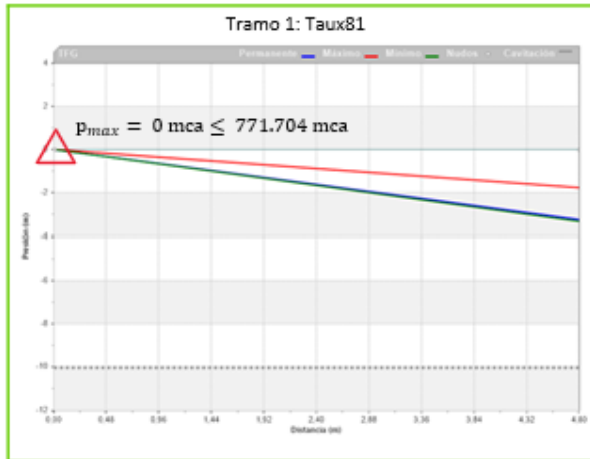


Figura 14. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise

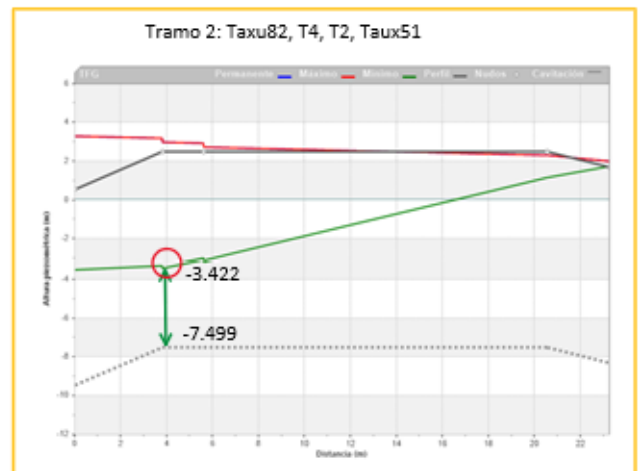
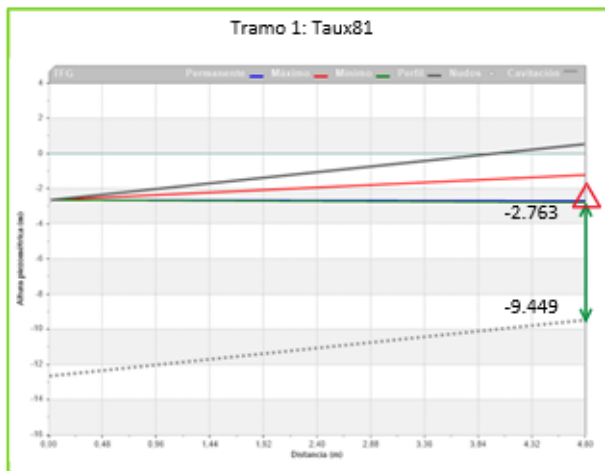


Figura 15. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise

- Canal con bomba Emica

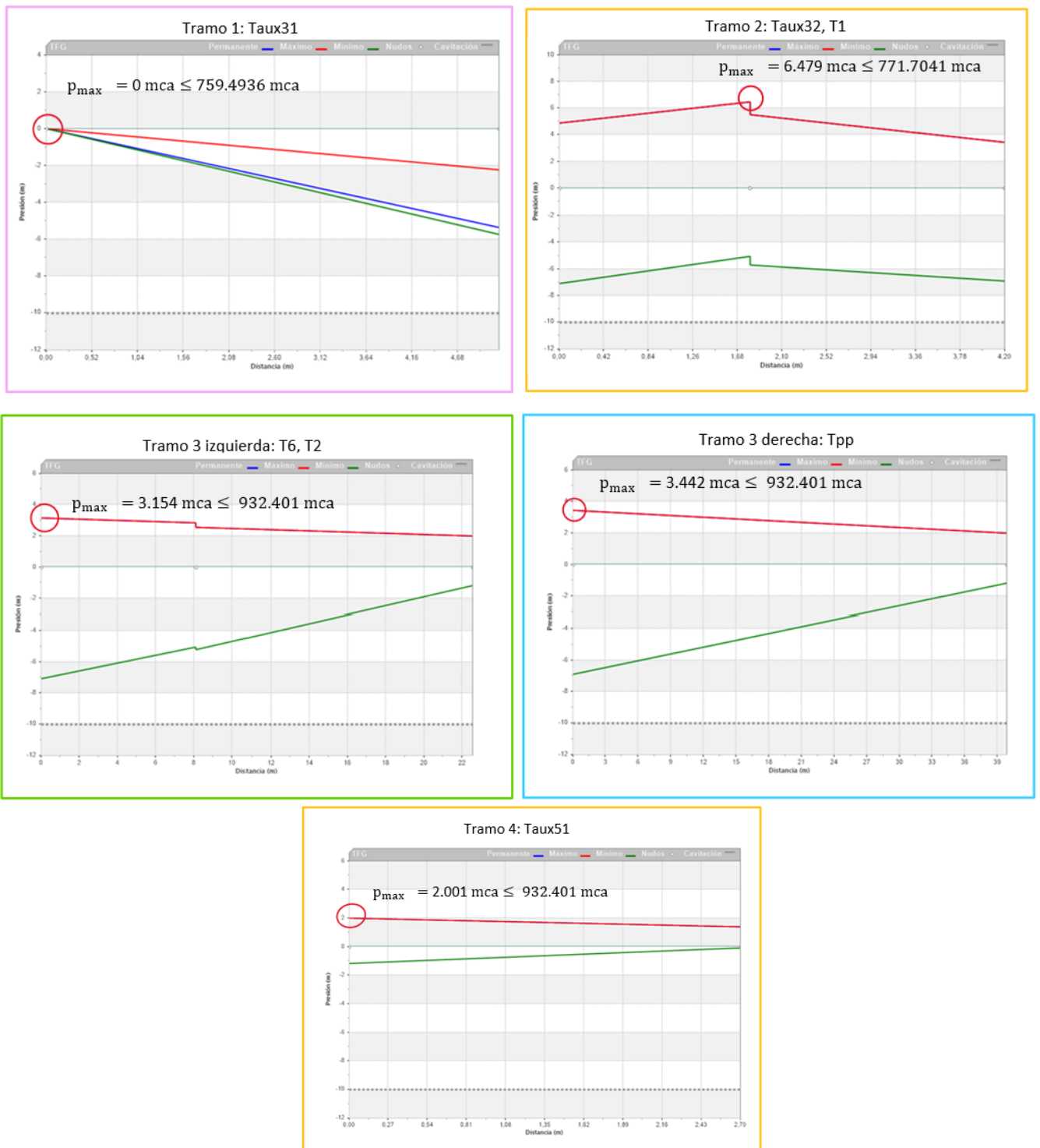


Figura 16. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica

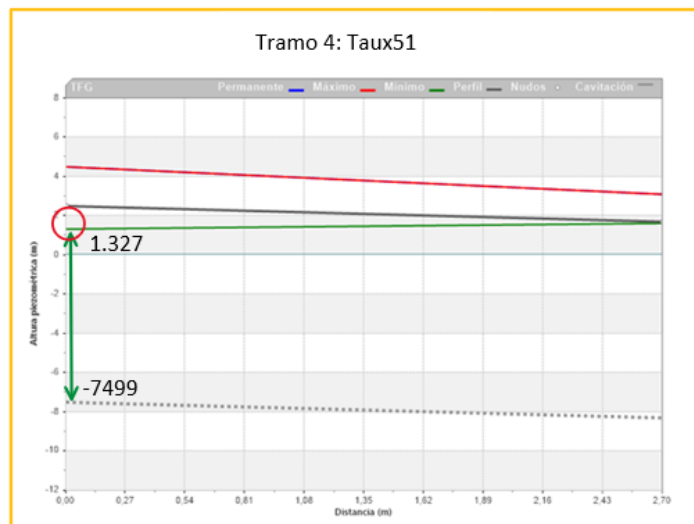
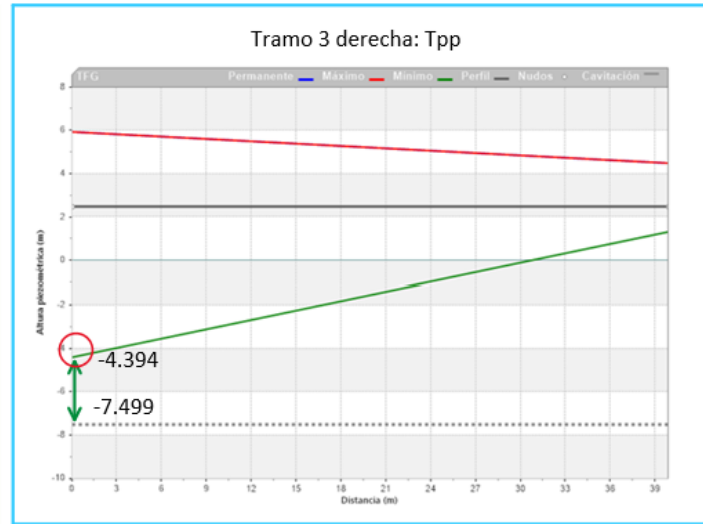
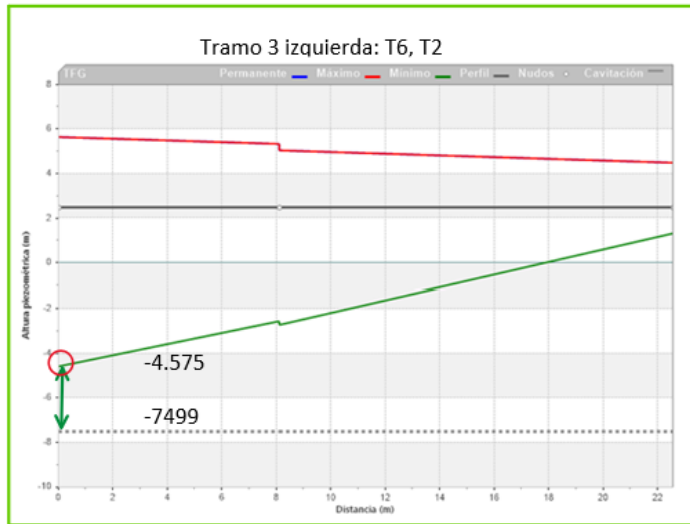
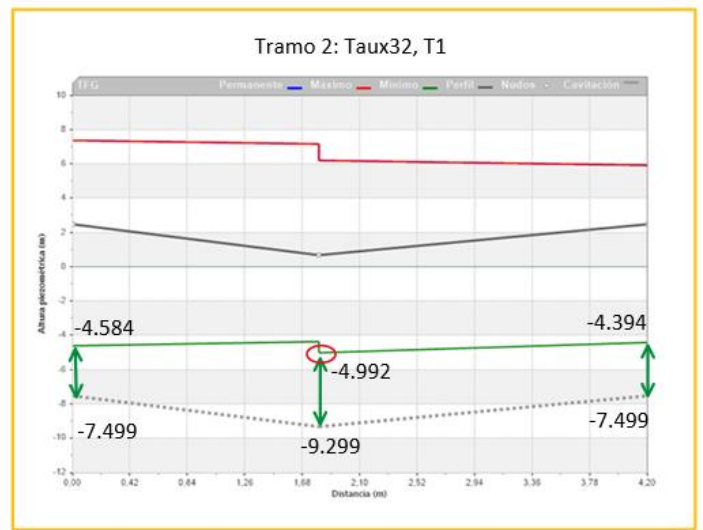
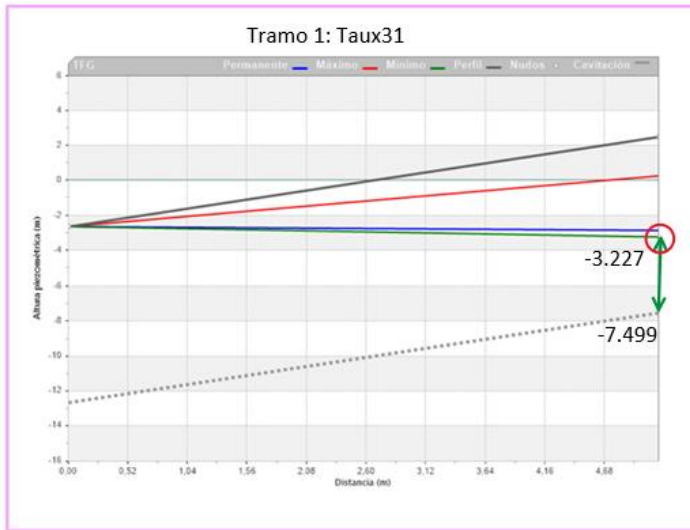


Figura 17. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica

- Turbina Kaplan con bomba Weise



Figura 18. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise

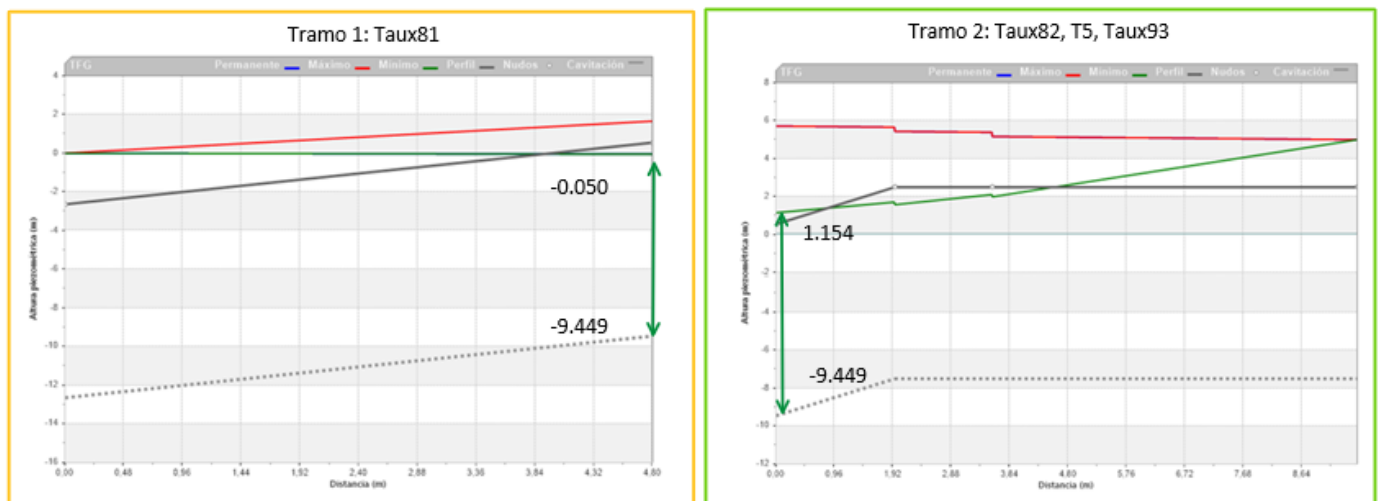


Figura 19. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise

- Turbina Pelton con bomba Sumergida

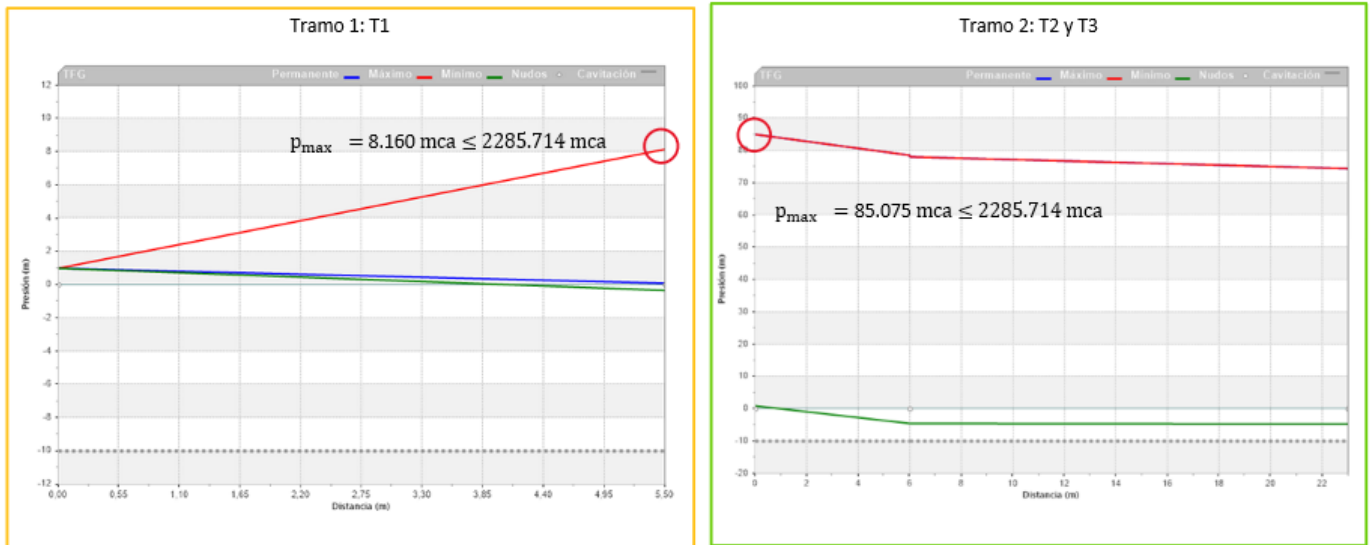


Figura 20. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida

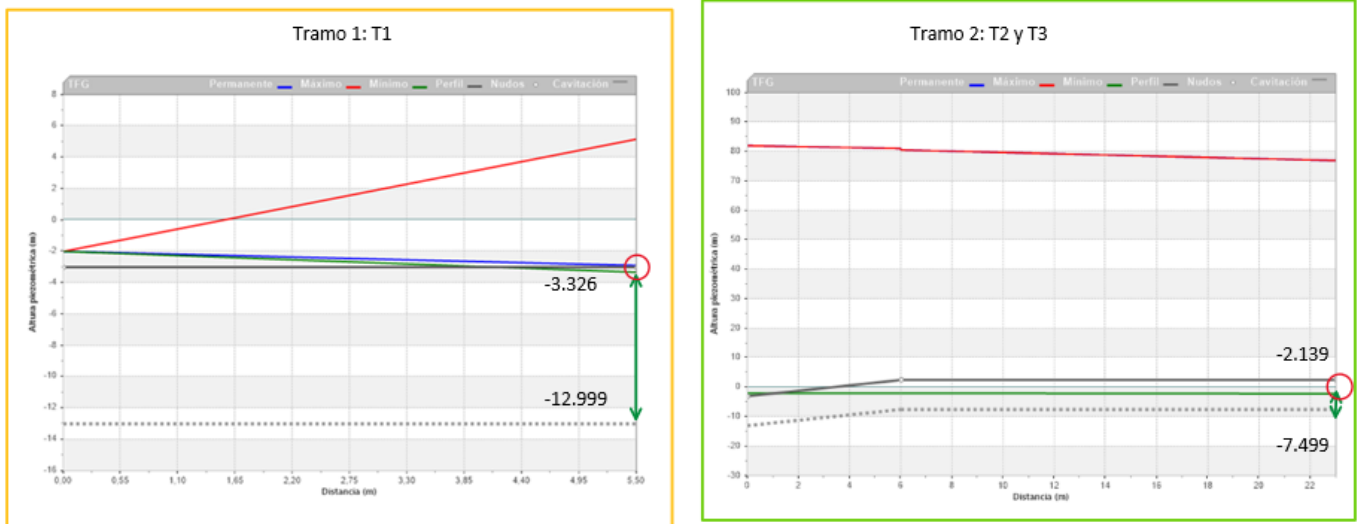


Figura 21. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida

- Turbina Francis con salto de agua

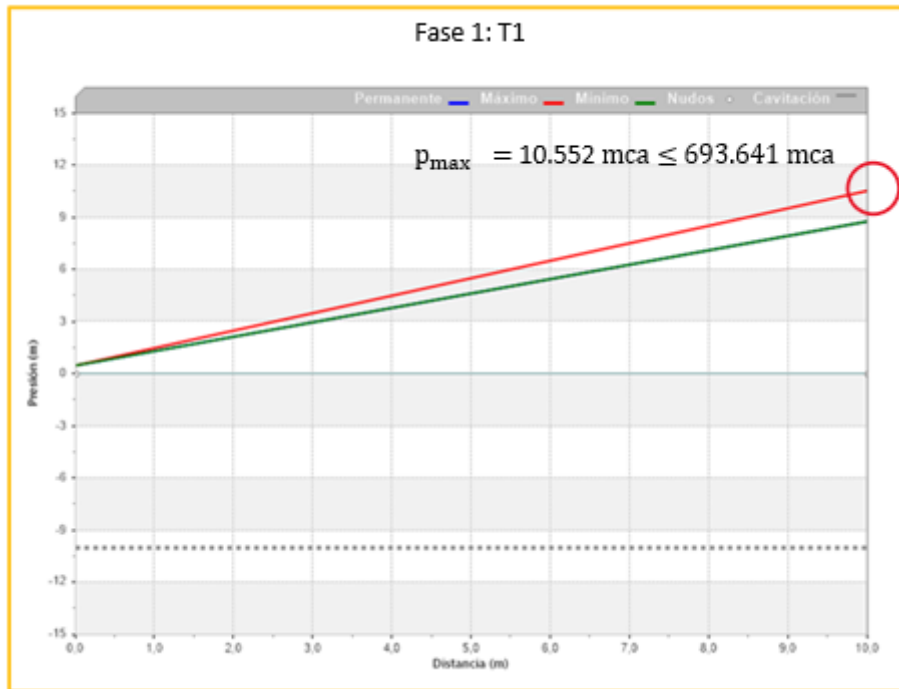


Figura 22. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua

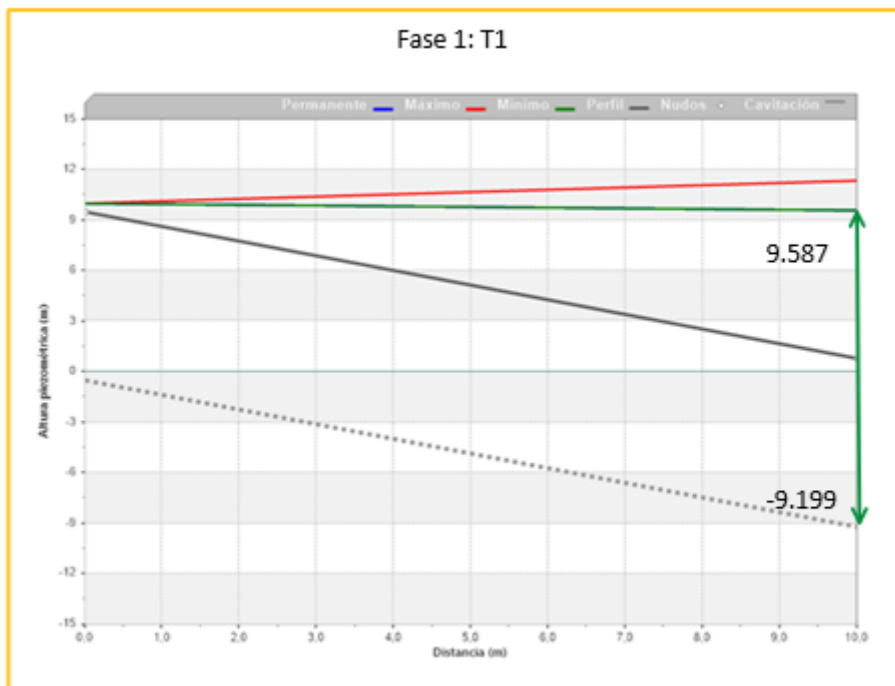


Figura 23. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua

El proceso y la conclusión en la misma en los cinco circuitos:

Se compara la altura piezométrica mínima con la de cavitación y en ninguno de los casos hay peligro de implosión, asimismo se comprueba la presión máxima y se comprueba que es menor a la que puede llegar a soportar la tubería, que ha sido hallada dado que conocemos el material el diámetro y el espesor.

4. Conclusiones

Los estudios realizados en el presente proyecto demuestran que la instalación presenta seguridad intrínseca frente a fallos de grandes dimensiones (rotura o colapso de tuberías, rotura de válvulas, etc.) por golpes de ariete, pero la experiencia de uso demuestra que sí presenta riesgo por daños puntuales (perforación de tuberías).

Es por ello que se sugiere como medida de protección frente a la perforación puntual de tuberías ante golpe de ariete, la instalación de ventosas dispuestas cada 3 metros por toda la instalación del laboratorio.

EVALUATION OF THE HAMMER IN THE HYDRAULIC POWER CIRCUIT OF THE ICAI FLUID LABORATORY

Author: Lopez Otero, Valeria.

Supervisor: Mochón Castro, Luis.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: Water Hammer, Transient Regime, Permanent Regime, Hydraulic Power Plant, Pelton Turbine, Francis Turbine, Kaplan Turbine, Weise Pump, Emica Pump, Hydraulic Circuit, Piezometric Head, Pressure, Piezometric Height Envelope, Pressure Envelope, Celerity, Disturbance, Equilibrium, flow.

1. Introduction

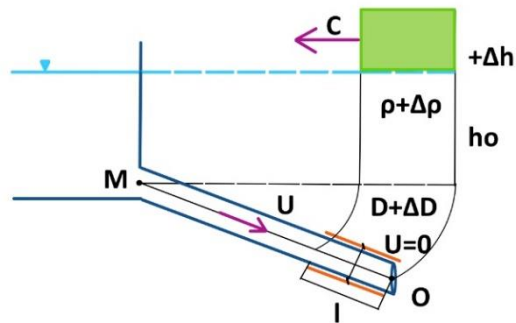
Due to variations in the operating conditions of a system, hydraulic transients arise. The disturbances on a system in equilibrium cause a transitory regime that evolves until it stabilizes again.

A system in equilibrium has a certain flow and pressure at each point in the system. A disturbance induces changes in the system, pressure oscillations that attenuate with time. Once equilibrium is reached again, the conditions do not have to coincide with the initial ones.

The magnitude of this disturbance determines the transient speed and therefore its effect. Sudden changes in the speed of the pipe are caused by rapid manoeuvres, and their consequences can be serious, so an exhaustive analysis is carried out. This phenomenon is called water hammer, when the pressure variation is such that it gives rise to large oscillations. It is a particular case of transients.

The transitional process occurs in 4 phases:

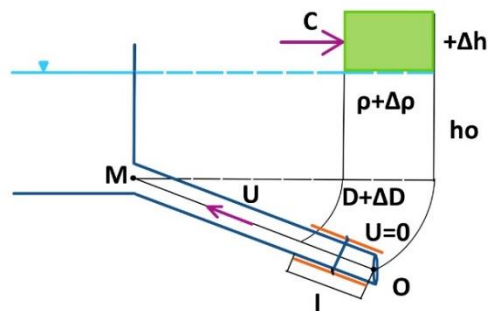
- First phase: The valve is completely closed; the water begins to stop in the vicinity of point O ($U = 0$).



$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + L / c$$

Figura 24. Properties of the first phase of water hammer

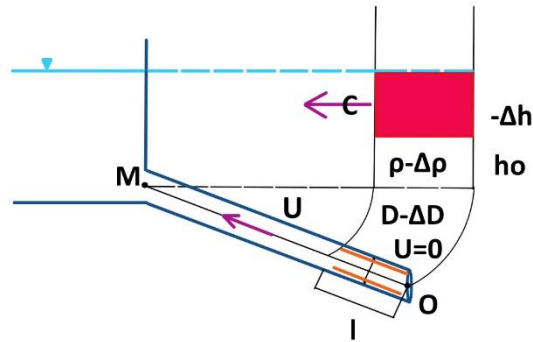
- Second phase: The water begins to return to the tank; the speed has the opposite direction.



$$t = t_0 + L / c + 1 / c$$

Figura 25. Properties of the second phase of water hammer

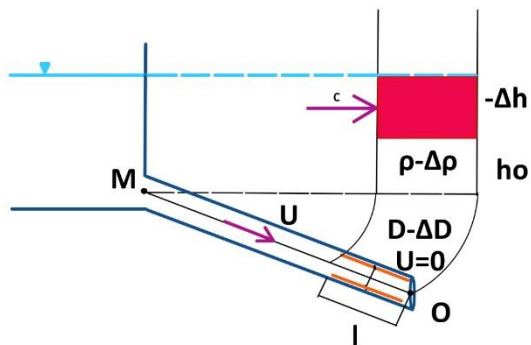
- Third phase: The water particles have a velocity U towards the reservoir that the flow cannot maintain, so as the wave progresses the water particles will have zero velocity.



$$t = t_0 + 2L / c + 1 / c$$

Figura 26. Properties of the third phase of water hammer

- Fourth phase: The water in the pipe begins its downstream movement with speed U , the increase in pressure experienced by the pipe in this case is positive, so the initial piezometric height of the reservoir is recovered.



$$t = t_0 + 3L / c + 1 / c$$

Figura 27. Properties of the fourth phase of water hammer

The consequences of transients are:

- Excessive pressures: The pressure waves can reach dimensions that cause the pipes to break, this problem increases in weak points that are partially corroded.
- Pressures below atmospheric: A pipe is designed to work under pressure, therefore, it resists axial or circumferential action, they are not prepared for negative pressures, since this case is not usually considered.
- Pressures lower than vapor pressure: It leads to the separation of the liquid column. If the vapor pressure of the liquid is reached at some point in the pipe, the fluid will boil, creating a pocket of vapor inside the pipe, which collapses abruptly. Also called cavitation.

In order to mitigate transients and therefore reduce their consequences, in some cases catastrophic, the installation of protection devices in the hydraulic circuit can be proposed. Indirect action devices act once the transient has occurred in order to mitigate its effects. Its characteristics are chosen based on the protection needs of the system.

- Boiler: It acts as a spring-like mattress, cushioning pressure oscillations. It is a tank with fluid and a gas (air or nitrogen) whose pressure is determined according to the circuit, and is what will define its performance.

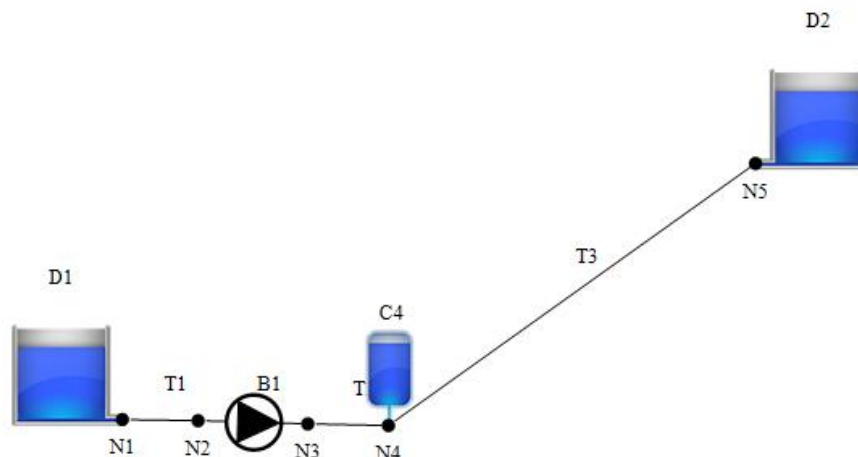


Figura 28. Circuit with boiler

- Balancing chimneys: Especially useful in pumping stations with low discharge heads and with a long pipe or one that has a high point in its profile. Its function is similar to that of a boiler, but opened by the atmosphere. Therefore, an open tank where it is placed imposes that the pressure be the piezometric height of the water level inside, preventing negative values.

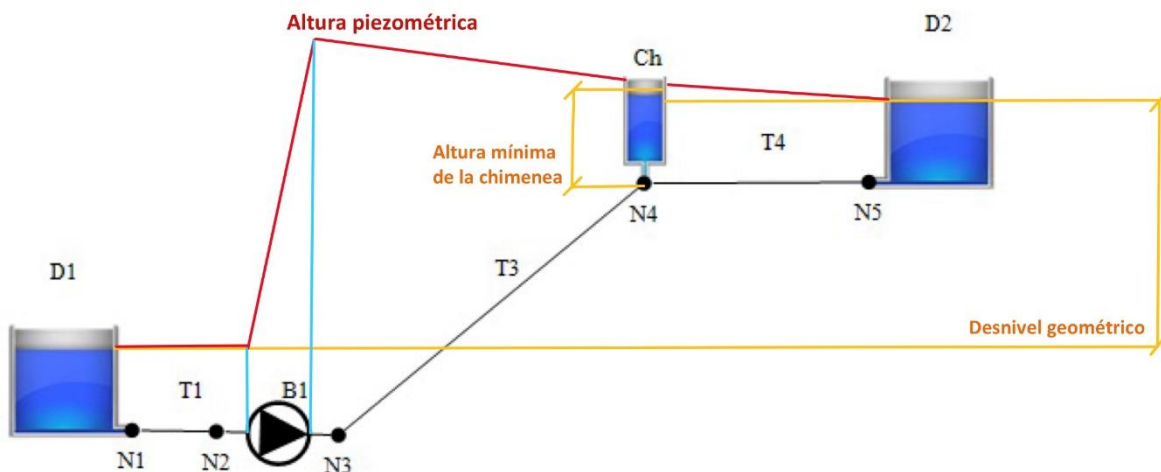


Figura 29. Circuit with balancing chimney

- One-way tanks: This is a protection device similar to the balance chimney, but with a check valve that prevents the inflow. Controlling depressions, by providing water to the system, but not overpressures.

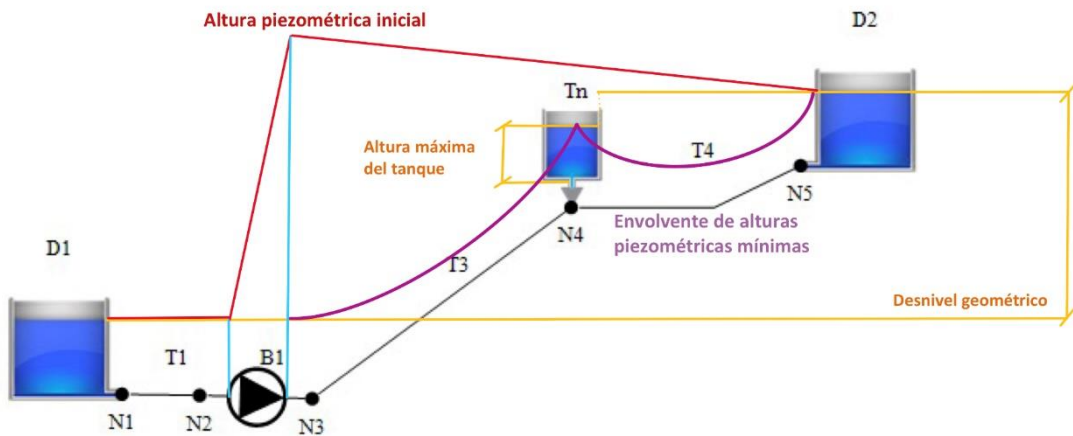


Figura 30. Circuit with unidirectional tank

- Suction cup: The suction cups can be placed along a pipe and allow to control the depressions in their environment of influence. When the pressure drops below atmospheric, air is allowed to enter the conduit. This prevents pressures from dropping below atmospheric.

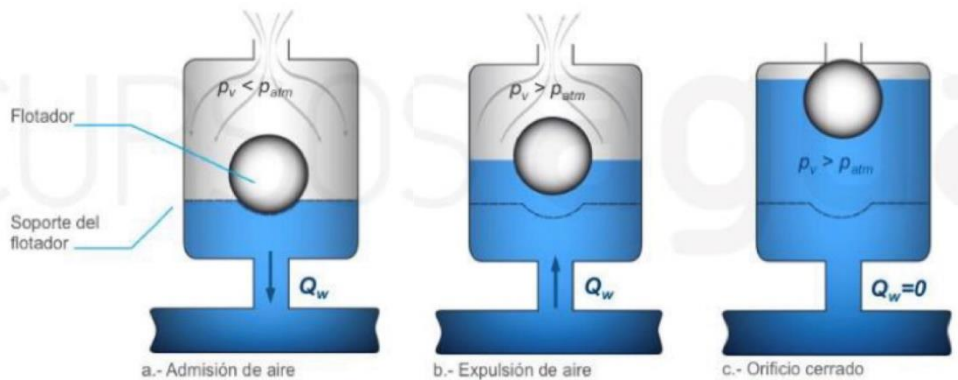


Figura 31. Phases of the suction cups

Other options to mitigate transients are: increase the mechanical resistance of the system or increase maneuver times. But neither of these two options is feasible given

that the circuit is already designed and that water hammer is caused by involuntary maneuvers.

2. Definition del project

In this work a study of five hydraulic circuits is carried out, and how the sudden stop of the pump or a sudden closing of a valve can affect the different elements of the system.

For the analysis of hydraulic transients the use of advanced software is necessary. The Program used to analyze the different situations is Allievi. The most effective way to analyze a transient is through simulation.

The circuits are as follows:

- Channel with Weise pump

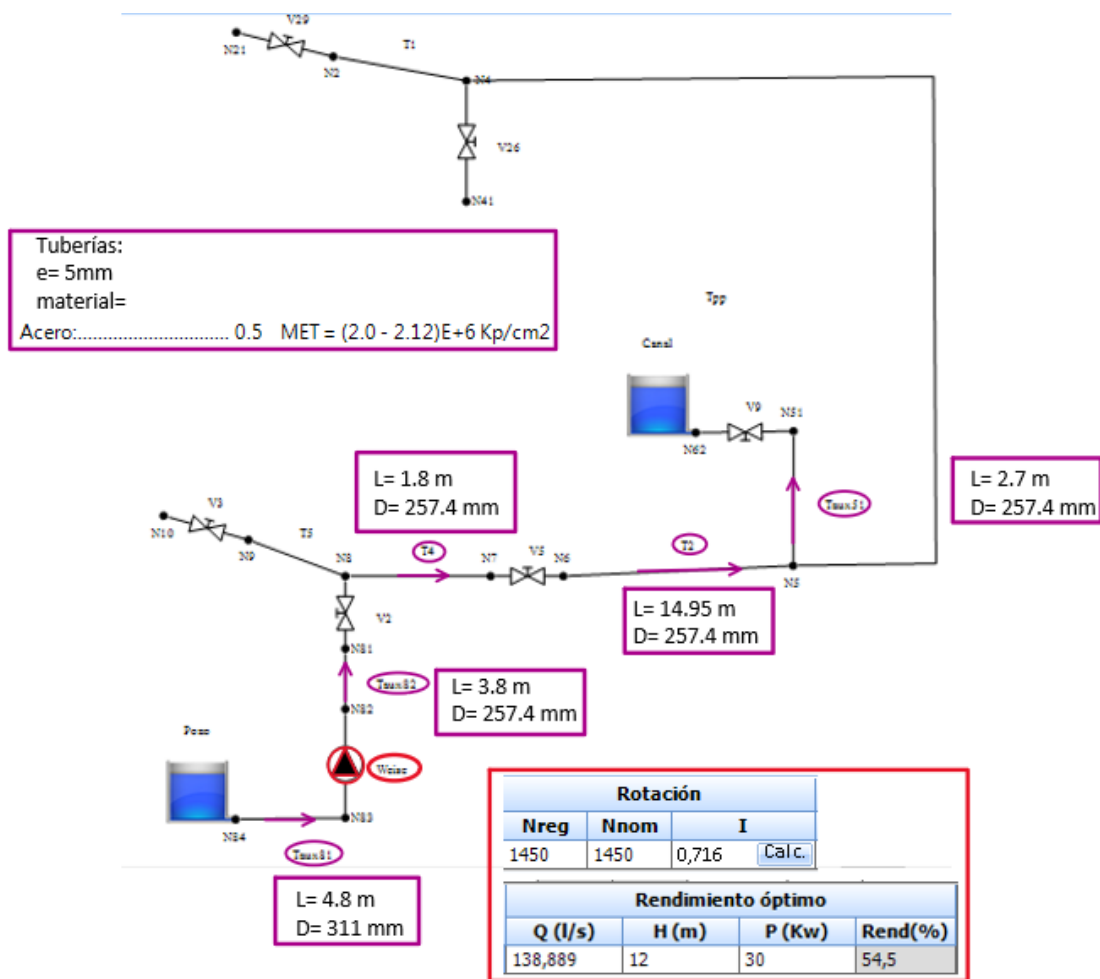


Figura 32. Circuit 1, Channel with Weise Pump

- Channel with Emica pump

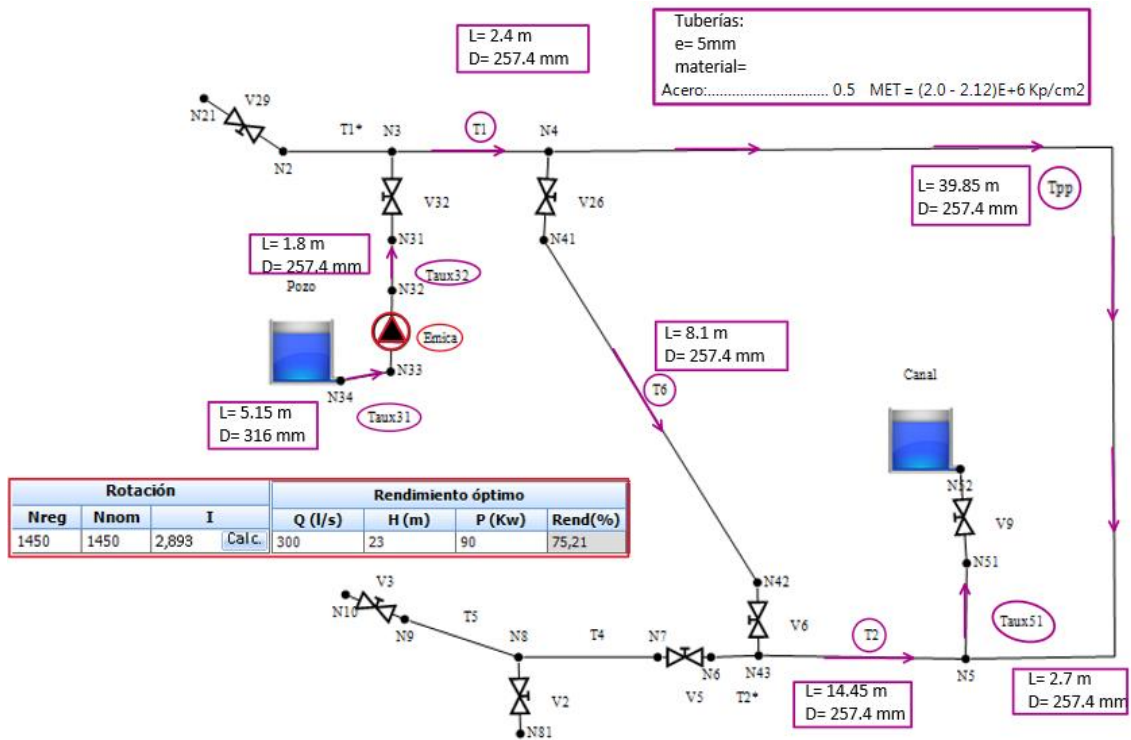


Figura 33. Circuit 2, Channel with Emica Pump

- Kaplan turbine with Weise pump

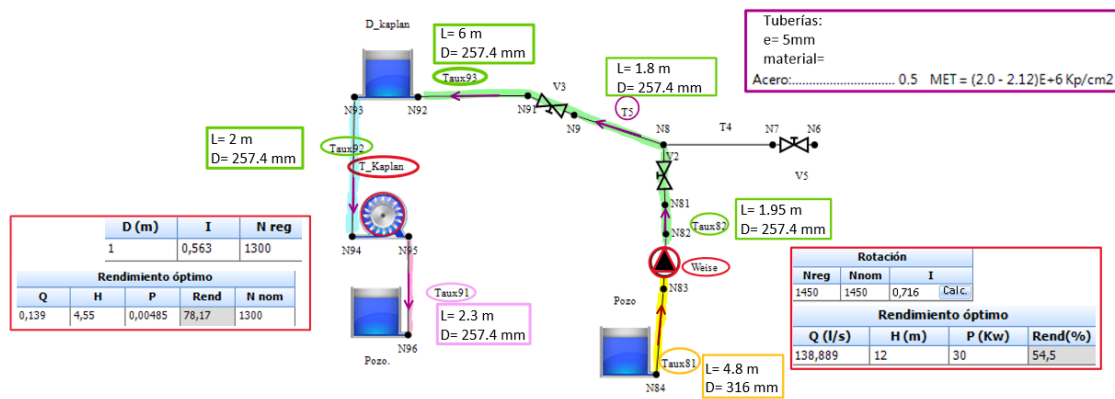


Figura 34. Circuit 3, Kaplan Turbine with Weise Pump

- Pelton turbine with submerged pump

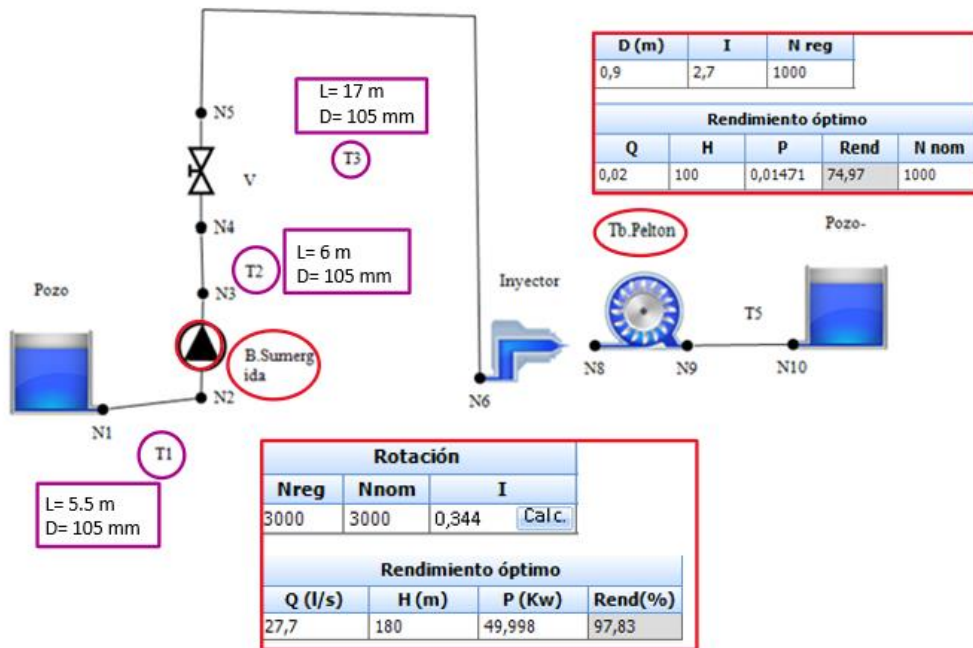


Figura 35. Circuit 4, Pelton Turbine with submerged pump

- Francis turbine with waterfall

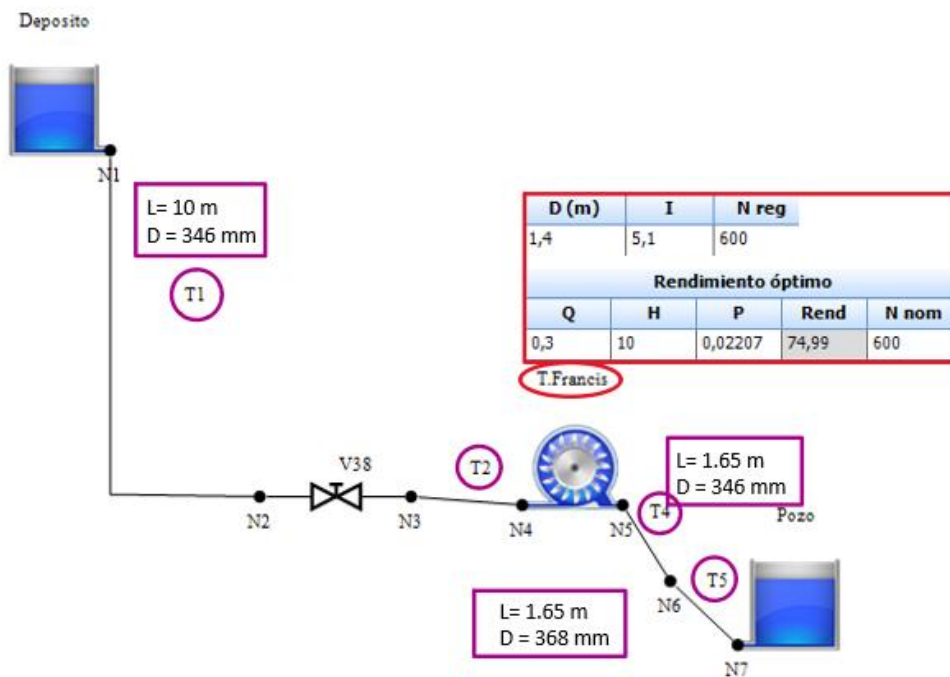


Figura 36. Circuit 5, Francis Turbine with waterfall

3. Results

- Channel with Weise pump

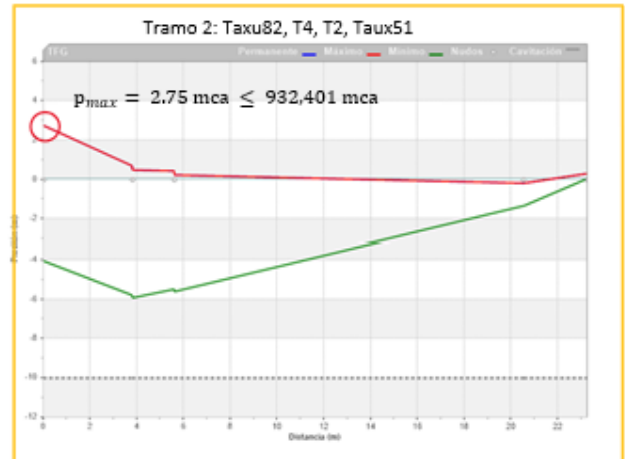
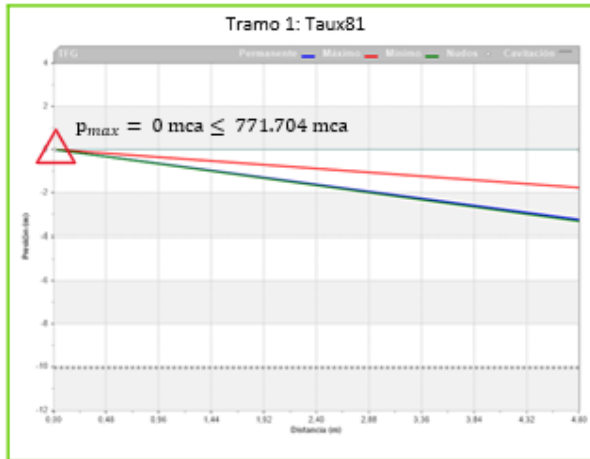


Figura 37. Transient regime: Overpressures, circuit 1, Channel with Weise Pump

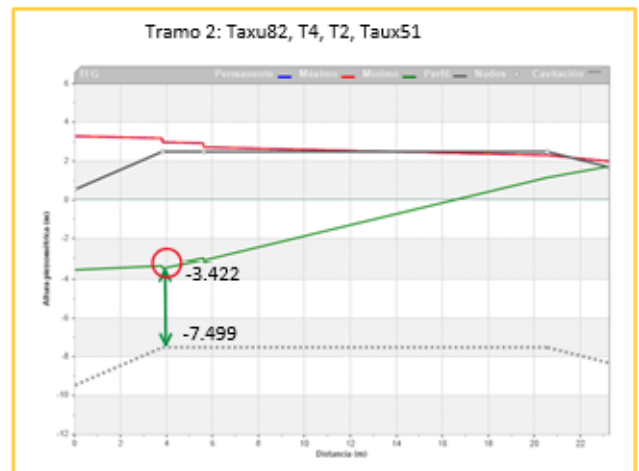
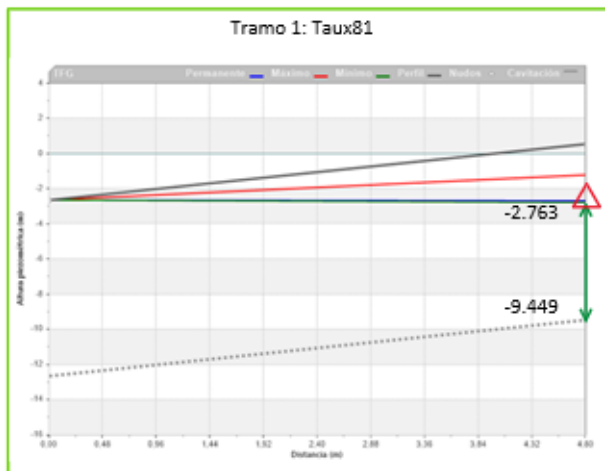


Figura 38. Transient regime: Depressions, circuit 1, Channel with Weise Pump

- Canal con bomba Emica

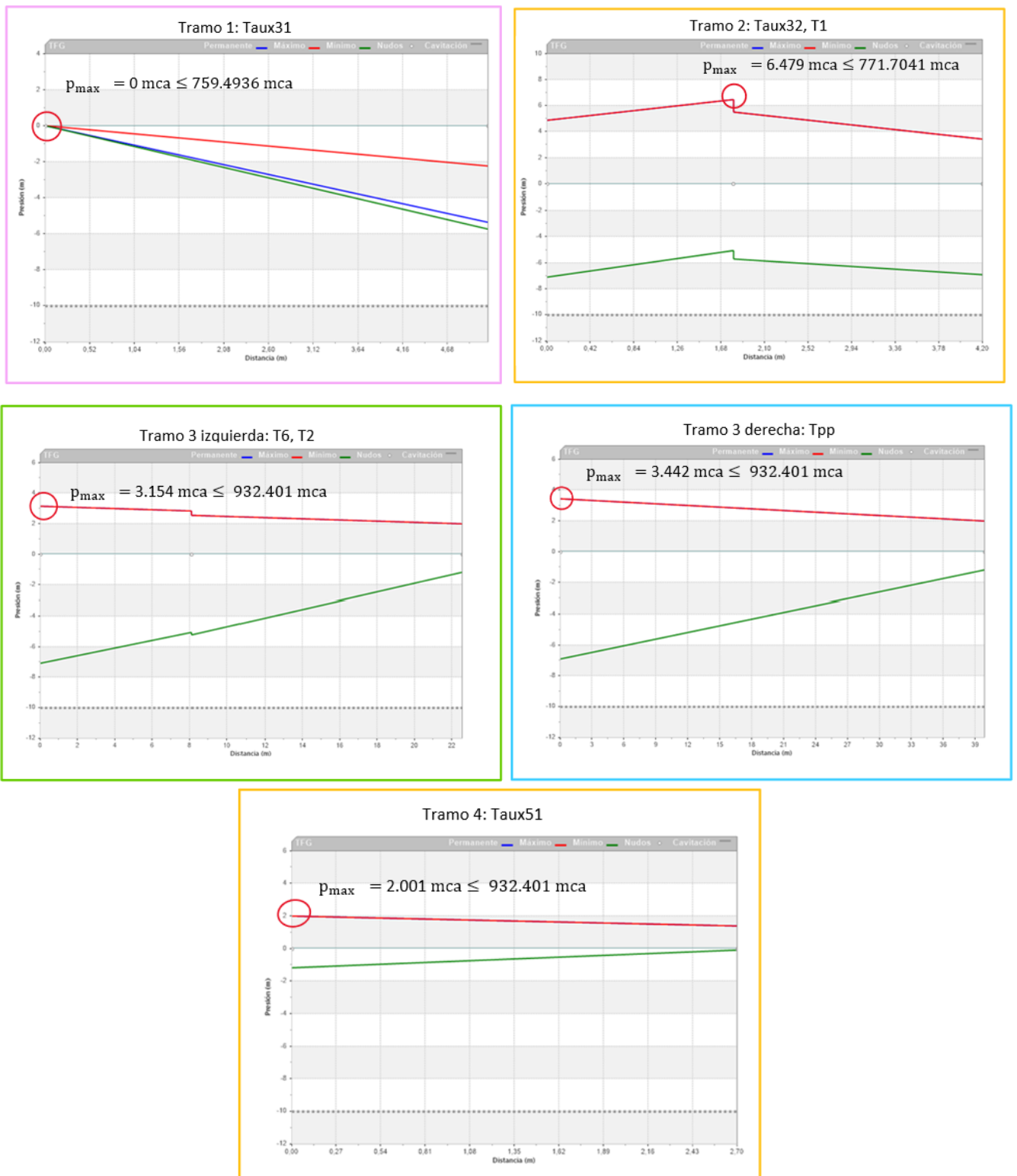


Figura 39. Transient regime: Overpressures, circuit 2, Channel with Emica Pump

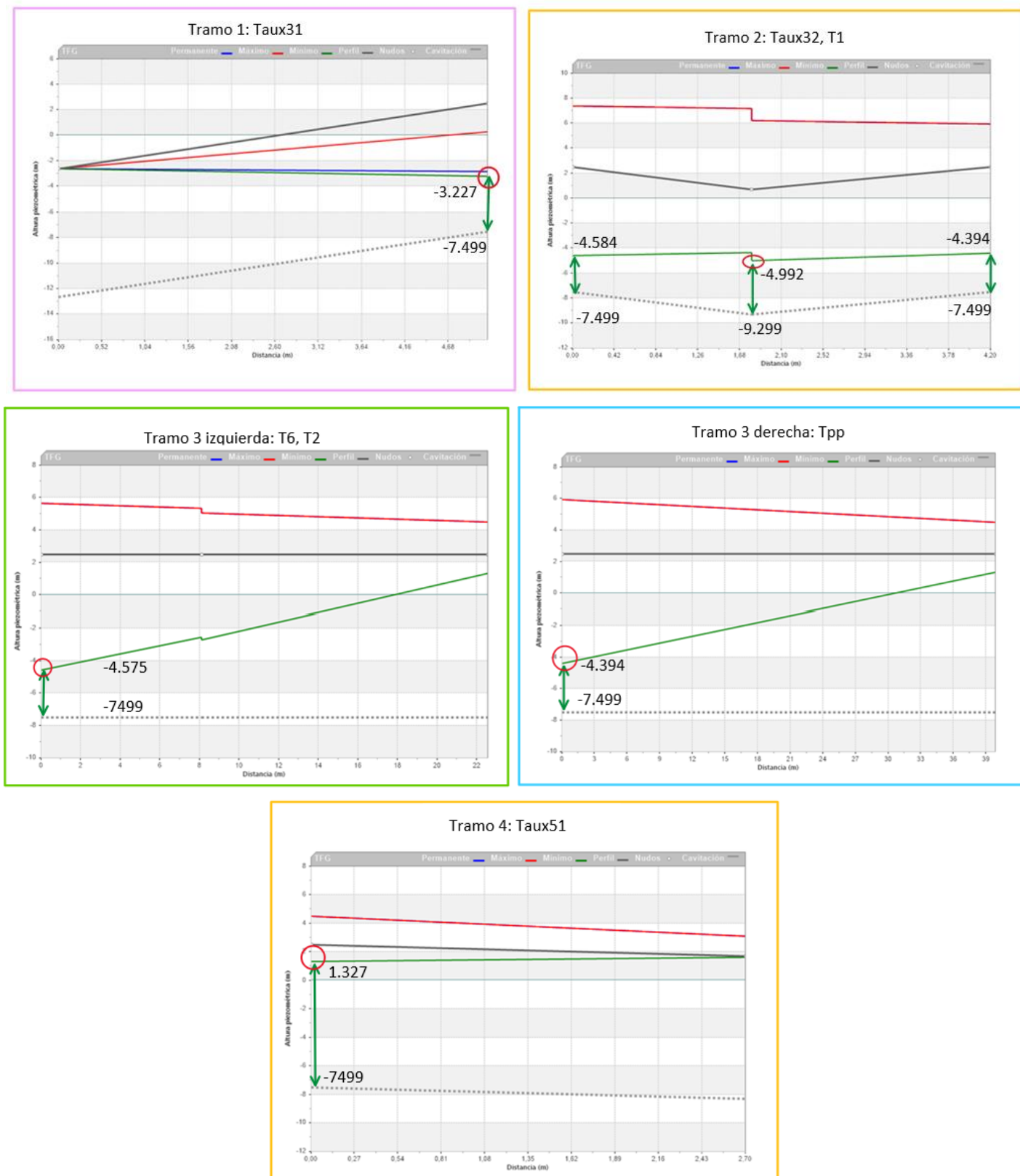


Figura 40. Transient regime: Depressions, circuit 2, Channel with Emica Pump

- Kaplan turbine with Weise pump



Figura 41. Transient regime: Overpressures, circuit 3, Kaplan turbine with Weise pump

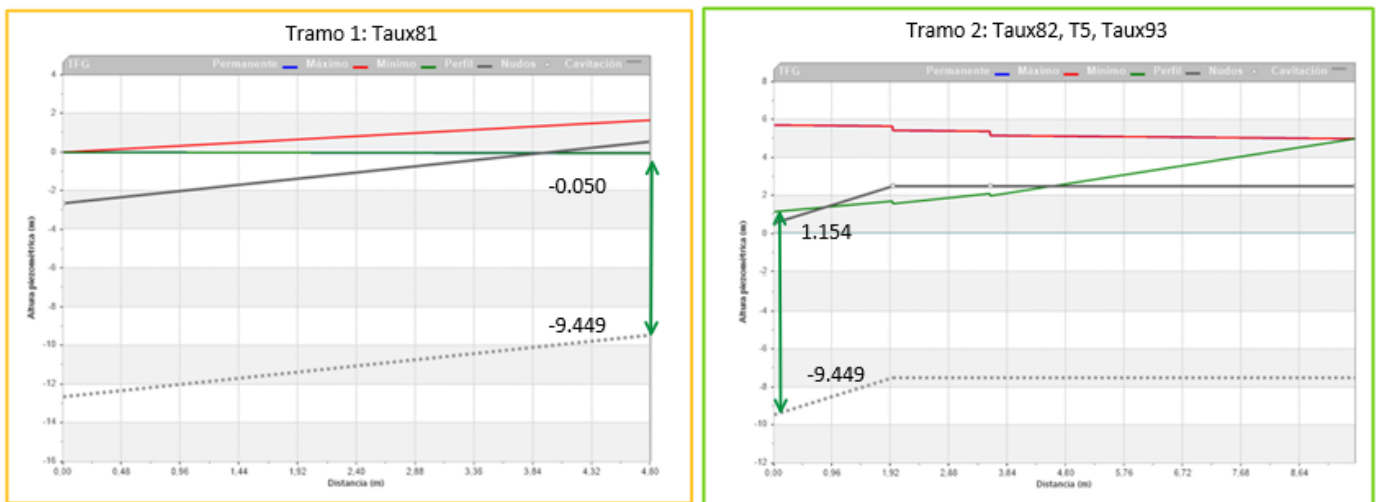


Figura 42. Transient regime: Depressions, circuit 3, Kaplan turbine with Weise pump

- Pelton turbine with submerged pump

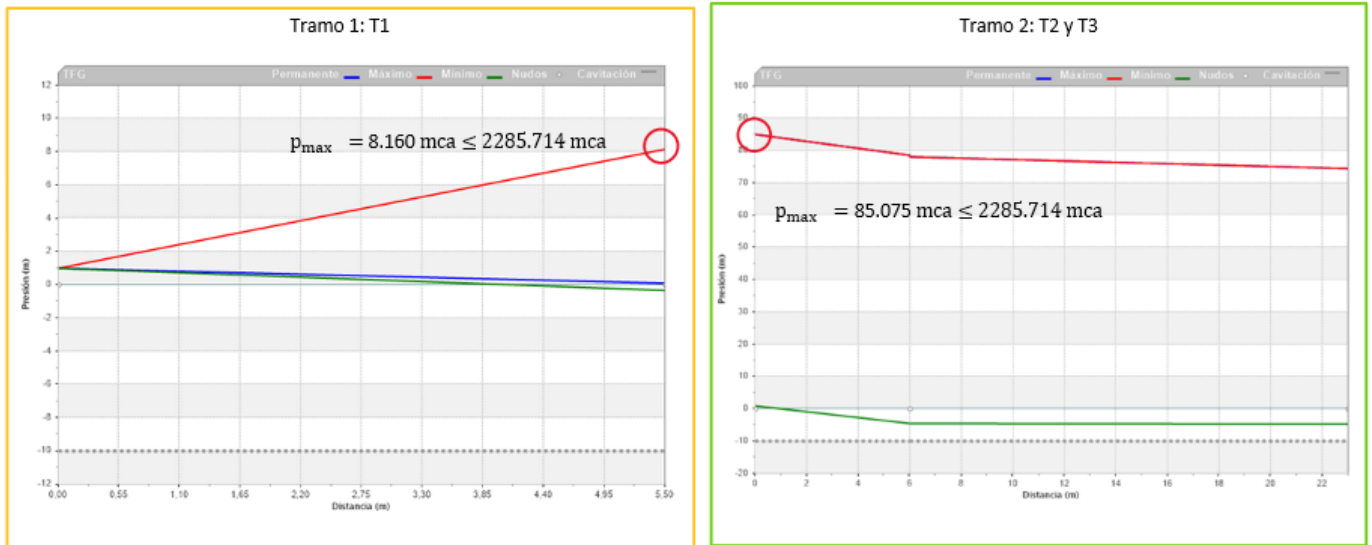


Figura 43. Transient regime: Overpressures, circuit 4, Pelton turbine with submerged pump

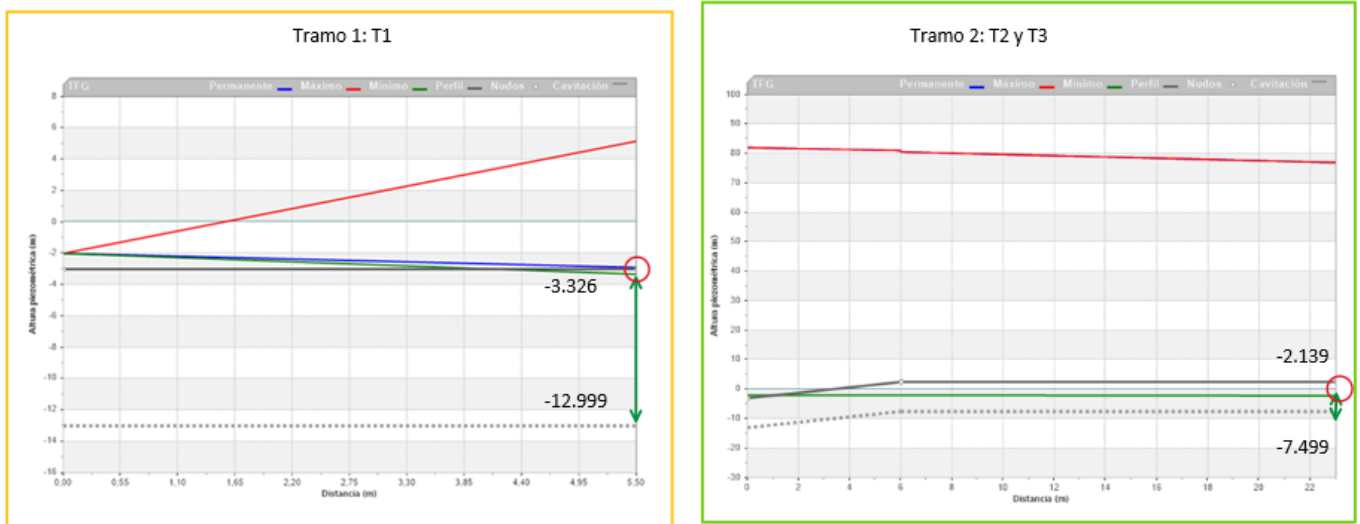


Figura 44. Transient regime: Depressions, circuit 4, Pelton turbine with submerged pump

- Francis turbine with waterfall

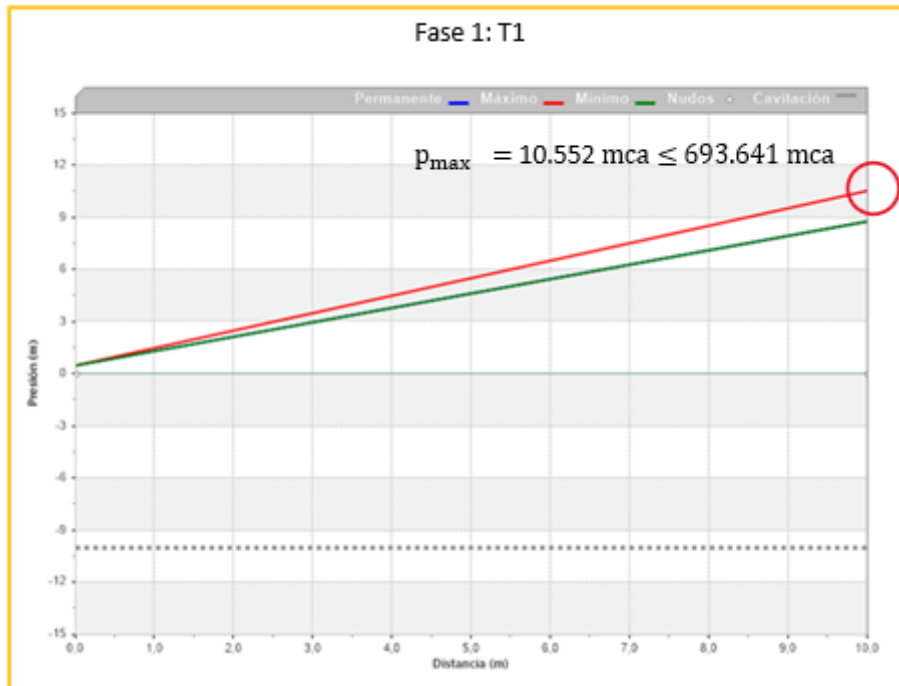


Figura 45. Transitional regime: Overpressures, circuit 5, Francis Turbine with waterfall

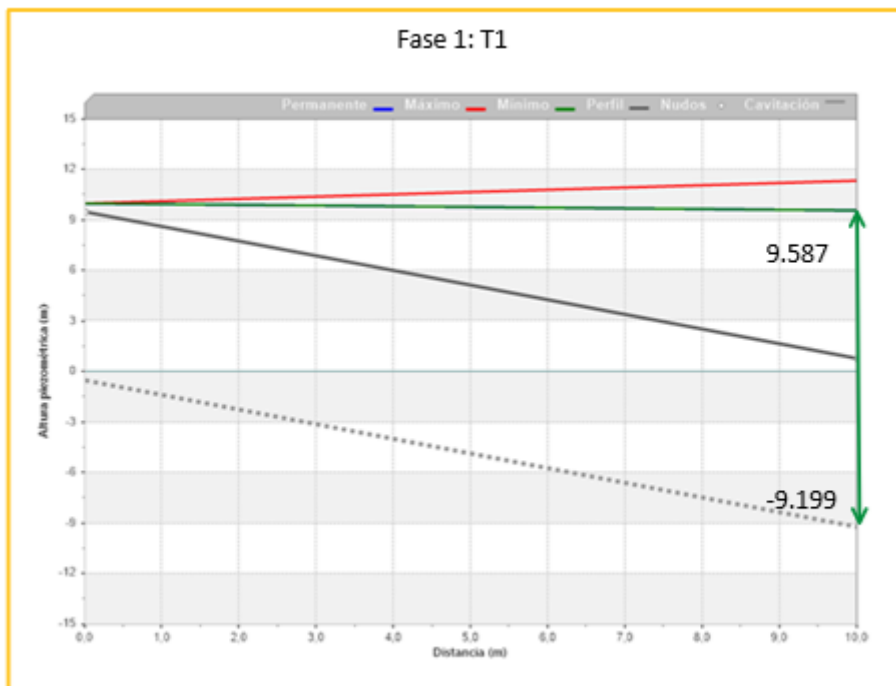


Figura 46. Transitional regime: Depressions, circuit 5, Francis Turbine with waterfall

The process and the conclusion in it in the five circuits:

The minimum piezometric height is compared with that of cavitation and in none of the cases is there a danger of implosion, the maximum pressure is also checked and it is verified which is less than the one that the pipe can withstand, which has been found since we know the material the diameter and the thickness.

4. Conclusions

The studies carried out in this project show that the installation presents intrinsic safety against large-scale failures (pipe breakage or collapse, valve rupture, etc.) due to water hammer, but experience of use shows that it does present a risk due to water hammer. specific damage (perforation of pipes).

That is why it is suggested as a protection measure against the punctual drilling of pipes against water hammer, the installation of suction cups arranged every 3 meters throughout the laboratory installation.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	17
1.1 Motivación del proyecto.....	17
1.2 Descripción del fenómeno.....	17
1.3 Consecuencias de los transitorios.....	26
1.3.1 Presiones excesivas	26
1.3.2 Presiones inferiores a la atmosférica.....	26
1.3.3 Presiones inferiores a la tensión de vapor	27
1.4 Modelación matemática del fenómeno.....	30
1.4.1 Ecuaciones de Saint Venant	30
1.4.2 Teoría de Allievi	32
1.4.3 Método de las características.....	34
1.5 Estrategias para mitigar los transitorios	37
1.5.1 Aumentar la resistencia mecánica del sistema.....	37
1.5.2 Aumentar los tiempos de maniobra.....	37
1.5.3 Diseñar dispositivos de protección.....	38
1.6 Dispositivos de Protección	39
1.6.1 Calderín.....	39
1.6.2 Chimenea de equilibrio	44
1.6.3 Tanque unidireccional.....	47
1.6.4 Ventosa.....	49
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	54
2.1 Oscilaciones de presión.....	56
2.2 Pulso de Joukowsky o de Allievi.....	58
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	59
Capítulo 4. Definición del Trabajo	61
4.1 Justificación y Objetivos	61
4.2 Metodología.....	62
Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....	64

5.1	Variables y Magnitudes de la formulación.....	64
5.1.1	<i>Ecuaciones de la propagación</i>	65
5.2	Elementos del sistema	70
5.2.1	<i>Tuberías</i>	70
5.2.2	<i>Válvulas</i>	72
5.2.3	<i>Depósitos</i>	73
5.2.4	<i>Estaciones de bombeo</i>	73
5.2.5	<i>Turbinas</i>	80
5.3	Análisis del Sistema	85
5.3.1	<i>Canal con bomba Weise</i>	87
5.3.2	<i>Canal con bomba Emica</i>	116
5.3.3	<i>Turbina Kaplan con bomba Weise</i>	149
5.3.4	<i>Turbina Pelton con bomba Sumergida (inyector)</i>	174
5.3.5	<i>Turbina Francis con Salto de agua</i>	190
Capítulo 6. Análisis Resultados.....		203
6.1	Canal con bomba Weise	203
6.2	Canal con bomba Emica.....	205
6.3	Turbina Kaplan con bomba Weise	210
6.4	Turbina Pelton con bomba Sumergida (inyector)	213
6.5	Turbina Francis con Salto de agua	215
Capítulo 7. Conclusiones.....		217
7.1	Canal con bomba Weise	218
7.2	Canal con bomba Emica.....	222
7.3	Turbina Kaplan con bomba Weise	228
7.4	Turbina Pelton con bomba Sumergida	231
7.5	Turbina Francis con salto de agua	235
Capítulo 8. Bibliografía.....		240
ANEXO I <i>¡Error! Marcador no definido.</i>		

Índice de figuras

Figura 1. Propiedades de la Primera fase del golpe de ariete	9
Figura 2. Propiedades de la Segunda fase del golpe de ariete	9
Figura 3. Propiedades de la Tercera fase del golpe de ariete	10
Figura 4. Propiedades de la Cuarta fase del golpe de ariete	10
Figura 5. Circuito con calderín	11
Figura 6. Circuito con chimenea de equilibrio	12
Figura 7. Circuito con tanque unidireccional	13
Figura 8. Fases de las ventosas	13
Figura 9. Circuito 1, Canal con Bomba Weise	15
Figura 10. Circuito 2, Canal con Bomba Emica	16
Figura 11. Circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise	16
Figura 12. Circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida	17
Figura 13. Circuito 5, Turbina Francis con salto de agua	17
Figura 14. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise	18
Figura 15. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise	18
Figura 16. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica	19
Figura 17. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica	20
Figura 18. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise	21
Figura 19. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise	21
Figura 20. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida	22
Figura 21. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida	22

Figura 22. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua	23
Figura 23. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua	23
Figura 24. Properties of the first phase of water hammer	26
Figura 25. Properties of the second phase of water hammer	26
Figura 26. Properties of the third phase of water hammer	27
Figura 27. Properties of the fourth phase of water hammer	27
Figura 28. Circuit with boiler	28
Figura 29. Circuit with balancing chimney	29
Figura 30. Circuit with unidirectional tank	30
Figura 31. Phases of the suction cups	30
Figura 32. Circuit 1, Channel with Weise Pump	31
Figura 33. Circuit 2, Channel with Emica Pump	32
Figura 34. Circuit 3, Kaplan Turbine with Weise Pump	32
Figura 35. Circuit 4, Pelton Turbine with submerged pump	33
Figura 36. Circuit 5, Francis Turbine with waterfall	33
Figura 37. Transient regime: Overpressures, circuit 1, Channel with Weise Pump	34
Figura 38. Transient regime: Depressions, circuit 1, Channel with Weise Pump	34
Figura 39. Transient regime: Overpressures, circuit 2, Channel with Emica Pump	36
Figura 40. Transient regime: Depressions, circuit 2, Channel with Emica Pump	36
Figura 41. Transient regime: Overpressures, circuit 3, Kaplan turbine with Weise pump .	37
Figura 42. Transient regime: Depressions, circuit 3, Kaplan turbine with Weise pump	37
Figura 43. Transient regime: Overpressures, circuit 4, Pelton turbine with submerged pump	38
Figura 44. Transient regime: Depressions, circuit 4, Pelton turbine with submerged pump	38
Figura 45. Transitional regime: Overpressures, circuit 5, Francis Turbine with waterfall .	39
Figura 46. Transitional regime: Depressions, circuit 5, Francis Turbine with waterfall	39
Figura 47. Válvula totalmente abierta, régimen permanente	20

Figura 48. Propiedades de la Primera fase del golpe de ariete	21
Figura 49. Propiedades de la Segunda fase del golpe de ariete	22
Figura 50. Propiedades de la Tercera fase del golpe de ariete	23
Figura 51. Propiedades de la Cuarta fase del golpe de ariete	24
Figura 52. Fase 1 de la separación de columna líquida: Inicio de vaporización	27
Figura 53. Fase 2 de la separación de columna líquida: Separación de columnas	28
Figura 54. Fase 3 de la separación de columna líquida: condensación de vapor	28
Figura 55. Fase 4 de la separación de columna líquida: Bolsas de vapor	29
Figura 56. Interpretación Física de las Ecuaciones de Saint Venant.....	31
Figura 57. Método de las características	35
Figura 58. Condiciones de Contorno para el método de las características	36
Figura 59. Método de las características, parámetros a definir.	36
Figura 60. Circuito con calderín	40
Figura 61. Parámetros a definir en un calderín en Allievi.....	41
Figura 62. Medidas Calderín	42
Figura 63. Calderín con bypass	43
Figura 64. Válvula parcialmente cerrada.....	43
Figura 65. Circuito con chimenea de equilibrio	45
Figura 66. Fases chimenea de equilibrio	46
Figura 67. Parámetros a definir en una chimenea de equilibrio en Allievi	46
Figura 68. Circuito con tanque unidireccional	47
Figura 69. Fases de la onda tanque unidireccional.....	48
Figura 70. Parámetros a definir en un tanque unidireccional en Allievi	48
Figura 71. Tanque unidireccional.....	49
Figura 72. Fases de las ventosas.....	50
Figura 73. Parámetros a definir en una ventosa.....	51
Figura 74. Software Allievi	55
Figura 75. Grafica de envolventes de un ciclo	56
Figura 76. Envolvente cierre instantáneo de una válvula.....	68
Figura 77. Envolvente cierre rápido de una válvula.....	69

Figura 78. Envoltente cierre lento de una válvula	70
Figura 79. Cálculo de la celeridad	71
Figura 80. Correlaciones para el cálculo de pérdidas de carga a través de accesorios.....	72
Figura 81. Valores del coeficiente “k” para pérdidas de energía local.....	73
Figura 82. Curva motriz y de rendimiento de la bomba.....	75
Figura 83. Curva motriz de la bomba y resistente de la instalación	75
Figura 84. Curva de características de la bomba	76
Figura 85. Diversos campos de trabajo de la bomba	77
Figura 86. Esquema de funcionamiento de una Turbina Francis	81
Figura 87. Esquema de funcionamiento de una Turbina Kaplan	82
Figura 88. Turbina Pelton con los cangilones a la vista	83
Figura 89. Inyector Turbina Pelton.....	85
Figura 90. Esquema circuito sótano completo	86
Figura 91. Circuito sótano datos generales de bombas y turbinas	87
Figura 92. Circuito canal con bomba Weise.....	88
Figura 93. Datos de los nudos del Circuito canal con bomba Weise	89
Figura 94. Datos de los depósitos del Circuito canal con bomba Weise.....	89
Figura 95. Datos de las turbias del Circuito canal con bomba Weise	90
Figura 96. Cálculo de la celeridad de la tubería auxiliar 81	90
Figura 97. Cálculo de la celeridad de las tuberías auxiliar 82, 4, 2 y auxiliar 51.....	90
Figura 98. Datos de las válvulas del Circuito canal con bomba Weise.....	91
Figura 99. Datos de la bomba Weise del Circuito canal con bomba Weise.....	91
Figura 100. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito canal con bomba Weise	92
Figura 101. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito canal con bomba Weise	92
Figura 102. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito canal con bomba Weise	93
Figura 103. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito canal con bomba Weise	93

Figura 104. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba	94
Figura 105. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba.....	95
Figura 106. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=4$ m, de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba.....	96
Figura 107. Envoltente de presiones de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba .	97
Figura 108. Envoltente de caudales de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba...	98
Figura 109. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba	99
Figura 110. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba.....	100
Figura 111. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 1.5$ m, de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba.....	101
Figura 112. Envoltente de presiones de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba	102
Figura 113. Envoltente de caudales de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba.	103
Figura 114. Envoltente de presiones de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba	104
Figura 115. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba	104
Figura 116. Envoltente de presiones de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba	105
Figura 117. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba	105
Figura 118. Tramo tuberías circuito 1 canal con bomba Weise	106
Figura 119. Envoltente de alturas piezométricas de las tuberías aux82, 4, 2 y aux51 en el caso 1, al parar la bomba	107
Figura 120. Envoltente de presión de las tuberías aux82, 4, 2 y aux51 en el caso 1, al parar la bomba	109

Figura 121. Envolvente de caudales de las tuberías aux82, 4, 2 y aux51 en el caso 1, al parar la bomba	109
Figura 122. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 4 en el caso 1, al parar la bomba.....	111
Figura 123. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 1$ m, de la tubería 4 en el caso 1, al parar la bomba.....	111
Figura 124. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 2 en el caso 1, al parar la bomba.....	113
Figura 125. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 10$ m, de la tubería 2 en el caso 1, al parar la bomba.....	113
Figura 126. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux51 en el caso 1, al parar la bomba.....	115
Figura 127. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 2$ m, de la tubería aux51 en el caso 1, al parar la bomba.....	115
Figura 128. Circuito canal con bomba Emica	116
Figura 129. Datos de los nudos del Circuito canal con bomba Emica	117
Figura 130. Datos de los depósitos del Circuito canal con bomba Emica	117
Figura 131. Datos de las tuberías del Circuito canal con bomba Emica	118
Figura 132. Cálculo de la celeridad de la tubería auxiliar 31	118
Figura 133. Cálculo de la celeridad de las tuberías auxiliar 32, 1, 6, 2, pp y auxiliar 51..	118
Figura 134. Datos de las válvulas del Circuito canal con bomba Emica.....	119
Figura 135. Datos de la bomba Weise del Circuito canal con bomba Emica.....	119
Figura 136. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito canal con bomba Emica.....	120
Figura 137. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito canal con bomba Emica.....	121
Figura 138. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito canal con bomba Emica.....	121
Figura 139. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito canal con bomba Emica.....	122

Figura 140. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba	123
Figura 141. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba.....	125
Figura 142. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=4$ m, de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba.....	125
Figura 143. Envolvente de presiones de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba	126
Figura 144. Envolvente de caudales de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba.	127
Figura 145. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba	128
Figura 146. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba.....	130
Figura 147. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=1$ m, de la tubería aux32 en el caso 2, al parar la bomba.....	130
Figura 148. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=1$ m, de la tubería 1 en el caso 2, al parar la bomba.....	131
Figura 149. Envolvente de presiones de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba	132
Figura 150. Envolvente de caudales de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba	133
Figura 151. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba	134
Figura 152. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba.....	136
Figura 153. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=4$ m, de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba	136
Figura 154. Envolvente de presiones de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba	137
Figura 155. Envolvente de caudales de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba.....	138
Figura 156. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al parar la bomba	139

Figura 157. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al parar la bomba.....	141
Figura 158. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=7$ m, de la tubería 6 en el caso 2, al parar la bomba.....	141
Figura 159. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=10$ m, de la tubería 2 en el caso 2, al parar la bomba.....	142
Figura 160. Envoltente de presiones de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al parar la bomba .	143
Figura 161. Envoltente de caudales de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al parar la bomba...	144
Figura 162. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba	145
Figura 163. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba.....	147
Figura 164. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=2$ m, de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba.....	147
Figura 165. Envoltente de presiones de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba	148
Figura 166. Envoltente de caudales de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba.	149
Figura 167. Circuito turbina Kaplan con bomba Weise	150
Figura 168. Datos de los nudos del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise.....	151
Figura 169. Datos de los depósitos del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise	151
Figura 170. Datos de las turbias del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise.....	151
Figura 171. Cálculo de la celeridad de las tuberías T5, Taux82, Taux91, Taux92 y Taux93	152
Figura 172. Cálculo de la celeridad de la tubería aux81	152
Figura 173. Datos de las válvulas del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise	152
Figura 174. Datos de la turbina Kaplan del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise ..	153
Figura 175. Datos de la bomba Weise del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise	153
Figura 176. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise.....	154
Figura 177. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise.....	154

Figura 178. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise.....	154
Figura 179. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise.....	155
Figura 180. Resultados del régimen permanente de la Turbina del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise.....	156
Figura 181. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba	158
Figura 182. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba.....	159
Figura 183. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 3$ m, de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba.....	159
Figura 184. Envolvente de presiones de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba	160
Figura 185. Envolvente de caudales de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba.	161
Figura 186. Envolvente de alturas piezométricas de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba	163
Figura 187. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba.....	164
Figura 188. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 1$ m, de la tubería Taux82 en el caso 3, al parar la bomba	165
Figura 189. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 1$ m, de la tubería T5 en el caso 3, al parar la bomba	165
Figura 190. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 3$ m, de la tubería Taux93 en el caso 3, al parar la bomba	166
Figura 191. Envolvente de presiones de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba	167
Figura 192. Envolvente de caudales de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba	168
Figura 193. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería Taux92 en el caso 3, al parar la bomba	169

Figura 194. Envoltente de presiones de la tubería Taux92 en el caso 3, al parar la bomba	170
Figura 195. Envoltente de caudales de la tubería Taux92 en el caso 3, al parar la bomba	171
Figura 196. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux91 en el caso 3, al parar la bomba	172
Figura 197. Envoltente de presiones de la tubería aux91 en el caso 3, al parar la bomba	173
Figura 198. Envoltente de caudales de la tubería aux91 en el caso 3, al parar la bomba.	174
Figura 199. Circuito turbina Pelton con bomba sumergida.....	175
Figura 200. Datos de los nudos del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida	175
Figura 201. Datos de los depósitos del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida	176
Figura 202. Datos de las turbias del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida	176
Figura 203. Cálculo de la celeridad de la tubería 1, 2 y 3	176
Figura 204. Datos de las válvulas del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida	177
Figura 205. Datos de la bomba sumergida del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida	177
Figura 206. Datos de la turbina Pelton del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida	178
Figura 207. Datos del inyector Pelton del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida	178
Figura 208. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida.....	178
Figura 209. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida.....	179
Figura 210. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida.....	179
Figura 211. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida.....	179
Figura 212. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba	180

Figura 213. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba.....	182
Figura 214. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 4$ m, de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba.....	182
Figura 215. Envoltente de presiones de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba	183
Figura 216. Envoltente de caudales de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba.....	184
Figura 217. Envoltente de alturas piezométricas de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba	185
Figura 218. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba	187
Figura 219. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 4$ m, de la tubería 2 en el caso 4, al parar la bomba.....	187
Figura 220. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 12$ m, de la tubería 3 en el caso 4, al parar la bomba.....	188
Figura 221. Envoltente de presiones de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba	189
Figura 222. Envoltente de caudales de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba	190
Figura 223. Circuito turbina Francis con Salto de agua	192
Figura 224. Datos de los nudos del Circuito turbina Francis con Salto de agua.....	192
Figura 225. Datos de los depósitos del Circuito turbina Francis con Salto de agua	193
Figura 226. Datos de las tuberías del Circuito turbina Francis con Salto de agua	193
Figura 227. Cálculo de la celeridad de la tubería 1	193
Figura 228. Cálculo de la celeridad de las tuberías 5	193
Figura 229. Datos de las válvulas del Circuito turbina Francis con Salto de agua	194
Figura 230. Datos de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua.....	194
Figura 231. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito turbina Francis con Salto de agua.....	195
Figura 232. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito turbina Francis con Salto de agua.....	195

Figura 233. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito turbina Francis con Salto de agua.....	195
Figura 234. Resultados del régimen permanente de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua.....	196
Figura 235. Maniobra de desconexión de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua.....	196
Figura 236. Variación de carga de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua	197
Figura 237. Envolverte de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina.....	198
Figura 238. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolverte de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina	200
Figura 239. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=7$ m, de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina	200
Figura 240. Envolverte de presiones de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina	201
Figura 241. Envolverte de caudales de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina	202
Figura 242. Análisis del sistema, circuito 1, Canal con Bomba Weise.....	218
Figura 243. Régimen permanente, circuito 1, Canal con Bomba Weise.....	219
Figura 244. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise ..	220
Figura 245. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise	221
Figura 246. Análisis del sistema, circuito 2, Canal con Bomba Emica.....	222
Figura 247. Régimen permanente, circuito 2, Canal con Bomba Emica.....	223
Figura 248. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica ..	225
Figura 249. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica.....	227
Figura 250. Análisis del sistema, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise.....	228
Figura 251. Régimen permanente, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise.....	228
Figura 252. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise	229

Figura 253. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise	230
Figura 254. Análisis del sistema, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida	231
Figura 255. Régimen permanente, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida	232
Figura 256. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida	233
Figura 257. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida	234
Figura 258. Análisis del sistema, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua	235
Figura 259. Régimen permanente, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua	236
Figura 260. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua.....	237
Figura 261. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua	238
Figura 262. Noveno objetivo de desarrollo sostenible de las naciones unidas	241
Figura 263. Séptimo objetivo de desarrollo sostenible de las naciones unidas.....	241
Figura 264. Sexto objetivo de desarrollo sostenible de las naciones unidas.....	242

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen propiedades 4 fases del golpe de ariete	25
Tabla 2. Resumen características principales de los elementos de protección.....	53
Tabla 3. Magnitudes de la formulación	65
Tabla 4. Datos Turbinas Kaplan, Pelton y Francis	84
Tabla 5. Datos de la bomba Weise en el régimen permanente en los casos 1 y 3.....	155
Tabla 6. Turbina Francis características generales	191
Tabla 7. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas Taux81, Taux82, T4, T2 y Taux51 en el caso 1, al parar la bomba	204
Tabla 8. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas en Taux31, Taux32, T1, Tpp, T6, T2 y Taux51 en el caso 2, al parar la bomba	208
Tabla 9. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas Taux81, Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba.....	211
Tabla 10. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas T1, T2 y T3 en el caso 4, al parar la bomba.....	214
Tabla 11. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas en T1 en el caso 5, al cerrar la válvula	216

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 *MOTIVACIÓN DEL PROYECTO*

El objetivo de este proyecto es la evaluación del golpe de ariete en el circuito hidráulico de potencia del laboratorio de ICAI. Este laboratorio consta de bombas (Emica y Weise) así como de tres turbinas hidráulicas (Kaplan, Francis y Pelton), combinándolas con los distintos depósitos, válvulas y tuberías. Se van a estudiar los cinco principales circuitos y su regímenes permanente y transitorio.

En concreto, se van a analizar los posibles Golpes de Ariete ante diferentes escenarios de operación, la probabilidad de que ocurran y en este caso el peligro y daños que pueden llegar a ocasionar. Los transitorios resultan difíciles de analizar, pero gracias a la ayuda del software para transitorios hidráulicos Allievi, desarrollado por la Universidad de Valencia, podremos realizar un análisis y concluir los casos en los que sería peligroso para el circuito la repentina parada de bombas o cierre de válvulas, por ejemplo.

El Golpe de Ariete es la sucesiva transformación de energía cinética en presión y energía elástica de la tubería. En el transcurso de este fenómeno, el líquido genera sobrepresiones y depresiones, las cuales es necesario tener controladas para garantizar la seguridad en las instalaciones.

1.2 *DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO*

Debido a variaciones en las condiciones de operación de un sistema, como por ejemplo el cambio del grado de apertura de una válvula o el cambio de velocidad de giro de una bomba, se originan **transitorios hidráulicos**. Esta perturbación sobre un sistema en equilibrio provoca un régimen transitorio que va evolucionando hasta estabilizarse de nuevo.

Por lo tanto, los transitorios son fenómenos de variación de presiones provocadas por un cambio proporcional en la velocidad.

Un sistema en equilibrio, como puede ser por ejemplo el régimen permanente para el que fue diseñado, tiene un caudal y presión determinados en cada uno de los puntos del sistema. Una perturbación induce en el sistema cambios, oscilaciones de presión que se atenúan con el tiempo. Estas **oscilaciones** de caudal, velocidad y presión en la conducción, no son más que intercambios de energía cinética a energía de presión. Una vez se alcance de nuevo el equilibrio, las condiciones no tienen por qué coincidir con las iniciales.

La magnitud de esta **perturbación** determina la velocidad de transitorio y por lo tanto su efecto. El origen de las perturbaciones es diverso, cualquier cambio en la velocidad del fluido origina una perturbación, según su magnitud podemos clasificar los transitorios en tres grupos: transitorios muy lentos o cuasi-estáticos, transitorios lentos u oscilaciones en masa y transitorios muy rápidos o golpe de ariete.

En primer lugar, los cambios en las variables de flujo lentos, originados por perturbaciones en el consumo urbano o en el nivel de agua de los depósitos de una red de agua potable, son de pequeña magnitud. Por lo tanto, el circuito está diseñado para aguantar estas pequeñas oscilaciones de presión.

En segundo lugar, los cambios significativos en las variables de flujo, siempre y cuando se mantengan en unos niveles que el circuito pueda soportar, no es necesario tenerlos en cuenta ya que sus consecuencias son aceptables. La perturbación que las origina suele ser un cambio suave en la conducción.

Por último, los cambios bruscos en la velocidad de la tubería son originados por maniobras rápidas, y sus consecuencias pueden llegar a ser graves, por ello se realiza un análisis exhaustivo. Estas maniobras pueden ser: el accionamiento o parada de las bombas, cierre rápido de válvulas, rotura de tuberías... El grupo de bombeo es uno de los elementos que más en cuenta hay que tener, los fallos en el suministro eléctrico pueden provocar paradas accidentales que den lugar a golpes de ariete y por lo tanto grandes sobrepresiones.

Las tuberías en condiciones normales no podrían aguantar si no fuera por los elementos de protección, de los que hablaremos más adelante, y que se sitúan precisamente para estas situaciones extremas. Estas perturbaciones originadas por el grupo de bombeo son mayores en caso de parada que en caso de arranque. En el caso de parada, el transitorio comienza con una depresión, mientras que con el arranque comienza con una sobrepresión, las tuberías están diseñadas para aguantar mejor las presiones radiales internas positivas en lugar de las tensiones circunferenciales negativas. Por otro lado, la incorrecta manipulación de las válvulas es otra causa principal de transitorios bruscos, más adelante veremos cómo afecta el tiempo de cierre de la válvula al transitorio.

A este fenómeno se le denomina golpe de ariete, cuando la variación de presiones es tal que implica el impedimento de escurrir, es decir, que la velocidad final es nula, dando lugar a oscilaciones grandes. Se trata de un caso particular de transitorios en las conducciones a presión, de mayor magnitud en velocidades y por lo tanto presiones. Las maniobras de parada total dan lugar a los golpes de ariete de máxima intensidad ya que toda la energía de movimiento se transformará en energía de presión.

A continuación, se presentan las **4 fases** que se producen durante el transitorio, las cuales debido a la dispersión de energía se irán repitiendo continuamente, cada vez en menor magnitud hasta alcanzar un nuevo equilibrio. El ejemplo se trata de una aducción por gravedad 1 con diferencia de cotas entre el depósito y la válvula, en la Figura 1 se muestra el régimen permanente.

Supondremos: una tubería horizontal de diámetro D y longitud L , sin pérdidas, cuyo caudal transportado en condiciones de régimen permanente tiene una velocidad U , esta tubería está conectada a un embalse de capacidad infinita en el punto O y a una válvula en el punto M . La altura de presión de la tubería es la piezométrica, H_0 (la referencia de cotas la línea horizontal que pasa por el punto M)

Se van a presentar para cada fase: alturas piezométricas, velocidades, dirección de la onda, tiempos y dilatación de la tubería. La perturbación en ambos casos será el cierre instantáneo de la válvula, es una abstracción que tan solo puede darse en la teoría ya que en

la realidad cualquier maniobra lleva más de 0 s. No son deseables ya que originaran, como veremos a continuación sobrepresiones máximas.

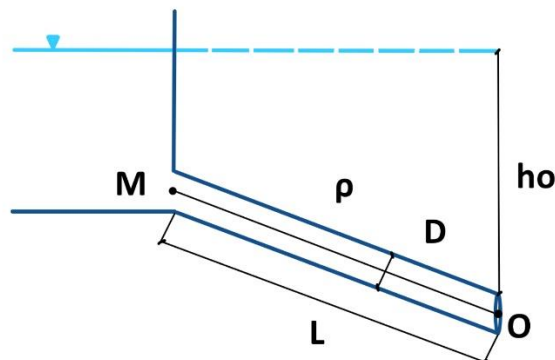


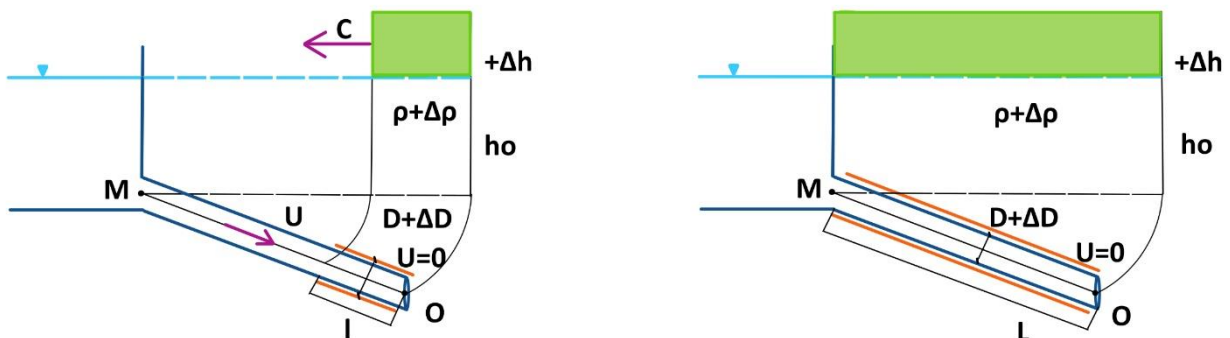
Figura 47. Válvula totalmente abierta, régimen permanente.

- **Primera fase**

La válvula se encuentra totalmente cerrada, el agua comienza a detenerse en las inmediaciones del punto O ($U=0$). Las partículas de agua paradas comienzan a acumularse aguas abajo, originando una onda de sobrepresiones, que se va transmitiendo aguas arriba. Las capas de espesor diferencial de líquido pasan de velocidad U a nula, transformando toda la energía cinética en potencial, y elevando la presión Δh .

Con este aumento de presión las partículas se comprimen $\rho+\Delta\rho$ y la tubería (o material de conducción se va a considerar elástica, con un módulo de elasticidad E) se expande $D+\Delta D$, generando nuevo espacio para las partículas que van llegando al punto de frenada. Cada instante otra capa de líquido pasa por el mismo proceso, denominado fenómeno de aquietamiento de las capas, esta propagación se da en el sentido de O a M. A la velocidad de esta onda de sobrepresiones se le denomina celeridad, c .

La figura 2.b presentan el final de la fase, toda el agua está detenida y la onda ha llegado al punto M. La presión es superior a H_0 en todos los puntos de la tubería, incluso en M. En este infinitésimo en M hay presión h_0 en el depósito y $h_0 + \Delta h$ en la tubería. Por lo tanto, es necesario que el sistema siga tendiendo al equilibrio, lo que da origen a la segunda fase. Esta situación de desequilibrio se resuelve transformando la energía de presión en cinética. El sentido de la velocidad claramente pasará a ser el opuesto al que causó este desequilibrio (o sea aguas arriba).



$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{l}{c}$$

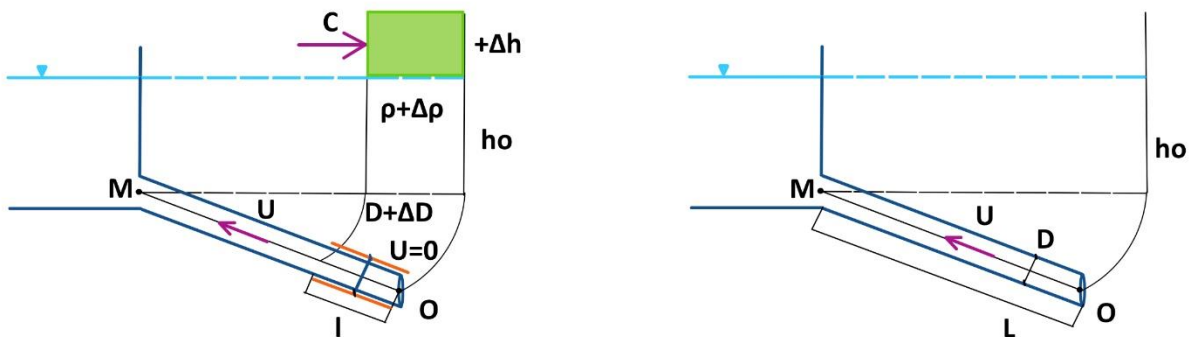
$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{L}{c}, \text{ final primera fase}$$

Figura 48. Propiedades de la Primera fase del golpe de ariete

- **Segunda fase**

El agua comienza a volver al depósito, la celeridad tiene dirección opuesta, o sea aguas abajo. La tubería va recuperando su diámetro D a medida que el fluido se va descomprimiendo ρ . Se recupera la altura piezométrica del depósito h_0 . Las partículas de agua por las que ya ha pasado la onda, retroceden con una velocidad U , el fluido se mueve de los puntos de mayor presión a los de menor, por lo tanto, la transformación de energía que se está dando en esta fase es de presión a cinética. Esta onda que deshace los cambios realizados en la primera fase es de descompresión.

La figura 3.b presentan el final de la fase, en el instante en el que llega la perturbación a la válvula, la velocidad del fluido en toda la tubería es U y en dirección al depósito. Esta velocidad no puede propagarse, como ocurre en el primer instante de cierre de la válvula, la diferencia es que en este caso la velocidad $-U$ se transformará en depresión $-\Delta h$. Dando comienzo a la siguiente fase.



$$t = t_0 + \frac{L}{c} + \frac{l}{c}$$

$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{2L}{c}, \text{ final segunda fase}$$

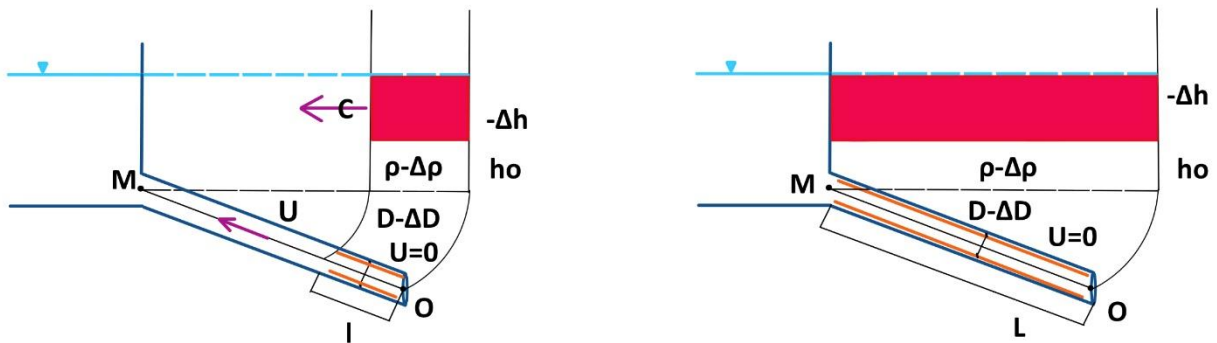
Figura 49. Propiedades de la Segunda fase del golpe de ariete

- **Tercera fase**

Las partículas de agua tienen una velocidad U hacia el depósito que el caudal no puede mantener, por lo que a medida que avance la onda las partículas de agua tendrán una velocidad nula. Dejando un vacío en la cara de la válvula, que generará un cambio negativo en la altura piezométrica, esta onda es de depresión. La tubería experimenta un cambio en el diámetro $D-\Delta D$, y la masa específica del fluido disminuye $\rho-\Delta\rho$.

Esta tercera fase termina cuando la onda alcanza el depósito, en el punto M, figuras 4.b. La altura piezométrica del depósito no coincide con la de la tubería, por lo tanto, el estado no es de equilibrio y se da lugar a la siguiente fase. Dado que el depósito tiene mayor

altura piezométrica, comienza a tomar parte en la conducción. Si observamos detenidamente este estado, coincide con el final de la primera fase a excepción de los cambios de signo.



$$t = t_0 + \frac{2L}{c} + \frac{l}{c}$$

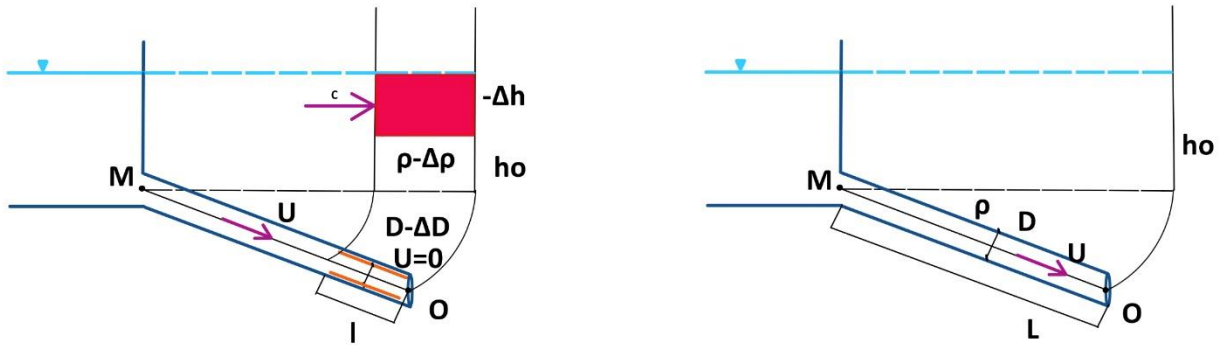
$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{3L}{c}, \text{ final tercera fase}$$

Figura 50. Propiedades de la Tercera fase del golpe de ariete

- **Cuarta fase**

El agua de la tubería comienza su movimiento aguas abajo con velocidad U , el incremento de presión que experimenta la tubería en este caso es positivo, por lo que se recupera la altura piezométrica inicial del depósito, las dimensiones iniciales, D y la masa específica del fluido ρ .

Al final de esta fase, figuras 5.b, el flujo se encuentra en las mismas condiciones que al inicio del transitorio, y comienza de nuevo el ciclo. Este ciclo podría continuar de forma indefinida si no se tiene en cuenta las pérdidas por energía.



$$t = t_0 + \frac{3L}{c} + \frac{l}{c}$$

$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{4L}{c}, \text{ final cuarta fase}$$

Figura 51. Propiedades de la Cuarta fase del golpe de ariete

	Tiempo	Velocidad Onda	Velocidad en zona no afectada x la onda	Velocidad del fluido	Diámetro de la tubería	Fluido: comprimido o dilatado	Altura piezométrica
Fase 1	$t = t_0 + \frac{l}{c}$	$c \leftarrow$	$U \rightarrow$	0	$D + \Delta D$	$\rho + \Delta \rho$	$h_0 + \Delta h_0$
Fase 2	$t = t_0 + \frac{L}{c} + \frac{l}{c}$	$c \rightarrow$	$U \leftarrow$	0	D	ρ	h_0
Fase 3	$t = t_0 + \frac{2L}{c} + \frac{l}{c}$	$c \leftarrow$	$U \leftarrow$	0	$D - \Delta D$	$\rho - \Delta \rho$	$h_0 - \Delta h_0$
Fase 4	$t = t_0 + \frac{3L}{c} + \frac{l}{c}$	$c \rightarrow$	$U \rightarrow$	0	D	ρ	h_0

Tabla 1. Resumen propiedades 4 fases del golpe de ariete

En la práctica este ciclo se repite pudiendo llegar a ocasionar graves daños en las tuberías. La onda se irá amortiguando gracias a las pérdidas de fricción por el escurrimiento. Lo que hará que se extinga en un intervalo de tiempo que cambia en función de la situación.

1.3 CONSECUENCIAS DE LOS TRANSITORIOS

Como ya hemos explicado los transitorios son originados por perturbaciones que originan grandes variaciones de presión. Los principales efectos son: Presiones excesivas, presiones inferiores a la atmosférica y presiones inferiores a la tensión de vapor.

1.3.1 PRESIONES EXCESIVAS

Las ondas de presión pueden llegar a alcanzar dimensiones que provoquen la rotura de las tuberías, este problema se incrementa en los puntos débiles que están parcialmente corroídos.

Como ya hemos comentado previamente, el tiempo de las maniobras con el que se cierran las válvulas o parada de bombas es de especial interés, ya que determina la magnitud de la perturbación. Las presiones máximas se alcanzarán si el tiempo es menor al tiempo que tarda la onda en su viaje de ida y vuelta por toda la tubería.

$$t_{\text{ cierre válvula o parada bomba}} \leq \frac{2L}{c}$$

Además de poder llegar a provocar fisuras o roturas en la tubería, estas altas presiones pueden superar la resistencia de distintos accesorios como las juntas o válvulas.

1.3.2 PRESIONES INFERIORES A LA ATMOSFÉRICA

Una tubería está diseñada para trabajar bajo presión, por lo tanto, resiste acción axial o circunferencial, no están preparadas para presiones negativas, dado que este caso no se suele contemplar. Otro inconveniente en el caso de las presiones negativas es la intrusión de patógenos en el caso de que haya alguna fisura en la tubería, lo que contaminaría el sistema de abastecimiento.

1.3.3 PRESIONES INFERIORES A LA TENSIÓN DE VAPOR

El caso más desfavorable en cuanto a presiones negativas se da cuando la presión mínima es inferior a la tensión de vapor de líquido (LPV).

$$P_{\min} \leq \text{tensión de vapor (LPV)}$$

Este fenómeno da lugar a la separación de columna líquida. Si se alcanza la presión de vapor de líquido en algún punto de la tubería, el fluido entraría en ebullición, creando una bolsa de vapor en el interior de la conducción. Este proceso se puede resumir en 4 fases:

- En primer lugar, cuando la presión desciende $P = P_v$, el líquido comienza a evaporizarse.

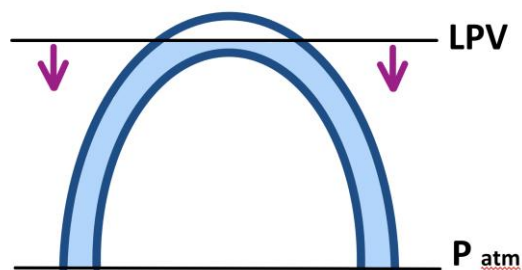


Figura 52. Fase 1 de la separación de columna líquida: Inicio de vaporización

- A continuación, esta bola va aumentando su volumen mientras continúa descendiendo la presión. Etapa depresiva.

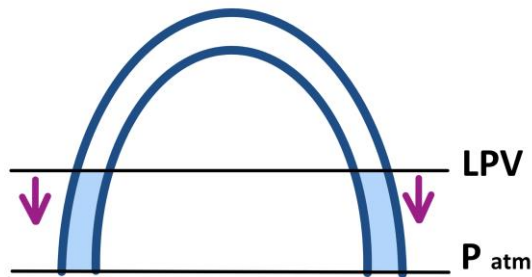


Figura 53. Fase 2 de la separación de columna líquida: Separación de columnas

- La presión comienza a aumentar y el volumen de la bolsa a disminuir, por lo que las dos columnas se van acercando con cierta velocidad relativa. El vapor comienza a condensarse en esta etapa sobrepresiva.

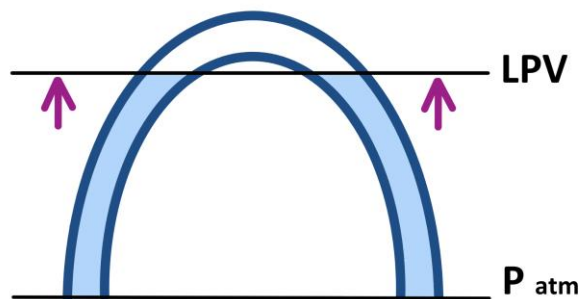


Figura 54. Fase 3 de la separación de columna líquida: condensación de vapor

- Por último, cuando la presión es superior a la presión de vapor, se condensa todo el líquido. Y tras el colapso de la bolsa de vapor se chocan las dos columnas de líquido.

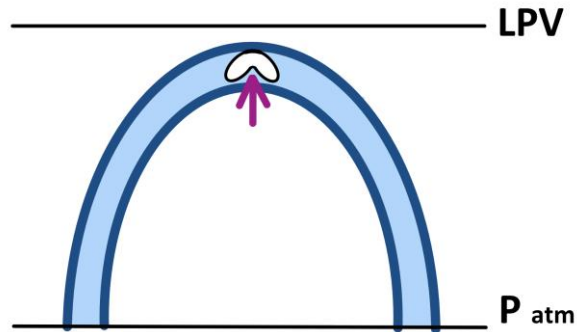


Figura 55. Fase 4 de la separación de columna líquida: Bolsas de vapor

Al colapsar la bolsa de vapor se pueden producir presiones elevadas.

1.4 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL FENÓMENO

1.4.1 ECUACIONES DE SAINT VENANT

Estas ecuaciones rigen los movimientos transitorios durante las conducciones a presión.

$$\frac{\partial}{\partial l} \left(Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} \right) = - \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - \overbrace{f \frac{U|U|}{2gD}}^{\text{"pérdida unitaria de energía hidráulica"}} \quad 1^{\circ} \text{ ecuación de Saint Venant}$$

Ecuación 1

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \left(U \frac{\partial p}{\partial l} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) = 0 \quad 2^{\circ} \text{ ecuación de Saint Venant}$$

Ecuación 2

Z: altura sobre un plano de comparación arbitrario del eje de la conducción.

p/γ : altura de presión en cada sección y en cada instante (p es la presión y γ el peso específico del agua).

U: velocidad media en cada sección y en cada instante.

g: aceleración normal de la gravedad.

t: tiempo

l: camino a lo largo del eje (coordenada curvilínea).

c: celeridad o velocidad de propagación del fenómeno transitorio

Interpretación física de las ecuaciones de Saint Venant. En primer lugar, vamos a desarrollar dos variables utilizadas.

$$\Delta l = \pm c \Delta t \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\Delta h = \frac{c}{g \Omega} \Delta Q \mp \int_0^l f \frac{U|U|}{2gD} dl \quad \text{Ecuación 4}$$

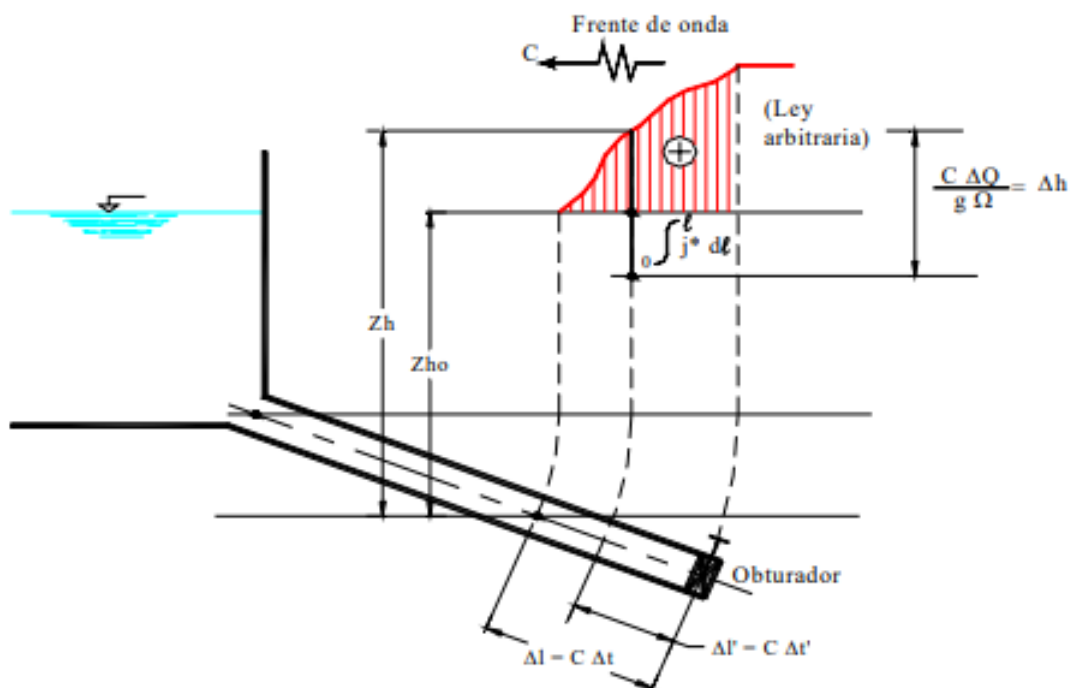


Figura 56. Interpretación Física de las Ecuaciones de Saint Venant

$$\left[\begin{array}{l} \int_0^l f \frac{U|U|}{2gD} dl \quad \text{efecto amortiguador de las pérdidas de energía} \\ \frac{c}{g \Omega} \Delta Q = \frac{c \Delta V}{g} = \frac{c}{g} (U - V) \end{array} \right.$$

U: velocidad media de escurrimiento permanente (es decir antes de la maniobra de obturación)

V: velocidad media en cada una y todas las secciones para cada grado de cierre del obturador.

La sobrepresión ocasionada por la variación de velocidad se propaga con una celeridad c , en un instante t y en la abscisa l . De forma que, a su vez, Δh resulta:

$$\Delta h = Z_h - Z_{ho} \quad \text{Ecuación 5}$$

Z_h : altura del eje sobre el plano de comparación

Z_{ho} : altura de presión

1.4.2 TEORÍA DE ALLIEVI

A partir de las ecuaciones de Saint Venant realizaremos algunas simplificaciones, que nos permitirán acotar el problema y hacer posible su integración. En primer lugar, considerando las pérdidas de energía despreciables $\int_0^l f \frac{U|U|}{2gD} dl \rightarrow 0$. Y, en segundo lugar, tan solo se tendrán en cuenta las variaciones de velocidad en función del tiempo. Por lo tanto, prevalecen los términos $\frac{\partial}{\partial t}$ sobre $\frac{\partial}{\partial l}$.

Pero estas simplificaciones matemáticas no van a afectar a la exactitud de los resultados. El orden de magnitud de las presiones durante el Golpe de Ariete hace que las pérdidas de energía resulten despreciables en comparación. Además, al no considerarlas estamos del lado de la seguridad ya que su efecto es puramente amortiguador. Por otro lado, el fenómeno de Golpe de Ariete tan solo es estudiado en casos de altas presiones, que es cuando toma importancia ya que resulta peligroso para las tuberías y elementos del circuito. Su magnitud está directamente relacionada con el tiempo, la rapidez de cierre de la válvula, por ejemplo.

Si aplicamos estas simplificaciones a las ecuaciones de Saint Venant:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left(Z + \frac{p}{\gamma} \right) = - \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} \quad 1^{\circ} \text{ ecuación de Saint Venant simplificada}$$

Ecuación 6

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad 2^{\circ} \text{ ecuación de Saint Venant simplificada}$$

Ecuación 7

{	- Derivamos respecto del tiempo			
	$\frac{\partial \text{ecuación 6}}{\partial t} * \rho \rightarrow$	$\frac{\partial^2 p}{\partial l \partial t} + \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0$		<i>Ecuación 8</i>
	- Derivamos respecto del recorrido			
	$\frac{\partial \text{ecuación 7}}{\partial l} * c^2 \rightarrow$	$\frac{\partial^2 p}{\partial t \partial t} + c^2 \rho \frac{\partial^2 U}{\partial l^2} = 0$		<i>Ecuación 9</i>

Combinando ambas ecuaciones (8 y 9) obtenemos:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial l^2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Si realizamos la misma operación de nuevo, pero al revés. Es decir $\frac{\partial \text{ecuación 7}}{\partial t}$ y

$\frac{\partial \text{ecuación 6}}{\partial l}$, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial l^2} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 h}{\partial l^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

1.4.3 MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

Como se explica más adelante, el programa que se va a utilizar para analizar los transitorios, utiliza el método de las características en su algoritmo para el cálculo de presiones en los infinitos puntos de la tubería.

Los fenómenos transitorios son difíciles de formular, pero existen métodos que permiten alcanzar soluciones fiables sin requerir demasiado esfuerzo computacional. El método de las características consiste en una resolución numérica y se va desarrollando a lo largo de una malla, partiendo de las condiciones de borde de cada problema. Este método resulta fiable ya que no aplica simplificaciones en su desarrollo.

A continuación, vamos a exponer las diferentes ecuaciones diferenciales utilizadas para la formulación, que iremos desarrollando poco a poco.

En primer lugar, se presentan las dos principales:

- Ecuación de conservación de masa
$$\frac{c^2}{g A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

Ecuación 12

- Ecuación de la cantidad de momento
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{Q |Q|}{2 D A} = 0$$

Ecuación 13

El método de las características pretende crear un sistema con las dos ecuaciones anteriores, tomando diversos puntos de la tubería. Estos puntos están separados una distancia Δx y se estudian en instante separados un intervalo Δt . Por lo tanto, la ecuación a resolver tiene la siguiente forma.

$$C^+ : H_i^{n+1} - H_{i-1}^{n-1} + \frac{a}{gA} [Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^n] + \frac{f \Delta x}{2gDA^2} Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| = 0$$

$$C^- : H_i^{n+1} - H_{i+1}^{n-1} - \frac{a}{gA} [Q_i^{n+1} - Q_{i+1}^n] - \frac{f \Delta x}{2gDA^2} Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| = 0$$

Ecuación 14

Objetivo es calcular los parámetros hidráulicos Q y H en el punto P y el instante $t+\Delta t$, tomando como dato los valores obtenidos en el instante anterior, t, en los puntos X e Y.

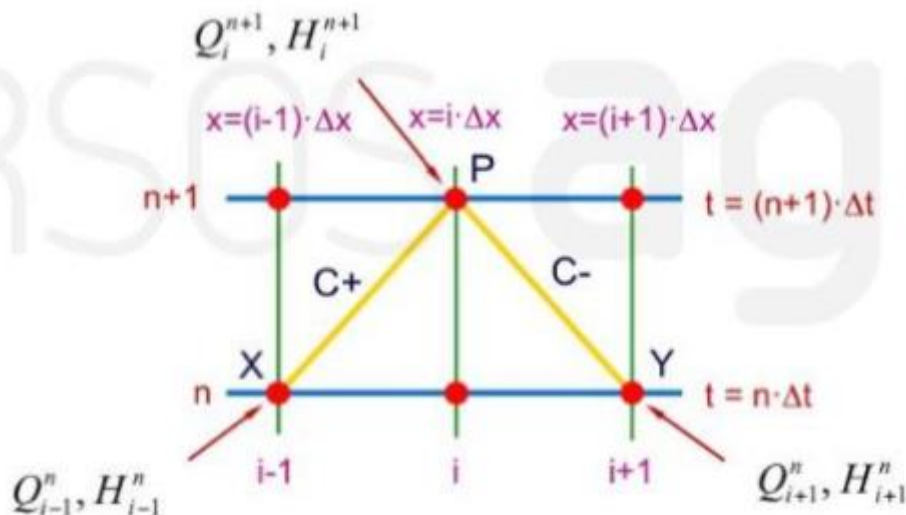


Figura 57. Método de las características

De esta forma creamos una malla ficticia, es decir, un plano $[x, t]$, y nos movemos un punto a otro con los valores Δx y Δt , gracias a las expresiones que acabamos de definir. Los puntos extremos de esta malla se denominan condiciones de contorno. En la siguiente figura mostramos algunas de las condiciones de contorno más frecuentes: En la esquina superior izquierda, maniobra de una válvula; en la esquina inferior izquierda, el nivel de agua de un depósito y a la derecha, el accionamiento de bombas.

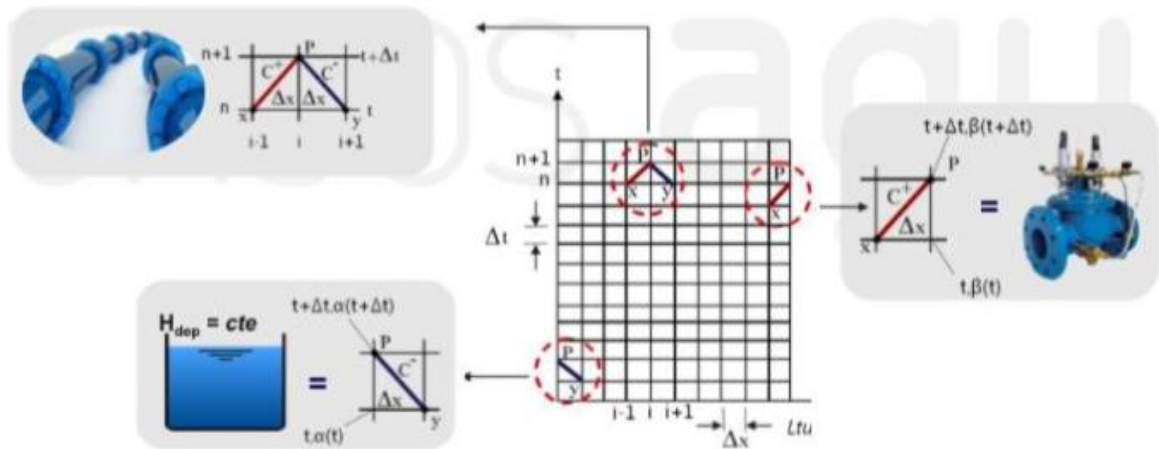


Figura 58. Condiciones de Contorno para el método de las características

Hay parámetros que debemos de decidir en función de los riguroso y exacto que queramos que sea nuestro análisis cómo puede ser el incremento de longitud de la tubería y el incremento de tiempo.

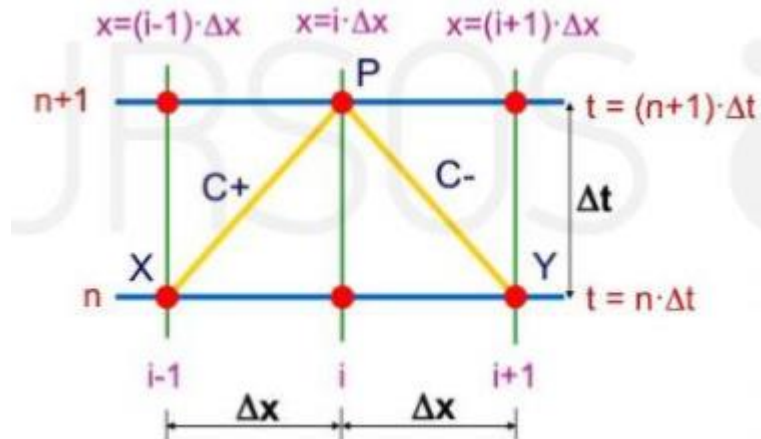


Figura 59. Método de las características, parámetros a definir.

Estos parámetros están relacionados entre sí por la celeridad de onda. De forma que normalmente comenzamos definiendo el intervalo de tiempo que en nuestro caso será 0.05s, para la mayoría de los análisis.

$$\Delta x = c \Delta t$$

Ecuación 15

1.5 ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LOS TRANSITORIOS

La principal consecuencia de los transitorios, y la razón de su importancia, es el peligro de rotura de la tubería y el resto de accesorios, tanto por depresiones como sobrepresiones.

1.5.1 AUMENTAR LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL SISTEMA

En caso de transitorio desfavorable, se puede reforzar el sistema de tuberías para soportar valores extremos, aumentando su resistencia mecánica. El principal inconveniente sería el incremento del coste y del peso. Por otro lado, la principal ventaja es la simplicidad de la decisión, en lugar de realizar un estudio de los distintos tipos de protección.

1.5.2 AUMENTAR LOS TIEMPOS DE MANIOBRA

Al incrementar el tiempo de las maniobras en bombas y válvulas, la perturbación será de menor magnitud y por lo tanto disminuye la amplitud de la oscilación de presiones y se puede alcanzar un nuevo equilibrio sin pasar por sobrepresiones y depresiones peligrosas.

El inconveniente de esta solución es que no suele estar en nuestras manos esta decisión, en algunos casos los golpes de ariete son ocasionados por accidentes, como el corte del suministro eléctrico y la consiguiente parada de las bombas. Por otro lado, se quieren evitar los tiempos de maniobra excesivos.

1.5.3 DISEÑAR DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

Los elementos de protección son dispositivos que se instalan frente a los transitorios hidráulicos con el objetivo de disminuir la amplitud de las oscilaciones de presión. Se clasifican en dos tipos en función del momento en el que intervienen.

La ventaja del uso de dispositivos de protección es que permiten reducir la resistencia mecánica del sistema. Y el inconveniente es el coste de mantenimiento para evitar que se produzcan fallos en su funcionamiento.

1.5.3.1 Dispositivos de acción directa

- Volantes de inercia en eje de bombas y turbinas
- Válvulas de retención
- Válvulas de cierre programado

Los dispositivos de acción directa son aquellos a los cuales se les impone una ley de maniobra programada y que intervienen directamente en la generación del transitorio.

1.5.3.2 Dispositivos de acción indirecta

- Chimeneas de equilibrio
- Tanques unidireccionales
- Calderines de aire
- By-pass
- Ventosas
- Válvulas de alivio, reguladoras de presión y anticipadoras de onda

Los dispositivos de acción indirecta actúan una vez se ha producido el transitorio con el fin de mitigar sus efectos. Sus características se eligen en función de las necesidades de protección del sistema.

1.6 DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

A continuación, presentamos las características de los principales elementos de protección, pero sobre todo las condiciones necesarias para que funcionen de forma adecuada. En función de las condiciones específicas de cada circuito resultará más útil un elemento de protección u otro. Una vez se elijan las soluciones más factibles, conviene simular los distintos casos.

El objetivo de estos dispositivos es reducir los cambios de velocidad que provocan estas presiones. Actuando directamente sobre la causa para mitigar los efectos. Otra opción, es reducir las oscilaciones de presión, una vez a iniciado la perturbación.

Los dispositivos de acción indirecta actúan en el momento oportuno, no sobre la causa sino sobre los efectos, ayudando a la instalación a amortiguar la perturbación. A continuación, vamos a profundizar en el estudio de algunos de los dispositivos de acción indirecta más comunes.

1.6.1 CALDERÍN

Los calderines son uno de los dispositivos de protección más utilizados, especialmente en instalaciones de bombeo para el caso de parada accidental de bombas. Actúa como un colchón a modo de resorte, amortiguando las oscilaciones de presión. Se trata de un depósito con fluido y un gas (aire o nitrógeno) cuya presión está determinada en función del circuito, y es la que va a definir su actuación.

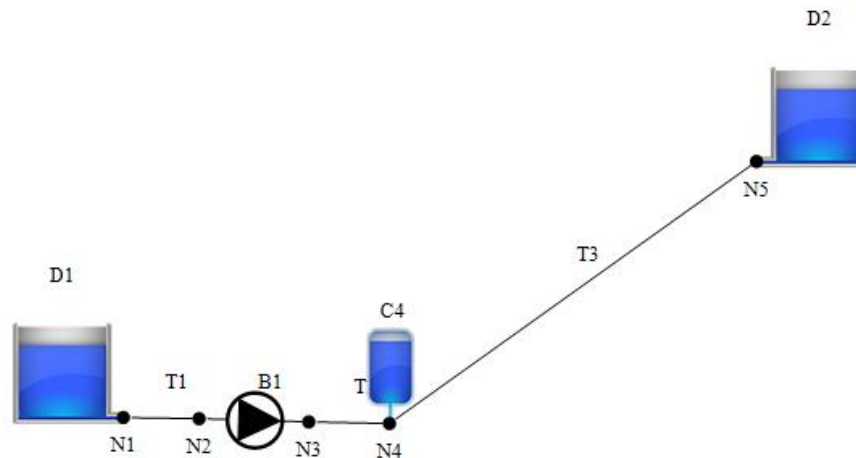


Figura 60. Circuito con calderín

Tras la desconexión de una bomba se crea una onda de depresión en sus inmediaciones, ya que la inercia del agua le lleva mantener su velocidad. Cuando la onda choca con el final de ciclo, el agua vuelve provocando el cierre de la válvula y crea una onda de sobrepresión. El calderín por lo tanto se instala aguas abajo junto a la válvula, con el fin de proteger de las presiones mínimas, que pueden descender hasta ser negativas, con el consiguiente peligro que esto representa.

Esta solución permite pasar de un transitorio rápido a uno más lento, lo que se puede apreciar en las alturas piezométricas. Pasando por dos **fases**, la expansión del gas y la compresión del gas.

- En el momento que la bomba para, y disminuye la presión en el punto que está conectado el calderín (bomba → válvula de retención que protege a la bomba → calderín), el agua comienza a salir del calderín contribuyendo al caudal y alimentando la impulsión. El gas se expande y por lo tanto disminuye su presión. Gracias al calderín la evolución del caudal ha sido menos brusca, así como la caída de presión.

- Con el flujo de retorno el agua comienza a entrar en el calderín, comprimiendo el gas y aumentando su presión. Reduciendo así la presión en el punto, dado que el agua no se acumula ahí.

Los calderines deben de ser revisados, su **mantenimiento** es importante ya que para su correcto funcionamiento deben de disponer de reserva de agua y de gas mínimas, y debe de estar en las condiciones de presión de régimen permanente de la bomba, de esta forma solo actuarán cuando sea necesario.

Los dos **tipos** de calderines más comunes son:

1.6.1.1 Calderín con contacto gas - agua

El agua está en todo momento en contacto con el aire o gas, el inconveniente es la disolución del aire en la masa de líquido, perdiendo así su efecto acolchonado. Por lo que las oscilaciones de presión serán mayores. Como solución se puede incorporar un compresor de aire que lo reponga, en caso necesario.

1.6.1.2 Calderín con membrana

Lleva una vejiga incorporada donde se acumula el gas, evitando así su posible disolución. Para evitar que la vejiga llega a introducirse en la tubería de entronque se dispone una rejilla en la boca de entrada al calderín que rompería la vejiga en tal caso.

Calderines - Datos básicos						Características físicas del calderín									
Nombre	Nudo	Zu (m)	Num	Calc K	Act	D (m)	L (m)	V (m ³)	Pred	Rug (mm)	Zb (m)	Posición	Vejiga	P (bar)	EP
C1	N1		1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	0		0	0	Vertical	No	0	Calc. 1,2

Ramal de unión			Pérdidas	
D (mm)	L (m)	Rug (mm)	K sal	K ent
0	0	0	0	0

Figura 61. Parámetros a definir en un calderín en Allievi

Dentro de los parámetros fundamentales para el diseño, tiene especial importancia el **dimensionado**. El volumen total debe de ser suficiente como para almacenar el volumen inicial de gas y agua para limitar las oscilaciones. En instalaciones grandes suele ser

necesario utilizar más de un calderín (los situaremos en paralelo) ya que su tamaño viene predeterminado por los fabricantes. En este caso, el diámetro del ramal de cada calderín debe de ser del orden de la boca de entrada al calderín.

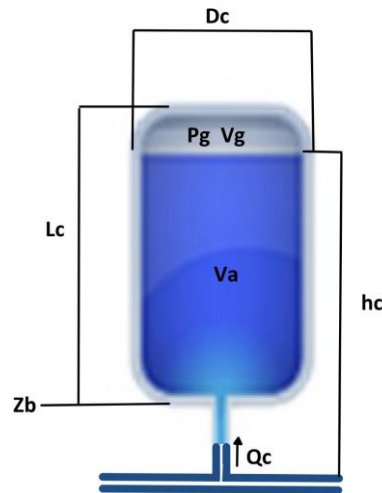


Figura 62. Medidas Calderín

La **localización** ideal para el calderín es tan cerca de la estación de bombeo como sea posible, por ejemplo, en el colector de impulsión. Las bombas siempre deben de estar protegidas del flujo de retorno por válvulas.

También se deben de tener en cuenta las **pérdidas** de fricción (Características físicas del calderín- Rug) y de carga (Ramal de unión- D , L y Rug) a partir de la ecuación Darcy Weisbach. Para evitar las presiones mínimas demasiado bajas, conviene que la salida del flujo a través del calderín se realice sin restricciones, o sea limitando las pérdidas en la conexión. Así mismo, las pérdidas generadas durante las maniobras de llenado y vaciado (K_{ent} y K_{sal}) son estudiadas con el fin de mejorar el transitorio. Interesan grandes pérdidas en el flujo de entrada, de esta forma cuando el flujo está retornando cargado de energía cinética se consigue disipar parte.

- Una posibilidad para aumentar estas pérdidas de entrada, es la colocación de un bypass en el ramal de unión con la tubería. La tubería principal consta de una

válvula de retención y se incorpora un ramal secundario, cuyo diámetro será del orden de la mitad que el principal. Este ramal secundario actúa como bypass, disipando la energía del caudal de retorno al calderín.



Figura 63. Calderín con bypass

- Otra opción para disipar esta energía de entrada y por lo tanto amortiguar las oscilaciones de presión, es instalar una válvula parcialmente cerrada. Restringiendo la entrada y dejando libre la salida.

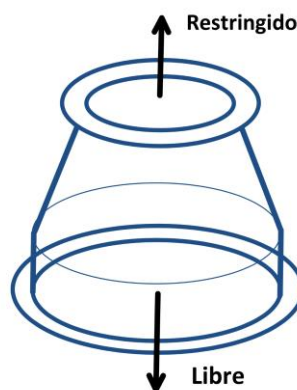


Figura 64. Válvula parcialmente cerrada

Las principales **ventajas** de los calderines: pueden instalarse en el interior de la estación de bombeo o en el exterior junto a ella. Al tratarse de un depósito cerrado, su altura

no debe de ser tan grande como la de un tanque que protege la misma instalación. En casos en los que la pendiente es pequeña y hay poco espacio, resultan especialmente útiles. AL tratarse de un dispositivo de acción indirecta, actúa por si solo, de forma proporcional a las oscilaciones.

Las principales **desventajas**: en instalaciones grandes puede ser necesario un número excesivo de calderines para llegar a mitigar estas oscilaciones hasta valores razonables. En el caso de los calderines con vejiga, el compresor supone un coste de instalación y mantenimiento adicional. Los compresores de vejiga también deben de ser revisados por peligro de rotura de la vejiga. Ya llevé un bypass o una válvula de retención, estos también deben de ser revisados.

1.6.2 CHIMENEA DE EQUILIBRIO

Este elemento de protección resulta especialmente útil en estaciones de bombeo con poca altura de impulsión y con una tubería de gran longitud o que tenga algún punto elevado en su perfil. Su función es similar a la de un calderín, pero abierto por la atmósfera.

Se trata de un tanque abierto, por lo tanto, donde este colocado impone que la presión sea la altura piezométrica del nivel de agua en su interior, impidiendo valores negativos. En función de la etapa del transitorio aporta o acumula agua. Se logra laminar los picos de presión, tanto de depresiones como sobrepresiones. Su principal limitación es encontrar su adecuada **localización**, puntos altos donde la diferencia entre la cota y la altura piezométrica sea discreta. Ya que las dimensiones de la chimenea deben de ser suficientes como para que el agua nunca rebose, su altura será superior a la máxima altura piezométrica.

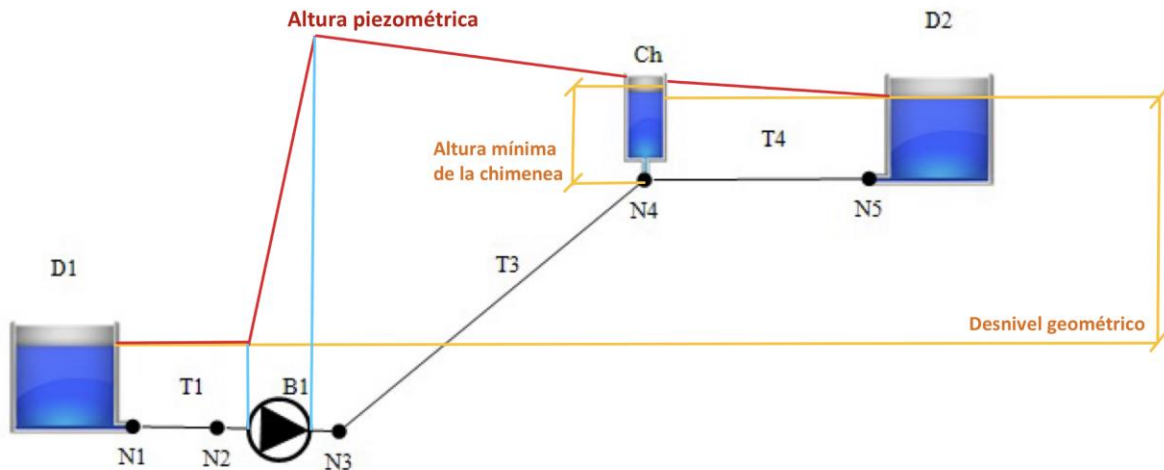


Figura 65. Circuito con chimenea de equilibrio

Su funcionamiento está basado en no dejar que la onda se transmita y reflejándola tan solo parcialmente. Pasando por cuatro **fases**: régimen permanente, se aproxima la onda, llega la onda y es reflejada, por último, evita que se propague.

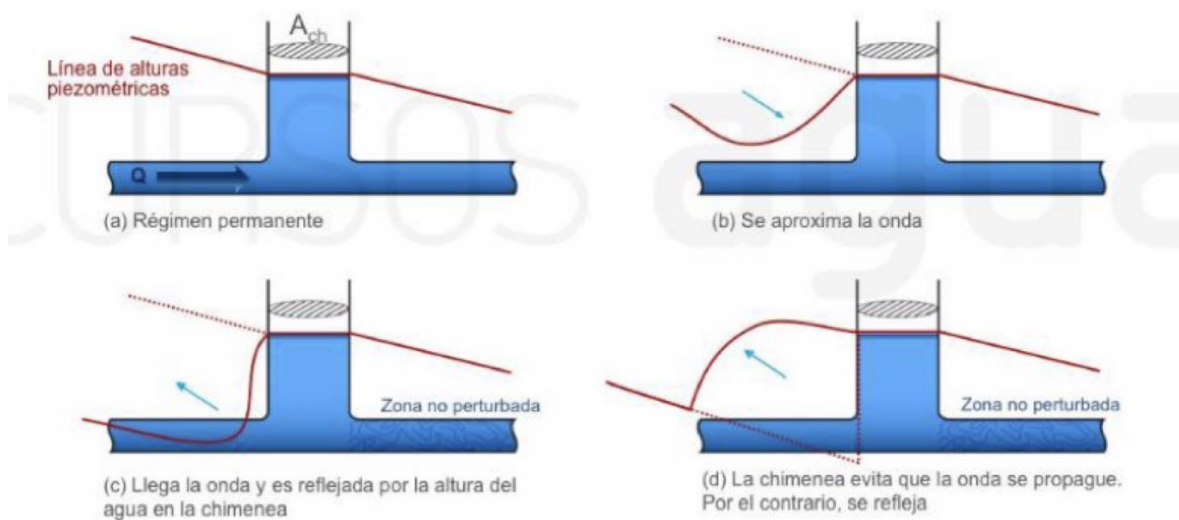


Figura 66. Fases chimenea de equilibrio

Actúa como un depósito de nivel variable, que se adapta en función del equilibrio del sistema. Refleja la onda depresiva impidiendo que se transmita.

Allievi permite especificar las **características** que se indican a continuación. Interesa que la tubería de conexión entre la chimenea y la tubería principal sea lo más corta posible y de gran diámetro, para facilitar la salida del agua y amortiguar de forma más rápida el transitorio. Respecto a las pérdidas, al igual que con los calderines, interesa que las pérdidas sean pequeñas en la salida ($K_{sal} \downarrow$) para evitar grandes depresiones y grandes en la entrada ($K_{ent} \uparrow$) para disipar la energía cinética del flujo de retorno. Tiene especial importancia la altura de la chimenea para evitar que se desborde, así como la cota inferior para evitar el vaciado. Provocando inundaciones en los alrededores o la entrada de aire en el depósito, ambos son efectos no deseables.

Chimeneas - Datos básicos									Ramal de unión					
Nombre	Nudo	Zu (m)	Act	Tipo	D (m)	Rug (mm)	Zb (m)	Vol. acum.	D (mm)	L (m)	Rug (mm)	K sal	K ent	Calc K
Ch2	N2		<input checked="" type="checkbox"/>	SC	0	0	0		0	0	0	0	0	...
Tubo interior en chimenea diferencial														
D (m)	H (m)	Rug (mm)	Cq	K sal	K ent									

Figura 67. Parámetros a definir en una chimenea de equilibrio en Allievi

Las principales **ventajas** de las chimeneas es su simplicidad, y que se reduce el gasto, ya que no necesitan mantenimiento. Además, no necesita elementos adicionales para controlar el abastecimiento.

Las **desventajas** son: la geometría del circuito debe de ser la adecuada de forma que las dimensiones de la chimenea no sean desmesuradas. Ya que su altura mínima depende de la altura piezométrica. También debemos de preocuparnos por la zona aguas abajo del circuito, que en la primera fase no está protegida ante depresiones, por ello serán necesarios elementos de protección adicionales.

1.6.3 TANQUE UNIDIRECCIONAL

Se trata de un dispositivo de protección similar a la chimenea de equilibrio, pero con una válvula de retención que impide el flujo de entrada. Controlando las depresiones, al aportar agua al sistema, pero no las sobrepresiones.

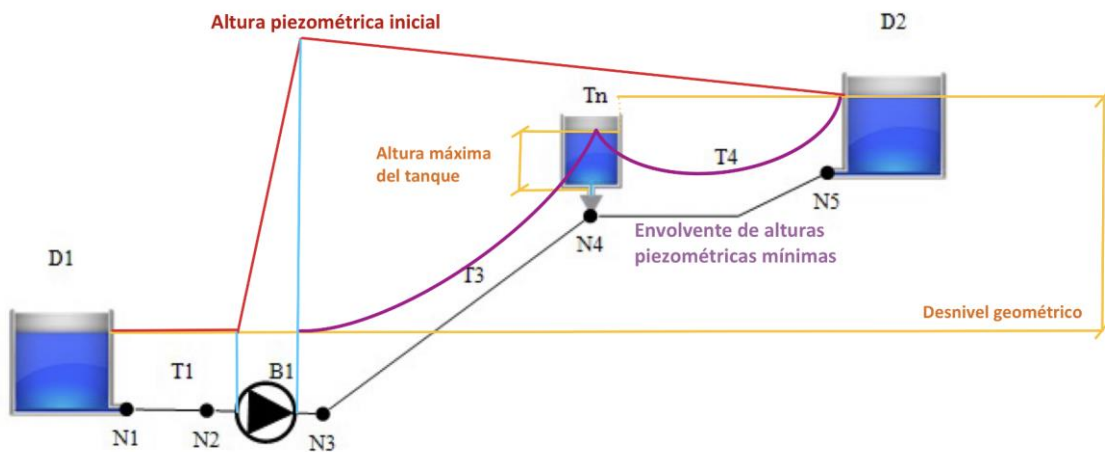


Figura 68. Circuito con tanque unidireccional

Al llegar la onda al tanque pasa por cuatro **fases** como podemos ver en la figura. La parte de la onda que queda por encima del nivel libre del agua se transmite, pero la parte de la onda que queda por debajo se refleja. De esta forma ambas han reducido su magnitud. Régimen permanente, se aproxima la onda, llega la onda y es fraccionada, parte se transmite y parte se refleja.

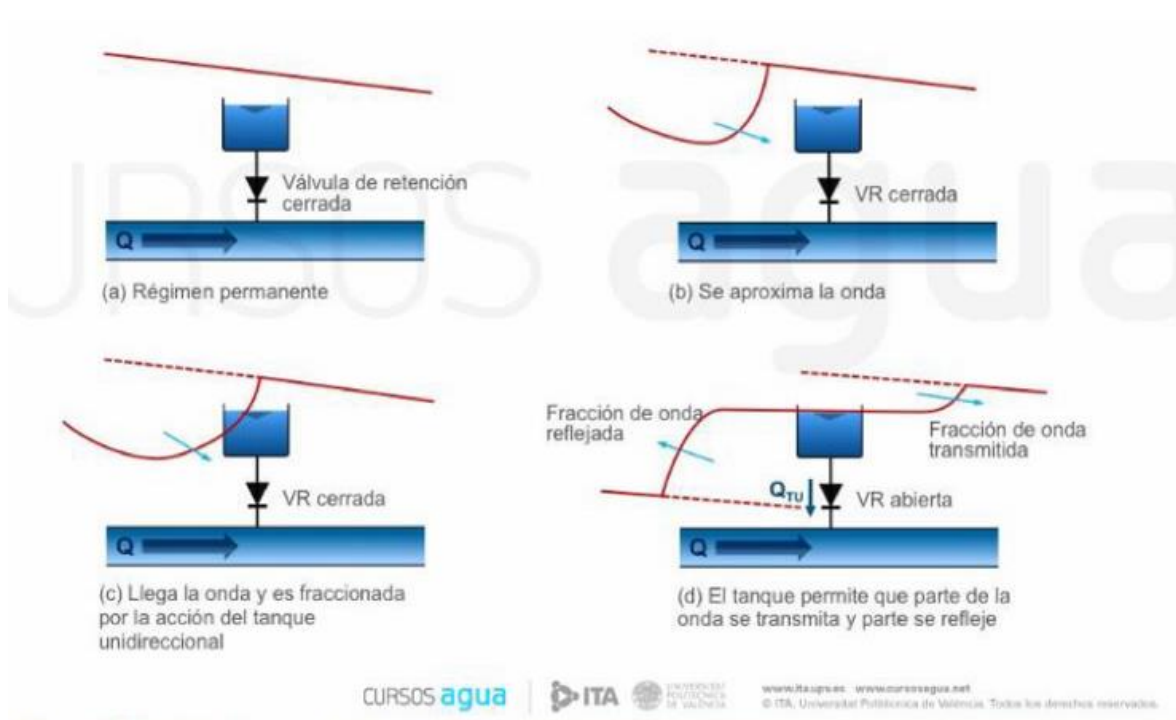


Figura 69. Fases de la onda tanque unidireccional

Como se puede observar, tiene especial importancia las **dimensiones**, en especial la altura del tanque. Dado que no recibe agua del sistema, debe de tener suficiente para actuar frente a un transitorio. Conviene que el tramo de tubería de salida del tanque unidireccional a la tubería principal sea lo más corto posible y de gran diámetro. Al contrario que las chimeneas, el nivel de agua en los tanques unidireccionales en régimen permanente, debe de estar siempre por debajo de la línea de alturas piezométricas de la tubería.

Tanque Unidireccional - Datos básicos								Ramal de unión				
Nombre	Nudo	Zu (m)	Act	D (m)	Rug (mm)	Zb (m)	Niv.max (m)	D (mm)	L (m)	Rug (mm)	K sal	Calc K
Tn3	N3		<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	0	0	0	0	0	0	...

Figura 70. Parámetros a definir en un tanque unidireccional en Allievi

Para reponer el volumen del tanque se utiliza una válvula de llenado con flotador conectada a la tubería principal.

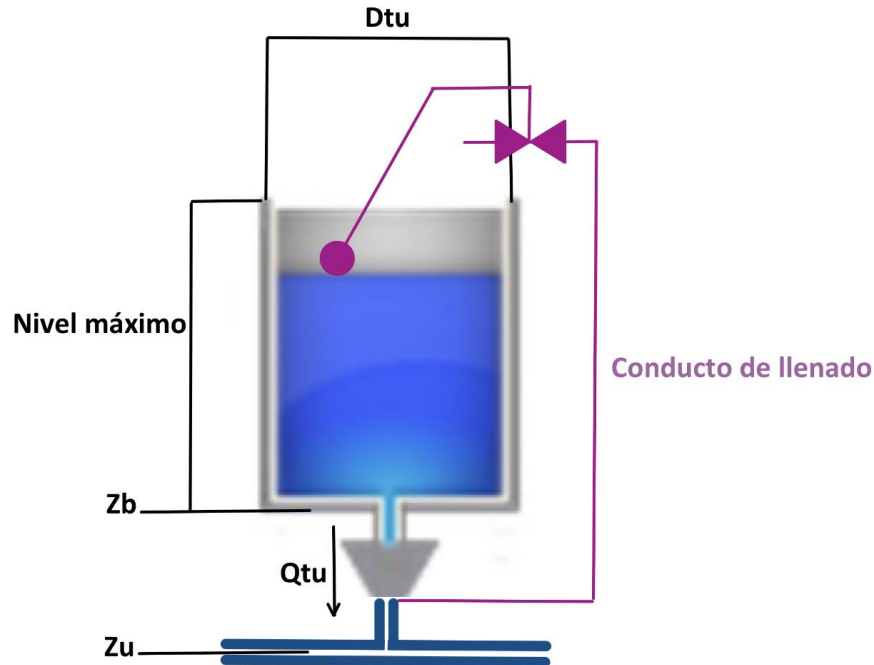


Figura 71. Tanque unidireccional

Un tanque unidireccional consigue evitar presiones negativas durante el transitorio, manteniendo la línea de alturas piezométricas por encima del perfil de la tubería principal.

Presentan la misma **desventaja** que las chimeneas, al comenzar a actuar cuando el transitorio llega al punto en el que este colocado, se produce una deficiente protección frente a depresiones aguas abajo. Debe de tenerse en cuenta el coste de mantenimiento de la válvula de retención y llenado. Esta operación puede resultar complicada por el acceso al tanque.

1.6.4 VENTOSA

Las ventosas se pueden colocar a lo largo de una tubería y permiten controlar las depresiones en su entorno de influencia. Cuando la presión cae por debajo de la atmosférica se permite la entrada de aire en la conducción. De esta manera se evita que las presiones bajen por debajo de la atmosférica.

Las ventosas normalmente consisten en un flotador que abre o cierra el orificio de contacto con la atmosfera en función de la presión. Este proceso se produce en 4 fases: cuando la presión en el punto de conexión con la tubería desciende el nivel del agua comienza a bajar y por lo tanto el flotador deja el orificio del aire abierto; a continuación, la presión comienza a aumentar y el nivel de agua sube; finalmente, sube hasta que la presión es mayor que la atmosférica cerrando el orificio de aire. Para que funcionen de forma adecuada debe de tener un mantenimiento adecuado.

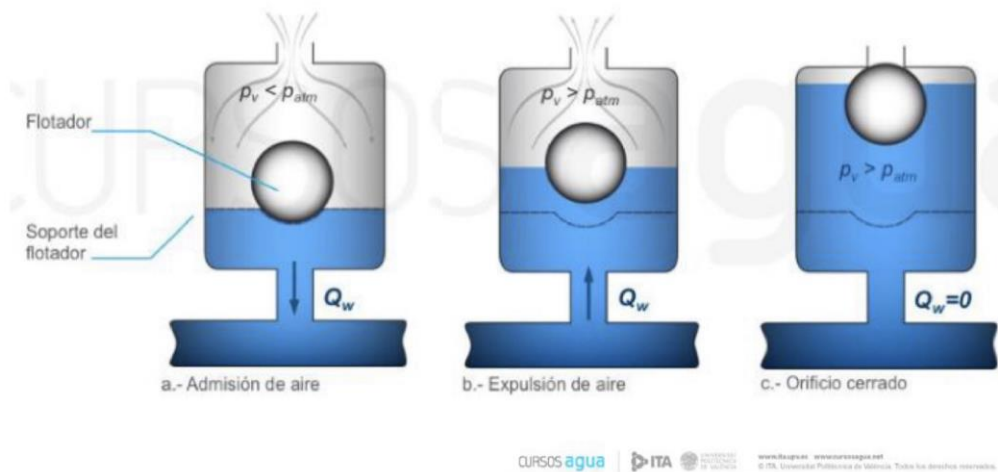


Figura 72. Fases de las ventosas

Las características más adecuadas son: una gran capacidad de admisión para que la presión nunca sea inferior a la negativa y una capacidad de expulsión baja, para evitar el cierre brusco que provocaría picos de presión. Para conseguir este objetivo podemos incorporar un aductor a la ventosa, este permite el flujo de aire de entrada, pero no de salida.

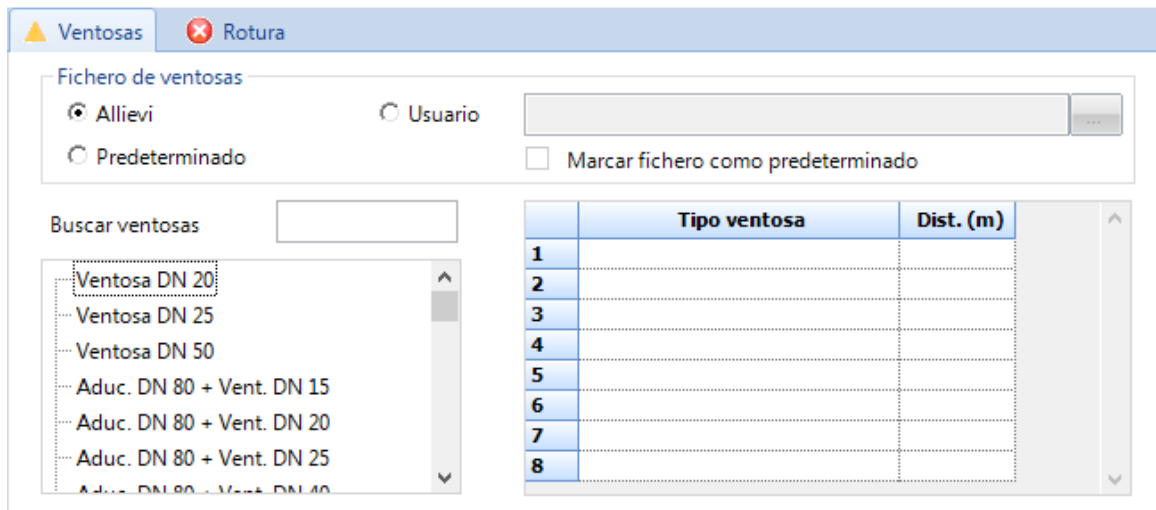


Figura 73. Parámetros a definir en una ventosa

El principal **inconveniente** de las ventosas es la incertidumbre que presentan, ya que las simulaciones no son muy fiables. La entrada de aire es controlada, pero como este se distribuye por la tubería tiene un cierto nivel de incertidumbre. Por ello el uso de ventosas debería de ser reducido a casos necesarios. Aun así, las ventosas son necesarias para la purga de aire y el llenado y vaciado de las tuberías. Pero el resto de elementos de protección deberían impedir que las presiones estén por debajo de la atmosférica. De forma que las ventosas no intervengan en el transitorio.

	Uso más frecuente	Localización	Fases	Altura
Calderín	Proteger frente a parada de bombas	Aguas abajo	-Expansión del gas -Compresión del gas	
Chimenea de equilibrio	Bombeos de pequeña altura con tuberías largas o puntos elevados	Puntos altos donde la diferencia entre la cota y la altura piezométrica sea discreta	-Régimen permanente -Se aproxima la onda -Llega la onda y es reflejada -Evita que se propague	Superior a la altura piezométrica en el punto de conexión.
Tanque unidireccional	Bombeos de pequeña altura con tuberías largas o puntos elevados	Puntos con peligro de tener presiones negativas.	-Régimen permanente -Se aproxima la onda -Llega la onda y es fraccionada -Parte se transmite y parte se refleja.	Inferior a la altura piezométrica en el punto de conexión.

Ventosa	Depresiones en la tubería Evitar su uso como elemento de protección frente a transitorio	A lo largo de la tubería	<ul style="list-style-type: none"> - $P < P_{atm}$ orificio del aire abierto - Presión comienza a aumentar y el nivel de agua sube - $P > P_{atm}$ cerrando el orificio de aire 	
---------	---	--------------------------	--	--

Tabla 2. Resumen características principales de los elementos de protección

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

El objetivo de este capítulo es describir las tecnologías, protocolos, herramientas específicas, etc. que se vayan a tratar durante el proyecto para facilitar su lectura y comprensión.

Para el análisis de transitorios hidráulicos es necesario el uso de software avanzado, como hemos explicado en la modelación matemática del fenómeno. El Programa usado para analizar las distintas situaciones es **Allievi**.

La forma más efectiva de analizar un transitorio es a través de la simulación. Allievi es un software desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, para el cálculo y simulación de transitorios hidráulicos. Permite representar gráficos de los diferentes parámetros de la instalación. Uno de los principales usos, es el de saber elegir y dimensionar los elementos de protección en función de la instalación, con el fin de mitigar el transitorio, y de esta forma proteger nuestro circuito.

El ITA lleva desarrollando paquetes de software desde la década de los 80, para uso interno y comercial. Ofreciendo resultados científicos rigurosos. Allievi es un paquete informático cuyo algoritmo ha sido contrastado con proyectos reales durante años.



Para Microsoft Windows 7 o posteriores

- Licencia gratuita sin publicidad ni límites
- Gran cantidad de elementos, incluyendo canales y turbinas
- Sin límite de nudos
- Comparación dinámica de escenarios
- Gráficos automatizados para informes
- Importación de redes en formato EPANET
- Soporte técnico profesional y formación y acreditación online

Figura 74. Software Allievi

Dada la importancia del transitorio, el software que usemos debe de ser robusto, fiable y eficaz. Además, debe de permitir la flexible modelación del sistema y sus parámetros, para que la simulación sea lo más veraz posible. Simula transitorios con o sin elementos de protección, por lo tanto, Allievi puede ser usado tanto para la fase de diseño de un ciclo hidráulico o para el análisis de su funcionamiento.

Todas estas simulaciones precisan de gran potencial de cálculo y tiempo. No estudiaremos tan solo maniobras cotidianas, como el cierre de válvulas, sino también casos no previstos, fallos, como el corte del suministro eléctrico. El algoritmo se basa en el método de las características, ya explicado en los métodos matemáticos.

En este capítulo, se exponen algunas de las funciones y características del programa.

2.1 OSCILACIONES DE PRESIÓN

Cuando se genera un transitorio se produce una onda de presión, la cual a veces puede pasar desapercibida para un manómetro convencional. Esta onda progresiva va originando cambios de presión en los distintos puntos de la tubería. Las ondas pueden ser de sobrepresión o depresión, en función de si el incremento de presiones es positivo o negativo.

Envolventes de alturas piezométricas máximas y mínimas

Este será el tipo de gráfico más utilizado a la hora de hacer el análisis del sistema en el capítulo 5. Una envolvente de alturas piezométricas muestra todas las alturas máximas o mínimas H que se alcanzan el régimen transitorio en cada punto de la tubería.

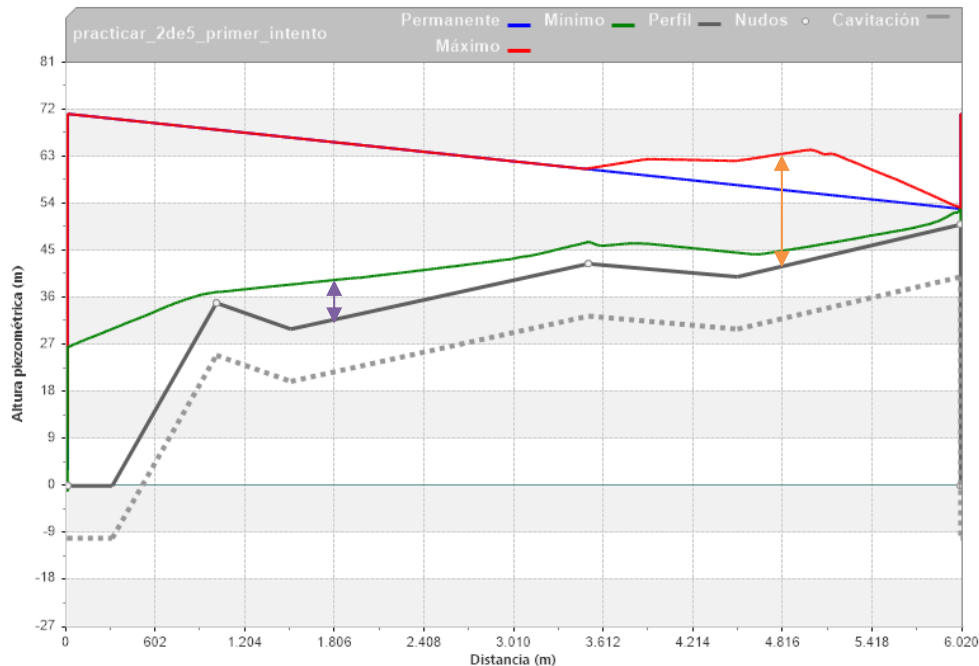


Figura 75. Gráfica de envolventes de un ciclo

Esta misma gráfica se puede realizar, no tan solo con las alturas piezométricas, sino con presiones, caudales o velocidades.

Presiones máximas y mínimas

A la hora de interpretar esta grafica no se debe perder de vista que se trata de alturas piezométricas, en mca, no de presiones. Pero podemos saber la presión máxima en cada punto de la tubería del transitorio a partir de estas alturas piezométricas:

Presión máxima (P_{\max}/γ)= la distancia entre el trazado de la conducción (línea negra continua) y la envolvente de alturas piezométricas máximas (línea roja continua). Por ejemplo, como se muestra en la figura en el punto $x=4816$ m con la flecha naranja.

Presión mínima (P_{\min}/γ)= la distancia entre el trazado de la conducción (línea negra continua) y la envolvente de alturas piezométricas mínima (línea verde continua). Por ejemplo, como se muestra en la figura en el punto $x=1806$ m con la flecha morada.

Estos valores de presión máxima y mínima son esenciales a la hora de diseñar un circuito y dimensionar la instalación. En el caso de las tuberías, su timbraje, del cual hablaremos más adelante, debe de ser suficiente para soportar estas presiones máximas. Además, los sistemas de protección deben de evitar las presiones negativas, para prevenir el colapso de la tubería o la separación de columna líquida.

2.2 *PULSO DE JOUKOWSKY O DE ALLIEVI*

En función de la magnitud de la perturbación, o sea del cambio de velocidad, se generan mayores sobrepresiones máximas de mayores o menores. Si la velocidad inicial pasa a ser nula en un instante, la sobrepresión se puede estimar con el pulso de Joukowski:

$$\Delta H_{max} = \frac{\Delta P_{max}}{\gamma} = \pm \frac{a V_0}{g}$$

Ecuación 16

ΔH_{max} : sobrepresión máxima (mca)

ΔP_{max} : gradiente de presión máxima (Pa)

γ : peso específico ($\rho * g$)

a : celeridad de la onda (m/s)

V_0 : velocidad inicial (m/s)

Los signos + y – indican que el pulso puede ser de sobrepresión o depresión.

Pero este valor es el máximo que se puede llegar a alcanzar, ya que es el ocasionado por el cierre instantáneo ($T_c=0$).

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El objetivo es la seguridad del circuito hidráulico. Y para alcanzarla, incluso en circunstancias extremas, en primer lugar debemos preguntarnos si existe algo en el mercado que nos permita obtener los resultados deseados de forma simple. Está herramienta que nos va a permitir analizar los circuitos es el software Allievi. Antes de explicar los objetivos y la justificación del trabajo, se presenta una breve introducción histórica acerca del ICAI y la importancia que han tenido siempre sus talleres y laboratorios.

Los laboratorios y talleres han sido siempre pieza importante en la actividad de ICAI. La instalación del laboratorio de Máquinas de Fluidos estuvo dirigida por el P. Claudio Mataix en sus comienzos.

El ICAI comienza una década después de haberse inaugurado el seminario de Comillas y un año antes de que ésta fuera elevada al rango de universidad pontificia por el papa Pío X.

El donante que financió este proyecto fue la marquesa de Vallejo, Doña Nicolasa, quien propone a los jesuitas crear una escuela para impartir moralidad a los obreros y a los hijos de éstos. La Compañía de Jesús acepta la idea y la modifica, considera que el mejor medio es formar a los obreros íntegramente. Respondiendo así a un gran problema del inicio del siglo XX, la necesidad de mano de obra especializada, debido a la aceleración del proceso industrial. Tras 4 años de obra en 1908 comienza la actividad docente.

Se fundó como Escuela de Mecánica y Electricidad para formar cristiana y técnicamente al personal que trabajaba en las fábricas. Posteriormente se comenzaron a ofrecer titulaciones superiores para ayudar en la promoción profesional a los estudiantes más dotados. Se otorgó validez a los estudios cursados en ICAI por Decreto en 1950 y posterior Ley en 1957.

Gran parte del prestigio de la escuela se debe a sus laboratorios. Dada su polivalencia, se van a estudiar los cinco circuitos principales. El funcionamiento de una instalación hidráulica a presión se puede ver alterado por distintas razones. En el caso de los cuatro primeros circuitos, la parada repentina de la bomba debido a un corte del suministro eléctrico, y en el quinto, debido a la desconexión de la turbina.

El objetivo es probar las tuberías en situaciones extremas en las que las sobrepresiones y depresiones alcanzan valores fuera de lo normal. En el caso de que el circuito estuviera diseñado con un coeficiente de seguridad poco conservador, estas presiones podrían tener consecuencias catastróficas en los distintos elementos del sistema. Se trata de poder prever el fallo por medio de la simulación, y proponer medidas de protección, como se ha explicado en el capítulo 1.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El normal funcionamiento de una instalación hidráulica a presión puede verse alterada de múltiples maneras, como puede ser la parada inesperada de una estación de bombeo, el cierre brusco de una válvula o la rotura de una tubería. Estas actuaciones generan lo que denominamos transitorios hidráulicos, cuyas consecuencias pueden llegar a ser devastadoras en la instalación, por ello es necesario disponer de profesionales cualificados capaces de prever, analizar y solucionar las problemáticas que pueden ocasionar estos transitorios hidráulicos.

Debido a su complejidad, no son muchos los profesionales especializados en el análisis y simulación de transitorios hidráulicos en redes de agua a presión.

Vamos a estudiar en distintos circuitos del laboratorio de Fluidos de ICAI, los posibles efectos de una perturbación sobre los elementos que lo forman. De esta forma se pueden prever posibles fallos en las tuberías.

Los cinco circuitos principales que se van a analizar son los siguientes:

- Canal con bomba Weise
- Canal con bomba Emica
- Turbina Kaplan con bomba Weise
- Turbina Pelton con bomba Sumergida
- Turbina Francis con salto de agua

El modelado matemático que calcula las presiones tras la parada de una bomba, el cierre de una válvula o la perturbación que ocasione el transitorio, está reunido en el software de transitorios hidráulicos que usaremos en este proyecto, Allievi.

4.2 *METODOLOGÍA*

En líneas generales, para prevenir el golpe de ariete en un ciclo, el procedimiento a seguir es: diagnosticar, formular y proteger. En primer lugar, se deben de conocer los límites de seguridad del sistema y las condiciones que son aceptables; estudiar los posibles fallos y las causas, y resaltar aquellos cuyas consecuencias pueden tener importancia; estudiar las alturas piezométricas en el régimen permanente, para el que fue diseñado, e identificar los puntos con mayor peligro; por último, se preparan las especificaciones para el análisis por ordenador con el fin de decidir cuál es el mejor método de protección.

Si la presión mínima no es inferior a la de cavitación, el efecto de la separación de columna de agua no es un problema en el circuito, de lo contrario el diseño no es adecuado y se tratara de proponer una solución.

Las tuberías son de acero al carbono, para el cual se va a sumir una tensión admisible $\sigma_{adm}=1600 \text{ kg/cm}^2$.

Haciendo un análisis de esfuerzos sobre la tubería, considerada de pared delgada:

$$2 e \sigma_{adm} CS \geq p_{max} D_{int} \rightarrow p_{max} \leq \frac{2 e \sigma_{adm} CS}{D_{int}}$$

Ecuación 17

e: espesor de la tubería

CS: coeficiente de seguridad (1,5)

D_{int} : diámetro interior de la misma.

Procedimiento: si ante una parada repentina (por corte de suministro eléctrico), la presión máxima en todos los puntos del circuito en estudio es menor que el valor dado por la ecuación, la instalación está bien dimensionada. En caso contrario, habría que disponer de los elementos necesarios para que la presión máxima no superara el valor dado por dicha ecuación.

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

5.1 VARIABLES Y MAGNITUDES DE LA FORMULACIÓN

Variables

Hemos presentado a las perturbaciones como la causa de un cambio en las variables del sistema, o sea el espacio y el tiempo.

- Tiempo (t)

El estudio del régimen transitorio resulta mucho más complejo que el permanente debido al cambio de la variable tiempo (t), que aparecerá en todas las ecuaciones debido a su importancia.

- Espacio (x)

En general, estudiaremos estos transitorios a lo largo de las tuberías, teniendo en cuenta tan solo los efectos longitudinales, dado que serán los relevantes. Por ello el fenómeno se considera unidimensional y se define con la coordenada x a lo largo de la tubería. Magnitudes como la velocidad o el caudal miden el promedio de la sección en cada punto x.

Magnitudes de la formulación

Las propiedades de los fluidos que circulan por el circuito hidráulico durante el transitorio, van definidas en función de las variables antes mencionadas, espacio y tiempo.

Presión	$P(x, t)$
Velocidad	$V(x, t)$
Caudal	$Q(x, t)$
Altura piezométrica	$H(x, t)$
Sección de la tubería	$A(x, t)$
Densidad del fluido	$\rho(x, t)$

Tabla 3. Magnitudes de la formulación

5.1.1 ECUACIONES DE LA PROPAGACIÓN

Como explicamos en el capítulo 1 en las fases, durante el transitorio se producen cambios no tan solo en velocidad, sino en las dimensiones de la tubería y en la densidad del fluido.

En el circuito del laboratorio del ICAI que estudiamos, usaremos agua, cuyo módulo elástico y densidad son:

$$K = 2.74 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

- **Celeridad**

Es la velocidad a la que se desplaza la onda a lo largo de la tubería. Su magnitud depende de los siguientes parámetros.

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{D K}{e E}}}$$

Ecuación 18

ρ : densidad del fluido

K: Modulo de elasticidad volumétrico del fluido

E: Modulo de elasticidad de la tubería

e: espesor de la tubería

D: diámetro interior de la tubería

Si sustituimos los datos que la conocemos, dado que el fluido es agua:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \frac{D}{e} C}}$$

Ecuación 19

C: constante cuyo valor depende del material de la tubería.

- **Pulso de Joukowsky**

Expresa tras un cambio en la velocidad, sus consecuencias en presión o altura piezométrica, en el régimen transitorio.

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\gamma} = \pm \frac{a \Delta V}{g}$$

Ecuación 20

ΔH : sobrepresión (mca)

ΔP : gradiente de presión (Pa)

γ : peso específico ($\rho \cdot g$)

a : celeridad de la onda (m/s)

ΔV : gradiente velocidad (m/s)

Los signos + y – indican que el pulso puede ser de sobrepresión o depresión.

Pero también tiene importancia las circunstancias en las que se da este cambio de velocidad. Ya que depende de la celeridad, por lo tanto, del material de la tubería, sus dimensiones y el fluido.

5.1.1.1 Cierre instantáneo de una válvula

La sobrepresión máxima, se calcula aplicando esta ecuación al caso extremo en el cual la velocidad pasa de V_0 a 0 en un instante. Ya ha sido mencionado en el punto 2.2.

$$T_c \approx 0$$

$$\Delta H_{max} = \frac{\Delta P_{max}}{\gamma} = \pm \frac{a V_0}{g}$$

Ecuación 21

T_c : tiempo de cierre (s)

ΔH_{max} : sobrepresión máxima (mca)

ΔP_{max} : gradiente de presión máxima (Pa)

γ : peso específico ($\rho \cdot g$)

a : celeridad de la onda (m/s)

V_0 : velocidad inicial (m/s)

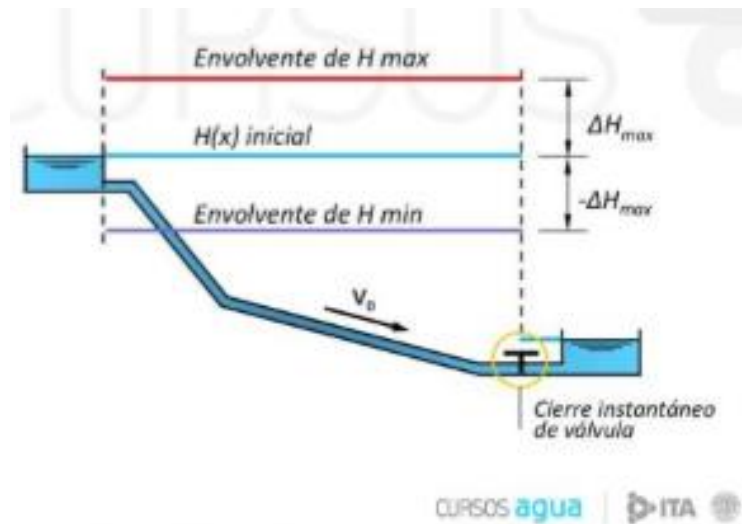


Figura 76. Envoltura cierre instantáneo de una válvula

5.1.1.2 Cierre rápido de una válvula

El cierre rápido de una válvula provoca alturas piezométricas máximas, del valor del pulso máximo de Joukowsky, en las inmediaciones de la válvula. Afectando a una longitud de la tubería que definiremos a continuación como L_{max} .

$$0 < T_c < \frac{2L}{a}$$

$$L_{max} = L_t - \frac{T_c a}{2}$$

Ecuación 22

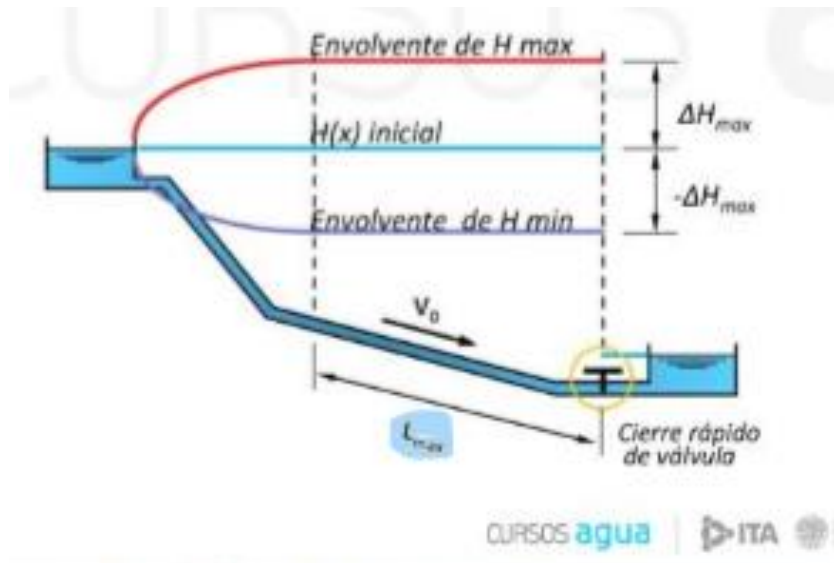


Figura 77. Envolvente cierre rápido de una válvula

5.1.1.3 Cierre lento de una válvula

Si el tiempo de cierre de válvula es mayor que lo que tarda la onda en recorrer la tubería en su recorrido de ida y vuelta, provoca oscilaciones de menor magnitud. La altura piezométrica máxima se va en el punto de conexión con la válvula.

$$T_c > \frac{2L}{a}$$

$$\Delta H_{max} = \frac{2L V_0}{g T_c}$$

Ecuación 23

Esta ley sería válida tan solo para los casos en los cuales la velocidad variase de forma proporcional al cierre de la válvula. (Hipótesis que asumió Michaud durante su desarrollo)



Figura 78. Envolvente cierre lento de una válvula

5.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA

5.2.1 TUBERÍAS

La resistencia mecánica de las tuberías es uno de los parámetros principales del diseño de una instalación hidráulica. El parámetro que la mide suele ser el timbraje, en función del material, diámetro y espesor de la tubería. En otras palabras, es la presión máxima de trabajo, o presión nominal (PN).

En tuberías principales de gran diámetro ($D \in [500, 2000]$ m) y en las redes de distribución de diámetros más reducidos ($D \in [50, 500]$ m), medimos la rigidez a partir del coeficiente D/e . Si se producen presiones negativas durante el transitorio, tiene más probabilidades de colapsar las tuberías elásticas, es decir, las de gran diámetro y poco espesor. Aunque el material no determina la rigidez, es un parámetro fundamental en la propagación de la onda.

La celeridad es un parámetro que depende en gran medida del material de la tubería. Allievi calcula la celeridad a partir del coeficiente de material de la tubería y sus características dimensionales.

$$a_{\text{materiales metálicos}} = 1000 \text{ m/s}$$

$$a_{\text{materiales plásticos}} = [300, 500] \text{ m/s}$$

En nuestro circuito las tuberías son de acero, cuyo coeficiente de material es 0.5, pero por razones de envejecimiento lo consideraremos 1.5 en algunas ocasiones.

Cálculo de la celeridad de la tubería seleccionada

Permite asignar un valor a la celeridad o calcularlo mediante la introducción de tres parámetros

Especificar celeridad

Celeridad (m/s)

Calcular celeridad

Diámetro (mm)	<input style="width: 60%;" type="text" value="262,40000"/>
Espesor (mm)	<input style="width: 60%;" type="text" value="5,00000"/>
Coef. material	<input style="width: 60%;" type="text" value="1,50"/>
Celeridad (m/s)	<input style="width: 60%;" type="text" value="880,8443"/>

Coeficientes de material de tubería

Coeficiente: CMT = 1.0E+6/ModElastTub(Kp/cm2)

Acero:..... 0.5 MET = (2.0 - 2.12)E+6 Kp/cm2

Fundición:..... 0.6 - 1.3 MET = (0.80 - 1.70)E+6 Kp/cm2

Hormigón:..... 3.3 - 7.1 MET = (0.14 - 0.30)E+6 Kp/cm2

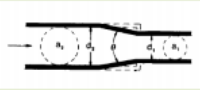





H. arm. camisa chapa:.. 2.5 MET = 0.39E+6 Kp/cm2

PVC Rígido:..... 36 - 42 MET = (2.40 - 2.75)E+4 Kp/cm2

Figura 79. Cálculo de la celeridad

En el caso de que queramos despreciar el transitorio en una tubería porque es auxiliar, tomamos un valor de 0 m/s para la celeridad.

También se deben de tener en cuenta las pérdidas de carga en los codos. Introduciendo en el programa el valor del coeficiente de pérdida de carga, K, correspondiente para cada tubería.

TIPO DE ACCESORIO	DIBUJO	CONDICIÓN	FÓRMULA
ESTRECHAMIENTO BRUSCO Y GRADUAL		$\theta < 45^\circ$	$K = \frac{0,8 \cdot (\sin \theta / 2) (1 - \beta^2)}{\tau^4}$
		$45^\circ < \theta < 90^\circ$	$K = \frac{0,5 \cdot \sqrt{(\sin \theta / 2) (1 - \beta^2)}}{\tau^4}$
ENSANCHAMIENTO BRUSCO Y GRADUAL		$\theta < 45^\circ$	$K = \frac{2,6 \cdot (\sin \theta / 2) (1 - \beta^2)^2}{\tau^4}$
		$45^\circ < \theta < 90^\circ$	$K = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\tau^4}$
CODOS 90°			$K=30 \cdot f_T$
CODO 45°			$K=16 \cdot f_T$
CONEXIONES ESTÁNDAR EN "T"		FLUJO DIRECTO	$K=20 \cdot f_T$
		FLUJO DESVIADO A 90°	$K=60 \cdot f_T$
CURVAS DE 180° DE RADIO			$K=50 \cdot f_T$

DIÁMETRO	mm	15	20	25	32	40	50	65,80	100	125	150	200,250	300,400
NOMINAL	Pulg	3/8	1/2	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2, 3	4	5	6	8, 10	12, 16
Factor de fricción		0,027	0,025	0,023	0,022	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012

Figura 80. Correlaciones para el cálculo de pérdidas de carga a través de accesorios

5.2.2 VÁLVULAS

Las válvulas son unos de los elementos más comunes de las instalaciones hidráulicas, su función es abrir una compuerta para permitir el paso del fluido. Las válvulas del circuito que vamos a estudiar son válvulas de regulación de compuerta.

Para el cálculo de las pérdidas de carga introducimos el coeficiente k y el programa las calcula.

Codos, accesorios, válvulas*	
Codo 45°	0.35 a 0.45
Codo 90°	0.50 a 0.70
Codo 22° 30'	0.25 a 0.30
Te, de paso directo	0.60
Te, salida de lado	1.30
Te, salida bilateral	1.8 a 2.0
Válvulas de compuerta (abierta)....	aprox. 0.25
Válvulas de control (abierta).....	aprox. 3.00
Válvula de globo abierta	10.00
Válvula de pie	1.75
Válvula de retención	2.75

$$K \frac{V^2}{2g}$$

Figura 81. Valores del coeficiente “k” para pérdidas de energía local

Las principales ventajas de las válvulas de compuerta son su alta capacidad, son económicas y ofrecen poca resistencia a la circulación.

5.2.3 DEPÓSITOS

Los depósitos son elementos de almacén que satisfacen la demanda de agua de la instalación. Los depósitos pueden ser de grandes dimensiones o de pequeñas. En los depósitos de grandes dimensiones no es necesario especificar las superficie y altura, ya que se considera que su capacidad es infinita, como un lago o embalse. Sin embargo, en los de pequeña sección el nivel del agua puede ir variando durante el transitorio y su capacidad es limitada.

5.2.4 ESTACIONES DE BOMBEO

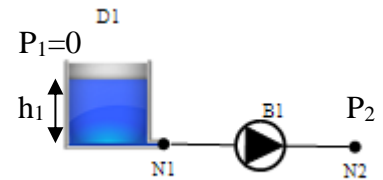
Las bombas son elementos esenciales de las instalaciones hidráulicas, su utilidad principal es transportar un caudal de un depósito a otro o alcanzar una determinada presión en la red de distribución. Muchos transitorios hidráulicos están asociados a las bombas.

Uno de los parámetros fundamentales de las bombas es la altura motriz o altura de bombero, H_b. Es la diferencia entre la presión en la entrada y salida de la bomba. La bomba puede aspirar directamente de la red o de un depósito abierto a la atmosfera.

- Aspiración desde depósito a presión atmosférica

$$H_b = \frac{P_2}{\gamma} - \left(\frac{P_1}{\gamma} + h_1 \right) = \frac{P_2}{\gamma} - h_1$$

Ecuación 24



- Aspiración directa de red

$$H_b = \frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}$$

Ecuación 25



Para llegar a comprender las bombas es necesario conocer las curvas que las representan: curva característica o altura en función del caudal y curva de rendimiento. En primer lugar, la curva motriz muestra el caudal que la bomba aporta para cada punto de su funcionamiento en relación con la altura. Mientras que la curva de rendimiento, muestra el rendimiento en función del caudal. Observando la gráfica podemos encontrar fácilmente una zona útil de la bomba, si el caudal está en el intervalo $[Q_{\min}, Q_{\max}]$ el rendimiento es aceptable ($\eta > \eta_{\min}$). El mejor punto de trabajo será el nominal.

$$H_b = A + B Q_b + C Q_b^2$$

Ecuación 26. Forma analítica de la curva característica

$$\eta_b = D Q_b + E Q_b^2$$

Ecuación 27. Forma analítica de la curva de rendimiento

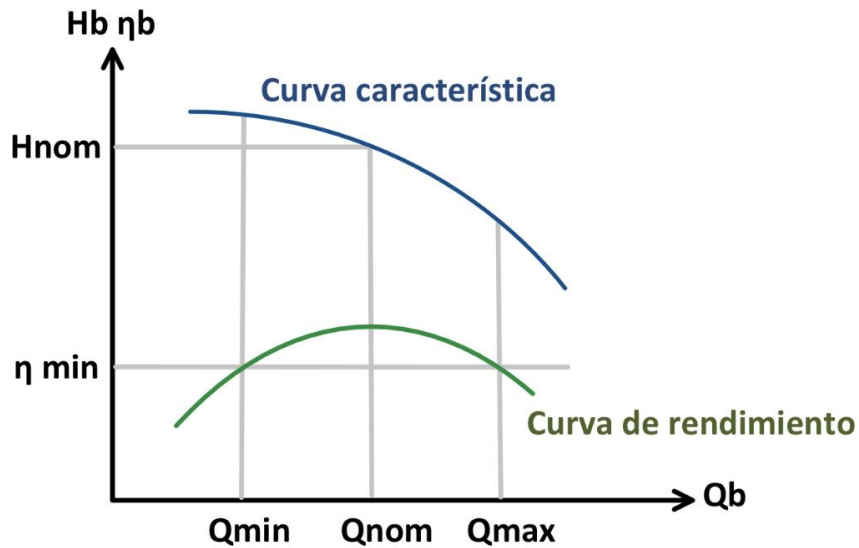


Figura 82. Curva motriz y de rendimiento de la bomba

Una vez conocemos la curva de la bomba, hay que estudiar como interacciona con la curva de la instalación. El punto de funcionamiento, es decir, el caudal y altura que están proporcionando la bomba, es la intersección entre la curva motriz de la bomba y la curva resistente de la instalación.

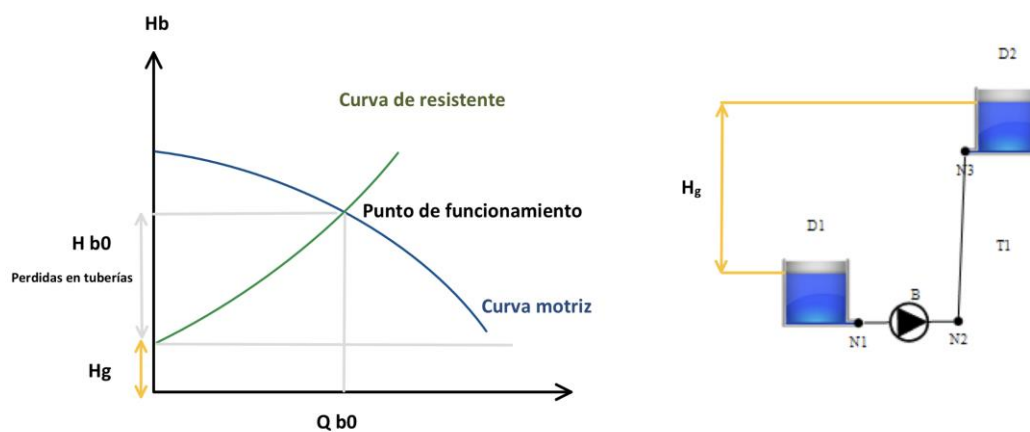


Figura 83. Curva motriz de la bomba y resistente de la instalación

La curva resistente de la instalación tiene en cuenta la altura geométrica de la impulsión y las pérdidas de carga a lo largo de la tubería.

$$H_r = H_g + R Q_t^2 + K Q_t^2$$

Ecuación 28. Forma analítica de la curva de resistente

R: coeficiente de perdidas por fricción en la tubería.

K: coeficiente de pérdidas en los accesorios

Q_t: caudal de la tubería

5.2.4.1 Comportamiento de las bombas

Observando la curva de características de una bomba, o sea el caudal (Q_b) frente a la altura (H_b), el uso más adecuado es en el primer cuadrante, cuando ambos son positivos. Pero nos transitorios pueden llegar a desplazar este punto de funcionamiento a valores negativos tanto de caudal como altura. Aun así, hay situaciones en las que estos puntos de funcionamiento son a propósito.

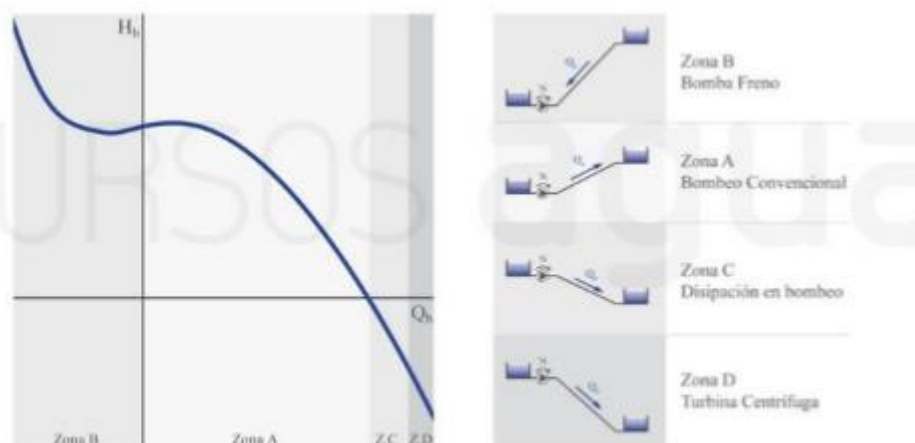


Figura 84. Curva de características de la bomba

Además de valores negativos de caudal y altura, la bomba puede funcionar con valores negativos de: velocidad de rotación (N), par en el eje (M) y potencia absorbida (P_a).

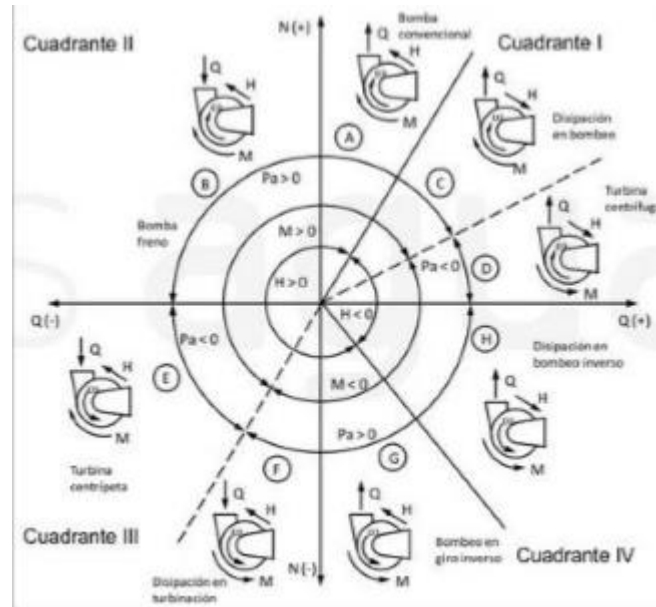


Figura 85. Diversos campos de trabajo de la bomba

En el circuito del laboratorio disponemos de dos bombas, Bomba Weise y Bomba Emica. Dado que su comportamiento depende del punto de funcionamiento, los cálculos se pueden realizar basados en las curvas características del catálogo o las curvas universales. Allievi proporciona las curvas universales, por lo tanto, es el método que usaremos.

- Las curvas características del catálogo las proporciona el fabricante. Generalmente dan el funcionamiento en las condiciones normales, es decir, en el primer cuadrante normalmente. Esta información también podríamos obtenerla de forma empírica realizando ensayos con la bomba. Representa el comportamiento real. El catálogo contiene las siguientes curvas: Altura manométrica- caudal, Potencia absorbida- caudal y Rendimiento global- caudal.

Resulta útil la colocación de una válvula de retención a la salida de la bomba con el finde protegerla de caudales negativos, debido al flujo inverso. En nuestros circuitos colocamos una válvula de compuerta tras las bombas.

Estas curvas se pueden introducir en nuestro programa punto a punto, dando la información del caudal, la altura y por último la potencia, de forma que Allievi calculará un rendimiento para cada punto de funcionamiento de la bomba. Y finalmente trabajara con ellos durante las simulaciones.

- Las curvas universales son las que utiliza Allievi en su simulación a menos que se le especifique lo contrario. En este proyecto son las que usaremos. Las más comunes son las propuestas por Marchal, Flesh y Suter. Una vez introducimos los datos de caudal, altura y potencia, el programa que conoce la curva de la bomba calcula instantáneamente para ese caudal el rendimiento de la bomba para el punto óptimo de funcionamiento en el que estamos trabajando.

Su principal ventaja frente a las curvas del catálogo, es que permiten valores negativos de caudal, altura o velocidades de rotación. En definitiva, cualquier cuadrante o punto de funcionamiento.

Durante el transitorio el funcionamiento más común es el flujo inverso, dado que el agua retrocede. Causando así que el punto de funcionamiento se desplace en la curva al tercer o cuarto cuadrante como hemos visto previamente. Es necesario introducir el punto óptimo de funcionamiento para que el programa calcule el rendimiento máximo.

5.2.4.2 Elementos

En las instalaciones de bombeo existen distintos elementos como pueden ser bypass válvulas de regulación, válvulas de contención o varias bombas en paralelo.

Estaciones de bombeo con el fin de aumentar la potencia se colocan bombas en paralelo (o en serie, menos común). En el caso de nuestros circuitos la bomba Emica y la bomba Weise actúan de forma aislada.

Además, es común que las bombas lleven instaladas válvulas de distintos tipos, diámetros nominales y características de operación. Cuyas pérdidas también deben de tenerse en cuenta y dependen de la velocidad del agua.

$$h_v = k(\tau) \frac{v^2}{2g} = K(\tau) Q^2$$

Ecuación 29

$k(\tau)$: coeficiente de pérdidas menores [adimensional]

$$K(\tau): [\text{mca}/(\text{m}^3/\text{s}^2)] \quad K(\tau) = \frac{k(\tau)}{(2g) A_0^2}$$

En función del grado de apertura de la válvula (τ)

h_v : pérdidas de carga en la válvula [mca]

v : velocidad del fluido [m/s] $v = \frac{Q}{A_0}$

Q : caudal circulante [m^3/s]

Con el fin de evitar grandes depresiones ante la parada de una bomba se instalan bypass que actúen como un puente entre el depósito y el circuito. Mediante simulaciones se averigua si se mitiga los efectos del transitorio.

5.2.4.3 Inercia y velocidad de rotación

Tras la desconexión de la bomba el caudal comienza a disminuir progresivamente, así como la velocidad de giro debido a la inercia. La inercia de un grupo de bombeo depende de las masas rodantes, no tan solo del rodete del agua (primer término de la ecuación) sino también del rotor del motor (segundo término de la ecuación). Está puede calcularse

mediante datos que debe de aportar el fabricante de la bomba o fórmulas como la de Thorley que aproxima en el valor de la inercia, y usaremos en Allievi.

$$I = 0.3768 \frac{P^{0.9556}}{N^3} + 0.0043 \frac{P^{1.48}}{N}$$

Ecuación 30

P: Potencia de la bomba [KW]

N: Rotación nominal [rpm]

Hay dos tipos de velocidad de rotación del grupo de bombeo, la del régimen permanente (N_{reg}) y la de las curvas características (N_{nom}).

5.2.5 TURBINAS

Las turbinas hidráulicas son turbomáquinas que transforman la energía del fluido que las atraviesa en movimiento, que a través del eje se transmite a un generador, donde esta energía mecánica pasa a ser eléctrica.

Con el fin de generar energía eléctrica, las turbinas convierten la energía hidráulica, que contiene las corrientes y saltos de agua, esta es una forma de energía renovable. En función de las condiciones de partida, se pueden utilizar distintas turbinas. Las turbinas pueden ser de varios tipos, como eólicas, propulsoras o hidráulicas, en este caso nos centraremos en las terceras.

En el laboratorio de Fluidos de ICAI hay tres turbinas de distintos tipos: Francis, Kaplan y Pelton. Estas son las más utilizadas en presas hidráulicas o centrales hidroeléctricas. Se utilizarán dependiendo de la relación entre la cantidad de agua y la altura.

5.2.5.1 Turbina Francis

Es una turbina de reacción en la que el distribuidor está compuesto por álabes directrices móviles que regulan el caudal.

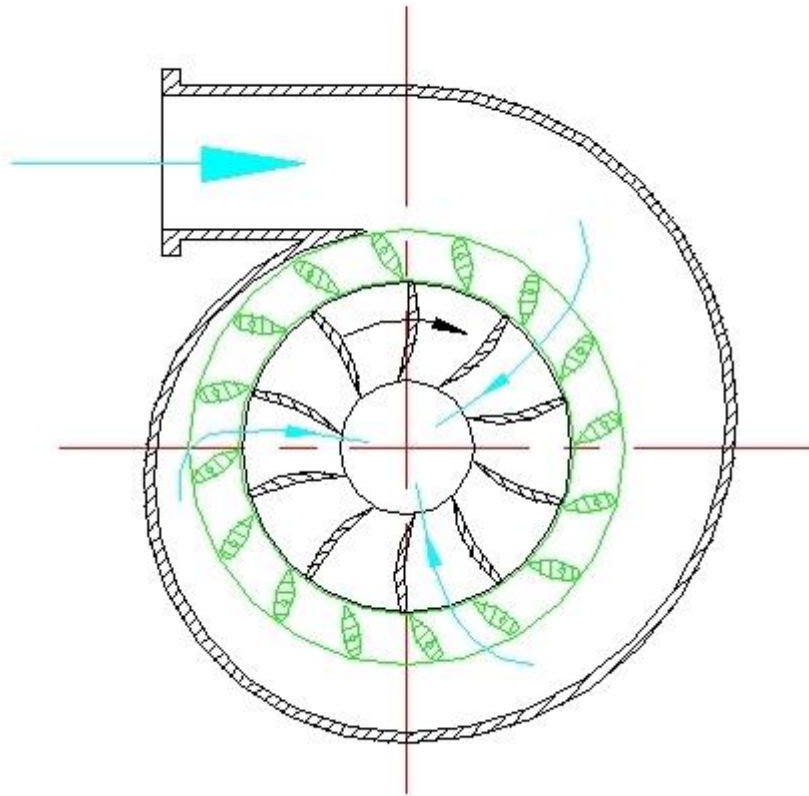


Figura 86. Esquema de funcionamiento de una Turbina Francis

Cuando el agua entra en el rodete cambia su velocidad, dirección y presión. La dirección de entrada y salida del agua no coincide con la dirección de giro del rodete. La potencia generada depende de la variación de la presión a lo largo del rodete.

Su principal ventaja frente a otras turbinas, es su versatilidad. Ya que puede diseñarse para un amplio rango de caudales y saltos.

5.2.5.2 Turbina Kaplan

Es una turbina de reacción axial, cuya novedad es la de disponer álabes orientables en el rotor. El distribuidor de agua está formado por álabes fijos o regulables. Si ambos (distribuidor y rodete) son regulables, se la denomina turbina Kaplan verdadera; si sólo son regulables los álabes del rodete, se la denomina turbina Semi-Kaplan.

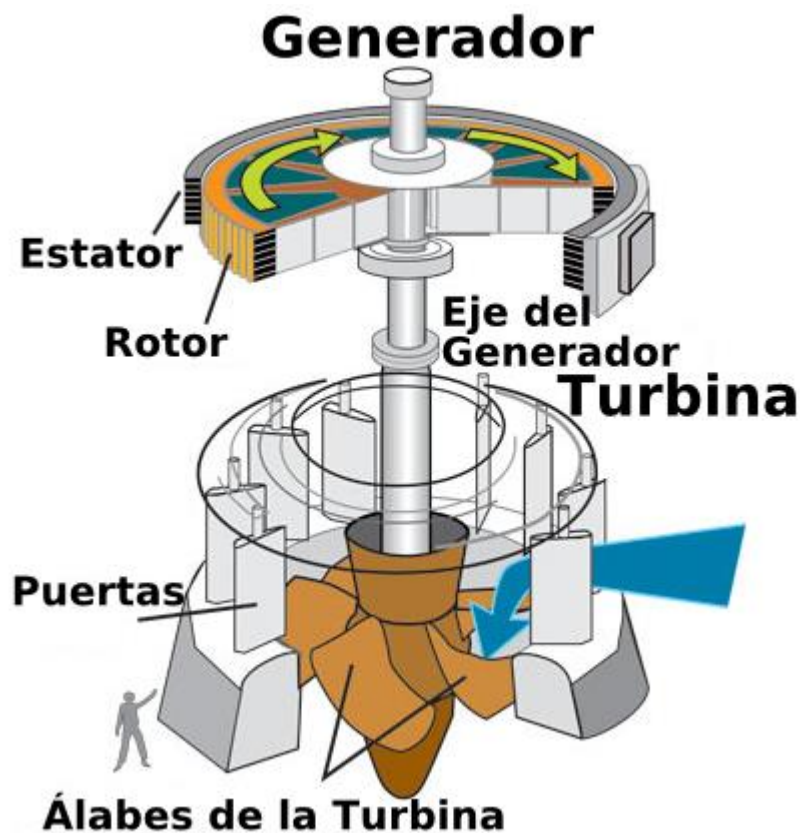


Figura 87. Esquema de funcionamiento de una Turbina Kaplan

Normalmente se utiliza para saltos de pequeña altura y grandes caudales.

5.2.5.3 Turbina Pelton

Es una turbina de acción donde el agua cae sobre el distribuidor (denominado inyector), que puede ser de una o varias entradas. El rodete, como se aprecia en la figura 88, consta de un anillo rodeado de álabes llamados cangilones (cucharas unidas por un vértice).



Figura 88. Turbina Pelton con los cangilones a la vista

El sentido de giro del rodete es el mismo que el de proyección del agua.

En la siguiente tabla se presentan los datos más relevantes de las turbinas del laboratorio, en los que se basan los próximos análisis.

	KAPLAN	PELTON	FRANCIS
Diámetro de la turbina [m]	1	0,9	1,4
Momento de inercia turbina-alternador [kg·m ²]	0,563	2,7	5,1
Velocidad de rotación de régimen [rpm]	1300	1000	600
Apertura inicial distribuidor [mm]	30		150
Apertura máxima distribuidor [mm]	60		150

Caudal (m ³ /s)	0,139	0,020	0,3
Altura [m]	4,55	100	10
Potencia [MW]	0,00485	0,01471	0,02207
Carga mínima para la desconexión en el proceso de variación de la carga [%]	30	20	35
Coefficiente proporcional de regulación k_p [-]	1	0,9	0,8
Coefficiente integrativo de regulación k_i [s]	10	10	12
Coefficiente derivativo de regulación k_d [s]	0,5	0,4	0,7
Coefficiente de realimentación de regulación k_{ra} [1/s]	100	100	100

Tabla 4. Datos Turbinas Kaplan, Pelton y Francis

5.2.5.4 Inyector

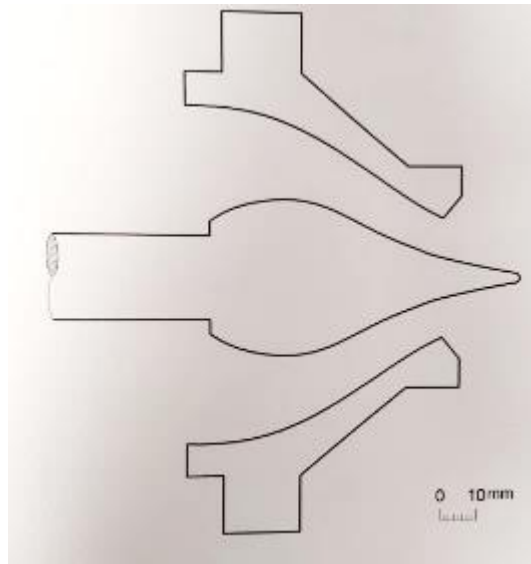


Figura 89. Inyector Turbina Pelton

El inyector es una válvula de aguja cuya función es la de convertir la energía de presión en energía cinética (para un mejor aprovechamiento de la energía en el rodete) y la regulación del caudal para ajustar la potencia producida en la turbina.

Tanto la entrada como la salida del rodete están abiertos a la atmósfera (turbina de acción), por lo tanto, sólo se aprovecha la energía cinética. En el caso de un inyector, el eje de la turbina suele ser horizontal, y vertical cuando dispone de varios inyectores (normalmente hasta 6).

5.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA

Descripción general del circuito hidráulico de la planta sótano del Laboratorio de Fluidos.

Consta de un depósito sumergido, cuya cota de fondo está 5 m por debajo del plano del suelo y cuya columna de agua suele ser de unos 3,5 m. El agua de este depósito, y por

mediación de las bombas Weise (500 m³/h, 12 mca, 1450 rpm) y Emica (1080 m³/h, 23 mca, 1450 rpm), alimenta al canal de vidrio y a las turbinas Kaplan (6,6 CV, 1300 rpm, 500 m³/h, 4,55 mca) y Francis (30 CV, 600 rpm, 1080 m³/h, 10 mca), las cuales disponen de sendos depósitos que actúan a modo de embalse de alimentación. El depósito que alimenta a la turbina Francis se encuentra en la segunda planta del edificio y el de la turbina Kaplan, en la planta baja del laboratorio. La turbina Pelton (14,7 KW, 1000 rpm, 72 m³/h, 70 a 100 mca) es alimentada también desde el mencionado depósito, pero por mediación de una bomba sumergida de alta presión (100 m³/h, 180 mca, 3000 rpm, 50 KW) que aporta una altura efectiva máxima de 180 m.

El esquema global de los circuitos hidráulicos de la planta sótano se muestra en la figura siguiente:

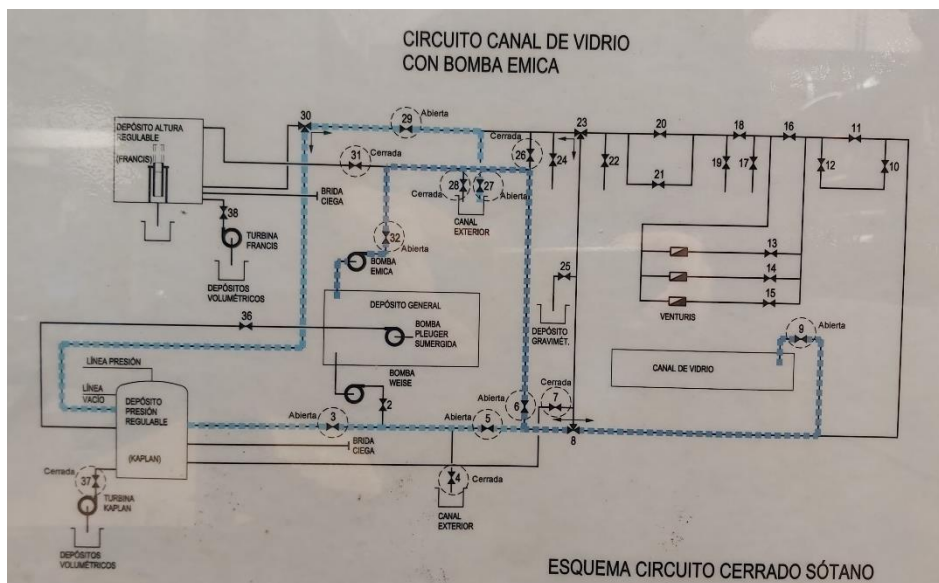


Figura 90. Esquema circuito sótano completo

Bombas Weise	500 m ³ /h	12 mca	1450 rpm
Bomba Emica	1080 m ³ /h	23 mca	1450 rpm

Bomba sumergida	100 m ³ /h	180 mca	3000 rpm	50 KW
Turbina Kaplan	500 m ³ /h	4,55 mca	1300 rpm	6,6 CV
Turbina Francis	1080 m ³ /h	10 mca	600 rpm	30 CV
Turbina Pelton	72 m ³ /h	70 a 100 mca	1000 rpm	14,7 KW

Figura 91. Circuito sótano datos generales de bombas y turbinas

5.3.1 CANAL CON BOMBA WEISE

5.3.1.1 Análisis del sistema

Este circuito alimenta un canal de vidrio (Canal) desde un depósito (Pozo) bajo la rasante de la planta sótano del nivel que vamos a analizar. Está formado por dos depósitos, una bomba y 3 válvulas, el resto de elementos no serán relevantes.

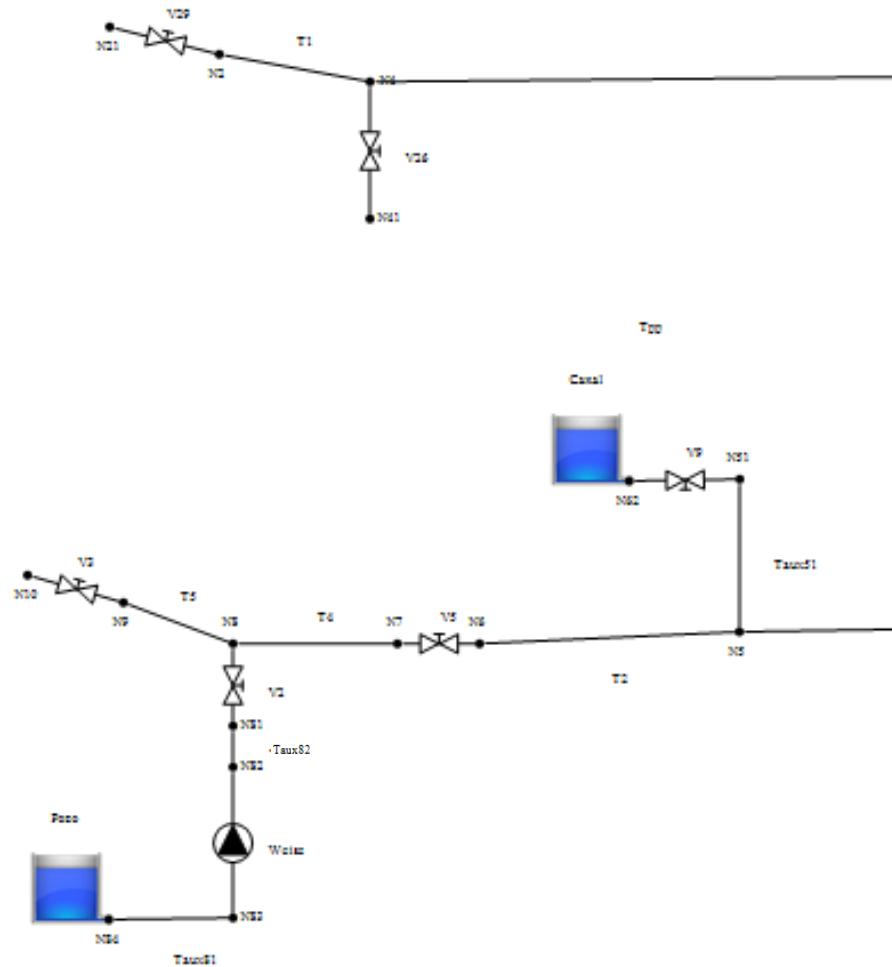


Figura 92. Circuito canal con bomba Weise

El agua sale del pozo (nudo 84) y se dirige por la tubería auxiliar 81 a la bomba Weise (nudos 83 a 82), a continuación pasa por la tubería auxiliar 82 (nudo 82 a 81) y válvula 2 pasando al circuito principal (nudo 8), donde se dirige al canal (nudo 52) tras atravesar la tubería 4 (nudo 8 a 7), válvula 5 (nudo 7 a 8), tubería 2 (nudo 5 a 51) y por último tubería auxiliar 51 (nudo 5 a 51) y válvula 9.

A continuación, se presentan los datos de los nudos, depósitos, tuberías, válvulas y la bomba, que hemos introducido en el programa para realizar las simulaciones. La cota del laboratorio es 2.5 m

Nudos	
Nombre	Cota (m)
N10	2,5
N2	2,5
N21	2,5
N4	2,5
N41	2,5
N5	2,5
N51	1,7
N6	2,5
N62	1,7
N7	2,5
N8	2,5
N81	2,5
N82	0,55
N83	0,55
N84	-2,64
N9	2,5

Figura 93. Datos de los nudos del Circuito canal con bomba Weise

Consideraremos el pozo y el canal como depósitos de grandes dimensiones.

Depósitos - Datos básicos							Vertedero/Aliviadero				División y Vertedero				Aliviadero móvil				
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	L (m)	Z Cresta (m)	Cq	Descarga	Si (m ²)	Z Si (m)	Sf (m ²)	Z Sf (m)	Cresta	Zf (m)	Ti(s)	Tf(s)
Pozo	---	N84	-2,64	GD	-	-2,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Canal	---	N62	1,7	GD	-	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Depósitos - Datos básicos							
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar
Pozo	---	N84	-2,64	GD	-	-2,63	-
Canal	---	N62	1,7	GD	-	1,8	-

Figura 94. Datos de los depósitos del Circuito canal con bomba Weise

En las tuberías sin flujo (5, 1 y pp) se considera una celeridad nula, de esta forma el programa no las incluirá en el cálculo del transitorio. Además, deben de incluirse los valores k de pérdida de carga secundaria, en el caso de la tubería 51, k=0.39 (codo de 90°).

Tuberías - Datos básicos											Pérdidas		Caudal nulo	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp	
T1	N2	2,5	N4	2,5	257,4	3,3	5	0	Calc.	----	0	0	-	
T2	N6	2,5	N5	2,5	257,4	14,95	5	1156,0184	Calc.	----	0	0	-	
T4	N8	2,5	N7	2,5	257,4	1,8	5	1156,0184	Calc.	----	0	0	-	
T5	N9	2,5	N8	2,5	257,4	1,6	5	0	Calc.	----	0	0	-	
Taux51	N5	2,5	N51	1,7	257,4	2,7	5	1156,0184	Calc.	----	0	0,39	-	
Taux81	N84	-2,64	N83	0,55	311	4,8	5	1115,9579	Calc.	----	0	0	-	
Taux82	N82	0,55	N81	2,5	257,4	3,8	5	1156,0184	Calc.	----	0	0	-	
Tpp	N4	2,5	N5	2,5	257,4	39,85	5	0	Calc.	----	0	0,65	-	

Figura 95. Datos de las turbias del Circuito canal con bomba Weise

El cálculo de las celeridades se realiza como ya hemos explicado en otros apartados.

Diámetro (mm)	311,00000
Espesor (mm)	5,00000
Coef. material	0,50
Celeridad (m/s)	1.115,9579

Figura 96. Cálculo de la celeridad de la tubería auxiliar 81

Diámetro (mm)	257,40000
Espesor (mm)	5,00000
Coef. material	0,50
Celeridad (m/s)	1.156,0184

Figura 97. Cálculo de la celeridad de las tuberías auxiliar 82, 4, 2 y auxiliar 51.

Todas las válvulas de este circuito son de compuerta, las únicas abiertas son la 2, 5 y la 9 permitiendo así el flujo de agua. El resto están completamente cerradas. Para el cálculo de las pérdidas de flujo a través de las válvulas debemos de especificar la k, que en este caso es 0.25.

Válvula Regulación - Datos básicos							Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $Ap(t)=Ap0+A*sen(2*Pi*t/T+B)$				
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
V26	N4	N41	2,5	262,4	0	De compuerta		Tabulada					
V2	N8	N81	2,5	262,4	0,25	De compuerta		Tabulada					
V9	N51	N62	1,7	262,4	0,25	De compuerta		Tabulada					
V29	N21	N2	2,5	262,4	0	De compuerta		Tabulada					
V3	N10	N9	2,5	262,4	0	De compuerta		Tabulada					
V5	N7	N6	2,5	262,4	0,25	De compuerta		Tabulada					

Válvula Regulación - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo
V26	N4	N41	2,5	262,4	0	De compuerta
V2	N8	N81	2,5	262,4	0,25	De compuerta
V9	N51	N62	1,7	262,4	0,25	De compuerta
V29	N21	N2	2,5	262,4	0	De compuerta
V3	N10	N9	2,5	262,4	0	De compuerta
V5	N7	N6	2,5	262,4	0,25	De compuerta

Figura 98. Datos de las válvulas del Circuito canal con bomba Weise

Por último, los datos de la bomba Weise.

Estación de bombeo - Datos básicos				Instalación			Rotación			Parada/Arranque							
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	V Reg	V Ret	By-Pass	Nreg	Nnom	I	Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arranque	Inst. arr.
Weise	N83	N82	0,55	1	Universale	No	No	No	1450	1450	0,716	Calc.	En marcha	No			
Rendimiento óptimo				V Regulación				V Retención		By-Pass							
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)	DN (mm)	Tipo	Modelo	Maniobra	K	K								
138,889	12	30	54,5														

Estación de bombeo - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	
Weise	N83	N82	0,55	1	Universale	

Instalación			Rotación		
V Reg	V Ret	By-Pass	Nreg	Nnom	I
No	No	No	1450	1450	0,716

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
138,889	12	30	54,5

Figura 99. Datos de la bomba Weise del Circuito canal con bomba Weise

Una vez que tenemos el sistema definido, podemos comenzar a realizar los análisis, el primer lugar el permanente y a continuación el transitorio en función de la perturbación que lo haya ocasionado.

5.3.1.2 Régimen Permanente

Resultado simulación

- Simulación finalizada con EXITO

- Finalizado el cálculo del régimen permanente en 4038 iteraciones

Nombre	H(m)	Pr(m)
N61_fin	1.80	0.10
N62	1.80	0.10
N51	2.01	0.31
N5	2.31	-0.19
N2	2.31	-0.19
N4	2.31	-0.19
N10	2.50	0.00
N41	2.50	0.00
N21	2.50	0.00
N84	-2.63	0.01
N84_fin	-2.63	0.01
N83	-2.68	-3.23
N6	2.73	0.23
N7	2.94	0.44
N8	2.99	0.49
N9	2.99	0.49
N81	3.19	0.69
N82	3.30	2.75

Figura 100. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito canal con bomba Weise

Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
T1	0.00	0.00	---	-0.00	0.00			
T2	178.32	3.43	0.01205	0.42	0.00	0.00	0	
T4	178.32	3.43	0.01205	0.05	0.00	0.00	0	
T5	0.00	0.00	---	-0.00	0.00			
Taux51	178.32	3.43	0.01205	0.08	0.23	0.00	0	
Taux81	178.32	2.35	0.01245	0.05	0.00	0.00	0	
Taux82	178.32	3.43	0.01205	0.11	0.00	0.00	0	
Tpp	0.00	0.00	---	-0.00	0.00			

Figura 101. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito canal con bomba Weise

Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
V2	1	178.32	0.21	100.00
V26	1	0.00	Cerrada	0.00
V29	1	0.00	Cerrada	0.00
V3	1	0.00	Cerrada	0.00
V5	1	178.32	0.21	100.00
V9	1	178.32	0.21	100.00

Figura 102. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito canal con bomba Weise

Nombre	bombas	Qb(l/s)	Hb(m)	Pot(Kw)	Rend(%)	Perd. val. ret(m)	Perd. val. reg(m)	Q Bypass (l/s)	Perd. Bypass (m)
Weise	1	178.32	5.98	24.27	43.12				

Figura 103. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito canal con bomba Weise

El rendimiento óptimo de la bomba Weise del 54.5%. En el circuito en régimen permanente tiene un rendimiento del 43.12%, un 21 % menor.

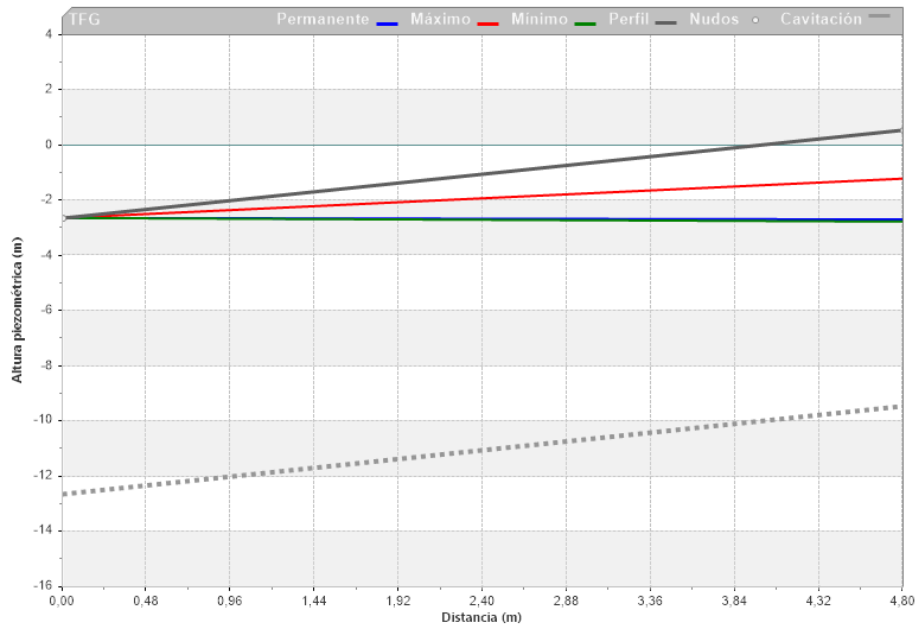
5.3.1.3 Régimen Transitorio

En el instante $t= 10s$ se para la bomba. A continuación, vamos a analizar las alturas piezométricas en las tuberías: 81, 82, 4, 2 y 51, es decir, sus graficas de envolventes.

- Taux81

La tubería auxiliar 81 tiene una longitud de 4.8 m y conecta el pozo con la bomba Weise. Por lo tanto, cuando la bomba se pare, los valores más extremos se darán en el punto $x=4,8$ m. En el instante de parada ($t=10$ s) debido a la inercia se creará una onda de sobrepresión dando comienzo al transitorio y a las fases ya explicadas en el punto 1.2.

Comenzaremos analizando la Envolvente de alturas piezométricas, ya que da una visión general de las alturas piezométricas y la relevancia del fenómeno en cada caso.



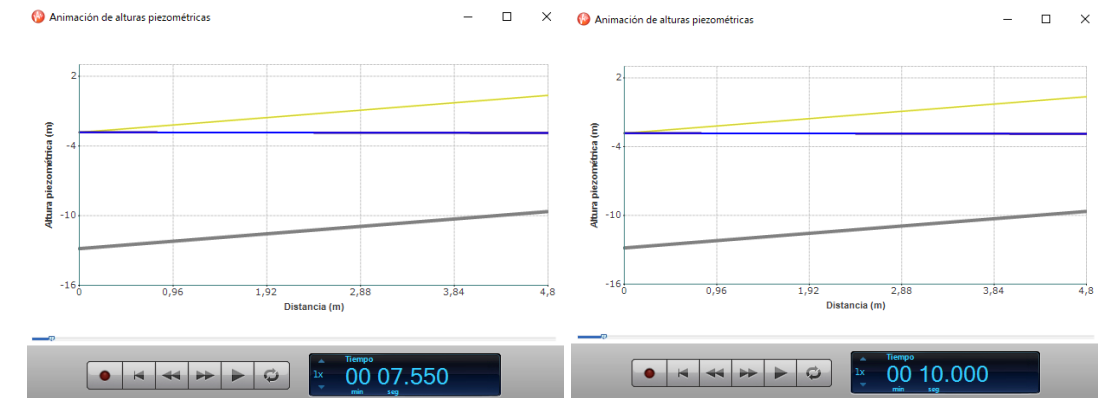
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	-2,63000011444092	0	-2,63000011444092
4,80000019073486	-2,68397307395935	4,80000019073486	-1,20698738098145

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-2,63000011444092	0	-2,64000010490417
4,80000019073486	-2,76303911209106	4,80000019073486	0,550000011920929

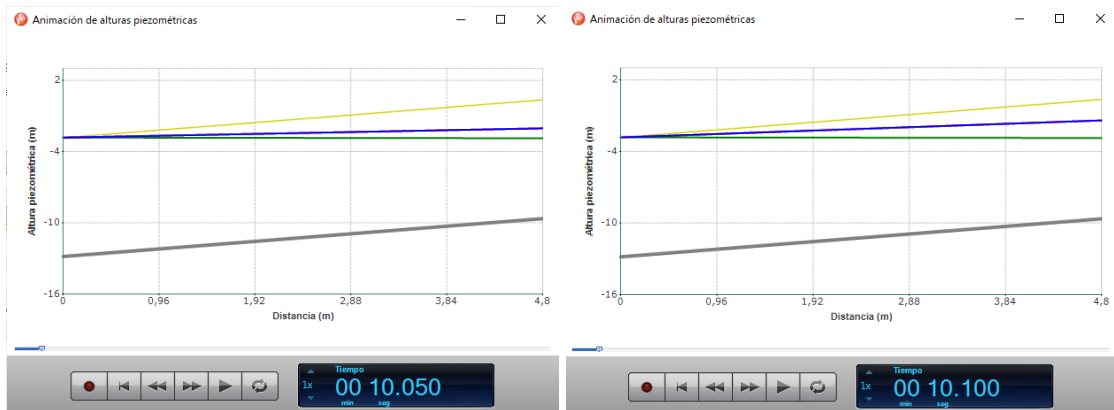
Cavitación X	Cavitación Y
0	-12,6399991512299
4,80000019073486	-9,44999903440475

Figura 104. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba

En esta tubería no se alcanzan presiones extremadamente altas ni bajas. Por lo tanto, el Golpe de Ariete no es un fenómeno que resulte peligroso en esta tubería en este caso concreto de parada repentina de la bomba. Para explicar cómo se ha formado esta curva presentamos imágenes de la animación en diferentes tiempos.



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar

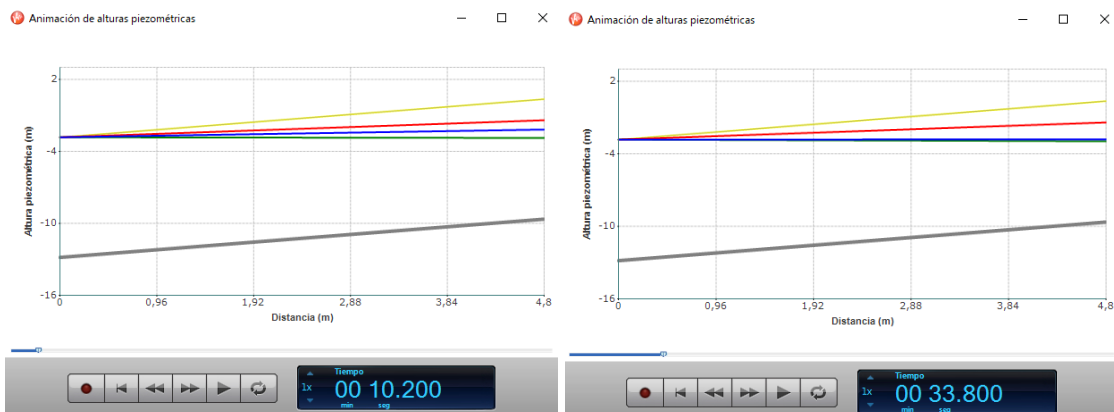


Figura 105. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba

La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10.00 s.

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10.10 s.

Para entender este proceso podemos analizar la evolución de presiones en un punto concreto de la tubería ($x=4$ m, por ejemplo).

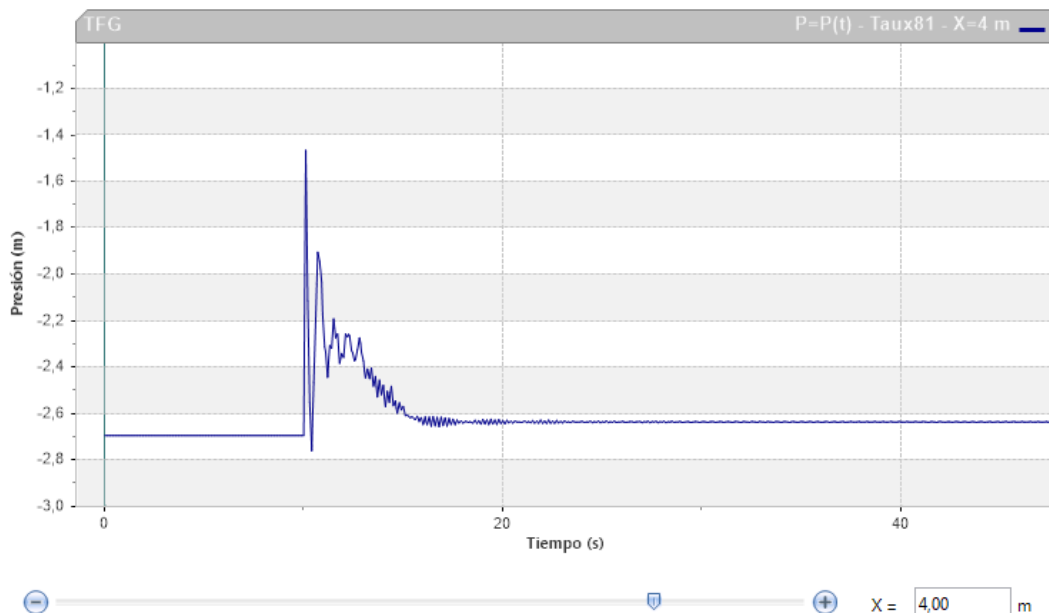
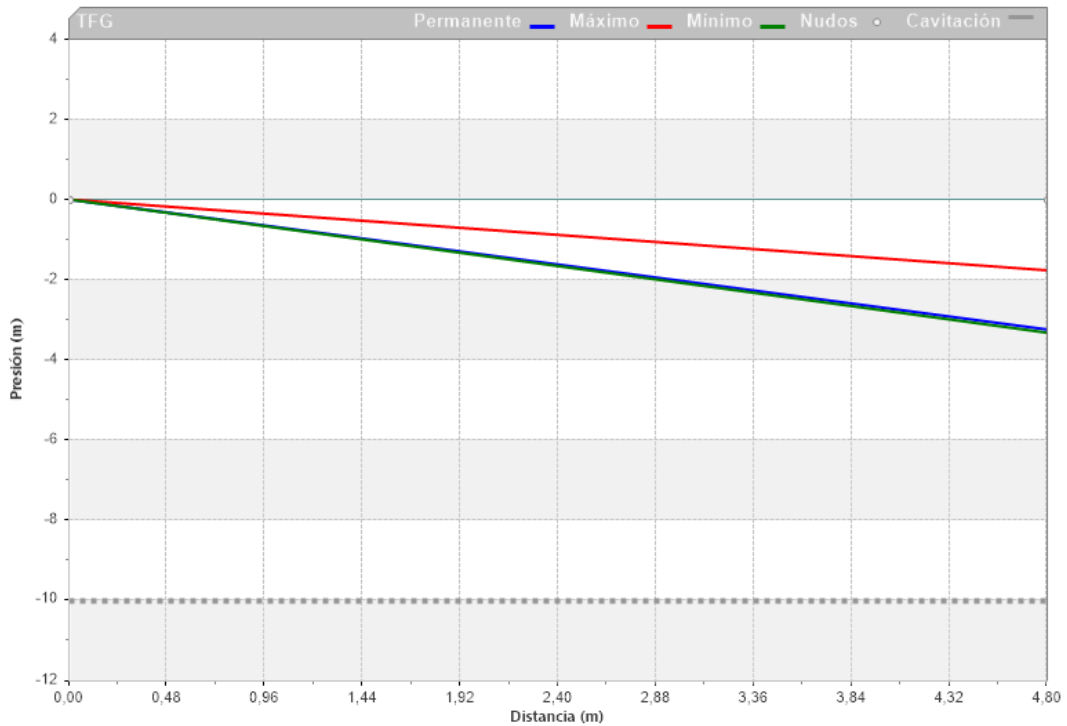


Figura 106. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=4$ m, de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba

En el siguiente gráfico de presiones, se observa como el fenómeno importancia del fenómeno en función de la coordenada de la tubería. Las mayores presiones se alcanzan junto al pozo, mientras que las presiones menores se alcanzan junto a la bomba en el instante de parada.

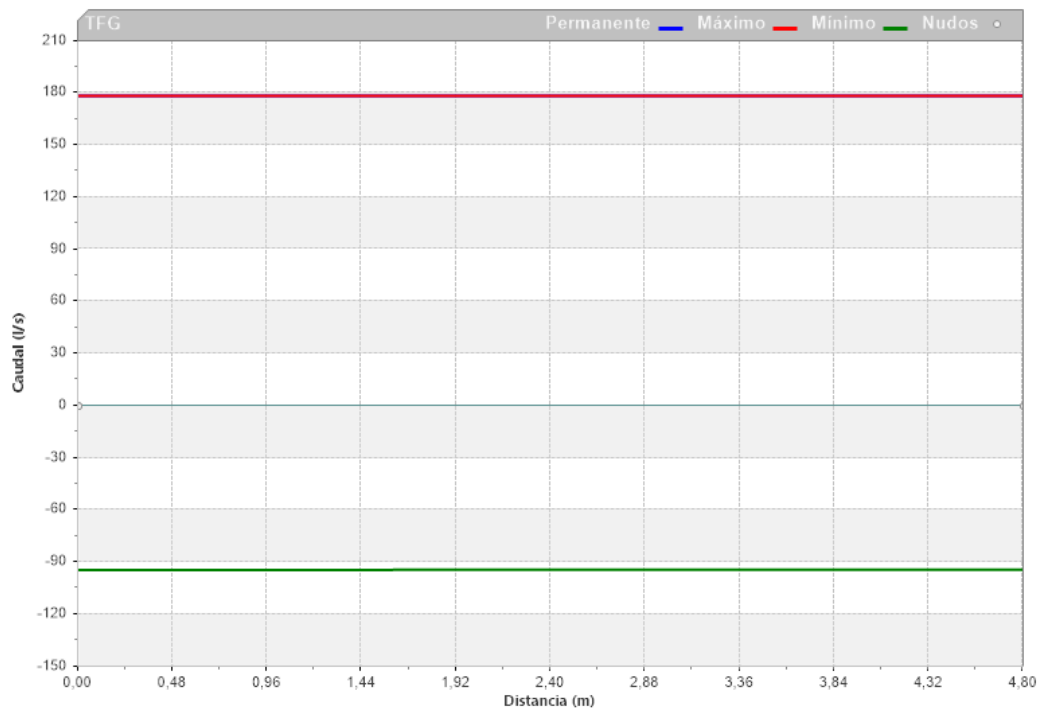


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	0,00999999046325684	0	0,00999999046325684
4,80000019073486	-3,23397302627563	4,80000019073486	-1,75698733329773

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	0,00999999046325684	0	-9,99999904632568
4,80000019073486	-3,31303906440735	4,80000019073486	-9,99999904632568

Figura 107. Envoltente de presiones de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba

Por último, se presenta la envoltente de caudales.

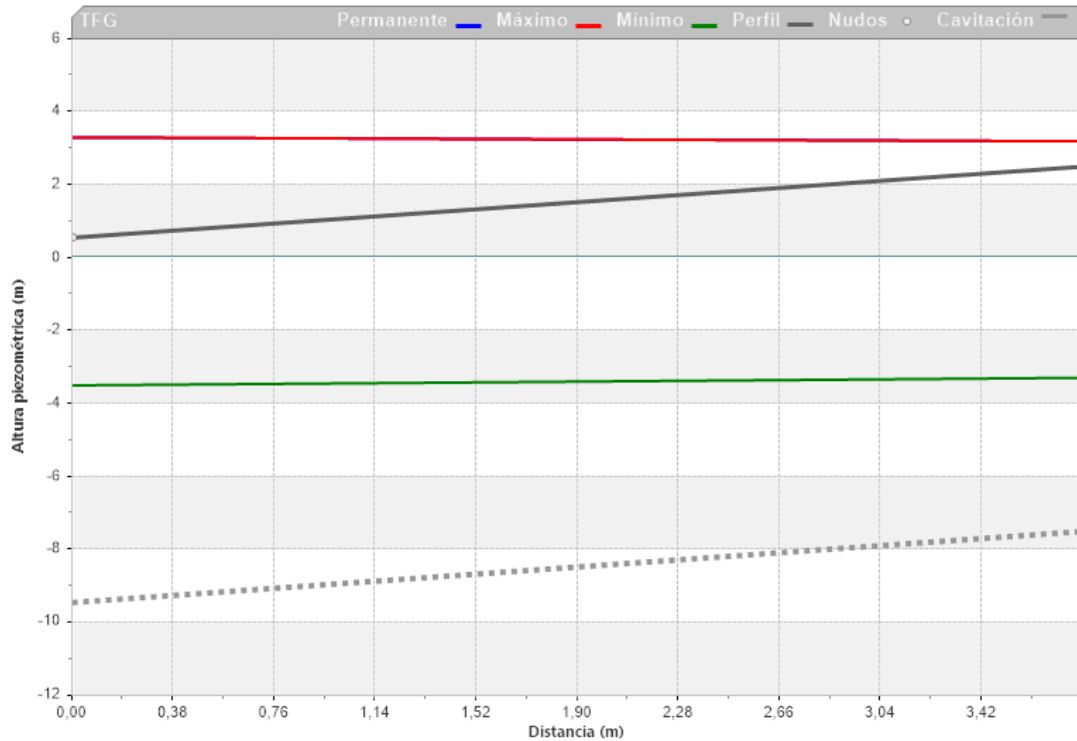


Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	178,318237304688	0	-94,4722671508789
4,80000019073486	178,318237304688	4,80000019073486	-94,3416290283203

Figura 108. Envolvente de caudales de la tubería aux81 en el caso 1, al parar la bomba

- Taux82

La tubería auxiliar 82 conecta la bomba Weise con la válvula 2, que dará paso al circuito principal. Esta tubería tiene longitud de 3.8 m. A continuación, vamos a analizar su caudal presión y altura piezométrica, comenzaremos por las gráficas y de envolvente al igual que en el caso anterior.

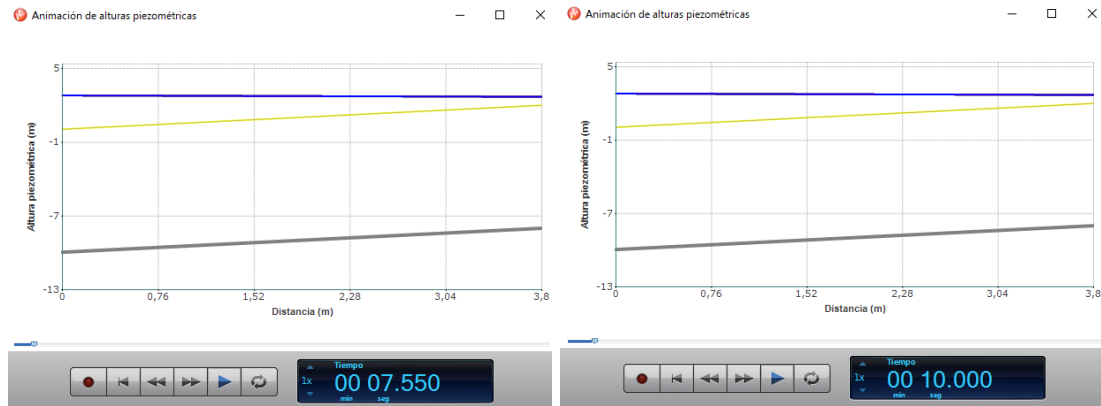


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	3,30005049705505	0	3,30005049705505
3,79999995231628	3,19357228279114	3,79999995231628	3,19357228279114

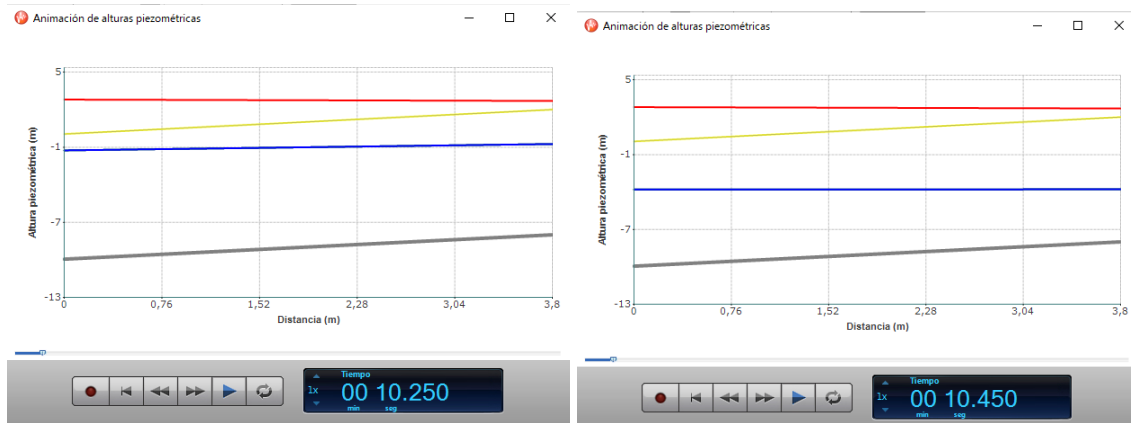
Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-3,49609637260437	0	0,550000011920929
3,79999995231628	-3,28880095481873	3,79999995231628	2,5

Cavitación X	Cavitación Y
0	-9,44999903440475
3,79999995231628	-7,49999904632568

*Figura 109. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux82 en el caso 1, al
 para la bomba*



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a disminuir

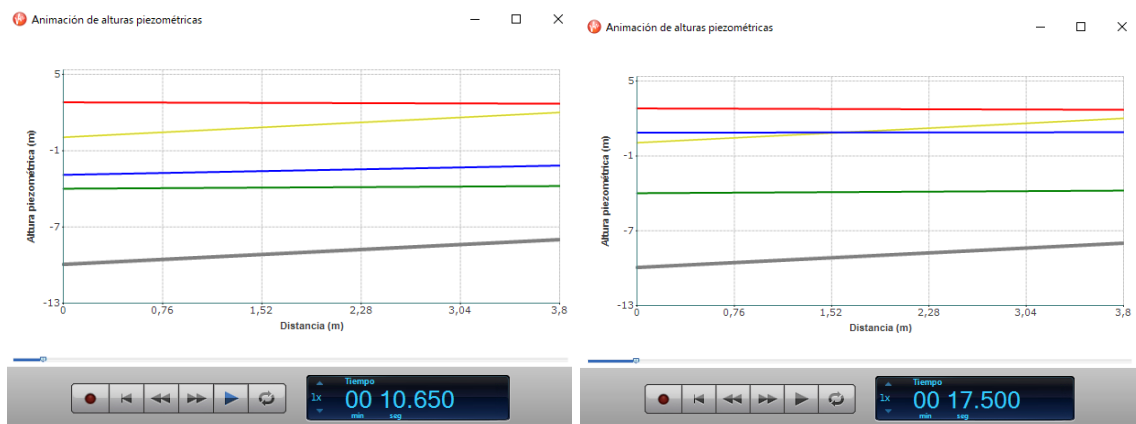


Figura 110. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba

La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Se traza la línea de presiones máximas en el instante $t= 10$ s. Al contrario de lo que ocurría en la tubería 81, esto se debe a que el proceso es el opuesto. En la tubería 81 cortamos el flujo en su “desembocadura”, sin embargo, al igual que ocurre en la tubería 4, 2 y 51, que se estudian a continuación, se corta el “suministro” de agua a su entrada. Por lo tanto, en primer lugar, se alcanza la presión máxima, y empieza a disminuir hasta alcanzar la mínima. Y comienza a oscilar entre valores máximos y mínimos hasta que se disipa toda esta energía cinética debido a las pérdidas, alcanzando un nuevo equilibrio. La línea de presiones mínimas se traza en al instante $t= 10.45$.

Para representar de forma más simple el efecto del tiempo y como se mitiga el transitorio, a continuación, se representa la gráfica de presiones frente a tiempo en un punto cualquiera, en este caso $x=1,5$ m.

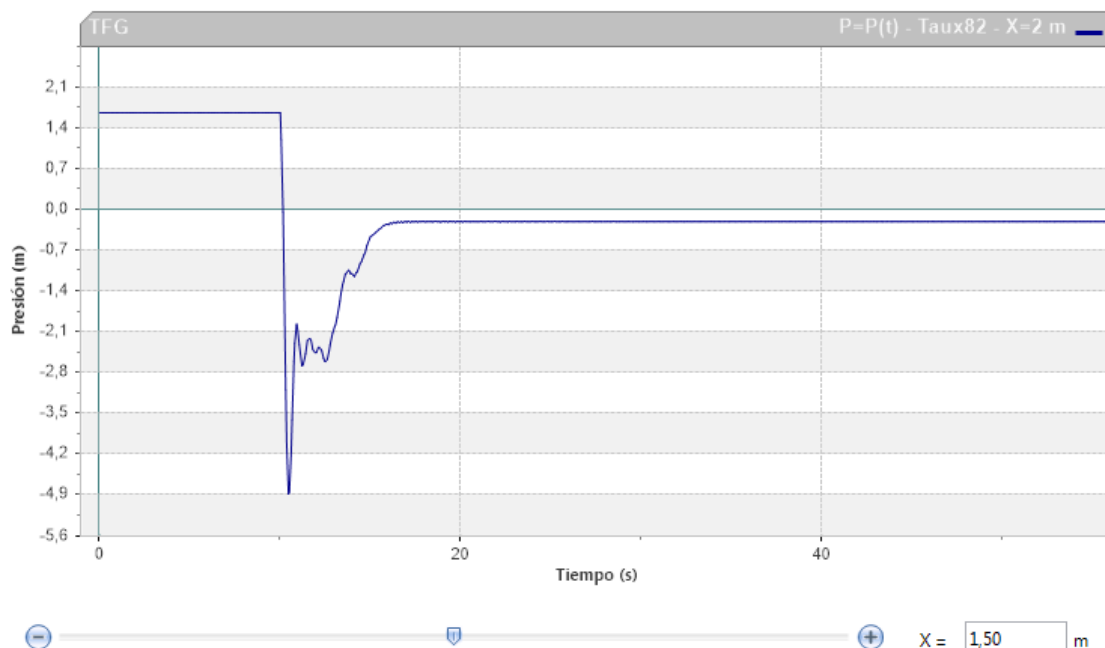
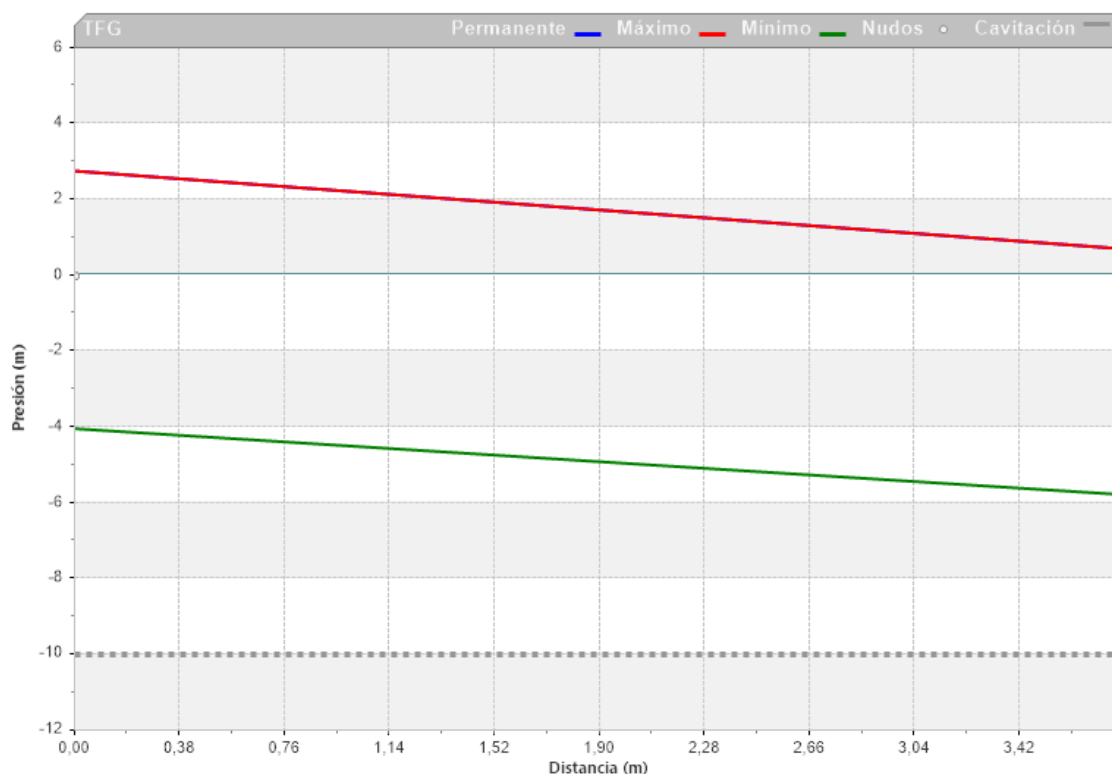


Figura 111. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 1.5$ m, de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba

También es necesario el estudio de caudales y presiones. Las siguientes graficas de envolventes de presiones muestran como el punto de mayores y menores presiones es



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	2,75005054473877	0	2,75005054473877
3,79999995231628	0,693572282791138	3,79999995231628	0,693572282791138

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	-4,04609632492065	0	-9,99999904632568
3,79999995231628	-5,7888011932373	3,79999995231628	-9,99999904632568

Figura 112. Envolvente de presiones de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba

Las presiones máximas se alcanzan junto a la bomba y las mínimas al final de la tubería en la entrada de la válvula.

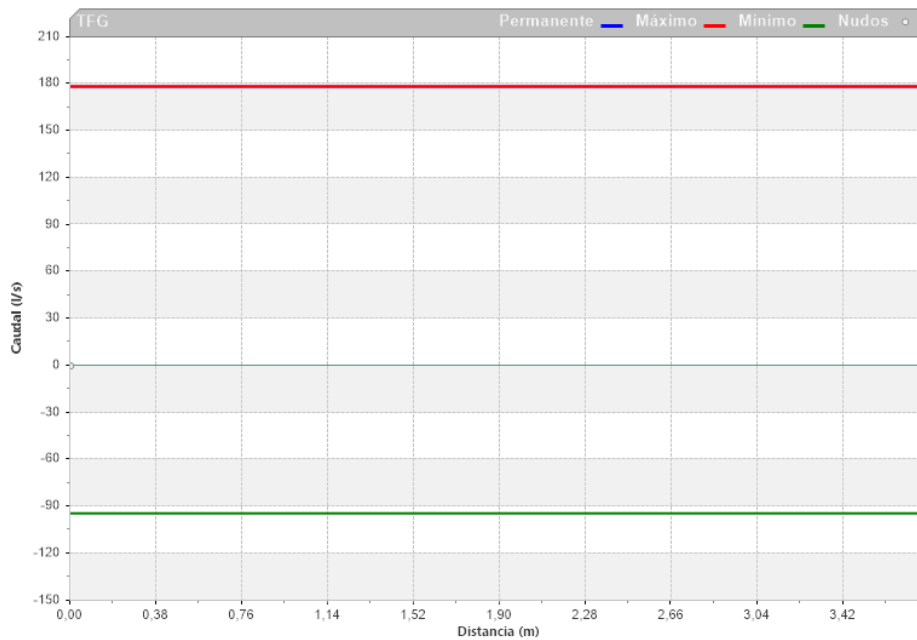


Figura 113. Envolvente de caudales de la tubería aux82 en el caso 1, al parar la bomba

- Pérdidas

Antes de proceder a analizar la tubería 4 que está a continuación tan solo separadas por la válvula 2 cabe destacar que hay un salto en las alturas piezométricas al atravesar la válvula, una pérdida de presión.

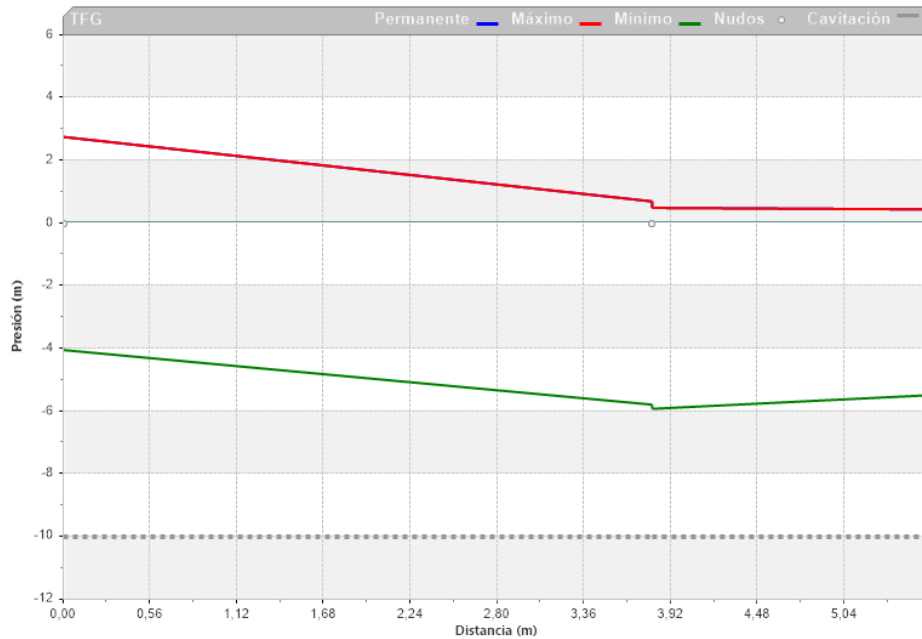


Figura 114. Envoltente de presiones de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba

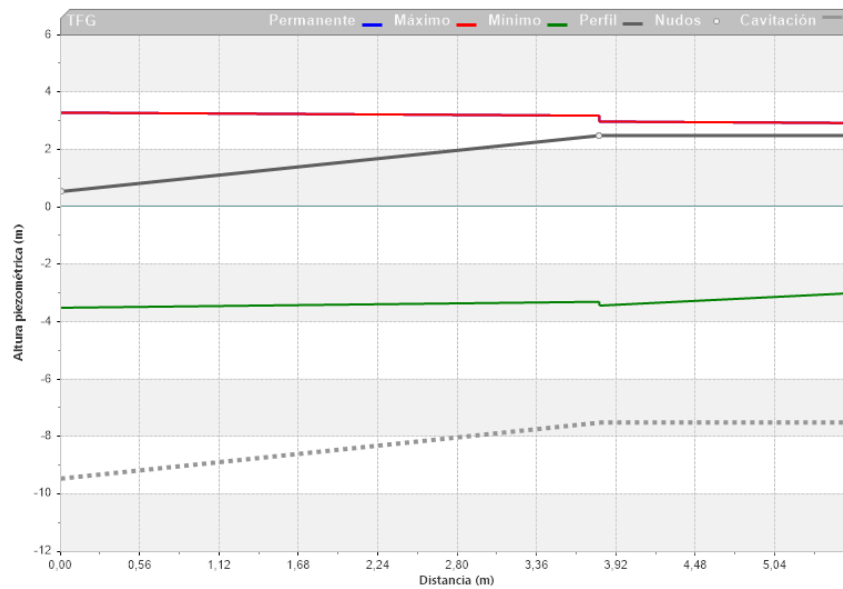


Figura 115. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba

Lo mismo ocurre con la válvula 5

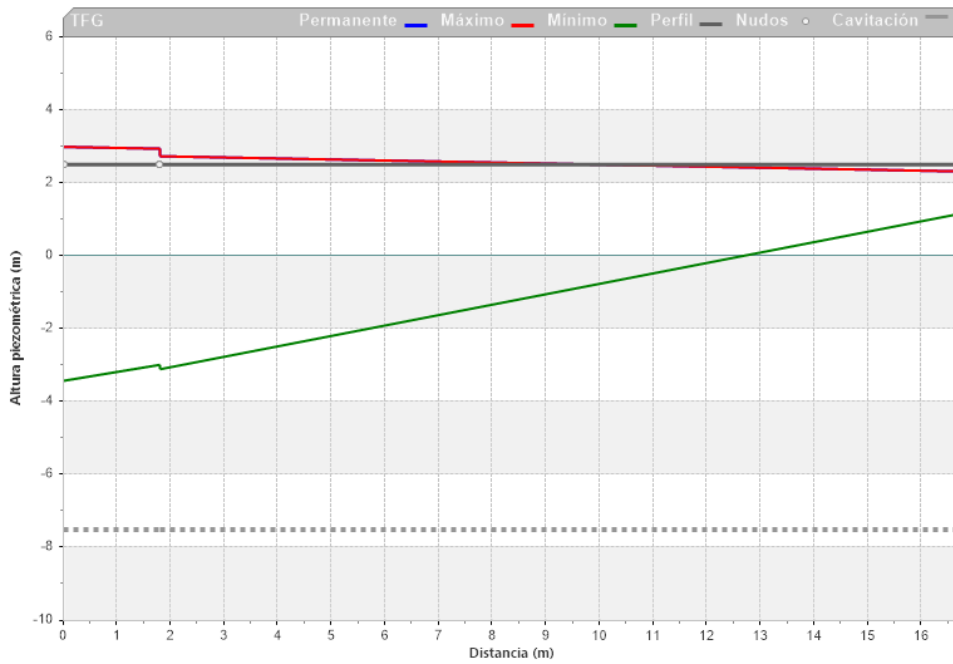


Figura 116. Envolvente de presiones de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba

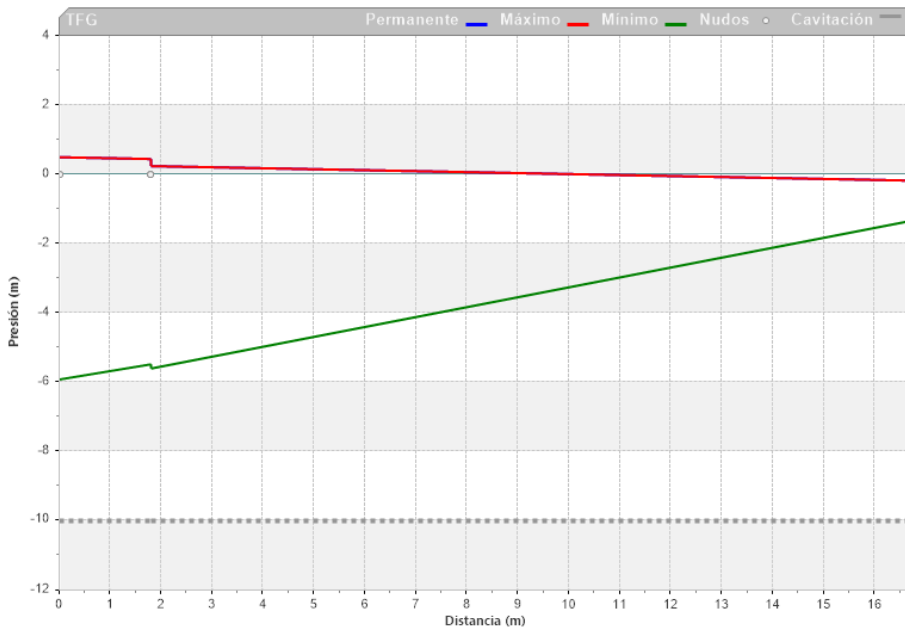


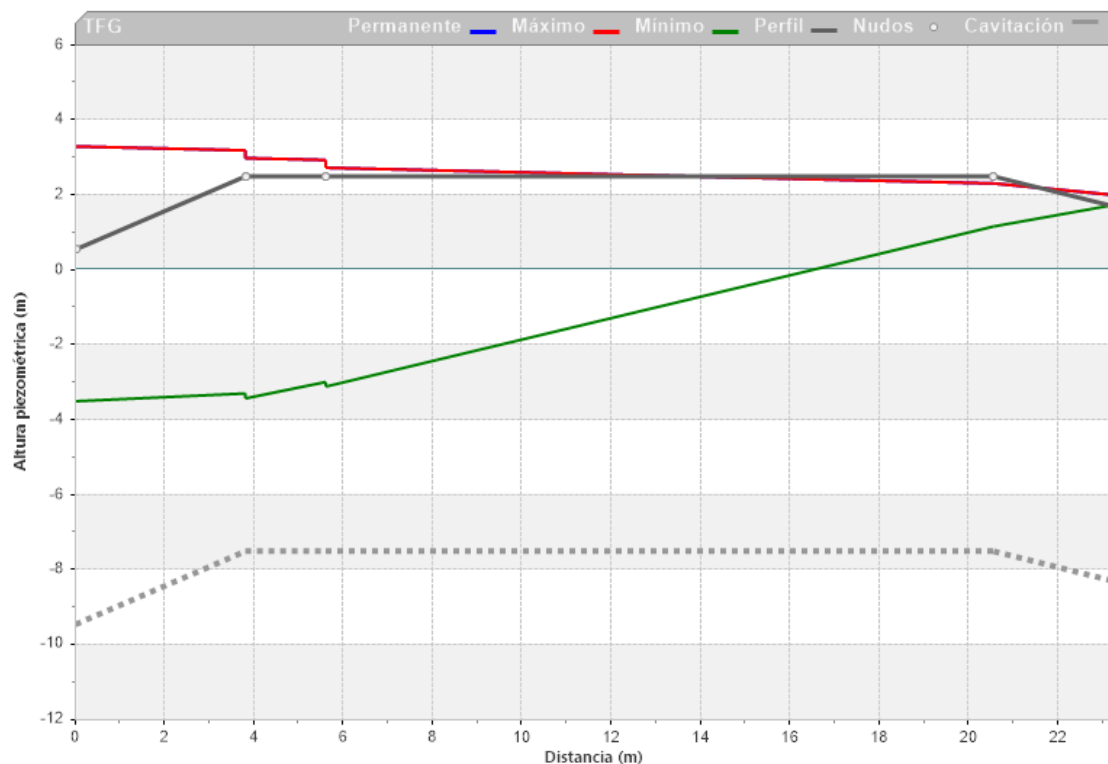
Figura 117. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux82 y 4 en el caso 1, al parar la bomba

Por lo tanto, se estudiará el tramo de tuberías como un conjunto:

- **Taux82, T4, T2 y Taux51**

Tubería	Long (m)	X inicial (m)	X final (m)
Taux82	3,8	0	3,8
T4	1,8	3,8	5,6
T2	14,95	5,6	20,55
Taux51	2,7	20,55	23,25

Figura 118. Tramo tuberías circuito 1 canal con bomba Weise



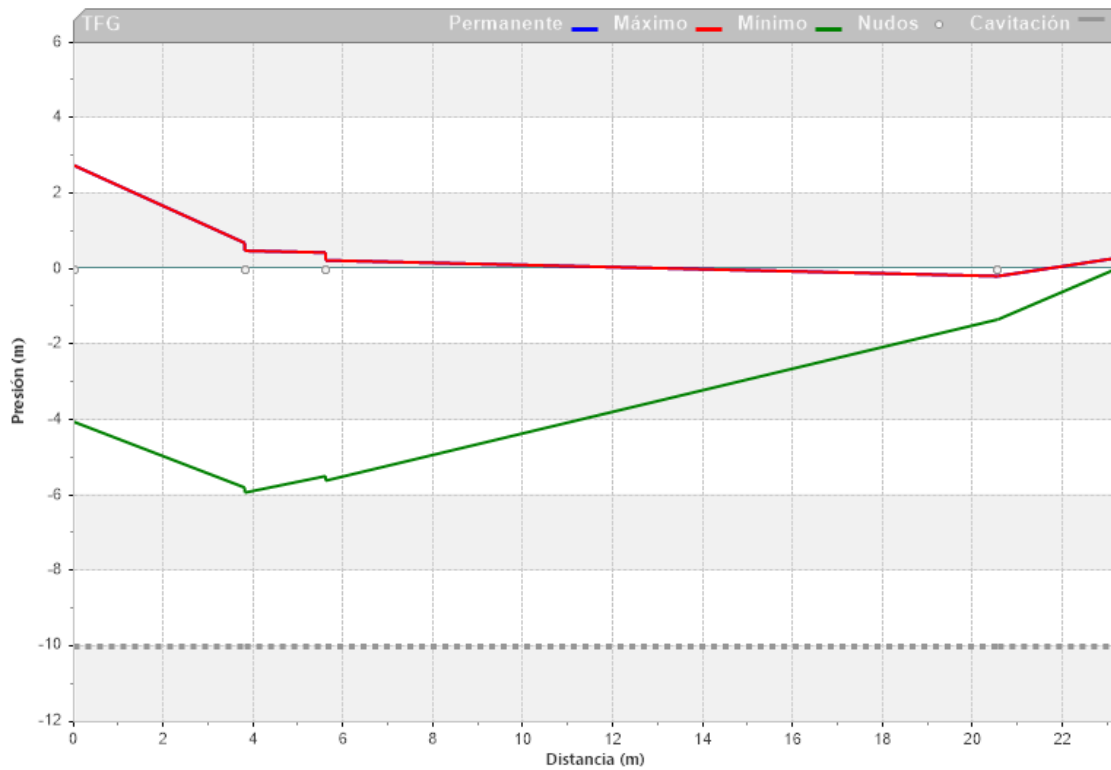
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	3,30005049705505	0	3,30005049705505
3,79999995231628	3,19357228279114	3,79999995231628	3,19357228279114
3,79999995231628	2,98852252960205	3,79999995231628	2,98852252960205
5,59999990463257	2,93808555603027	5,59999990463257	2,93808555603027
5,59999990463257	2,73303580284119	5,59999990463257	2,73303580284119
20,5499997138977	2,31412792205811	20,5499997138977	2,31412792205811
20,5499997138977	2,31412792205811	20,5499997138977	2,31412792205811
23,2499997615814	2,00504946708679	23,2499997615814	2,00504970550537

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-3,49609637260437	0	0,550000011920929
3,79999995231628	-3,28880095481873	3,79999995231628	2,5
3,79999995231628	-3,42226624488831	3,79999995231628	2,5
5,59999990463257	-2,98431658744812	5,59999990463257	2,5
5,59999990463257	-3,1056694984436	5,59999990463257	2,5
20,5499997138977	1,16589200496674	20,5499997138977	2,5
20,5499997138977	1,16589200496674	20,5499997138977	2,5
23,2499997615814	1,74222528934479	23,2499997615814	1,70000004768372

Cavitación X	Cavitación Y
0	-9,44999903440475
3,79999995231628	-7,49999904632568
3,79999995231628	-7,49999904632568
5,59999990463257	-7,49999904632568
5,59999990463257	-7,49999904632568
20,5499997138977	-7,49999904632568
20,5499997138977	-7,49999904632568
23,2499997615814	-8,29999899864197

Figura 119. Envoltente de alturas piezométricas de las tuberías aux82, 4, 2 y aux51 en el caso 1, al parar la bomba

No hay peligro de presiones negativas. Dado que como se ve en el gráfico no llegan al punto de separación de columna de agua.

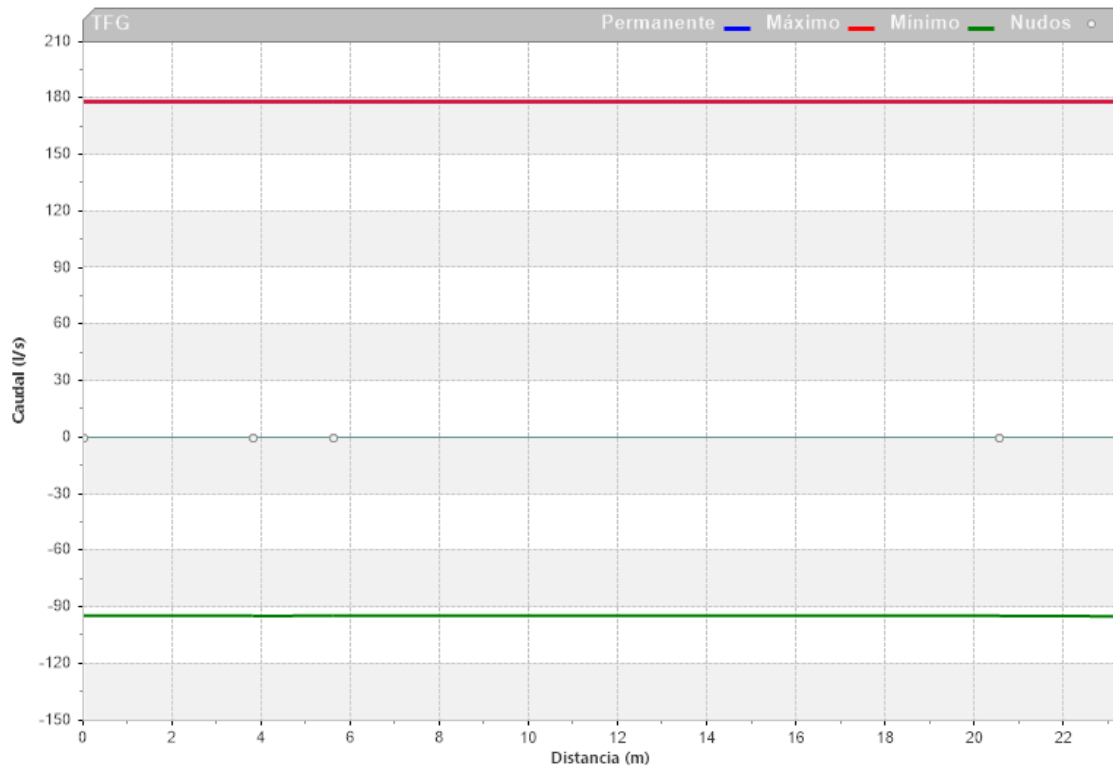


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	2,75005054473877	0	2,75005054473877
3,79999995231628	0,693572282791138	3,79999995231628	0,693572282791138
3,79999995231628	0,488522529602051	3,79999995231628	0,488522529602051
5,59999990463257	0,438085556030273	5,59999990463257	0,438085556030273
5,59999990463257	0,233035802841187	5,59999990463257	0,233035802841187
20,5499997138977	-0,185872077941895	20,5499997138977	-0,185872077941895
20,5499997138977	-0,185872077941895	20,5499997138977	-0,185872077941895
23,2499997615814	0,305049419403076	23,2499997615814	0,305049657821655

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	-4,04609632492065	0	-9,99999904632568
3,79999995231628	-5,7888011932373	3,79999995231628	-9,99999904632568
3,79999995231628	-5,92226600646973	3,79999995231628	-9,99999904632568
5,59999990463257	-5,4843168258667	5,59999990463257	-9,99999904632568
5,59999990463257	-5,6056694984436	5,59999990463257	-9,99999904632568
20,5499997138977	-1,33410799503326	20,5499997138977	-9,99999904632568
20,5499997138977	-1,33410799503326	20,5499997138977	-9,99999904632568
23,2499997615814	0,0422252416610718	23,2499997615814	-9,99999904632568

Figura 120. Envoltente de presión de las tuberías aux82, 4, 2 y aux51 en el caso 1, al parar la bomba

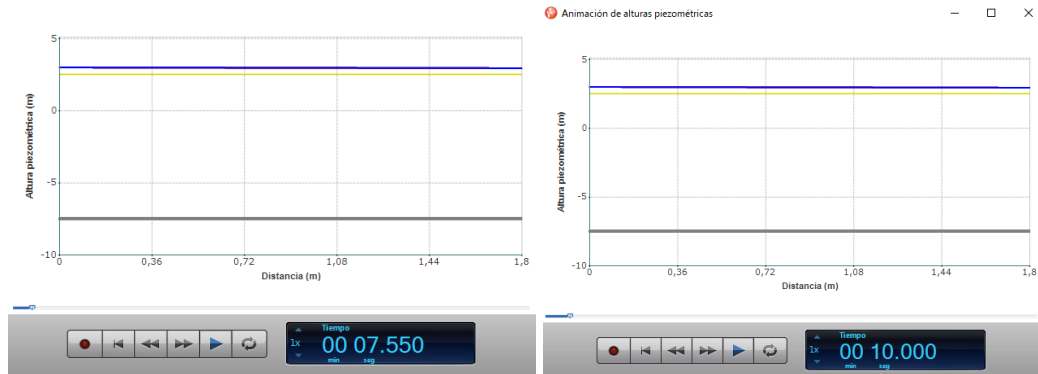
La máxima presión se alcanza junto a la bomba y la mínima en la válvula 2.



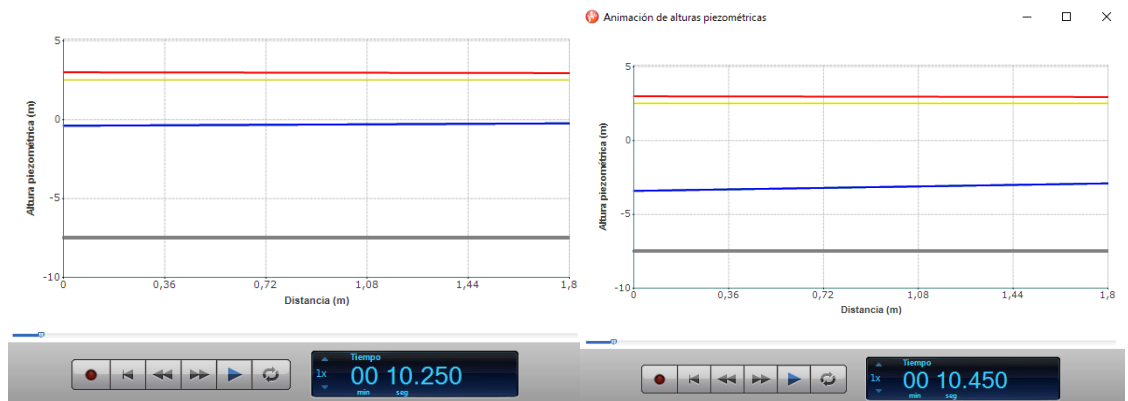
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	178,318206787109	0	178,318237304688	0	-94,3416290283203
3,79999995231628	178,318206787109	3,79999995231628	178,318237304688	3,79999995231628	-94,4398651123047
3,79999995231628	178,318206787109	3,79999995231628	178,318237304688	3,79999995231628	-94,4549255371094
5,59999990463257	178,318206787109	5,59999990463257	178,318237304688	5,59999990463257	-94,3967666625977
5,59999990463257	178,318206787109	5,59999990463257	178,318237304688	5,59999990463257	-94,3967666625977
20,5499997138977	178,318206787109	20,5499997138977	178,318237304688	20,5499997138977	-94,3596496582031
20,5499997138977	178,318206787109	20,5499997138977	178,318237304688	20,5499997138977	-94,4652328491211
23,2499997615814	178,318206787109	23,2499997615814	178,318237304688	23,2499997615814	-94,6531524658203

Figura 121. Envoltente de caudales de las tuberías aux82, 4, 2 y aux51 en el caso 1, al parar la bomba

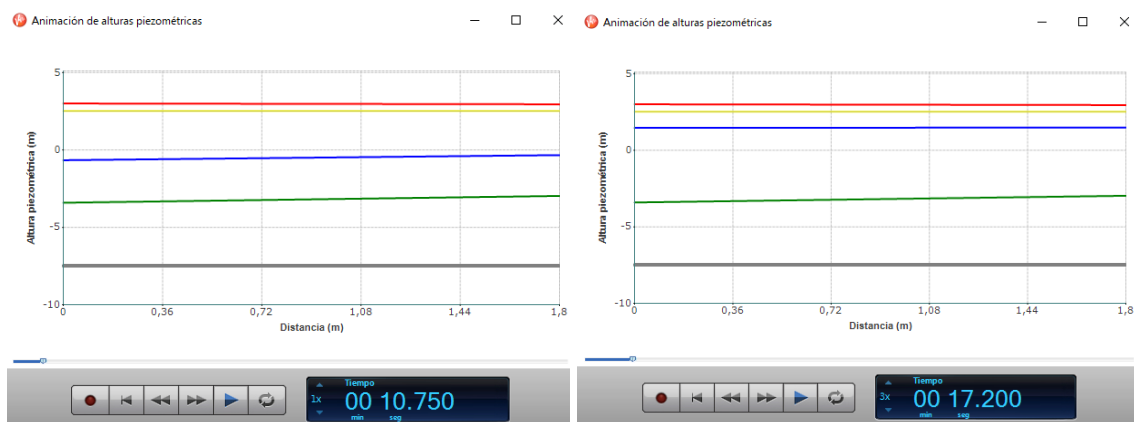
Conecta la válvula 2 y la 5 y tiene una longitud de 1.8 m.



- *Antes de la parada de la bomba*



- *Se para la bomba y la presión comienza a disminuir*



- *La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.*

Figura 122. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 4 en el caso 1, al parar la bomba

Se traza la línea de alturas piezométricas mínimas en el instante $t = 10.45$ s y la de máximas en el momento de parada de la bomba $t = 10$ s

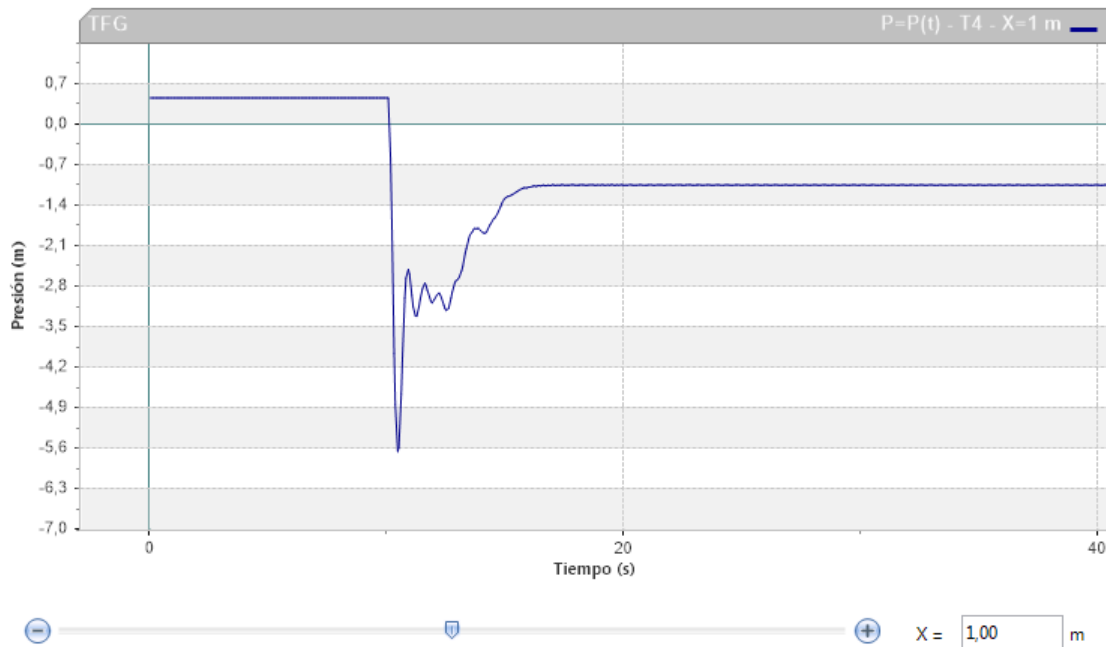
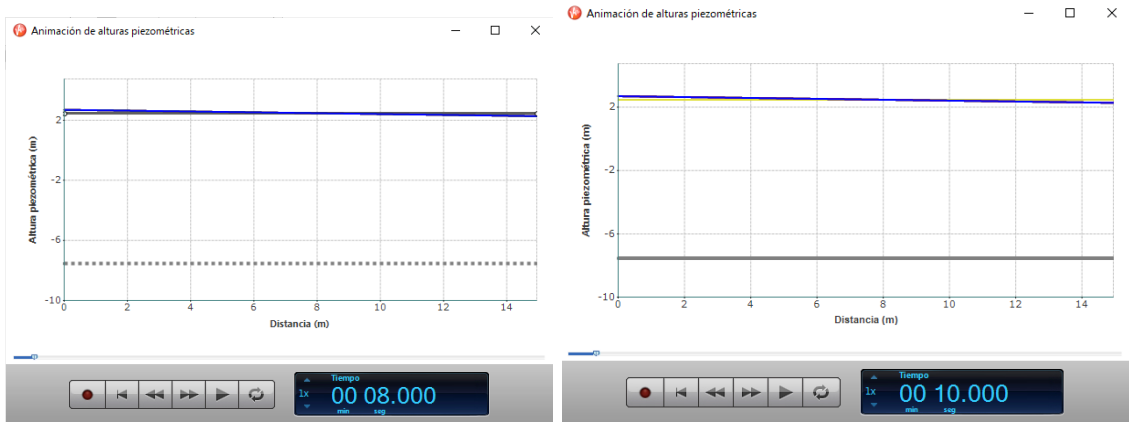


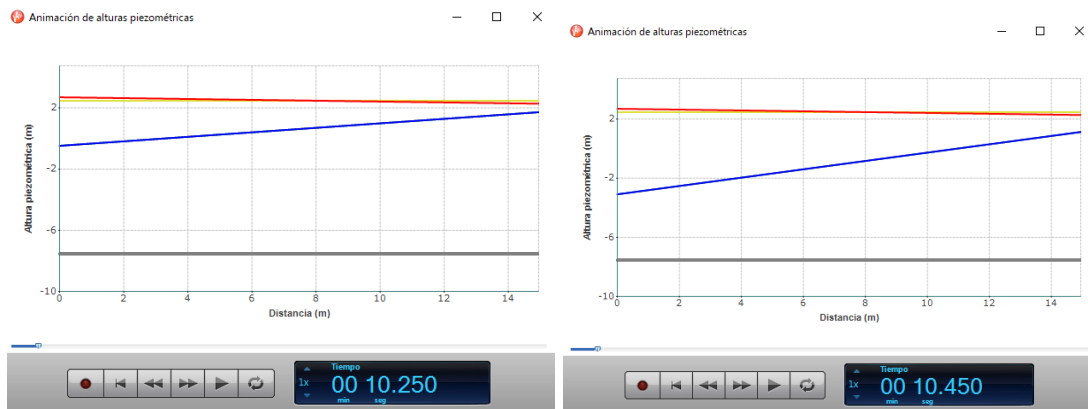
Figura 123. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x = 1$ m, de la tubería 4 en el caso 1, al parar la bomba

- T2

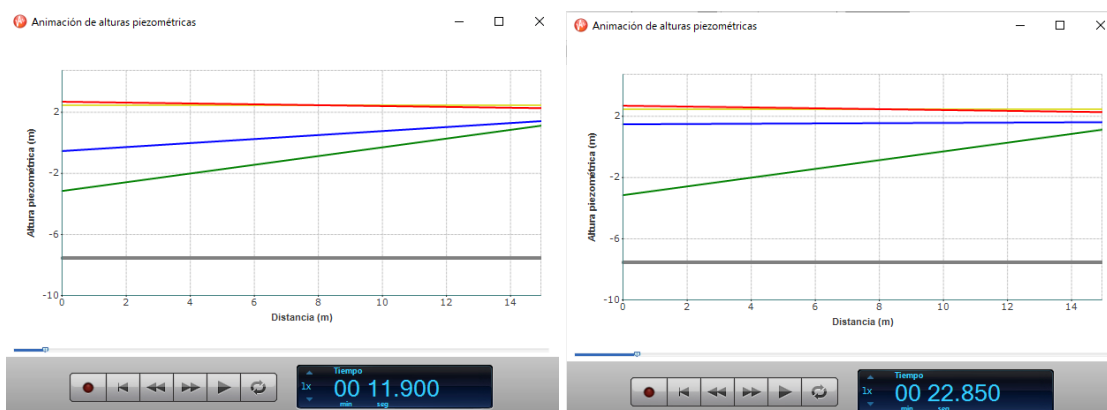
Tubería de longitud 14.91 m que conecta la válvula 5 con la tubería auxiliar 51.



- *Antes de la parada de la bomba*



- *Se para la bomba y la presión comienza a disminuir*



- *La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.*

Figura 124. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 2 en el caso 1, al parar la bomba

La línea de alturas piezométricas máximas se alcanza en el instante de cierre de la bomba, el $t= 10$ s y la de mínimas en $t= 0.45$ s, al igual que en la tubería aux82 y la 4.

En el siguiente grafico podemos ver el efecto amortiguador. En un punto cualquiera de la tubería, en este caso $x= 10$ m.

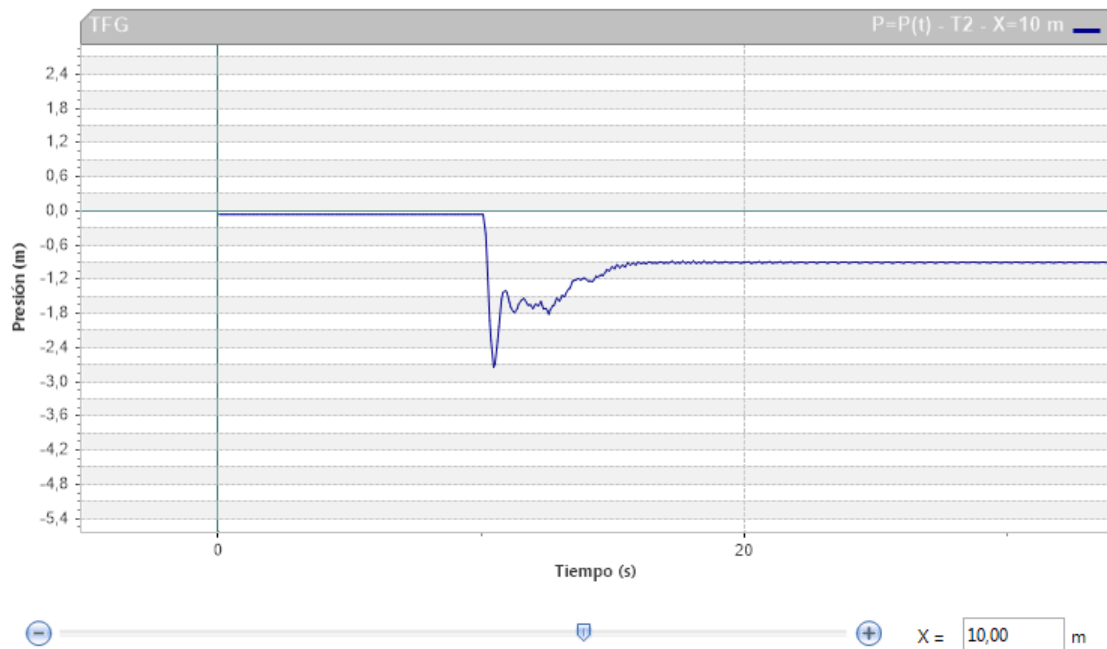
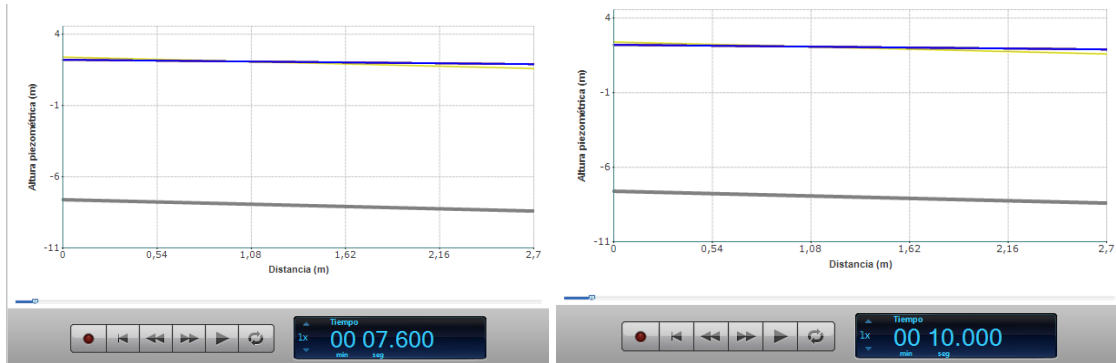


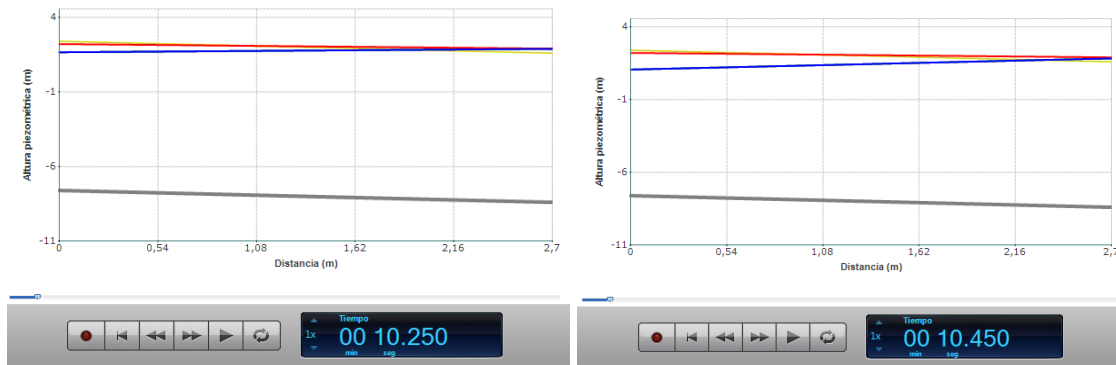
Figura 125. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 10$ m, de la tubería 2 en el caso 1, al parar la bomba

- Taux51

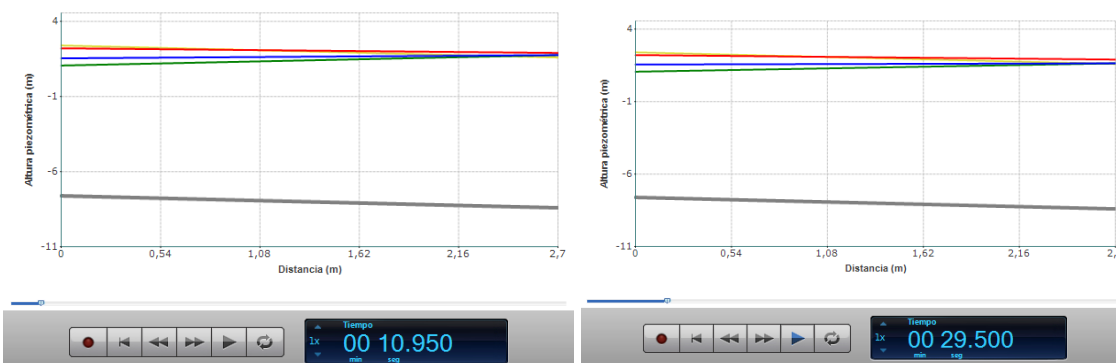
La tubería auxiliar 51 conecta la tubería 2 con la válvula 9 que da al canal. Su longitud es de 2.7 m. y las presiones y alturas piezométricas evolucionan dentro de la tubería de la misma forma que lo hacen en las tuberías 2, 4 y aux82.



- *Antes de la parada de la bomba*



- *Se para la bomba y la presión comienza a disminuir*



- *La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.*

Figura 126. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux51 en el caso 1, al parar la bomba

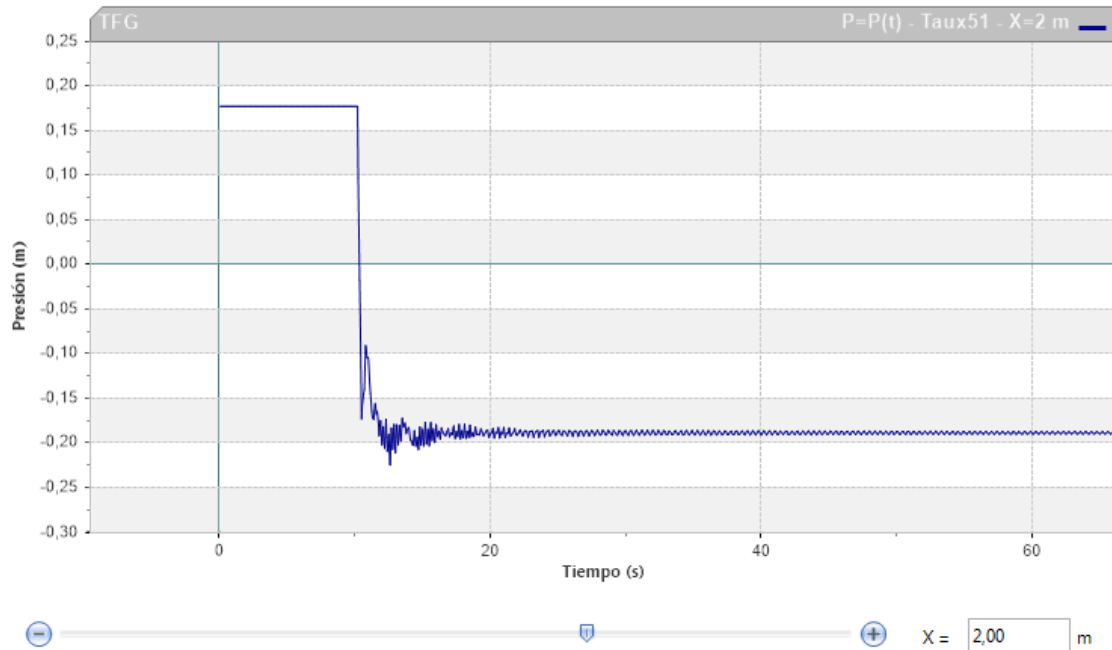


Figura 127. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=2$ m, de la tubería aux51 en el caso 1, al parar la bomba

En los próximos análisis estudiaremos estas 4 tuberías como un conjunto. Ya he en el diagrama de envolventes de alturas piezométricas y de presiones se ha comprobado el pequeño salto de pérdidas de energía que hay debido a las válvulas, y en las animaciones, que los instantes de presiones máximas y mínimas coinciden. En cuanto a las curvas en función del tiempo, en todas se ve como el transitorio continua, pero en magnitudes minúsculas, no relevantes, incluso más de 1 minuto después de la parada de la bomba, por lo tanto, no se le dará importancia durante el estudio.

5.3.2 CANAL CON BOMBA EMICA

5.3.2.1 Análisis del sistema

Este circuito, similar al caso anterior, alimenta un canal de vidrio (Canal) desde un depósito (Pozo) bajo la rasante de la planta sótano del nivel que vamos a analizar. Está formado por dos depósitos, una bomba y 4 válvulas, el resto de elementos no serán relevantes.

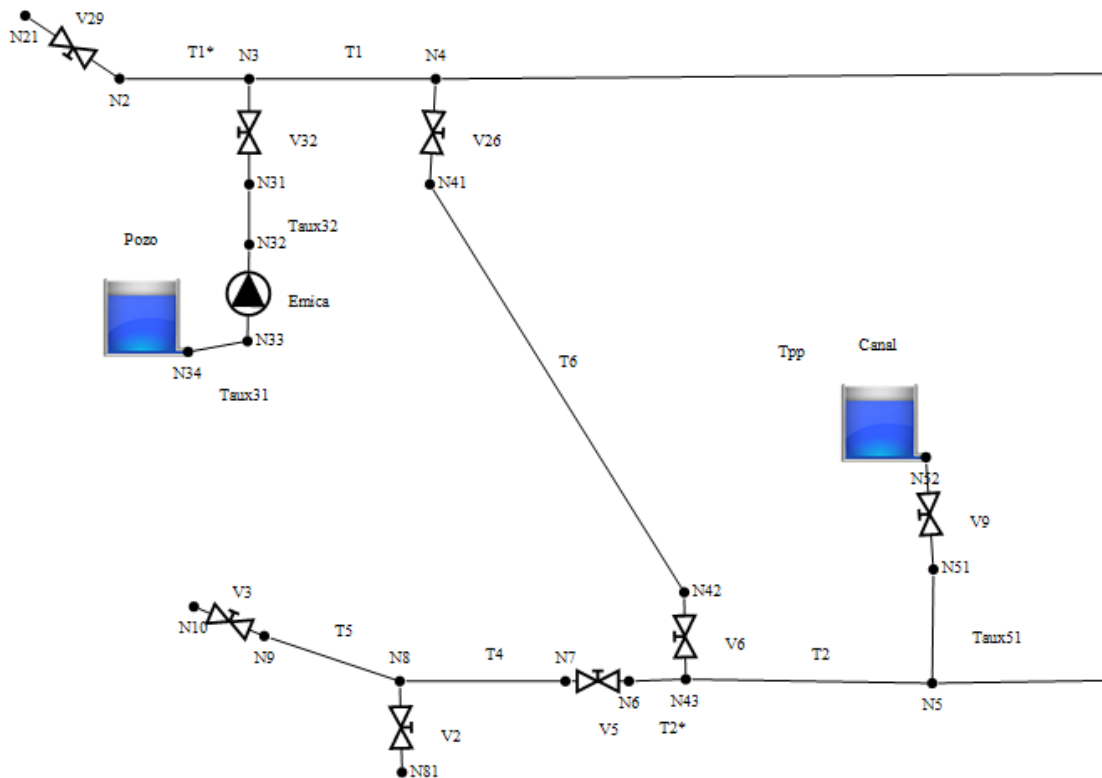


Figura 128. Circuito canal con bomba Emica

El agua sale del pozo (nudo 34) por la tubería aux31, entrando en la bomba Emica (nudo 33 y 32). La tubería aux32 y válvula 32 conectan con el circuito principal (nudo 3), donde el agua pasa por la tubería 1, y al llegar al nudo 4 el flujo se divide por dos caminos: la tubería pp y por otro lado, la válvula 26, tubería 6, válvula 6 y tubería 2. Finalmente, llegan ambos caminos al nudo 5 y por la tubería aux51 y válvula 9 se dirige al canal.

Antes de presentar los resultados del flujo permanente y transitorio, se presentan las características de los elementos del circuito.





















Nudos	
Nombre	Cota (m)
 N10	2,5
 N2	2,5
 N21	2,5
 N3	0,7
 N31	0,7
 N32	2,5
 N33	2,5
 N34	-2,64
 N4	2,5
 N41	2,5
 N42	2,5
 N43	2,5
 N5	2,5
 N51	1,7
 N52	1,7
 N6	2,5
 N7	2,5
 N8	2,5
 N81	2,5
 N9	2,5

Figura 129. Datos de los nudos del Circuito canal con bomba Emica

Consideraremos el pozo y el canal como depósitos de grandes dimensiones.

Depósitos - Datos básicos						Vertedero/Aliviadero				División y Vertedero				Aliviadero móvil					
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	L (m)	Z Cresta (m)	Cq	Descarga	Si (m ²)	Z Si (m)	Sf (m ²)	Z Sf (m)	Cresta	Zf (m)	Ti(s)	Tf(s)
Canal	---	N52	1,7	GD	-	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pozo	---	N34	-2,64	GD	-	-2,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Depósitos - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)
Canal	---	N52	1,7	GD	-	1,8
Pozo	---	N34	-2,64	GD	-	-2,63

Figura 130. Datos de los depósitos del Circuito canal con bomba Emica

En las tuberías sin flujo (1*, 2*, 4 y 5) se considera una celeridad nula, de esta forma el programa no las incluirá en el cálculo del transitorio. Además, deben de incluirse los valores de k para el cálculo de las pérdidas, en el caso de la tubería 51 el valor 0.39 de la k se debe a un codo de 90°.

Tuberías - Datos básicos										Pérdidas			Caudal nulo	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp	
T1	N3	0,7	N4	2,5	257,4	2,4	5	1156,0184	Calc.	----	0	0		
T1*	N3	0,7	N2	2,5	257,4	3,3	5	0	Calc.	----	0	0		
T2	N43	2,5	N5	2,5	257,4	14,45	5	1156,0184	Calc.	----	0	0		
T2*	N6	2,5	N43	2,5	257,4	0,5	5	0	Calc.	----	0	0		
T4	N8	2,5	N7	2,5	257,4	1,8	5	0	Calc.	----	0	0		
T5	N9	2,5	N8	2,5	257,4	1,6	5	0	Calc.	----	0	0		
T6	N41	2,5	N42	2,5	257,4	8,1	5	1156,0184	Calc.	----	0	0		
Taux31	N34	-2,64	N33	2,5	316	5,15	5	1112,4298	Calc.	----	0	0		
Taux32	N32	2,5	N31	0,7	257,4	1,8	5	1156,0184	Calc.	----	0	0		
Taux51	N5	2,5	N51	1,7	257,4	2,7	5	1200	Calc.	----	0	0,39		
Tpp	N4	2,5	N5	2,5	257,4	39,85	5	1156,0184	Calc.	----	0	0,65		

Figura 131. Datos de las tuberías del Circuito canal con bomba Emica

Diámetro (mm)	316,00000
Espesor (mm)	5,00000
Coef. material	0,50
Celeridad (m/s)	1.112,4298

Figura 132. Cálculo de la celeridad de la tubería auxiliar 31

Diámetro (mm)	257,40000
Espesor (mm)	5,00000
Coef. material	0,50
Celeridad (m/s)	1.156,0184

Figura 133. Cálculo de la celeridad de las tuberías auxiliar 32, 1, 6, 2, pp y auxiliar 51.

Válvula Regulación - Datos básicos								Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $A_p(t) = A_p0 + A \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot t / T + B)$			
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
V2	N8	N81	2,5	262,4	0	De compuerta		Tabulada					
V26	N4	N41	2,5	262,4	0,25	De compuerta		Tabulada					
V29	N2	N21	2,5	262,4	0	De compuerta		Tabulada					
V3	N10	N9	2,5	262,4	0	De compuerta		Tabulada					
V32	N31	N3	0,7	262,4	0,25	De compuerta		Tabulada					
V5	N7	N6	2,5	262,4	0	De compuerta		Tabulada					
V6	N43	N42	2,5	262,4	0,25	De compuerta		Tabulada					
V9	N51	N52	1,7	262,4	0,25	De compuerta		Tabulada					

Válvula Regulación - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo
V2	N8	N81	2,5	262,4	0	De compuerta
V26	N4	N41	2,5	262,4	0,25	De compuerta
V29	N2	N21	2,5	262,4	0	De compuerta
V3	N10	N9	2,5	262,4	0	De compuerta
V32	N31	N3	0,7	262,4	0,25	De compuerta
V5	N7	N6	2,5	262,4	0	De compuerta
V6	N43	N42	2,5	262,4	0,25	De compuerta
V9	N51	N52	1,7	262,4	0,25	De compuerta

Figura 134. Datos de las válvulas del Circuito canal con bomba Emica

Estación de bombeo - Datos básicos				Rotación				Parada/Arranque										
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	Nreg	Nnom	I	Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arrancan	Inst. arr.	Duración (s)	Nueva par	Inst. par.	
Emica	N33	N32	2,5	1	Universale	1450	1450	2,893	Calc.	En marcha	Si	10	No	-	-	No	-	-

Rendimiento óptimo				V Regulación		V Retención		By-Pass	
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)	DN (mm)	Tipo	Modelo	Maniobra	K	K
300	23	90	75,21						

Estación de bombeo - Datos básicos						Rotación			
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	Nreg	Nnom	I	
Emica	N33	N32	2,5	1	Universale	1450	1450	2,893	Calc.

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
300	23	90	75,21

Figura 135. Datos de la bomba Weise del Circuito canal con bomba Emica

Una vez que tenemos el sistema definido, podemos comenzar a realizar los análisis, el primer lugar el permanente y a continuación el transitorio en función de la perturbación que lo haya ocasionado.

5.3.2.2 Régimen Permanente

Resultado simulación

- Simulación finalizada con EXITO

- Finalizado el cálculo del régimen permanente en 46064 iteraciones

Nombre	H(m)	Pr(m)
N52	1.80	0.10
N52_fin	1.80	0.10
N21	2.50	0.00
N8	2.50	0.00
N7	2.50	0.00
N81	2.50	0.00
N10	2.50	0.00
N9	2.50	0.00
N34	-2.63	0.01
N34_fin	-2.63	0.01
N33	-2.85	-5.35
N51	3.10	1.40
N5	4.50	2.00
N6	5.06	2.56
N43	5.06	2.56
N42	5.34	2.84
N41	5.65	3.15
N4	5.94	3.44
N2	6.22	3.72
N3	6.22	5.52
N31	7.18	6.48
N32	7.39	4.89

Figura 136. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito canal con bomba Emica

Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
T1	385.81	7.41	0.01060	0.28	0.00	0.00	0	
T1*	-0.00	-0.00	---	-0.00	0.00			
T2	211.59	4.07	0.01170	0.55	0.00	0.00	0	
T2*	-0.00	-0.00	---	0.00	0.00			
T4	0.00	0.00	0.00000	-0.00	0.00			
T5	0.00	0.00	0.00000	0.00	0.00			
T6	211.59	4.07	0.01170	0.31	0.00	0.00	0	
Taux31	385.81	4.92	0.01096	0.22	0.00	0.00	0	
Taux32	385.81	7.41	0.01060	0.21	0.00	0.00	0	
Taux51	385.81	7.41	0.01060	0.31	1.09	0.00	0	
Tpp	174.22	3.35	0.01210	1.07	0.37			

Figura 137. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito canal con bomba Emica

El caudal que pasa por las tuberías aux31, aux32 y 1 es el mismo. Al llegar al nudo 4 por la tubería 1, el caudal se divide entre la tubería 6 y la pp ($211.59+174.22=385.81$). La velocidad, al igual que le caudal disminuye de 7.41 m/s a 4.07 m/s en la tubería 6 y 3.35 en la tubería pp, pero recupera su fuerza inicial, en la tubería aux51 al unirse de nuevo los dos caudales.

Nombre	bombas	Qb(l/s)	Hb(m)	Pot(Kw)	Rend(%)	Perd. val. ret(m)	Perd. val. reg(m)	Q Bypass (l/s)	Perd. Bypass (m)
Emica	1	385.81	10.24	74.37	52.10				

Figura 138. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito canal con bomba Emica

La bomba Emica tiene un rendimiento óptimo del 75.21 % y en el régimen permanente de este circuito su rendimiento es del 52.10 %, es decir, un 31 % menor. Si lo comparamos con el caso 1, donde la bomba Weise en régimen permanente actúa con un rendimiento un 21 % menor al óptimo, el circuito 1 tiene un diseño que amortiza más la capacidad de la bomba, situándose en un punto de funcionamiento de la curva de características más óptimo.

Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
V2	1	0.00	Cerrada	0.00
V26	1	211.59	0.29	100.00
V29	1	0.00	Cerrada	0.00
V3	1	0.00	Cerrada	0.00
V32	1	385.81	0.96	100.00
V5	1	0.00	Cerrada	0.00
V6	1	-211.59	-0.29	100.00
V9	1	385.81	1.30	90.00

Figura 139. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito canal con bomba Emica

La válvula 9 q conecta la tubería aux51 con el canal está parcialmente abierta. Y resto completa mente cerradas, excepto a 6, 26 y 32.

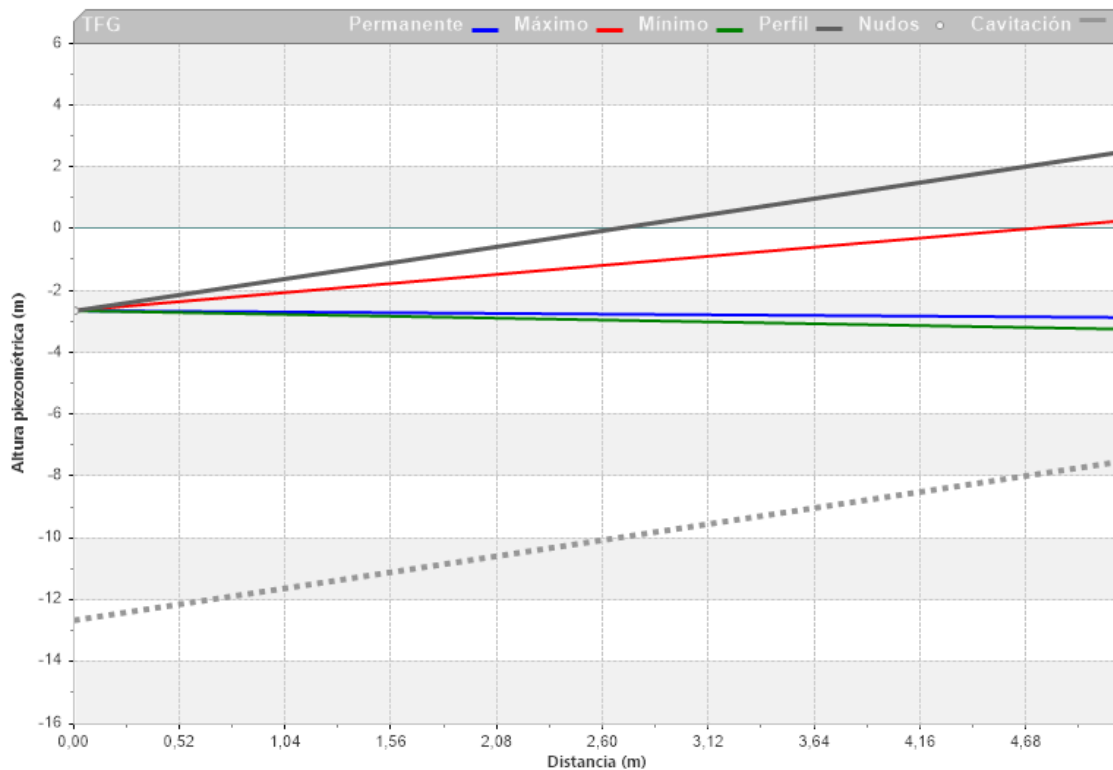
5.3.2.3 Régimen Transitorio

Ante una parada repentina de la bomba (por corte de suministro eléctrico) en el instante $t= 10$ s, se producen sobrepresiones o depresiones en las tuberías que pueden ocasionar el colapso de estas. Por lo tanto, se van a estudiar a continuación 5 tramos de tuberías y sus envolventes.

- El tramo previo a la bomba, Taux31
- Hasta el nudo 4, es decir, Taux32, V32 y T1
- El tramo de flujo que se redirige por Tpp
- El tramo de flujo que se redirige por V26, T6, V6 y T2
- Del nudo 5, donde se vuelve a reunir todo el flujo, al canal, es decir Taux51

- **Taux31**

La tubería auxiliar 31 mide 5.15 m conecta el pozo, depósito de grandes dimensiones, con la bomba Emica, es decir, del nudo 34 al 33.



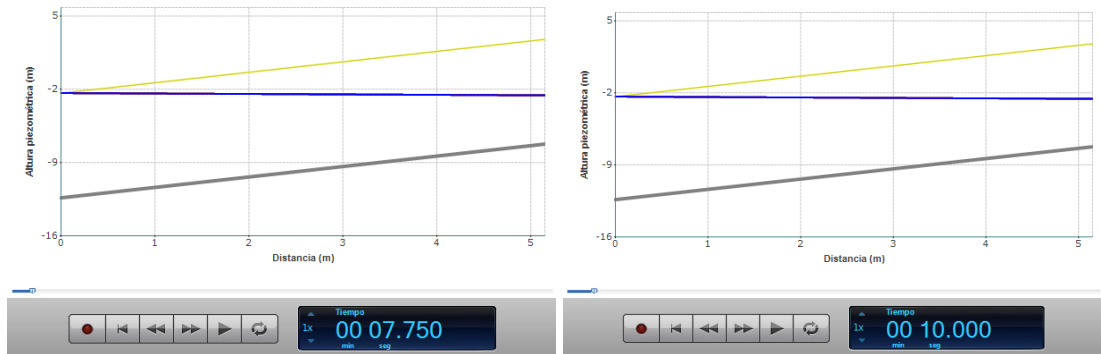
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	-2.63000011444092	0	-2.63000011444092
5.15000009536743	-2.8502938747406	5.15000009536743	0.275038689374924

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-2.63000011444092	0	-2.64000010490417
5.15000009536743	-3.22742867469788	5.15000009536743	2.5

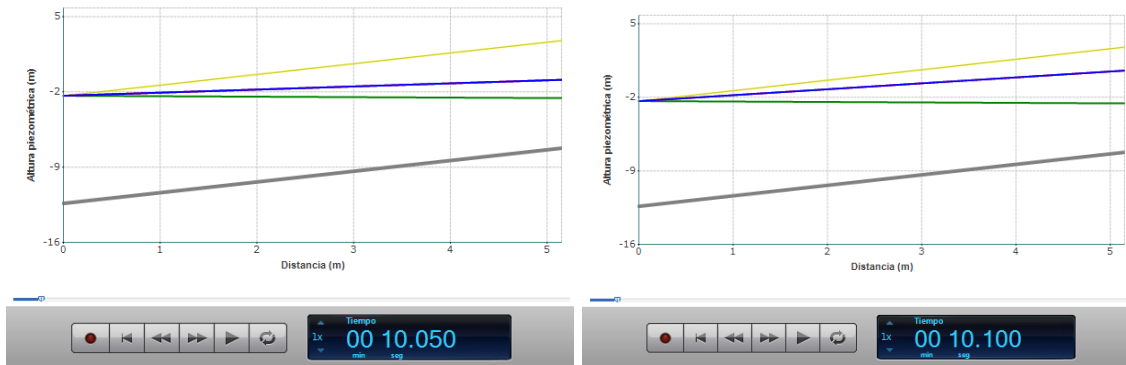
Cavitación X	Cavitación Y
0	-12.6399991512299
5.15000009536743	-7.49999904632568

Figura 140. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba

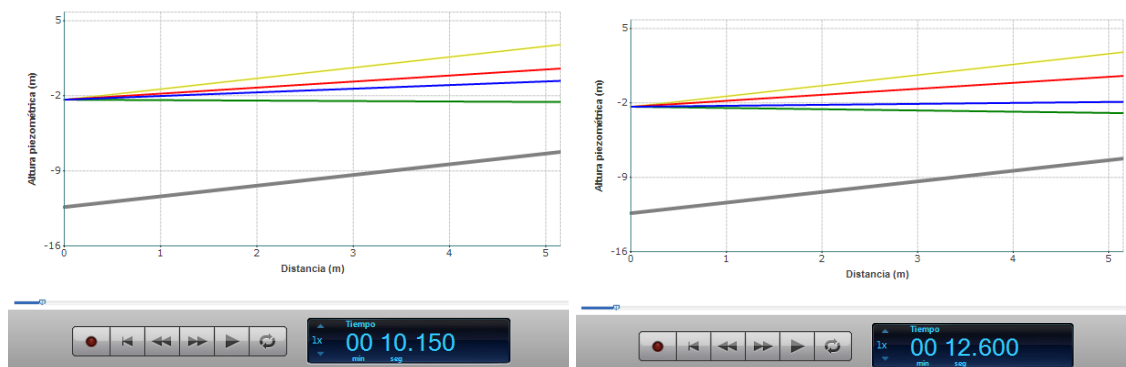
Para explicar cómo se ha formado la curva de envolventes de alturas piezométricas y los tiempos, presentamos imágenes de la animación en diferentes tiempos del desarrollo del transitorio.



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 141. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10.10 s.

A diferencia del resto de tuberías que vamos a estudiar a continuación, en la Taux31 la envolvente de alturas piezométricas mínimas se traza en el instante de cierre de la bomba, ya que se crea una onda de depresión al cortar el flujo en el nudo 33. En el resto de tuberías se corta el suministro de agua, es decir, en el comienzo de la tubería en lugar de al final.

Para entender este proceso podemos analizar la evolución de presiones en un punto concreto de la tubería ($x = 3$ m, por ejemplo). Y observar cómo se mitiga el transitorio.

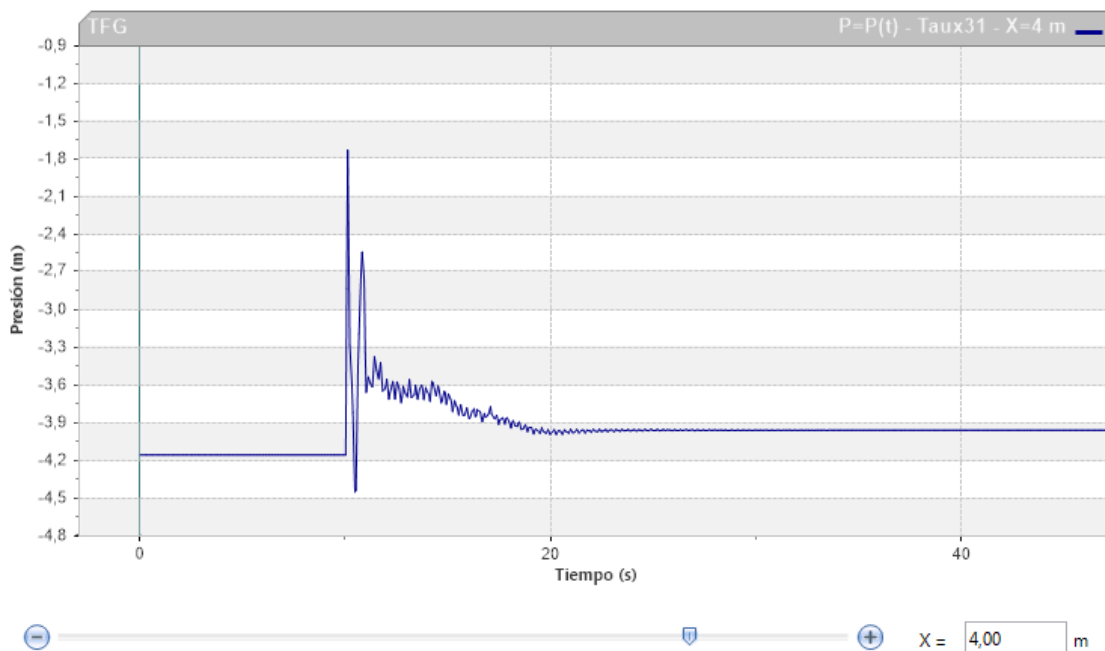
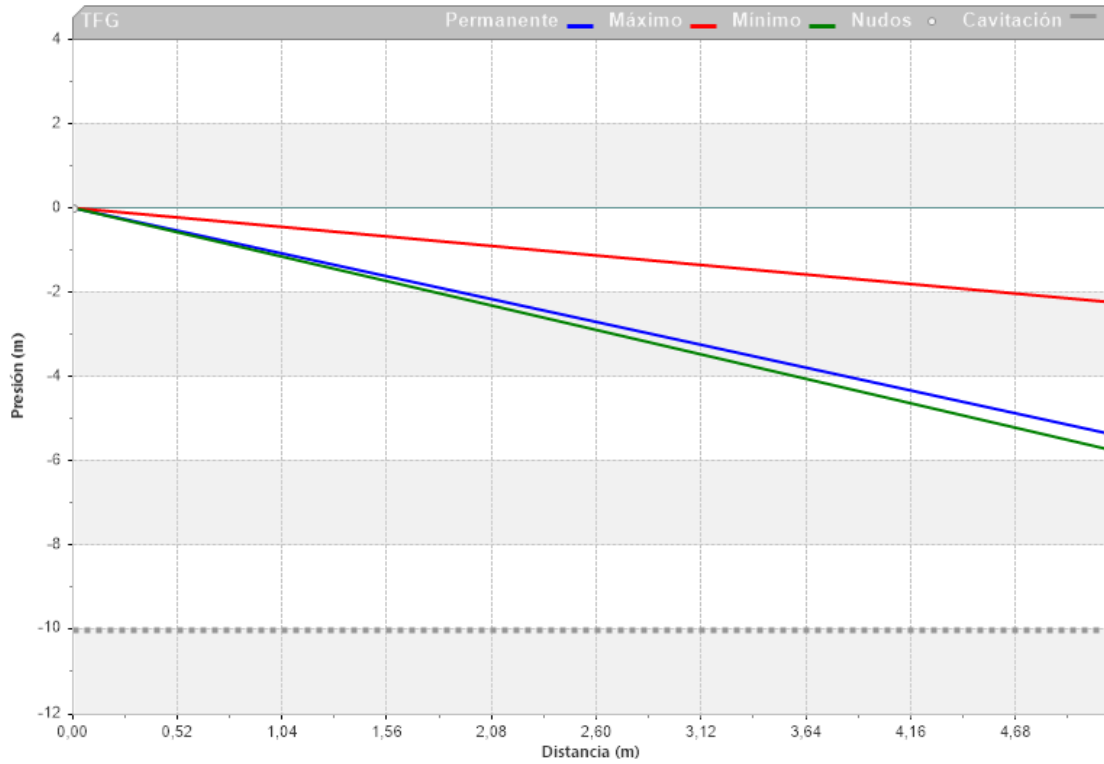


Figura 142. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=4$ m, de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba



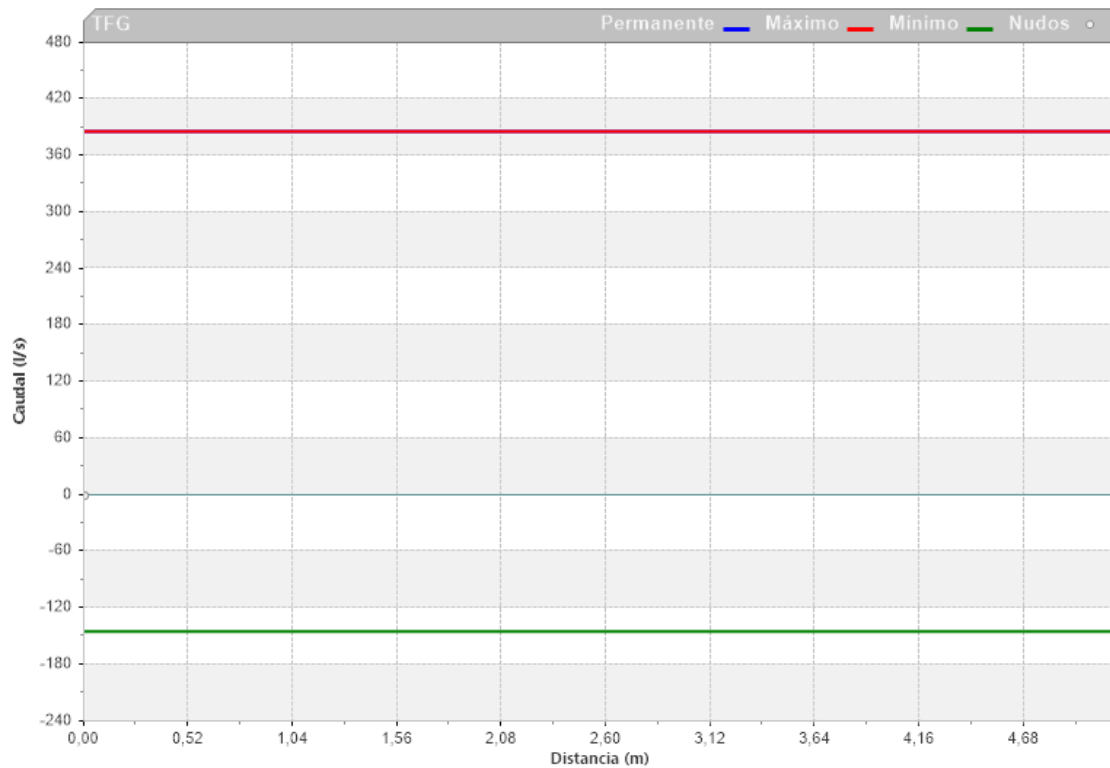
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	0,00999999046325684	0	0,00999999046325684
5,15000009536743	-5,35029411315918	5,15000009536743	-2,22496128082275

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	0,00999999046325684	0	-9,99999904632568
5,15000009536743	-5,7274284362793	5,15000009536743	-9,99999904632568

Figura 143. Envolvente de presiones de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba

El punto de máxima presión está situado en el nudo 34, junto al depósito y el de mínimas en el 33, junto a la bomba.

Por último, se presenta la envolvente de caudales.

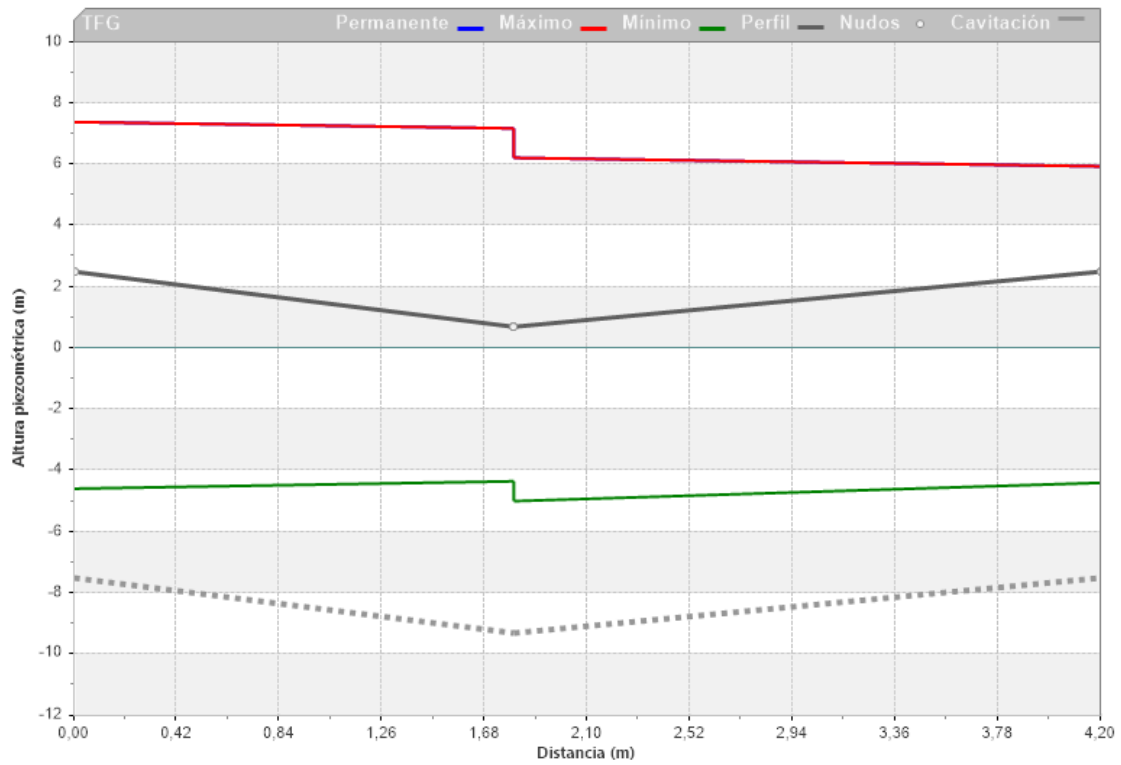


Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	385,810150146484	0	-144,928482055664
5,15000009536743	385,810119628906	5,15000009536743	-144,756423950195

Figura 144. Envolvente de caudales de la tubería aux31 en el caso 2, al parar la bomba

- Taux32 y T1

La tubería aux32 mide 1.8 m y conecta la bomba con la válvula 32. La tubería 1 mide 3.3 y conecta la válvula 32 y la 26.



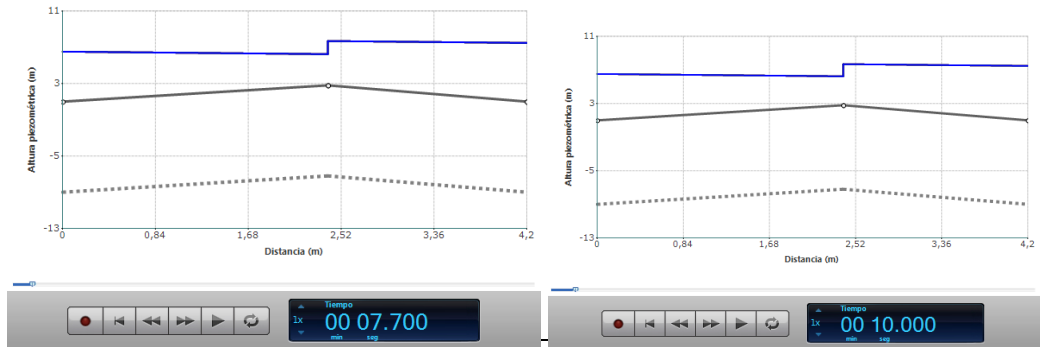
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	7,38732767105103	0	7,38733720779419
1,79999995231628	7,1796441078186	1,79999995231628	7,17965126037598
1,79999995231628	6,21976900100708	1,79999995231628	6,21977663040161
4,20000004768372	5,94285774230957	4,20000004768372	5,94286918640137

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-4,58463621139526	0	2,5
1,79999995231628	-4,34172010421753	1,79999995231628	0,699999988079071
1,79999995231628	-4,99202299118042	1,79999995231628	0,699999988079071
4,20000004768372	-4,39414930343628	4,20000004768372	2,5

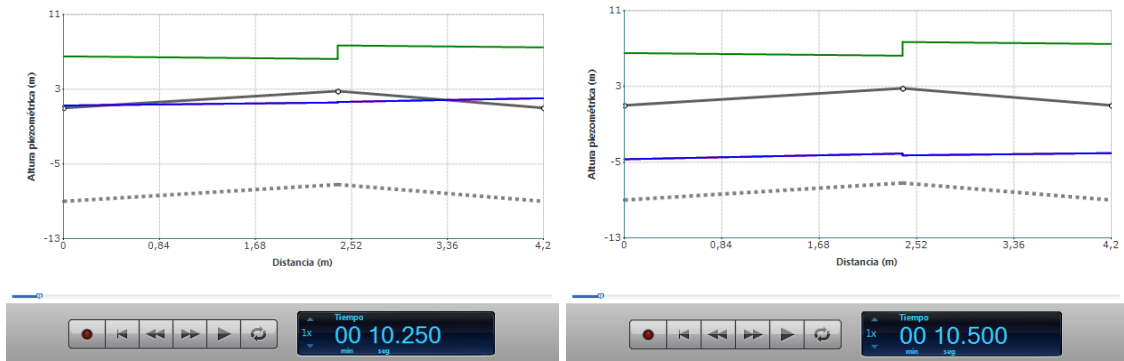
Cavitación X	Cavitación Y
0	-7,49999904632568
1,79999995231628	-9,29999905824661
1,79999995231628	-9,29999905824661
4,20000004768372	-7,49999904632568

Figura 145. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba

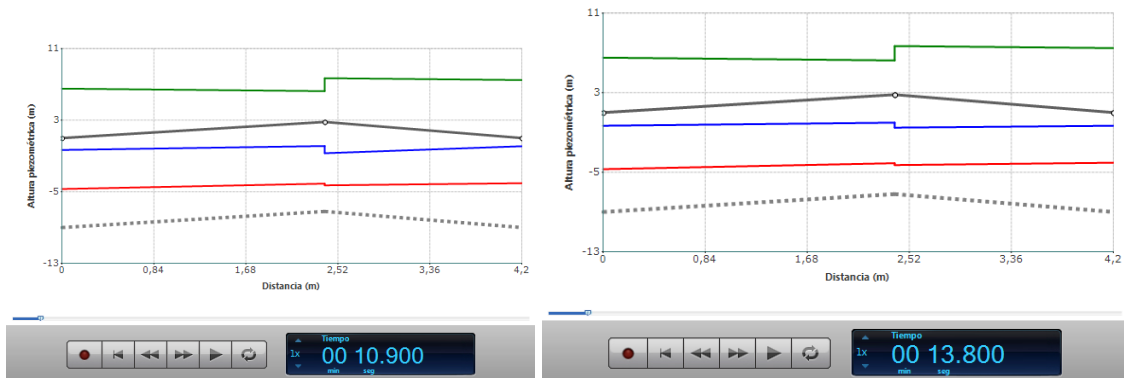
Para explicar cómo se ha formado la curva de envolventes de alturas piezométricas y los tiempos, presentamos imágenes de la animación en diferentes tiempos del desarrollo del transitorio.



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 146. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10.50 s.

Para entender este proceso podemos analizar la evolución de presiones en un punto concreto de las tuberías. Donde se puede ver la evolución del transitorio y como se alcanza el nuevo régimen permanente tras mitigarse el transitorio.

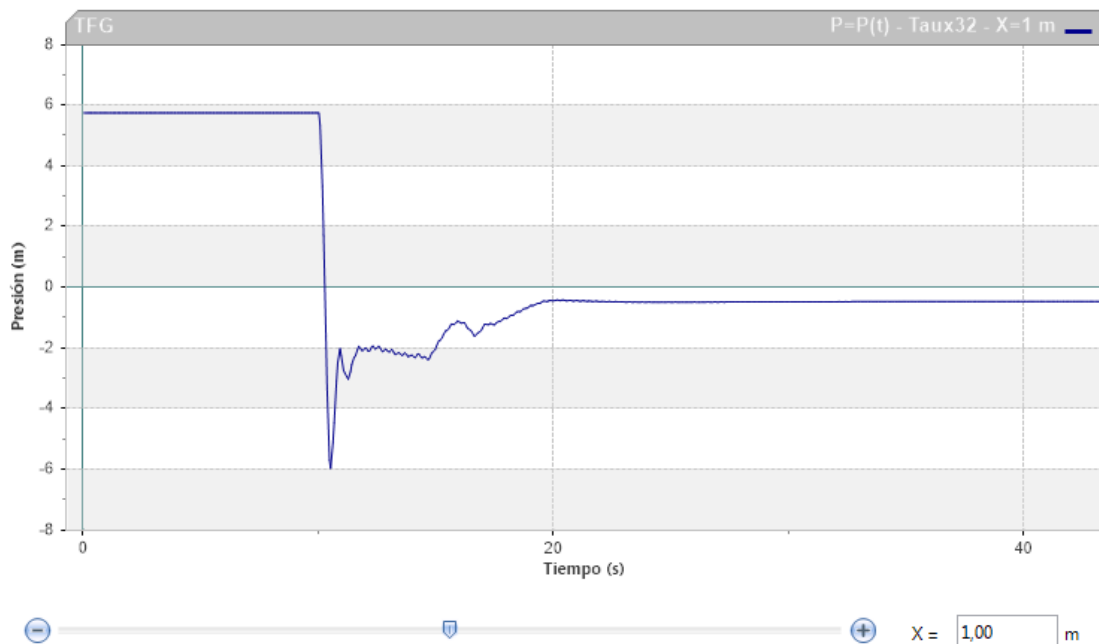


Figura 147. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=1$ m, de la tubería aux32 en el caso 2, al parar la bomba

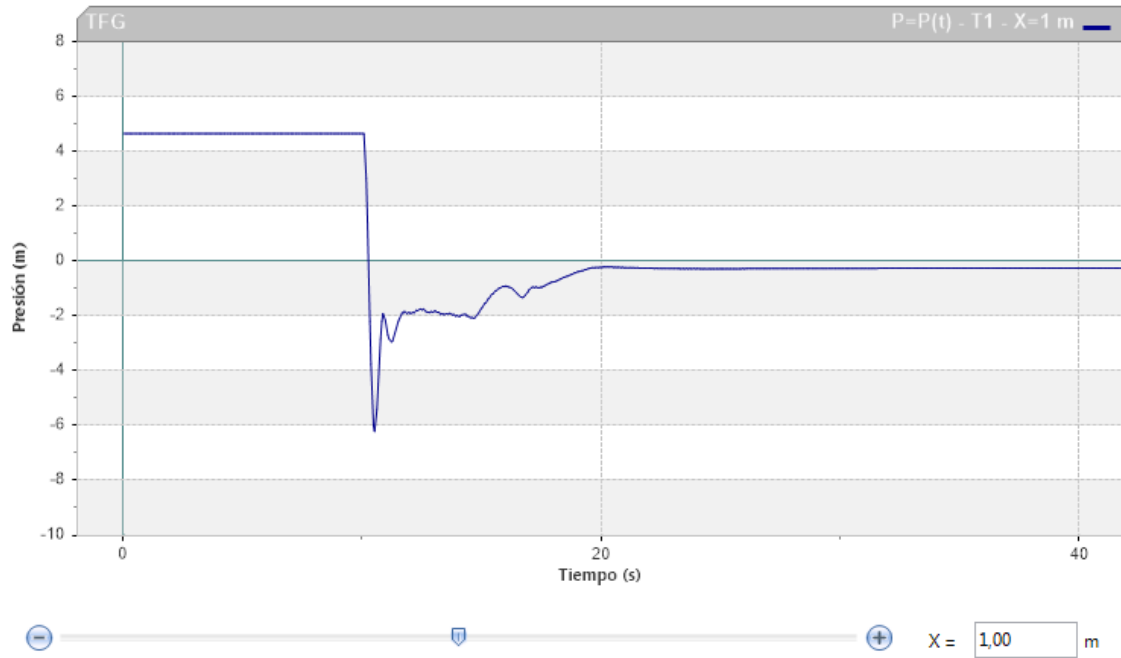
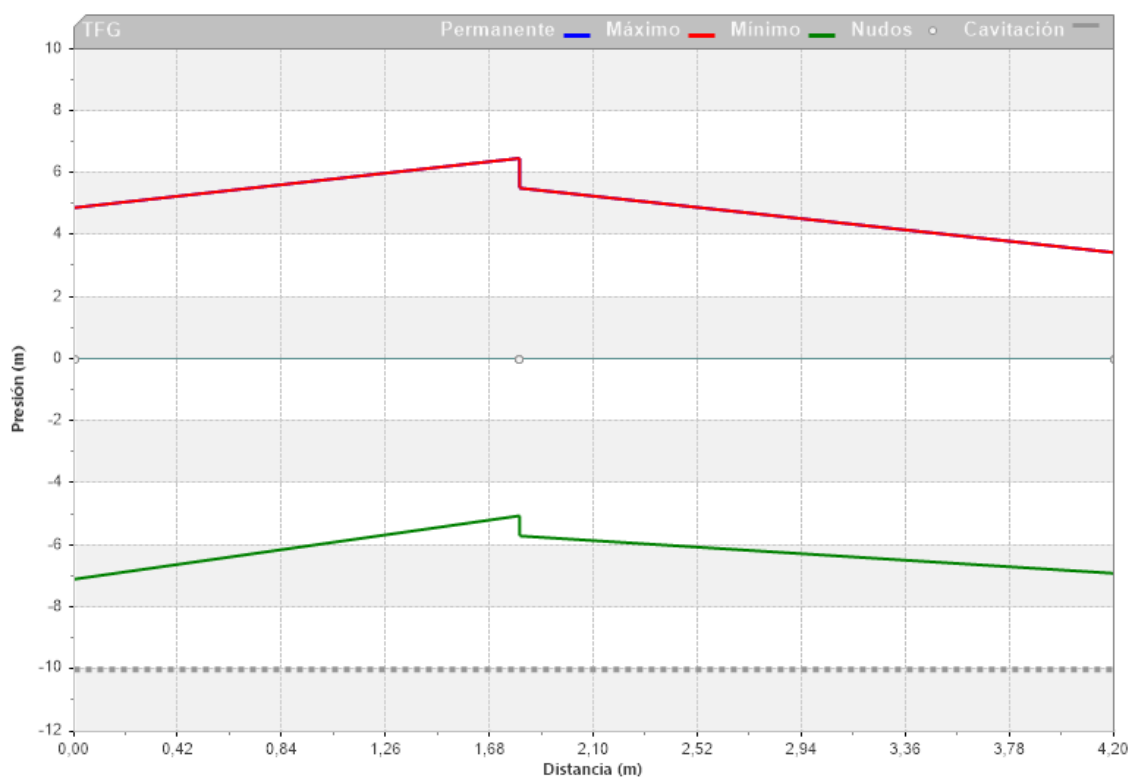


Figura 148. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=1$ m, de la tubería 1 en el caso 2, al parar la bomba



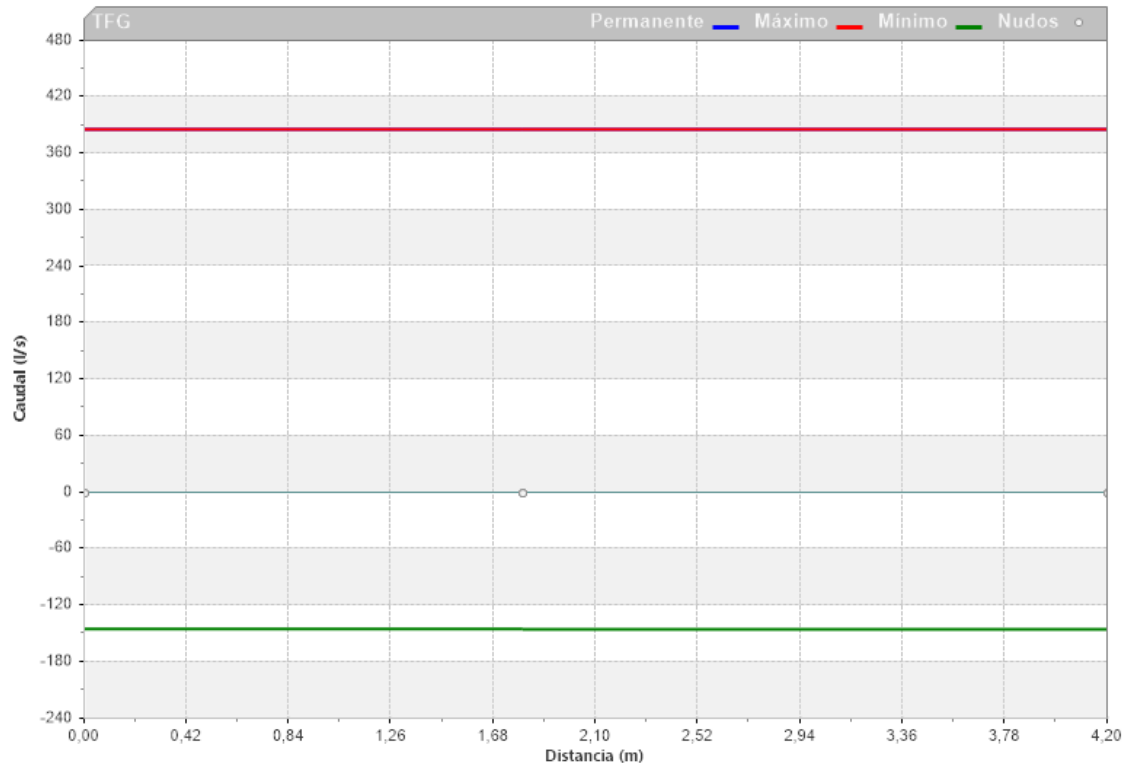
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	4.88732767105103	0	4.88733720779419
1.79999995231628	6.47964429855347	1.79999995231628	6.47965145111084
1.79999995231628	5.51976919174194	1.79999995231628	5.51977682113647
4.20000004768372	3.44285774230957	4.20000004768372	3.44286918640137

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	-7.08463621139526	0	-9.99999904632568
1.79999995231628	-5.04171991348267	1.79999995231628	-9.99999904632568
1.79999995231628	-5.69202280044556	1.79999995231628	-9.99999904632568
4.20000004768372	-6.89414930343628	4.20000004768372	-9.99999904632568

Figura 149. Envoltente de presiones de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba

La presión máxima se encuentra en el punto final de la Taux32 y la mínima en el comienzo de la Taux32.

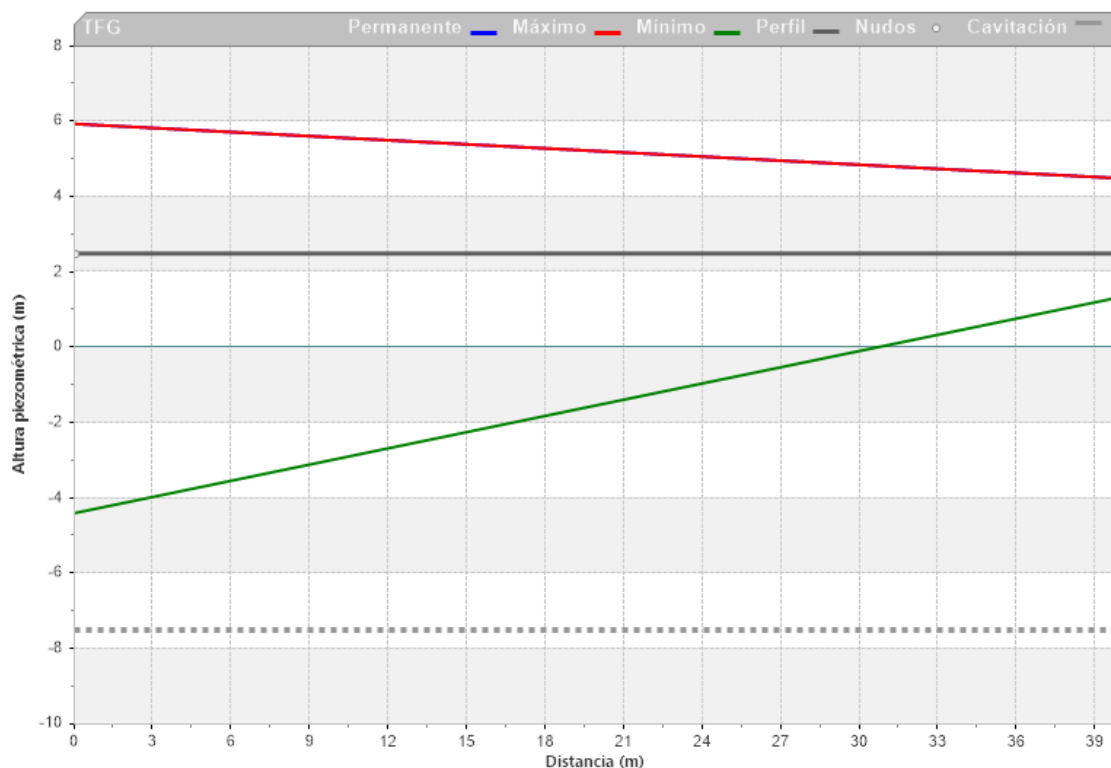
Por último, se presenta la envoltente de caudales.



	Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
	0	385,810119628906	0	-144,756423950195
	1,79999995231628	385,810150146484	1,79999995231628	-145,093521118164
	1,79999995231628	385,810150146484	1,79999995231628	-145,115447998047
	4,20000004768372	385,810150146484	4,20000004768372	-145,275131225586

Figura 150. Envolvente de caudales de la tubería aux32 y 1 en el caso 2, al parar la bomba

- Tpp



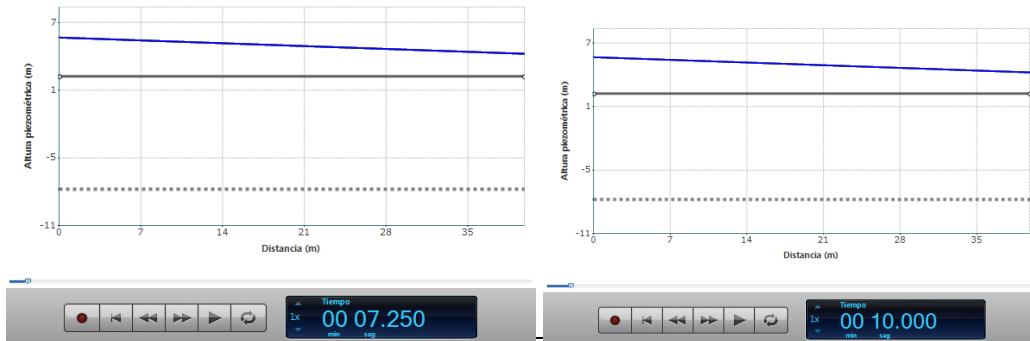
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	5,94285774230957	0	5,94286918640137
39,8499984741211	4,50134801864624	39,8499984741211	4,50135564804077

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-4,39414930343628	0	2,5
39,8499984741211	1,32723009586334	39,8499984741211	2,5

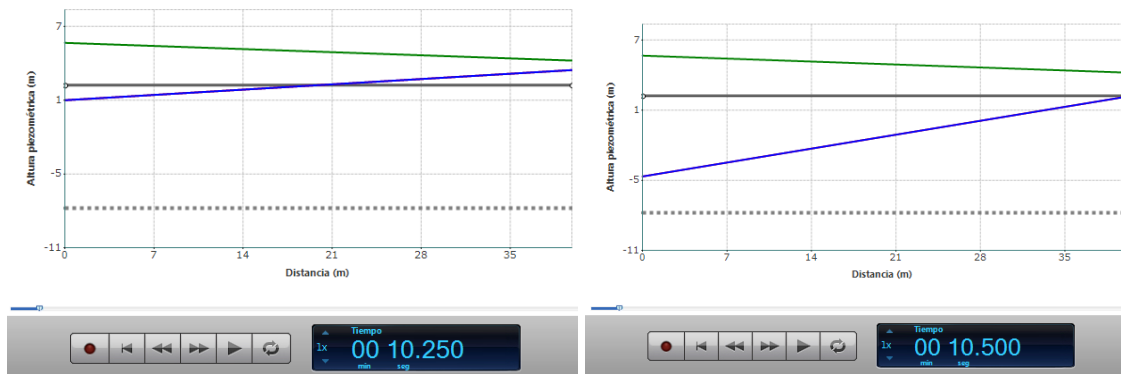
Cavitación X	Cavitación Y
0	-7,49999904632568
39,8499984741211	-7,49999904632568

Figura 151. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba

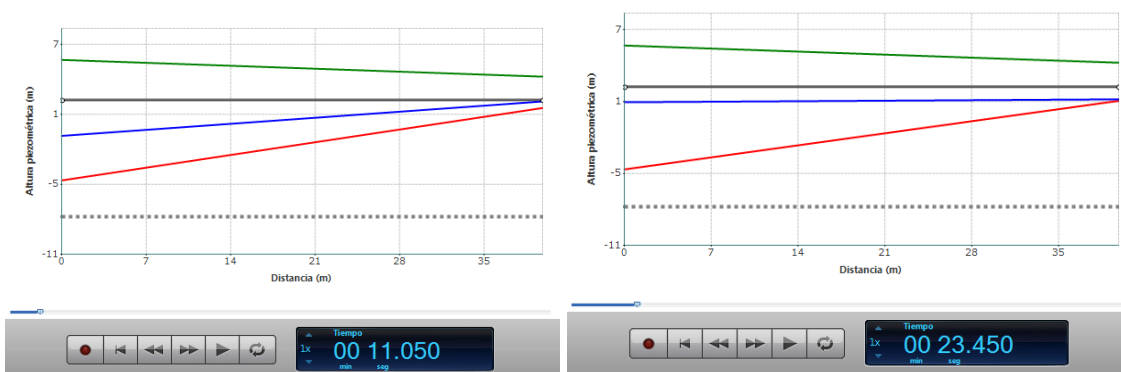
Para explicar cómo se ha formado la curva de envolventes de alturas piezométricas y los tiempos, presentamos imágenes de la animación en diferentes tiempos del desarrollo del transitorio.



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 152. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10.50 s.

Para entender este proceso podemos analizar la evolución de presiones en un punto concreto de la tubería ($x=4$ m, por ejemplo).

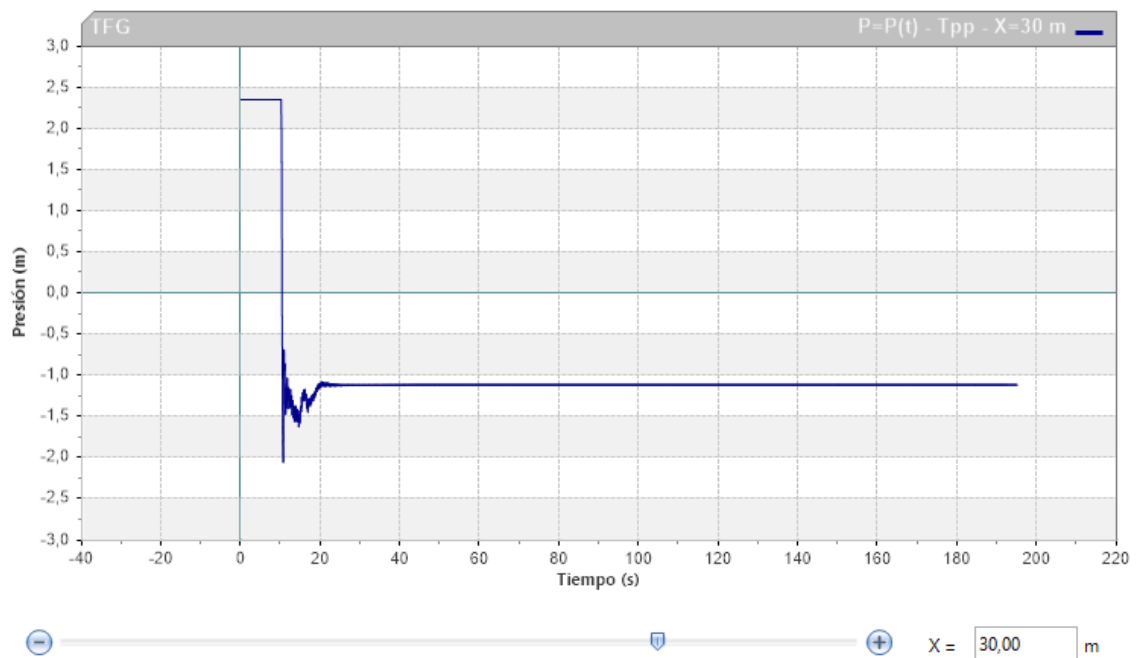
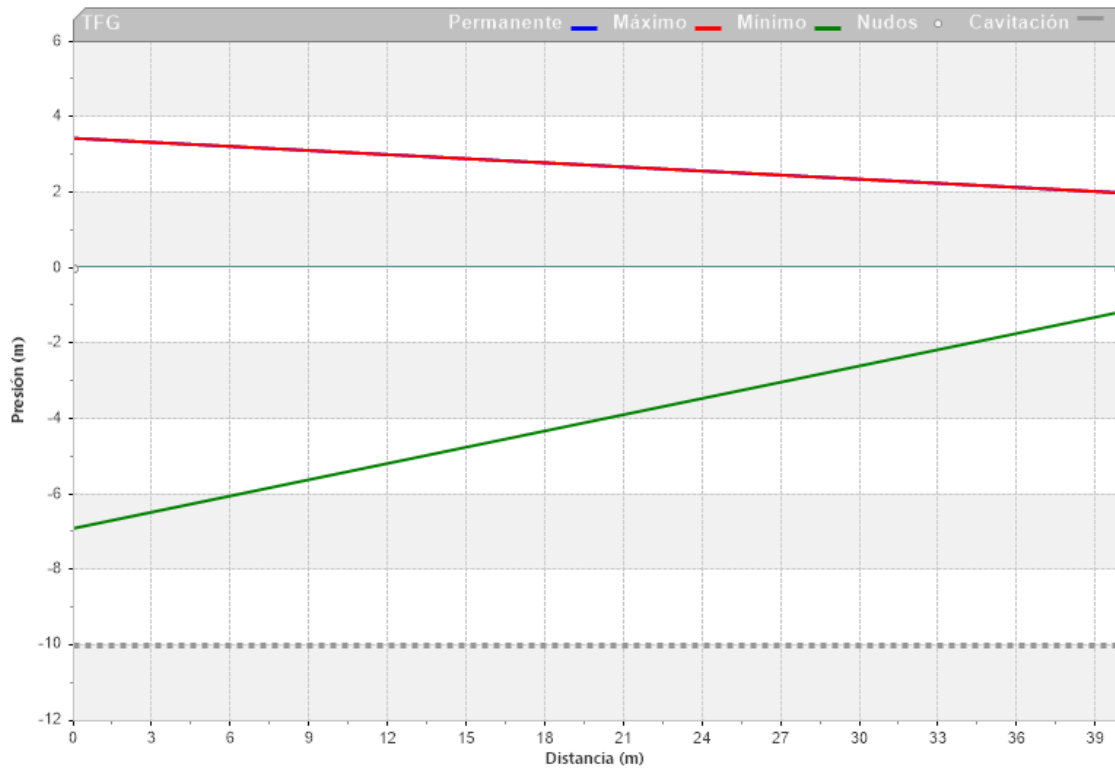


Figura 153. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=4$ m, de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba

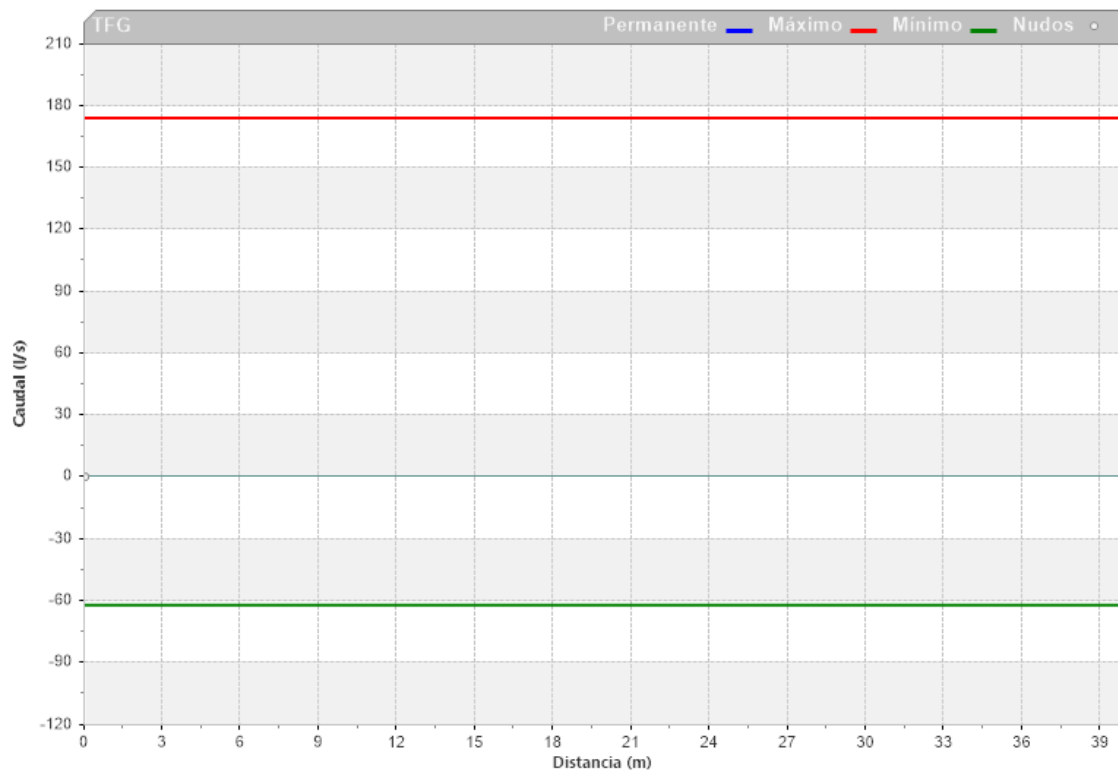


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	3,44285774230957	0	3,44286918640137
39,8499984741211	2,00134801864624	39,8499984741211	2,00135564804077

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	-6,89414930343628	0	-9,99999904632568
39,8499984741211	-1,17276990413666	39,8499984741211	-9,99999904632568

Figura 154. Envoltente de presiones de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba

Por último, se presenta la envoltente de caudales.

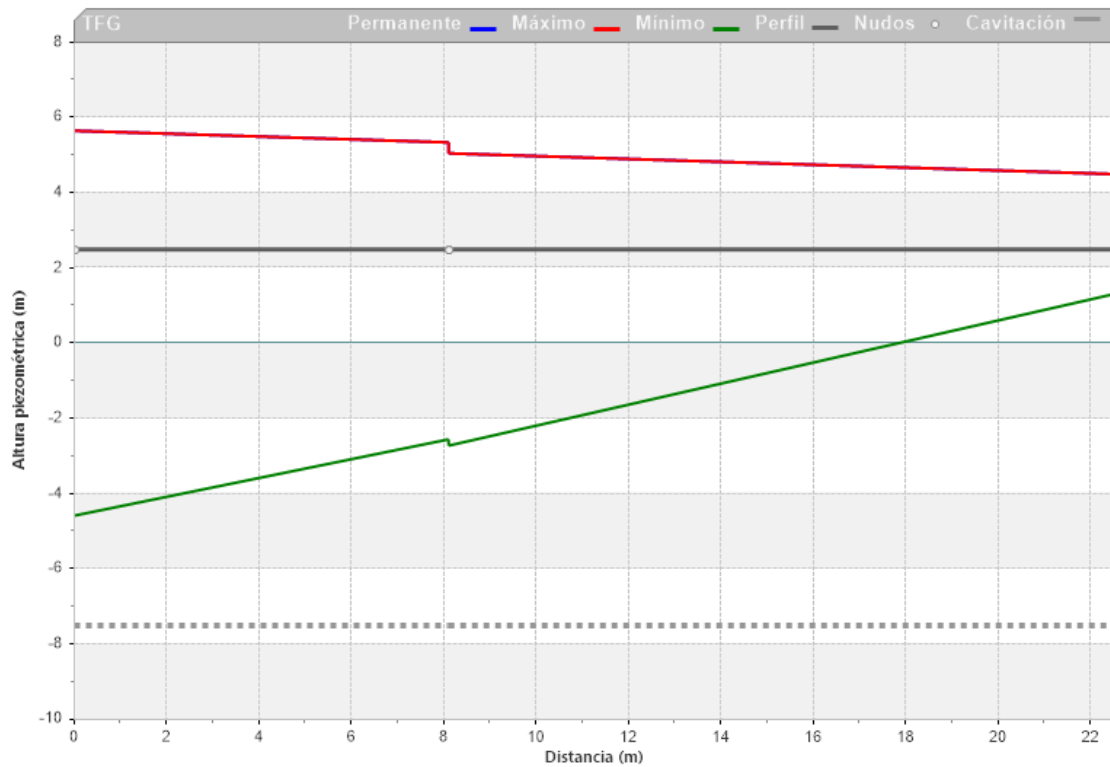


Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	174,220092773438	0	-61,9583511352539
39,8499984741211	174,220092773438	39,8499984741211	-61,9583473205566

Figura 155. Envolvente de caudales de la tubería pp en el caso 2, al parar la bomba

- T6 y T2

La tubería 6, mide 8.1 m y conecta la válvula 26 y la 6. La tubería 2, mide 14.45 y conecta la válvula 6 con el nudo 5.



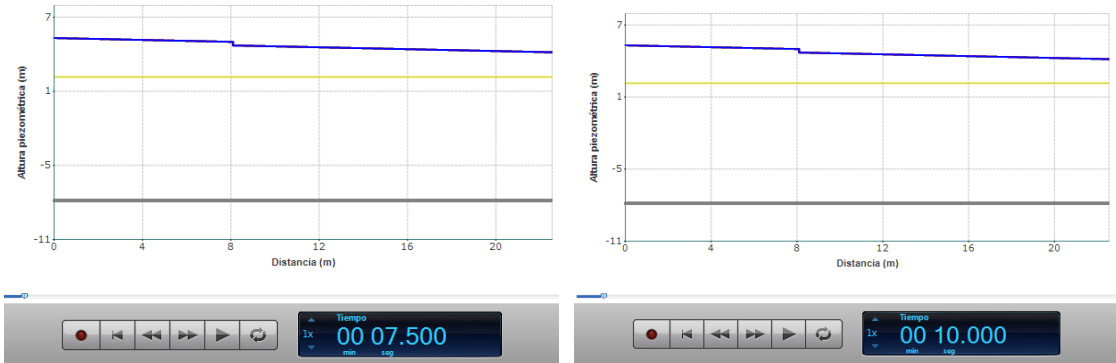
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	5,6541485786438	0	5,6541600227356
8,10000038146973	5,34376573562622	8,10000038146973	5,34377193450928
8,10000038146973	5,05505657196045	8,10000038146973	5,05506324768066
22,5500001907349	4,50134801864624	22,5500001907349	4,50135564804077

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-4,57590341567993	0	2,5
8,10000038146973	-2,5489239692688	8,10000038146973	2,5
8,10000038146973	-2,71580624580383	8,10000038146973	2,5
22,5500001907349	1,32723009586334	22,5500001907349	2,5

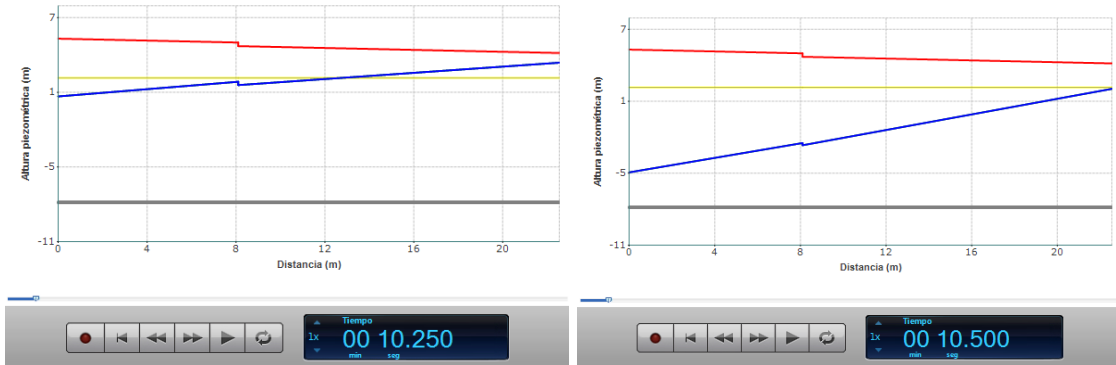
Cavitación X	Cavitación Y
0	-7,49999904632568
8,10000038146973	-7,49999904632568
8,10000038146973	-7,49999904632568
22,5500001907349	-7,49999904632568

*Figura 156. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al
 para la bomba*

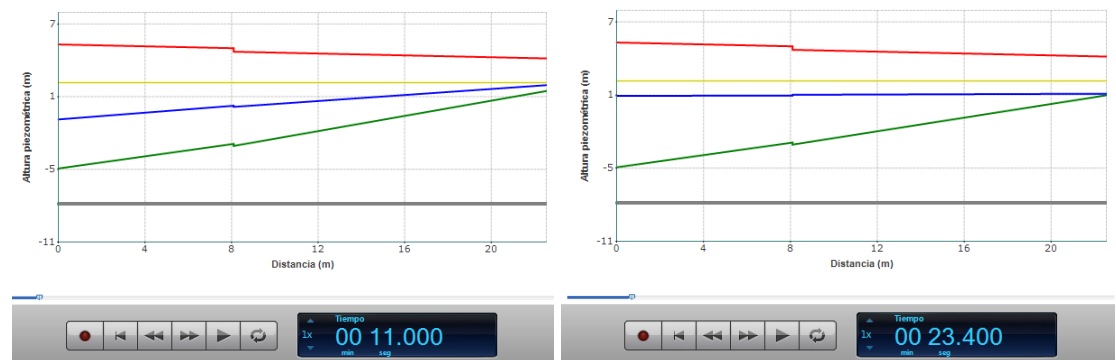
Para explicar cómo se ha formado la curva de envolventes de alturas piezométricas y los tiempos, presentamos imágenes de la animación en diferentes tiempos del desarrollo del transitorio.



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 157. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10.50 s.

Para entender este proceso podemos analizar la evolución de presiones en un punto concreto de la tubería ($x = 7$ m, por ejemplo).

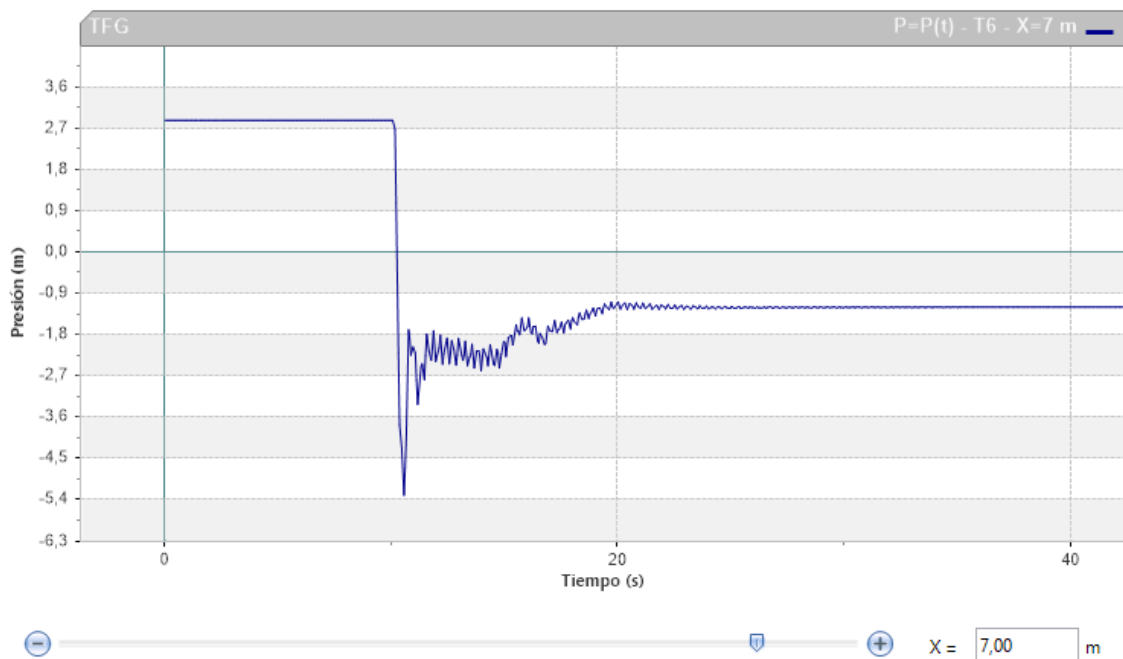


Figura 158. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x = 7$ m, de la tubería 6 en el caso 2, al parar la bomba

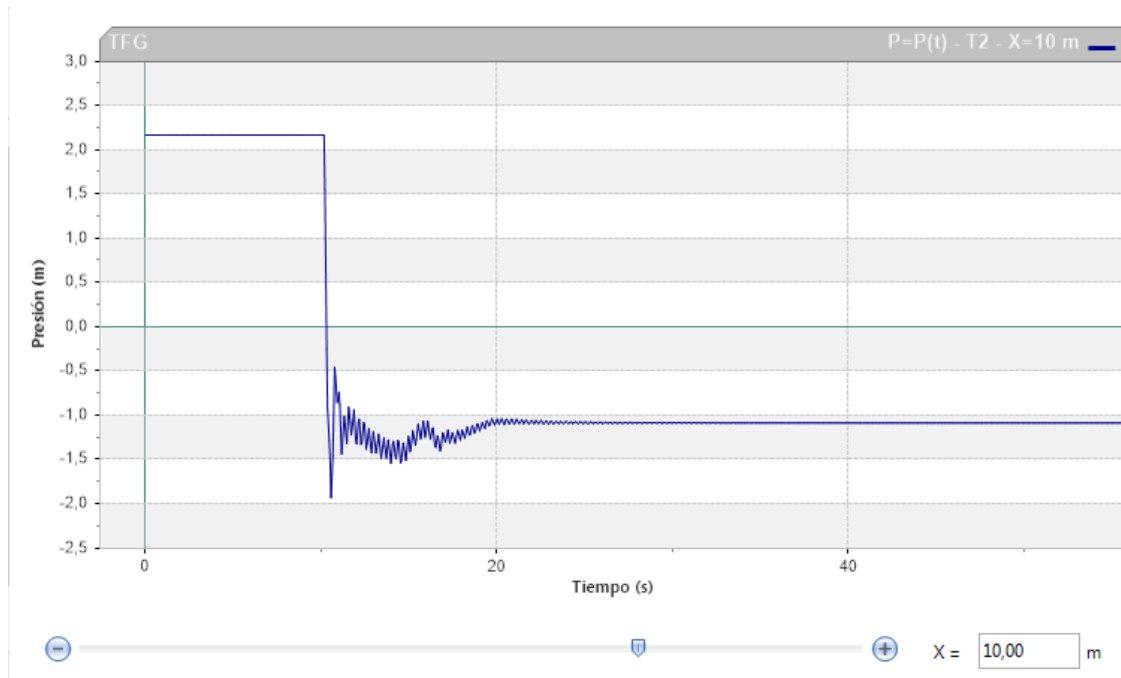
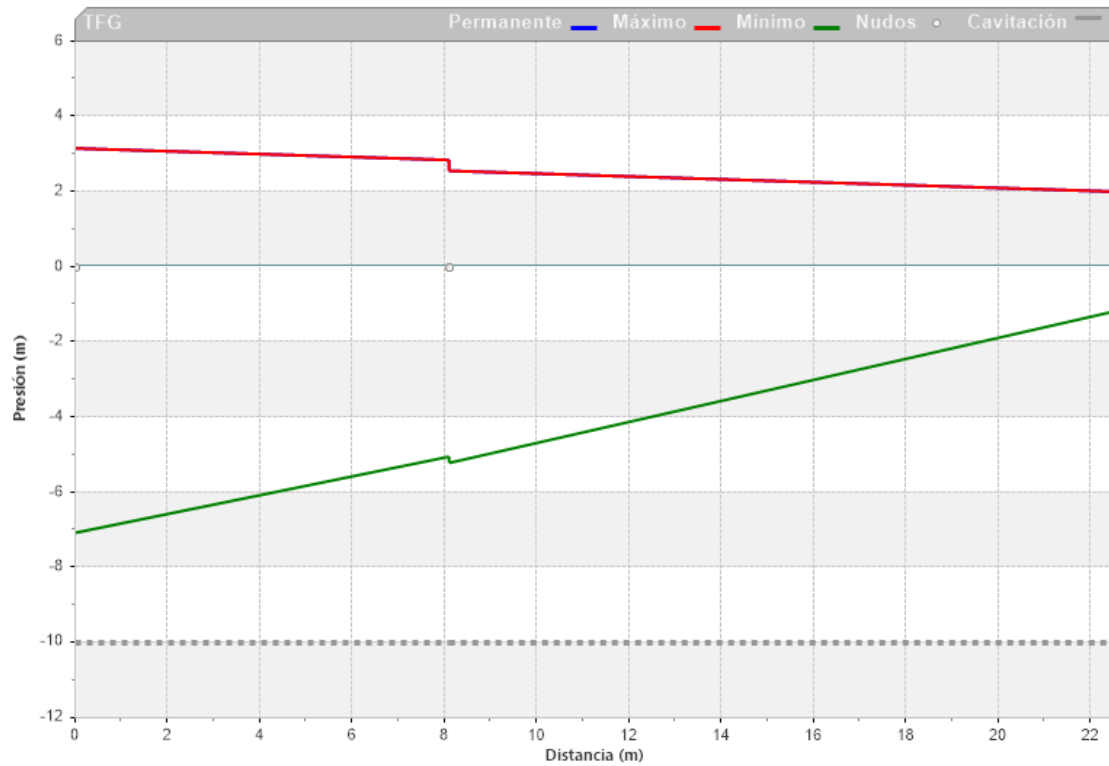


Figura 159. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=10$ m, de la tubería 2 en el caso 2, al parar la bomba

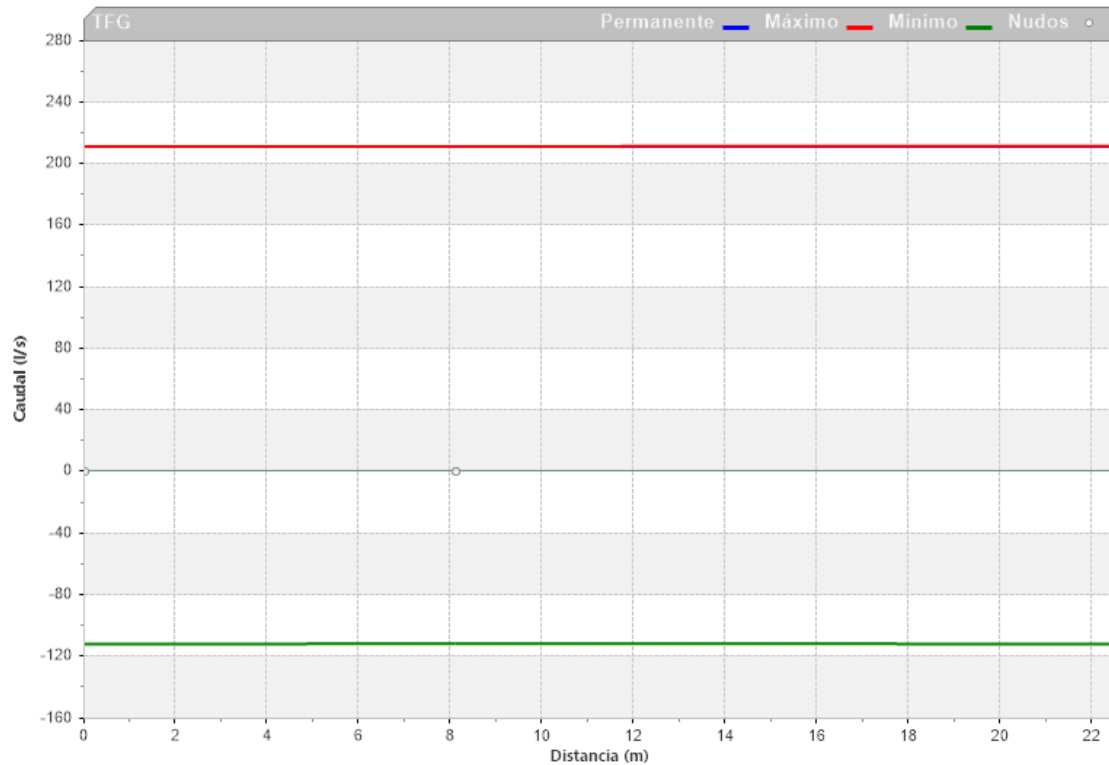


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	3,1541485786438	0	3,1541600227356
8,10000038146973	2,84376573562622	8,10000038146973	2,84377193450928
8,10000038146973	2,55505657196045	8,10000038146973	2,55506324768066
22,5500001907349	2,00134801864624	22,5500001907349	2,00135564804077

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	-7,07590341567993	0	-9,99999904632568
8,10000038146973	-5,0489239692688	8,10000038146973	-9,99999904632568
8,10000038146973	-5,21580600738525	8,10000038146973	-9,99999904632568
22,5500001907349	-1,17276990413666	22,5500001907349	-9,99999904632568

Figura 160. Envolvente de presiones de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al parar la bomba

Por último, se presenta la envolvente de caudales.

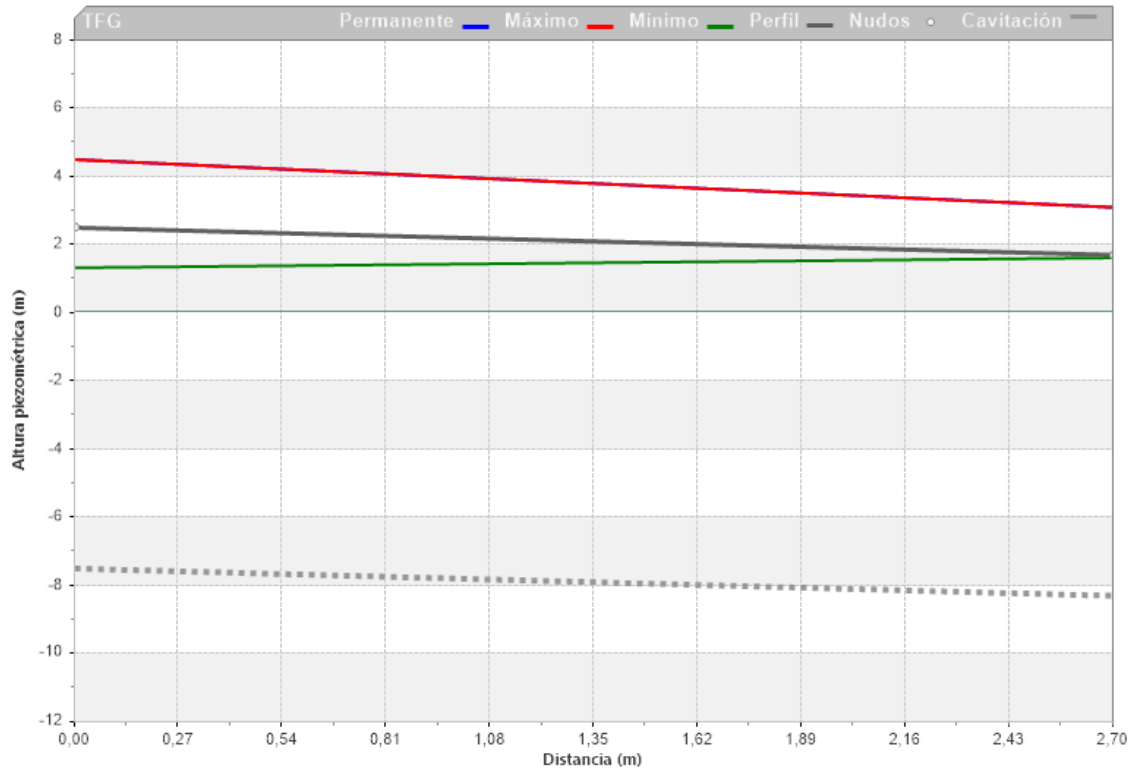


Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	211,590621948242	0	-111,672988891602
8,10000038146973	211,590621948242	8,10000038146973	-111,35230255127
8,10000038146973	211,590621948242	8,10000038146973	-111,33422088623
22,5500001907349	211,860900878906	22,5500001907349	-111,510513305664

Figura 161. Envoltente de caudales de la tubería 6 y 2 en el caso 2, al parar la bomba

- Taux51

La tubería auxiliar 51 mide 2,7 y conecta el nudo 5 con la válvula 9 que está conectada al canal.



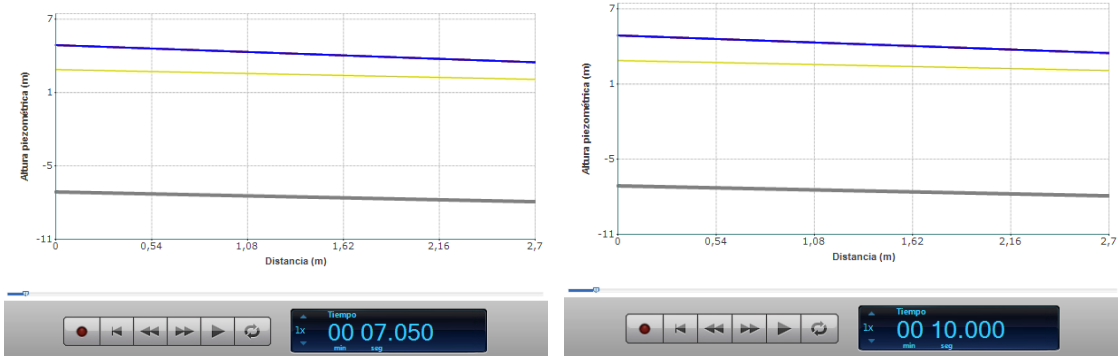
Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	4,50134801864624	0	4,50135564804077
2,70000004768372	3,09712862968445	2,70000004768372	3,09712910652161

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	1,32723009586334	0	2,5
2,70000004768372	1,61584663391113	2,70000004768372	1,70000004768372

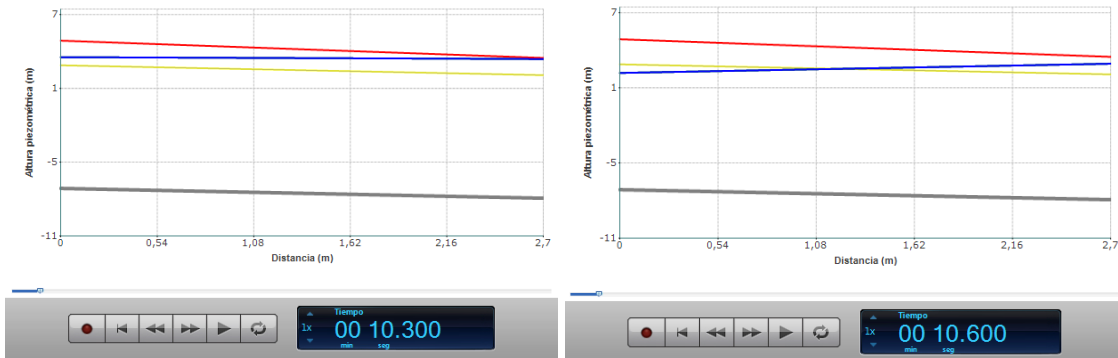
Cavitación X	Cavitación Y
0	-7,49999904632568
2,70000004768372	-8,29999899864197

Figura 162. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba

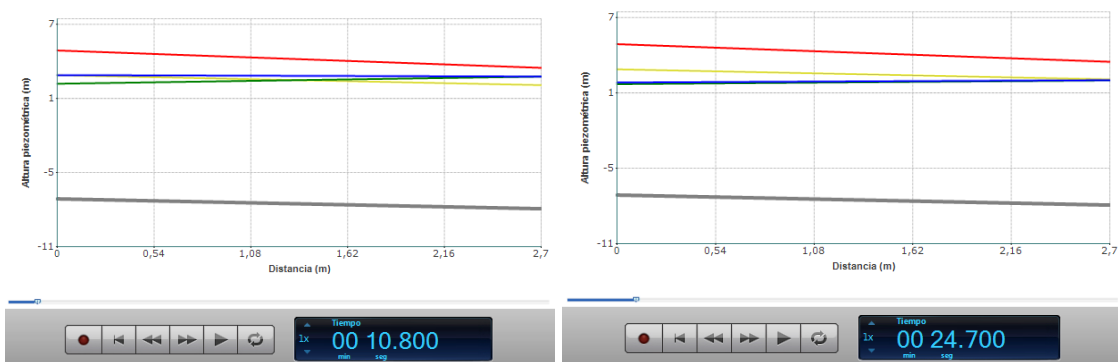
Para explicar cómo se ha formado la curva de envoltentes de alturas piezométricas y los tiempos, presentamos imágenes de la animación en diferentes tiempos del desarrollo del transitorio.



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 163. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10.60 s.

Para entender este proceso podemos analizar la evolución de presiones en un punto concreto de la tubería ($x=2$ m, por ejemplo).

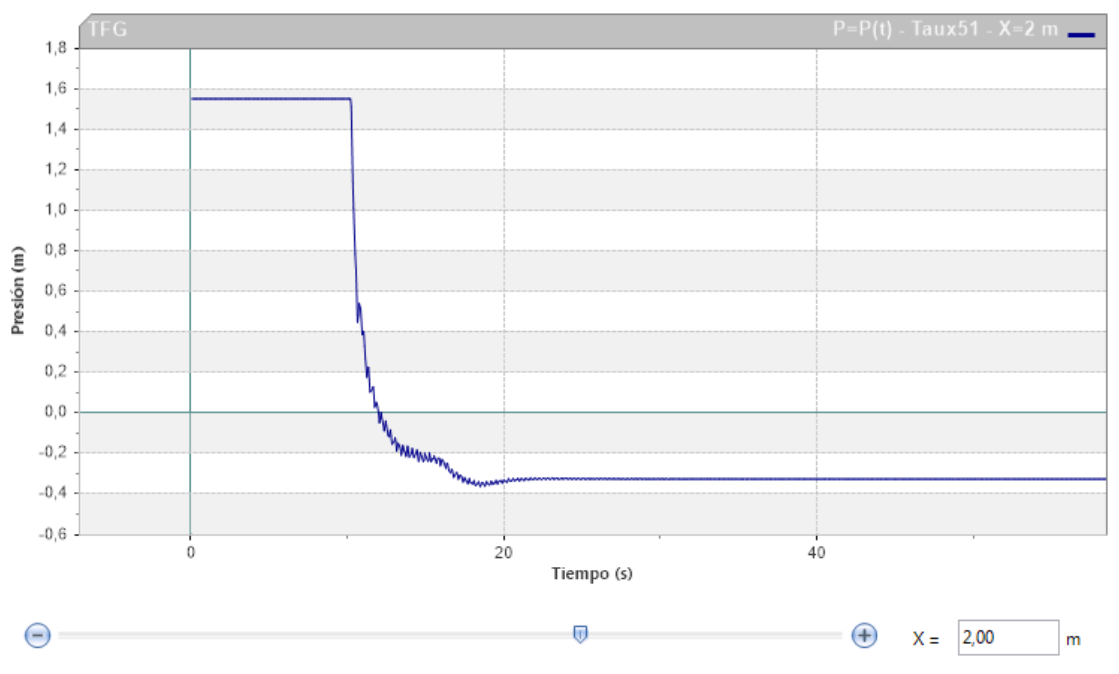
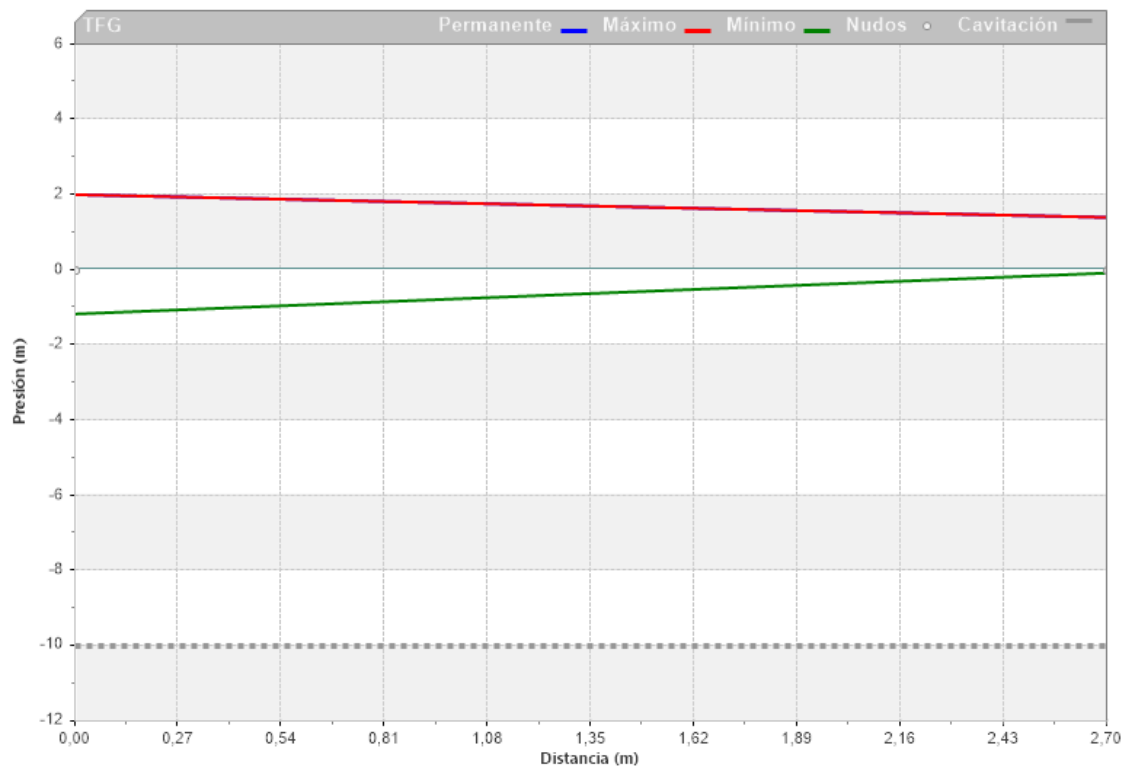


Figura 164. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=2$ m, de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba

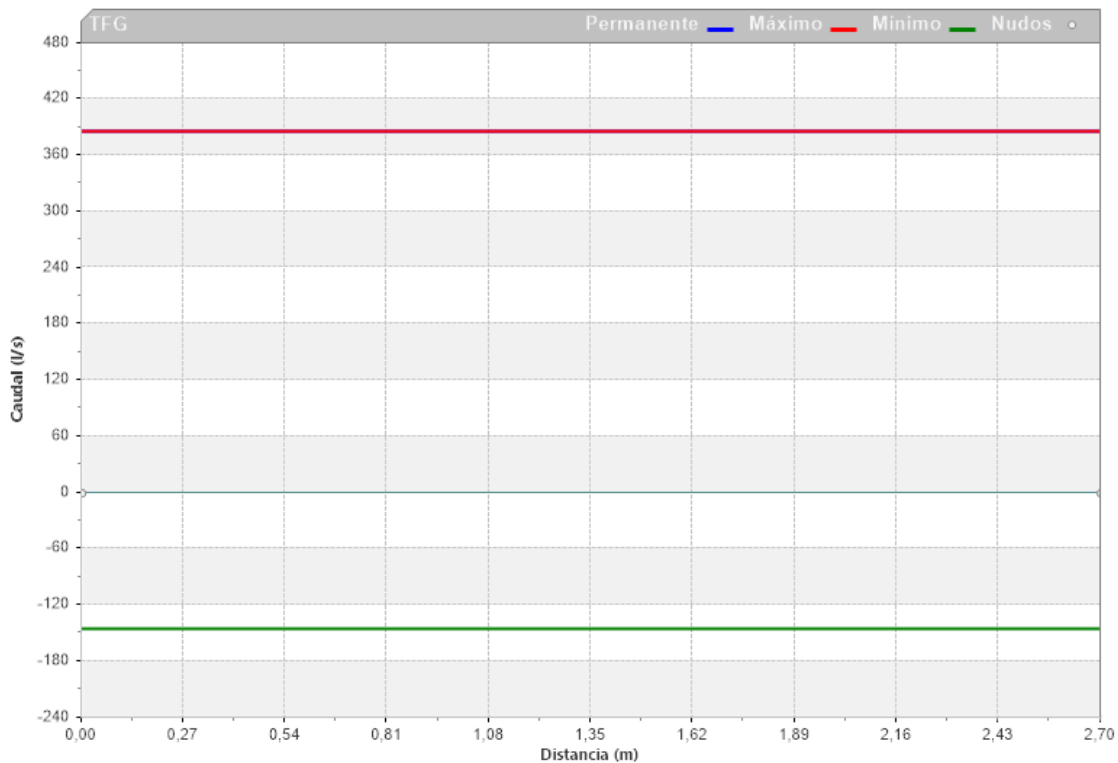


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	2,00134801864624	0	2,00135564804077
2,70000004768372	1,39712858200073	2,70000004768372	1,39712905883789

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	-1,17276990413666	0	-9,99999904632568
2,70000004768372	-0,084153413772583	2,70000004768372	-9,99999904632568

Figura 165. Envoltente de presiones de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba

Por último, se presenta la envoltente de caudales.



Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	385,810150146484	0	-145,113983154297
2,70000004768372	385,810180664063	2,70000004768372	-145,369018554688

Figura 166. Envolvente de caudales de la tubería aux51 en el caso 2, al parar la bomba

5.3.3 TURBINA KAPLAN CON BOMBA WEISE

5.3.3.1 Análisis del sistema

El flujo de agua comienza en el nudo 84, saliendo del pozo e incorporándose al circuito a través de la bomba Weise. La tubería auxiliar 82 conecta la bomba (nudo 82) con la válvula 2, que está totalmente abierta, y conecta con el circuito principal. A continuación, el flujo de agua se dirige por la tubería 5 (nudos 8 a 9) y la válvula 3, hasta el depósito de la turbina Kaplan.

Como ya se ha explicado, este tipo de turbina se utiliza en los siguientes casos:

- altura de caída 3-60 Metros
- caudal 0,7-1.000 m³/s
- potencia 50-180.000 KW

A diferencia de los otros tipos de turbinas se puede ajustar ambas alabas (los del rotor y los alabas de guía) para adaptar la turbina a diferentes niveles del caudal. Los ejes son de orientación horizontal ó vertical. Se usa este tipo de turbina en plantas de presión baja y mediana. Para abastecer las necesidades de energía hidroeléctrica estas turbinas pueden aprovechar caídas de agua de pequeños embalses de agua.

Esta es la razón por la que se dispone el depósito antes de la turbina Kaplan, que por la tubería auxiliar 91 devuelve al agua al pozo.

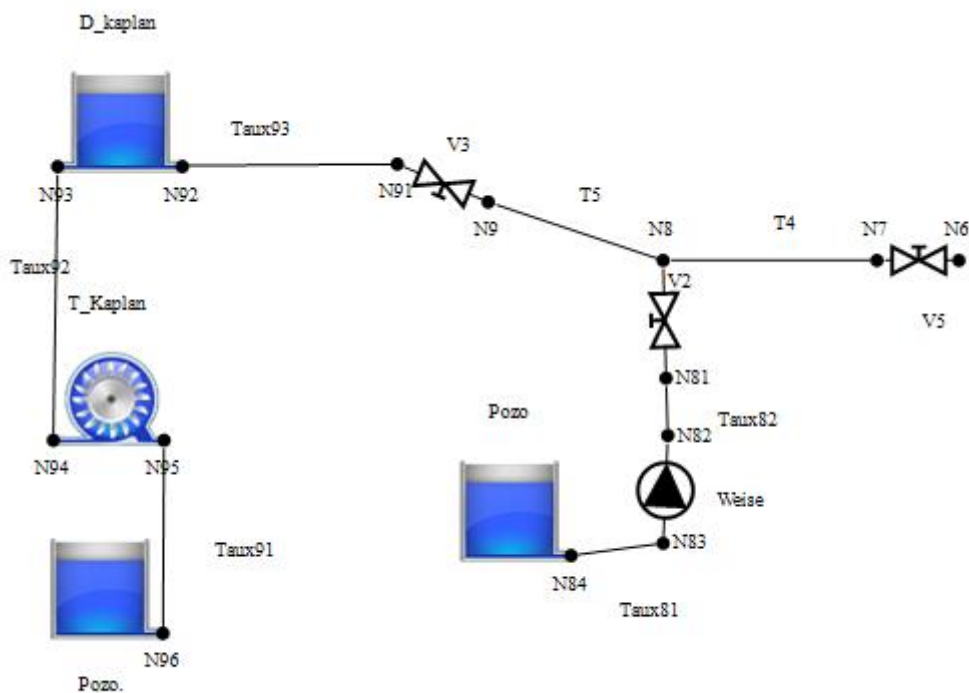


Figura 167. Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Nudos	
Nombre	Cota (m)
N6	2,5
N7	2,5
N8	2,5
N81	2,5
N82	0,55
N83	0,55
N84	-2,64
N9	2,5
N91	2,5
N92	2,5
N93	2,5
N94	1,1
N95	1,1
N96	-1,1

Figura 168. Datos de los nudos del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Depósitos - Datos básicos							Vertedero/Aliviadero				División y Vertedero				Aliviadero móvil				
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	L (m)	Z Cresta (m)	Cq	Descarga	Si (m ²)	Z Si (m)	Sf (m ²)	Z Sf (m)	Cresta	Zf (m)	Ti (s)	Tf (s)
D_kaplan	N93	N92	2,5	GD	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pozo	---	N84	-2,64	GD	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pozo.	---	N96	-1,1	GD	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)
D_kaplan	N93	N92	2,5	GD	5	5
Pozo	---	N84	-2,64	GD	0	0
Pozo.	---	N96	-1,1	GD	0	0

Figura 169. Datos de los depósitos del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

La tubería 4 es la única que no participa en el régimen permanente. Ni en el transitorio, por eso su celeridad es 0.

Tuberías - Datos básicos											Pérdidas		Caudal nulo	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp	
T4	N8	2,5	N7	2,5	257,4	1,8	5	0	Calc.	0	0		-	
T5	N8	2,5	N9	2,5	257,4	1,6	5	886,1212	Calc.	0	0		-	
Taux81	N84	-2,64	N83	0,55	316	4,8	5	829,6219	Calc.	0	0		-	
Taux82	N82	0,55	N81	2,5	257,4	1,95	5	886,1212	Calc.	0	0		-	
Taux91	N95	1,1	N96	-1,1	257,4	2,3	5	886,1212	Calc.	0	0		-	
Taux92	N93	2,5	N94	1,1	257,4	2	5	886,1212	Calc.	0	0		-	
Taux93	N91	2,5	N93	2,5	257,4	6	5	886,1212	Calc.	0	0		-	

Figura 170. Datos de las turbias del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Diámetro (mm)	257,40000
Espesor (mm)	5,00000
Coef. material	1,50
Celeridad (m/s)	886,1212

Figura 171. Cálculo de la celeridad de las tuberías T5, Taux82, Taux91, Taux92 y Taux93

Diámetro (mm)	316,00000
Espesor (mm)	5,00000
Coef. material	1,50
Celeridad (m/s)	829,6219

Figura 172. Cálculo de la celeridad de la tubería aux81

La válvula 5 esta cerrada. El resto de válvulas del circuito, la 2 y la 3 están abiertas al 100% durante todo el ciclo.

Válvula Regulación - Datos básicos								Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $A_p(t) = A_p0 + A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T + B)$			
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
V2	N81	N8	2,5	257,4	0,25	De compuerta		Tabulada					
V3	N9	N91	2,5	257,4	0,25	De compuerta		Tabulada					
V5	N7	N6	2,5	257,4	0	De compuerta		Tabulada					

Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo
V2	N81	N8	2,5	257,4	0,25	De compuerta
V3	N9	N91	2,5	257,4	0,25	De compuerta
V5	N7	N6	2,5	257,4	0	De compuerta

Figura 173. Datos de las válvulas del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Turbinas - Datos básicos							Distribuidor	
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	D (m)	I	N reg	Ap inic	Ap max
T_Kaplan	N94	N95	1,1	1	0,563	1300	30	60

Rendimiento óptimo					Variación de la carga	Desconexión		Regulación PID			
Q	H	P	Rend	N nom		Cmin	Maniobra	Kp	Ki	Kd	Kra
0,139	4,55	0,00485	78,17	1300	(!)	30	(!)	1	10	0,5	100

Figura 174. Datos de la turbina Kaplan del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Estación de bombeo - Datos básicos							Rotación		
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	Nreg	Nnom	I	
Weise	N83	N82	0,55	1	Universale	1450	1450	0,716	

Parada/Arranque						
Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arrancan	Inst. arr.	Duración (s)
En marcha	Si	10	No			

Rendimiento óptimo				V Regulación				V Retención	By-Pass
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)	DN (mm)	Tipo	Modelo	Maniobra	K	K
138,889	12	30	54,5						

Figura 175. Datos de la bomba Weise del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

5.3.3.2 Régimen permanente

Resultado simulación

- Simulación finalizada con EXITO

Resumen de incidencias

- Finalizado el cálculo del régimen permanente en 2065 iteraciones

En primer lugar, se analiza las presiones, alturas piezométricas y caudales en el circuito durante el régimen permanente para el que ha sido diseñado.

Nombre	H(m)	Pr(m)
N8	5.44	2.94
N84_fin	0.00	2.64
N84	0.00	2.64
N81	5.66	3.16
N83	-0.05	-0.60
N82	5.72	5.17
N91	5.17	2.67
N9	5.39	2.89
N7	5.44	2.94
N6	2.50	0.00
N93	5.00	2.50
N92	5.00	2.50
N96_fin	0.00	1.10
N96	0.00	1.10
N94	4.96	3.86
N95	0.05	-1.05

Figura 176. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
Taux81	179.39	2.29	0.01247	0.05	0.00	0.00	0	
T4	-0.00	-0.00	---	0.00	0.00			
Taux93	179.39	3.45	0.01204	0.17	0.00	0.00	0	
Taux92	146.97	2.82	0.01246	0.04	0.00	0.00	0	
Taux91	146.97	2.82	0.01246	0.05	0.00	0.00	0	
Taux82	179.39	3.45	0.01204	0.06	0.00	0.00	0	
T5	179.39	3.45	0.01204	0.05	0.00	0.00	0	

Figura 177. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
V5	1	0.00	Cerrada	0.00
V2	1	179.39	0.22	100.00
V3	1	179.39	0.22	100.00

Figura 178. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

	Nombre	bombas	Qb(l/s)	Hb(m)	Pot(Kw)	Rend(%)	Perd. val. ret(m)	Perd. val. reg(m)	Q Bypass (l/s)	Perd. Bypass (m)
1	Weise	1	179.39	5.77	23.95	42.39				

Figura 179. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

La bomba Weise tiene un rendimiento óptimo del 54.5 % y en el régimen permanente de este circuito su rendimiento es del 42.39 %, es decir, un 22 % menor. Si lo comparamos con el caso 1, donde la bomba Weise en régimen permanente actúa con un rendimiento un 21 % menor al óptimo, el circuito 1 tiene un diseño que amortiza de forma similar la capacidad de la bomba, situándose en un punto de funcionamiento de la curva de características cercano al de este caso. Dado que el rendimiento de a bomba en el primer caso es mayor que en el tercero, el resto de valores, caudal, altura piezométrica y potencia, también difieren ligeramente, como se muestra en la tabla a continuación.

	Bomba Weise caso 1	Bomba Weise caso 3
Rend [%]	43.12	42.39
Rend optimo [%]	54.50	
Qb [l/s]	178.32	179.39
Hb [m]	5.98	5.77
Pot [KW]	24.27	23.95

Tabla 5. Datos de la bomba Weise en el régimen permanente en los casos 1 y 3

Nombre	Qt (m3/s)	Ht (m)	Pot (Mw)	Rend(%)
T_Kaplan	0.15	4.92	0.01	76.75

Figura 180. Resultados del régimen permanente de la Turbina del Circuito turbina Kaplan con bomba Weise

Del mismo modo que comparamos con las bombas su rendimiento real y el óptimo podemos calcular lo con la turbina Kaplan. El rendimiento óptimo de la turbina Kaplan es del 78.17 % y el rendimiento en el circuito es del 76.75 %, es decir, un 2.5 % menor.

5.3.3.3 Régimen transitorio

Resultado simulación
• Simulación finalizada con EXITO

El fallo del sistema que se analiza a continuación es la repentina parada de la bomba debido a un corte del suministro eléctrico. El corte del flujo tan rápido puede dar presiones de gran magnitud, golpe de ariete, que lleguen a fisurar las tuberías o a dañar otros elementos del circuito.

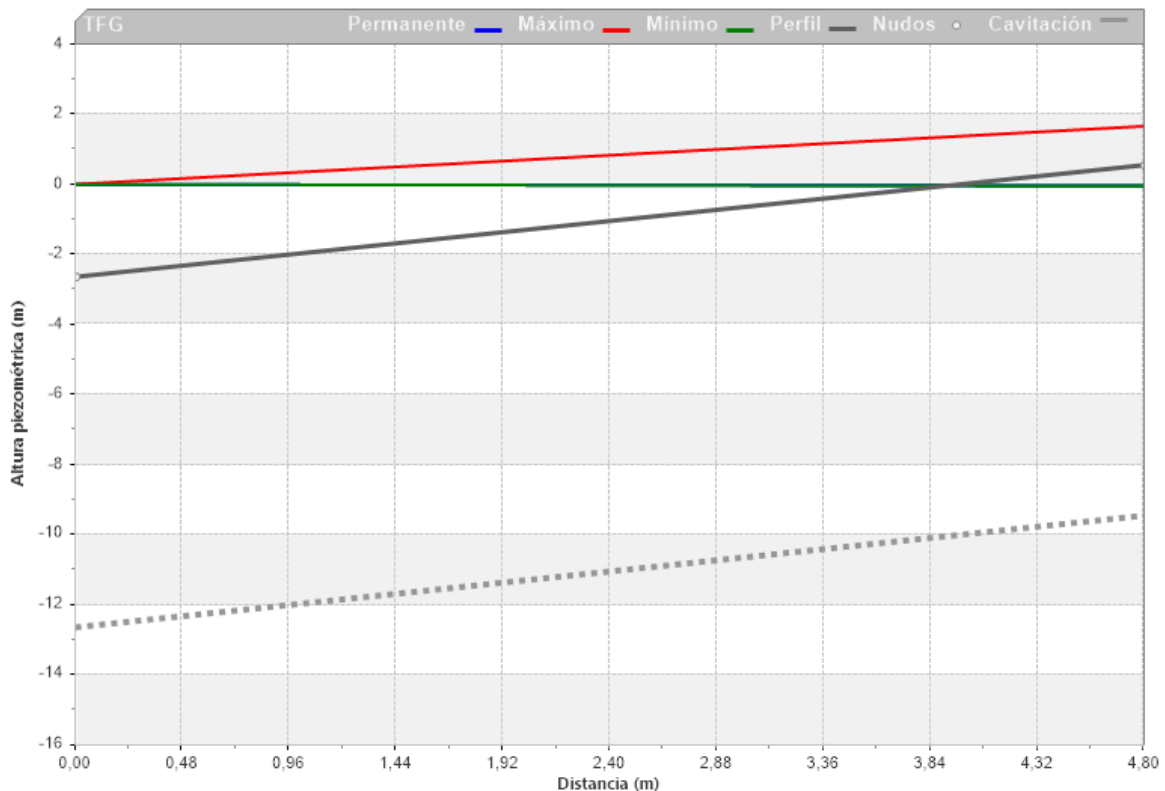
Se van a analizar los siguientes tramos de tuberías:

- Taux81, del nudo 84 al 83 que conecta el pozo y la bomba Weise
- Taux82, válvula 2, T5, válvula 3 y Taux93. Desde el nudo 82 al 92, que conecta la bomba con el depósito de la turbina Kaplan.
- Taux92, que conecta el depósito Kaplan con la turbina Kaplan, del nudo 93 al 94.
- Por último, el tramo de tubería que conecta la turbina Kaplan, nudo 95 con el pozo, nudo 96. La Taux91.

- **Taux81**

La tubería auxiliar 81 tiene un diámetro interior de 316 mm, ligeramente mayor que el diámetro del resto de tuberías de este circuito. Y una longitud de 4.8 m, conecta el pozo con la bomba Weise. Va del nudo 84 al 83, se trata de un tubo de aspiración.

En primer lugar, se estudian la altura piezométrica máxima y mínima en todos los puntos de la tubería. Para entender el desarrollo a continuación se exponen los gráficos de alturas piezométricas de la tubería aux81 en distintos instantes del transitorio.

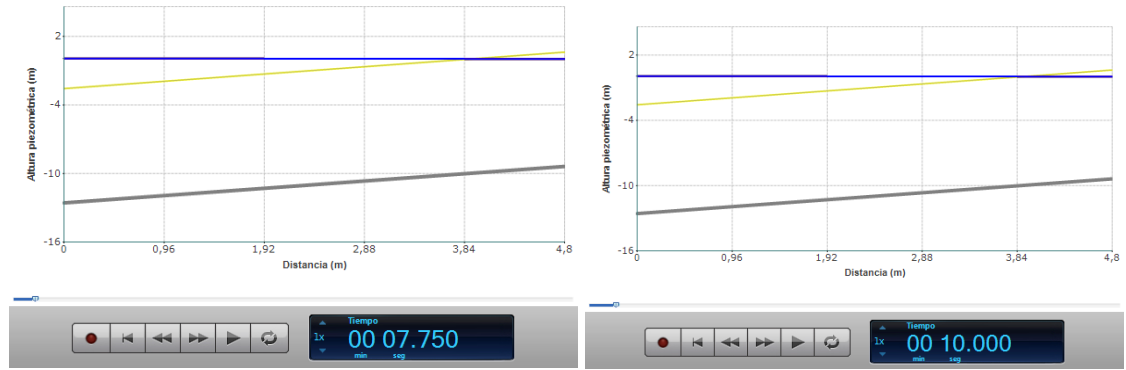


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	0	0	0
4,80000019073486	-0,0505252704024315	4,80000019073486	1,65974950790405

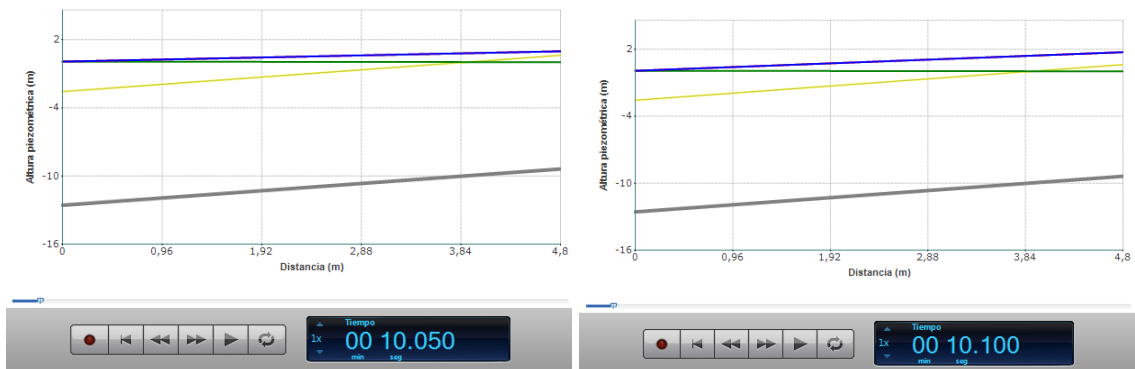
Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	0	0	-2,64000010490417
4,80000019073486	-0,0505258478224278	4,80000019073486	0,550000011920929

Cavitación X	Cavitación Y
0	-12,6399991512299
4,80000019073486	-9,44999903440475

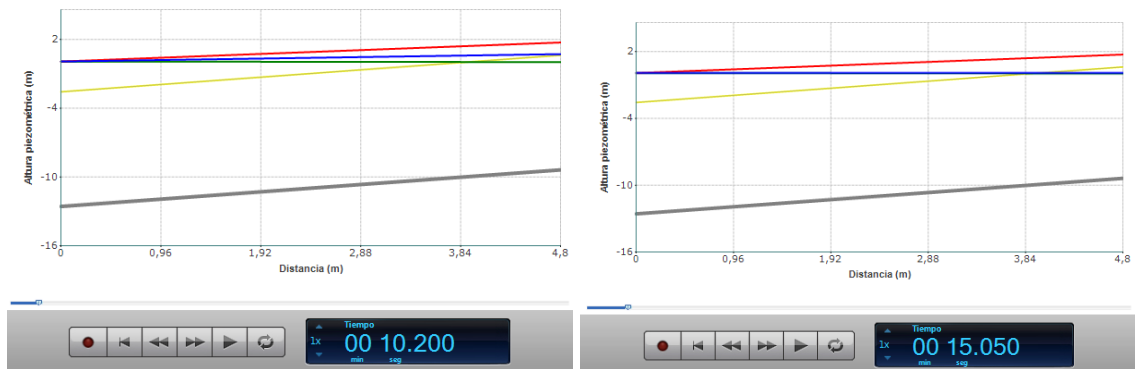
Figura 181. Envoltante de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 182. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10.10 s.

Para estudiar de forma aproximada cuanto tarda en amortiguarse del todo el transitorio, se puede analizar una curva de presión y tiempo en un punto cualquiera de la tubería.

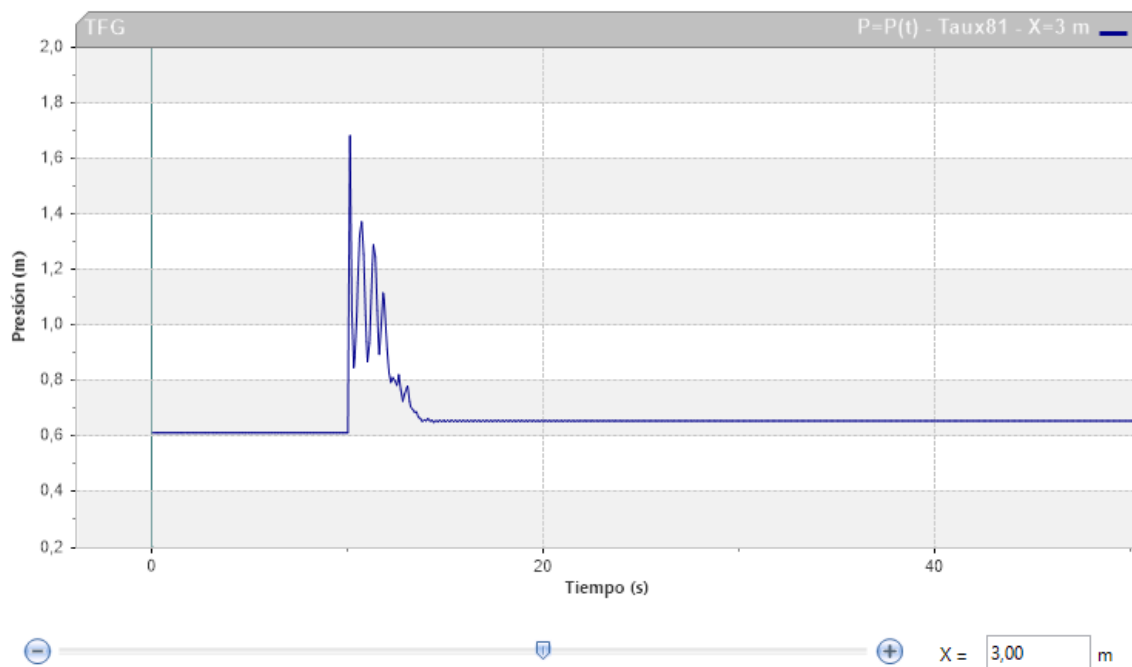
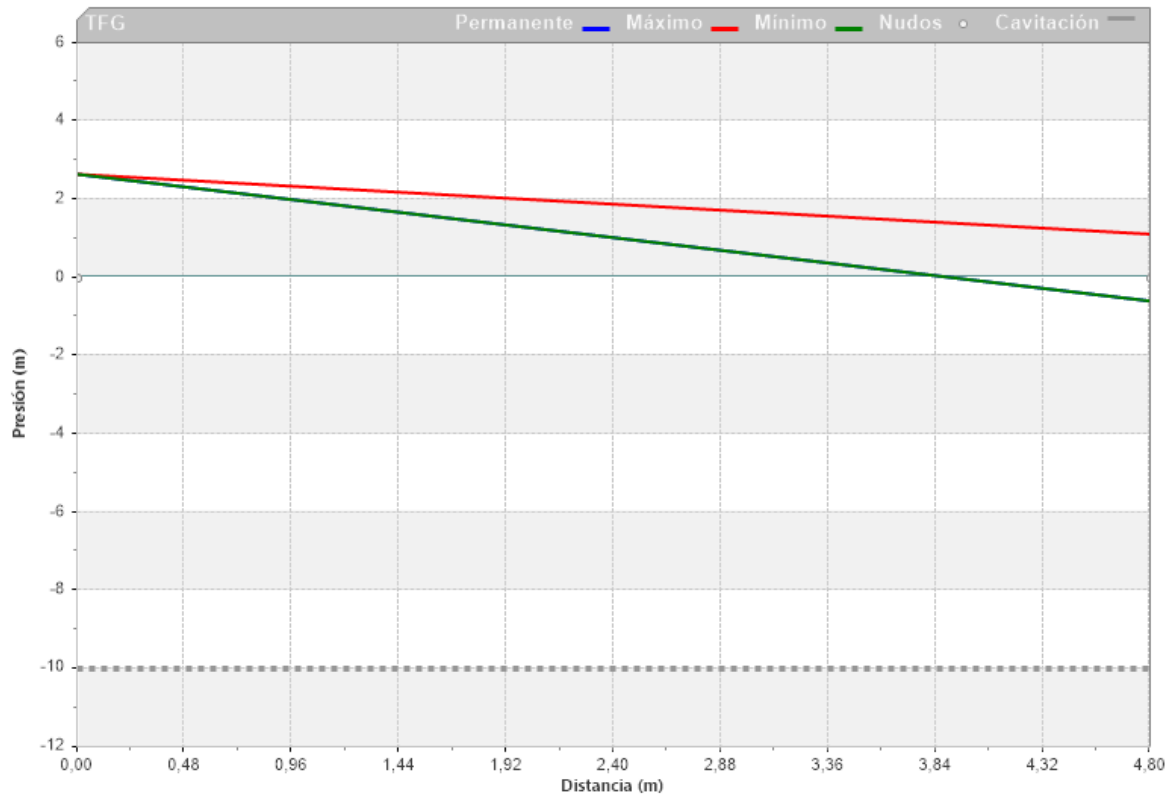


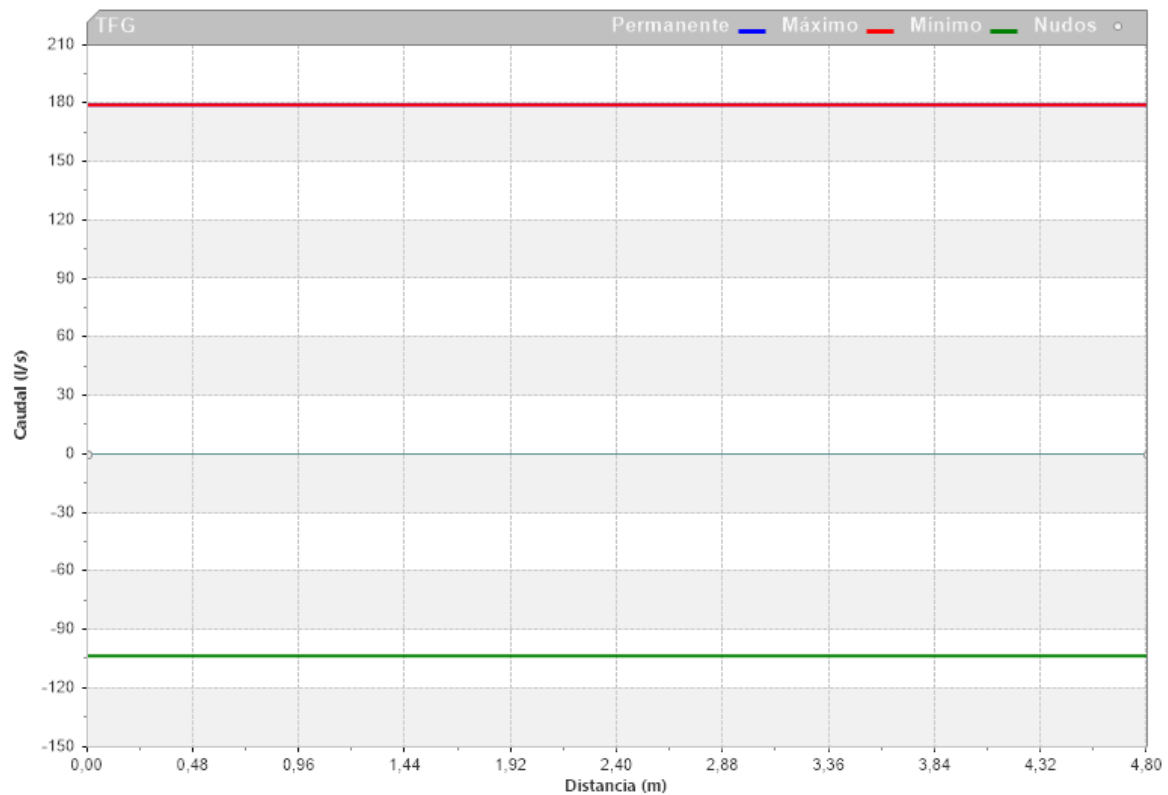
Figura 183. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=3$ m, de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	2,64000010490417	0	2,64000010490417
4,80000019073486	-0,600525259971619	4,80000019073486	1,10974955558777

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	2,64000010490417	0	-9,99999904632568
4,80000019073486	-0,600525856018066	4,80000019073486	-9,99999904632568

Figura 184. Envoltente de presiones de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba



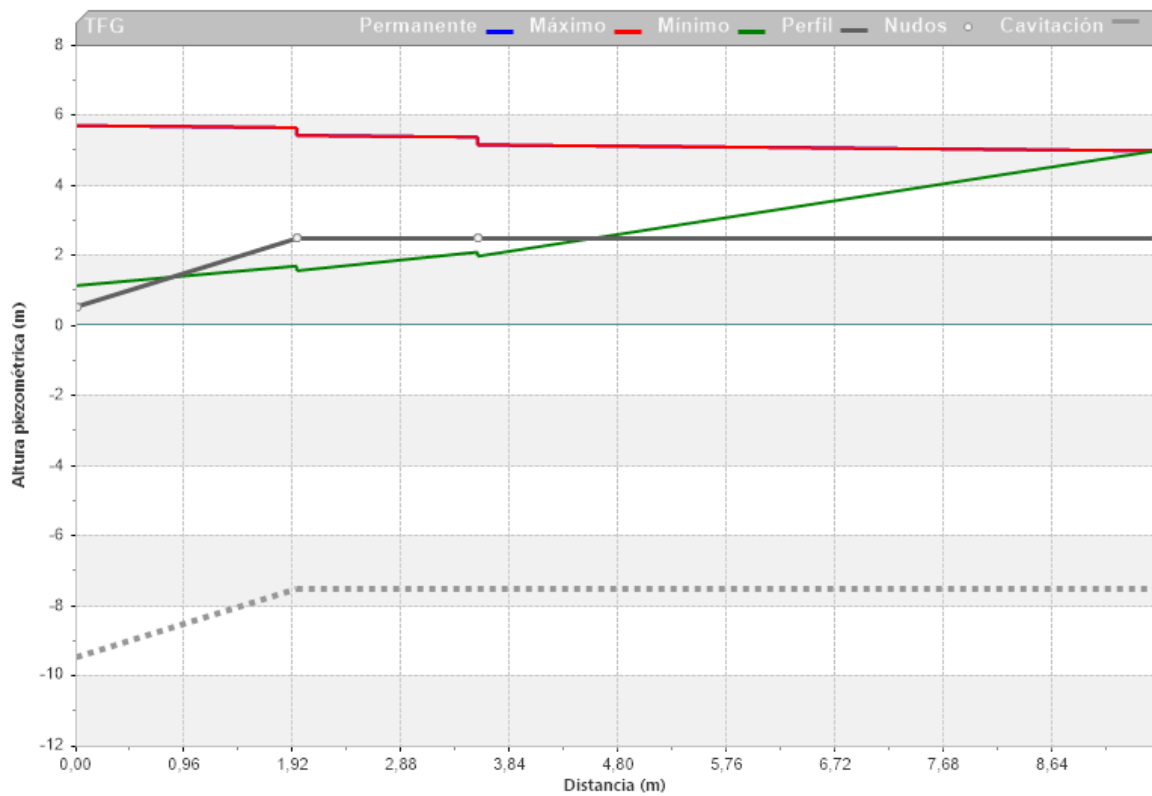
Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	179,390899658203	0	-103,21703338623
4,80000019073486	179,390899658203	4,80000019073486	-103,182151794434

Figura 185. Envoltente de caudales de la tubería aux81 en el caso 3, al parar la bomba

- Taux82, T5 y Taux93

Este conjunto de tuberías conecta la bomba Weise con el depósito de la turbina Kaplan. Comienza en el nudo 82 con la tubería aux82, que conecta con la válvula 2. En los siguientes gráficos se observa una pequeña caída de altura piezométrica entre los nudos 81 y 8, donde está situada la válvula, debido a la pérdida de carga en este punto. Del nudo 8 al 9 está la tubería 5 que conecta con otra válvula. Esta válvula de compuerta, 3, también provoca una leve pérdida de presión entre los nudos 9 y 91. Por último la tubería aux93

conecta la válvula 3 con el depósito. La tubería aux82 tiene una longitud de 1.95 m, la tubería 5 de 1.6 m y la tubería aux93 de 6 m.

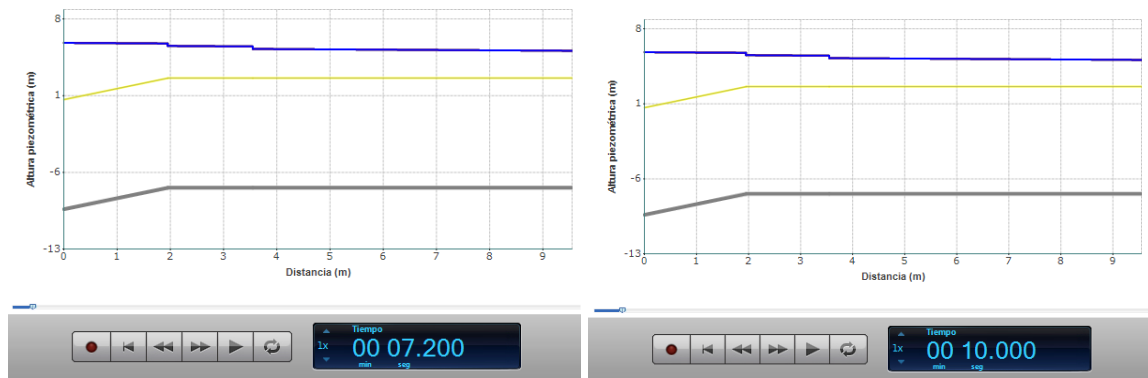


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	5,7187967300415	0	5,7187967300415
1,95000004768372	5,66355419158936	1,95000004768372	5,66355419158936
1,95000004768372	5,43942975997925	1,95000004768372	5,43942975997925
3,55000007152557	5,39410209655762	3,55000007152557	5,39410209655762
3,55000007152557	5,16997766494751	3,55000007152557	5,16997766494751
9,55000007152557	5	9,55000007152557	5

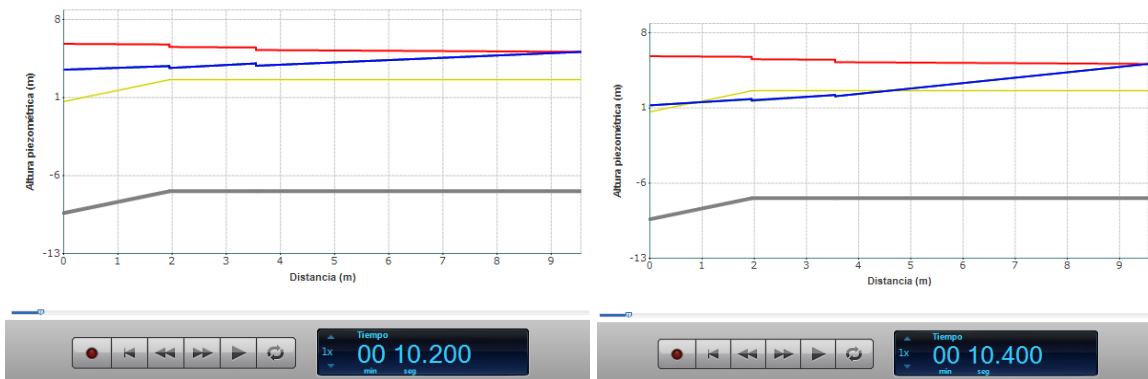
Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	1,15470695495605	0	0,550000011920929
1,95000004768372	1,71352624893188	1,95000004768372	2,5
1,95000004768372	1,57802307605743	1,95000004768372	2,5
3,55000007152557	2,11037492752075	3,55000007152557	2,5
3,55000007152557	1,99138784408569	3,55000007152557	2,5
9,55000007152557	5	9,55000007152557	2,5

Cavitación X	Cavitación Y
0	-9,44999903440475
1,95000004768372	-7,49999904632568
1,95000004768372	-7,49999904632568
3,55000007152557	-7,49999904632568
3,55000007152557	-7,49999904632568
9,55000007152557	-7,49999904632568

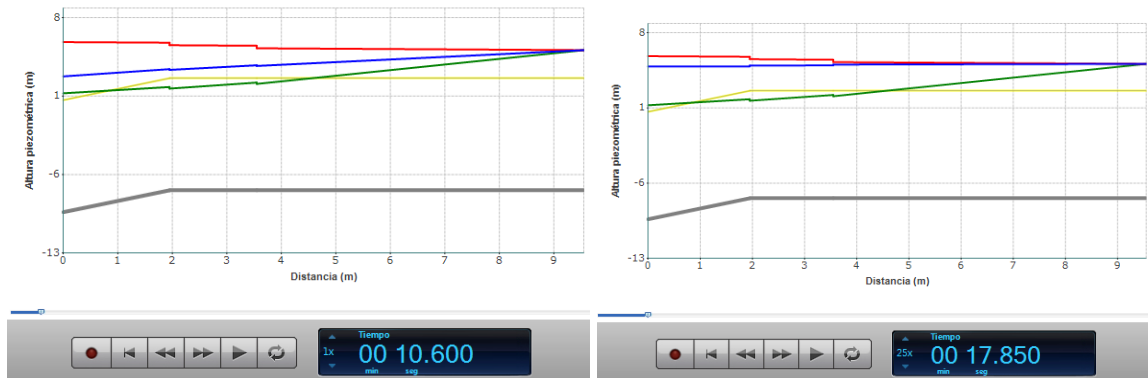
Figura 186. Envoltante de alturas piezométricas de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 187. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envolvente de alturas piezométricas de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10.40 s.

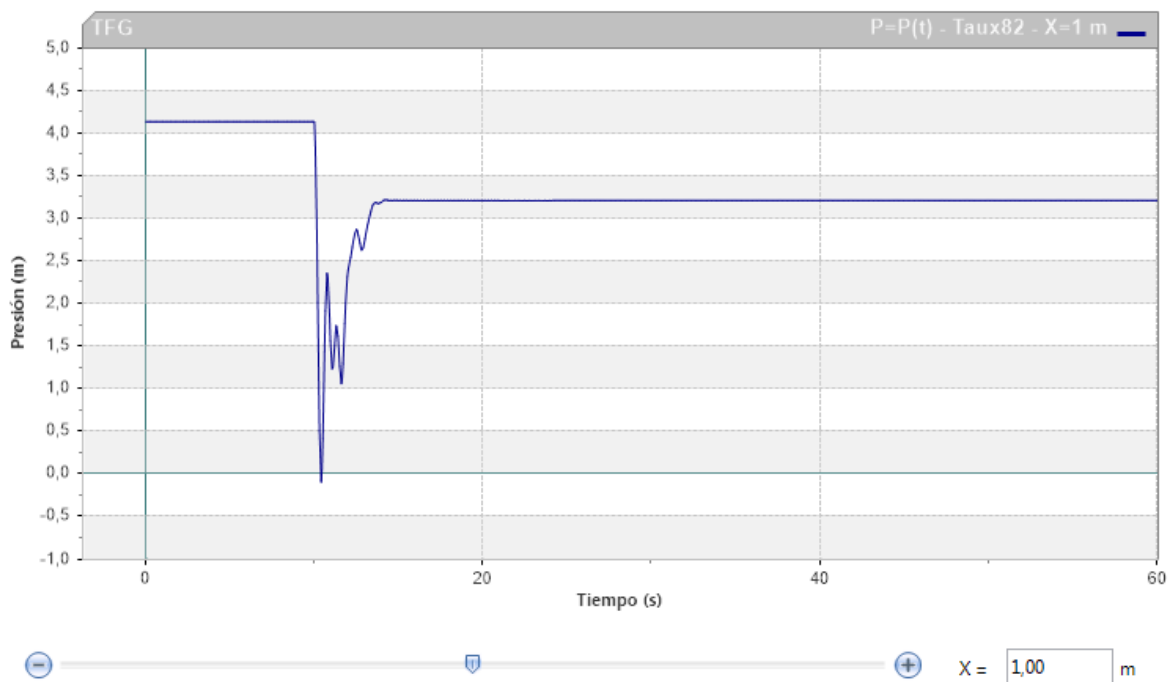


Figura 188. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x = 1$ m, de la tubería Taux82 en el caso 3, al parar la bomba

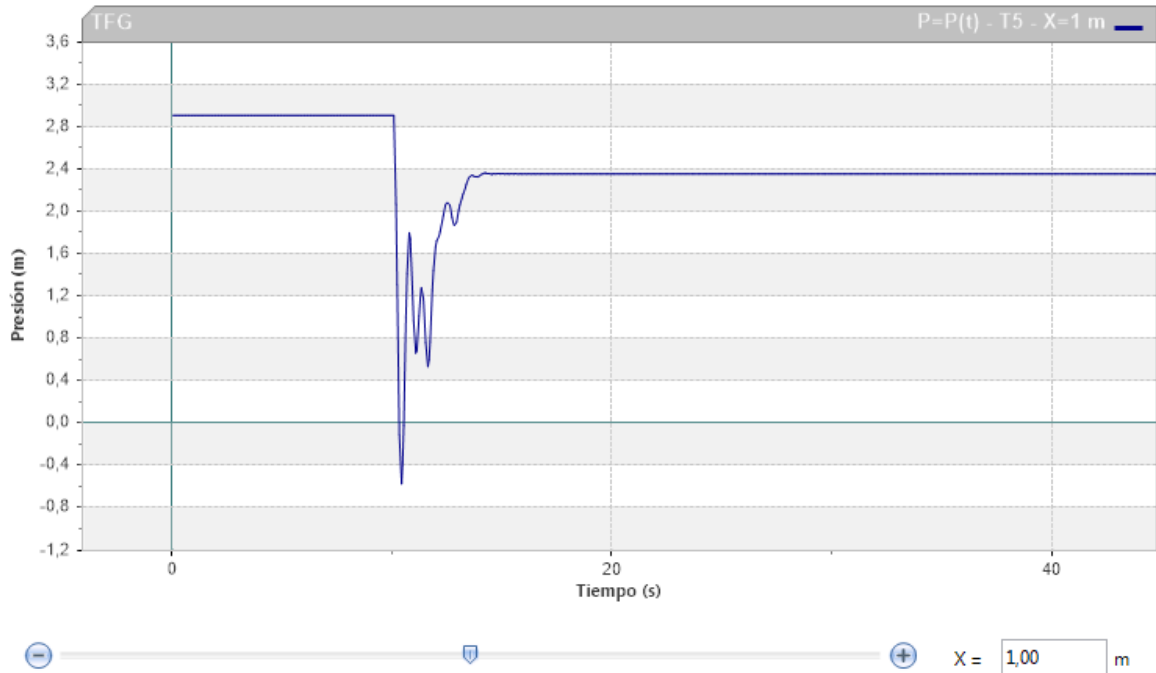


Figura 189. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x = 1$ m, de la tubería T5 en el caso 3, al parar la bomba

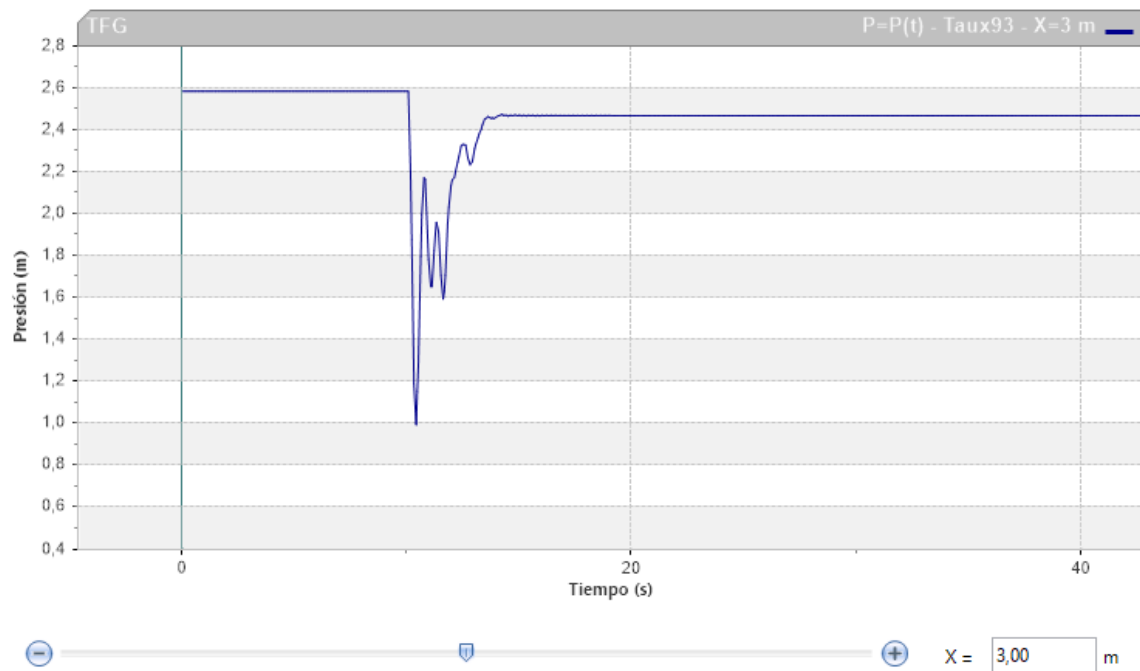
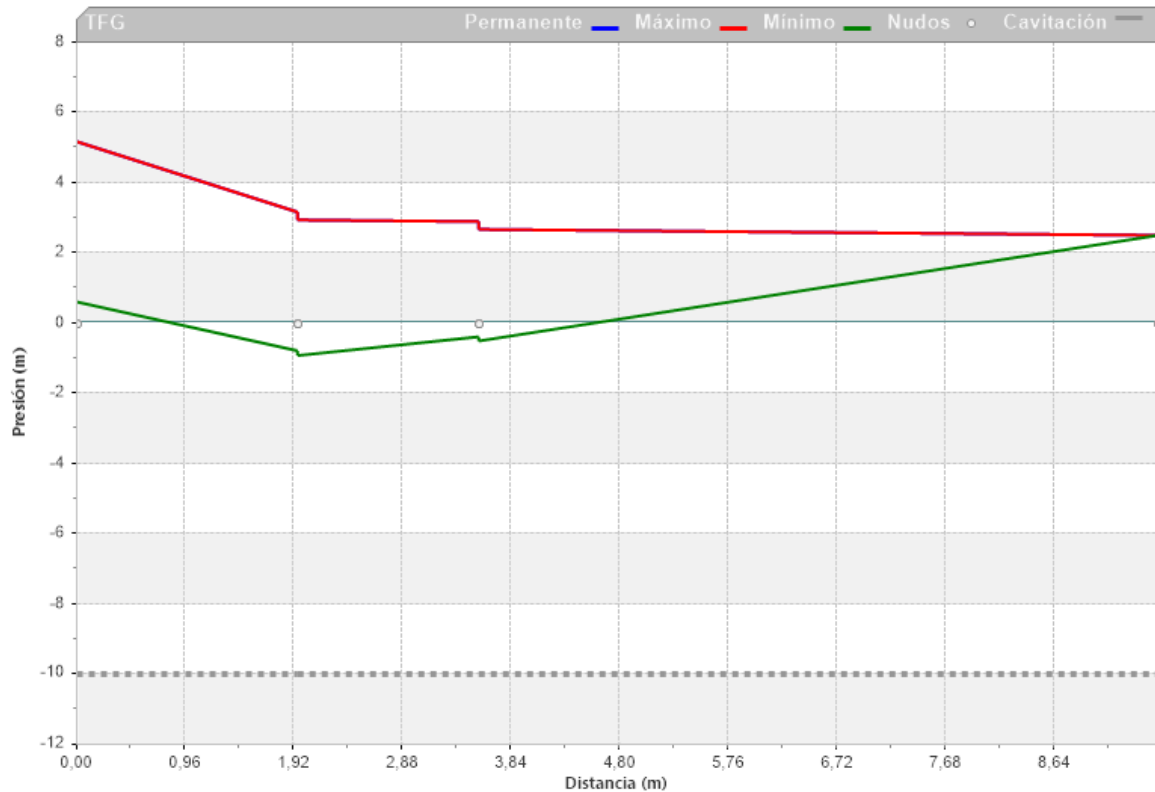


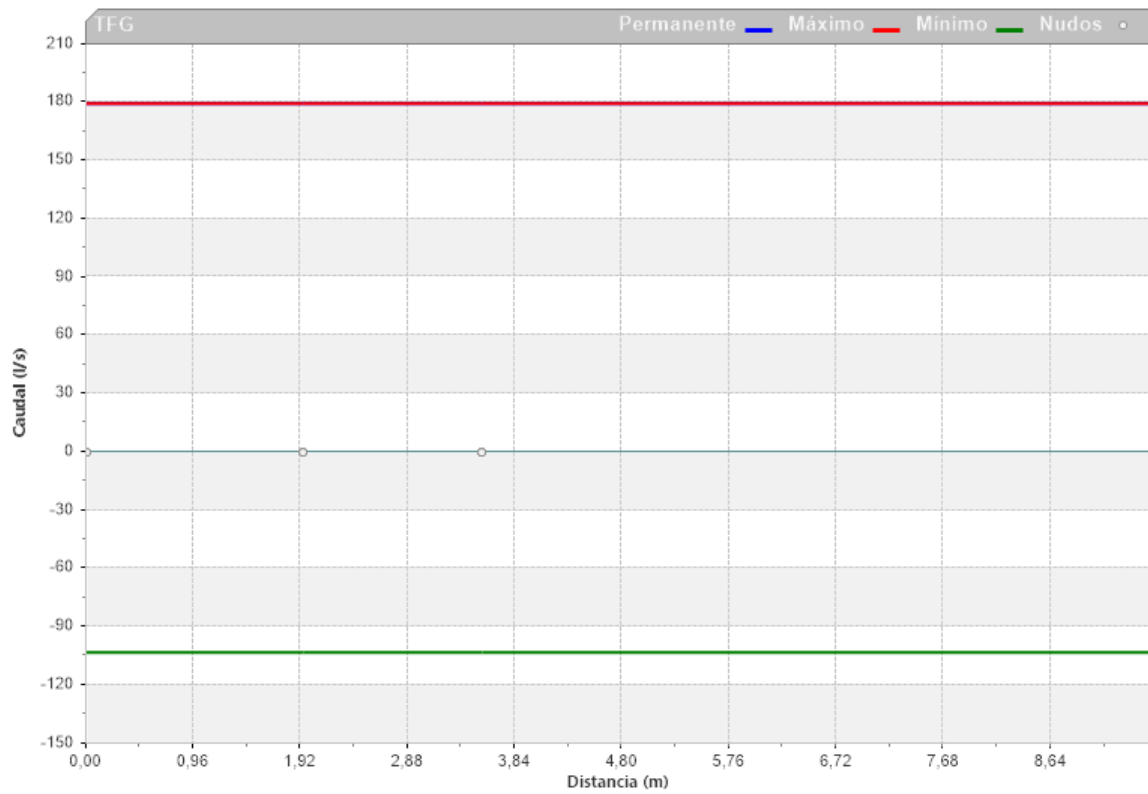
Figura 190. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=3$ m, de la tubería Taub93 en el caso 3, al parar la bomba



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	5.16879653930664	0	5.16879653930664
1.95000004768372	3.16355419158936	1.95000004768372	3.16355419158936
1.95000004768372	2.93942975997925	1.95000004768372	2.93942975997925
3.55000007152557	2.89410209655762	3.55000007152557	2.89410209655762
3.55000007152557	2.66997766494751	3.55000007152557	2.66997766494751
9.55000007152557	2.5	9.55000007152557	2.5

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	0.604706943035126	0	-9.99999904632568
1.95000004768372	-0.786473751068115	1.95000004768372	-9.99999904632568
1.95000004768372	-0.921976923942566	1.95000004768372	-9.99999904632568
3.55000007152557	-0.389625072479248	3.55000007152557	-9.99999904632568
3.55000007152557	-0.508612155914307	3.55000007152557	-9.99999904632568
9.55000007152557	2.5	9.55000007152557	-9.99999904632568

Figura 191. Envoltente de presiones de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba

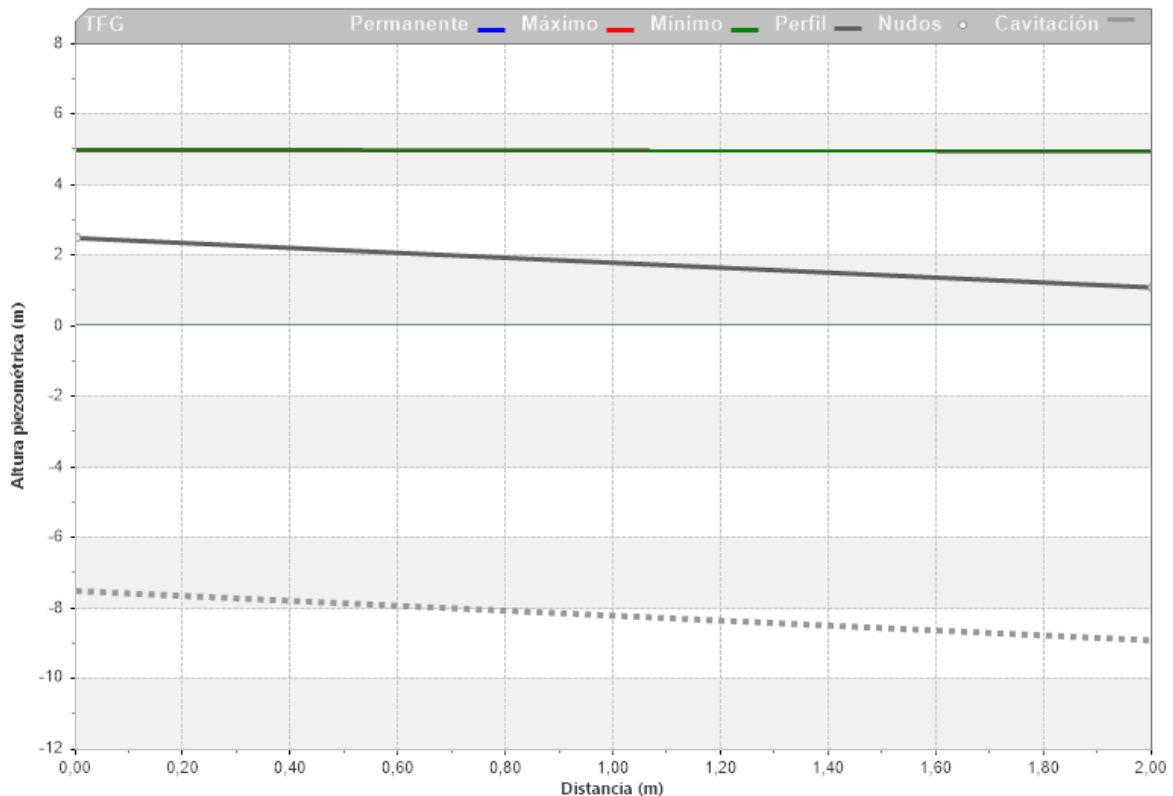


Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	179,390899658203	0	-103,182151794434
1,95000004768372	179,390899658203	1,95000004768372	-103,235816955566
1,95000004768372	179,390899658203	1,95000004768372	-103,23267364502
3,55000007152557	179,390914916992	3,55000007152557	-103,22998046875
3,55000007152557	179,390914916992	3,55000007152557	-103,22998046875
9,55000007152557	179,390914916992	9,55000007152557	-103,237251281738

Figura 192. Envolvente de caudales de las tuberías Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba

- Taux92

La tubería aux92 tiene una longitud de 2 m, conecta el depósito con la turbina Kaplan, desde el nudo 93 al 94. Esta tubería no se ve afectada por el transitorio, porque el depósito Kaplan aísla esta zona del circuito.

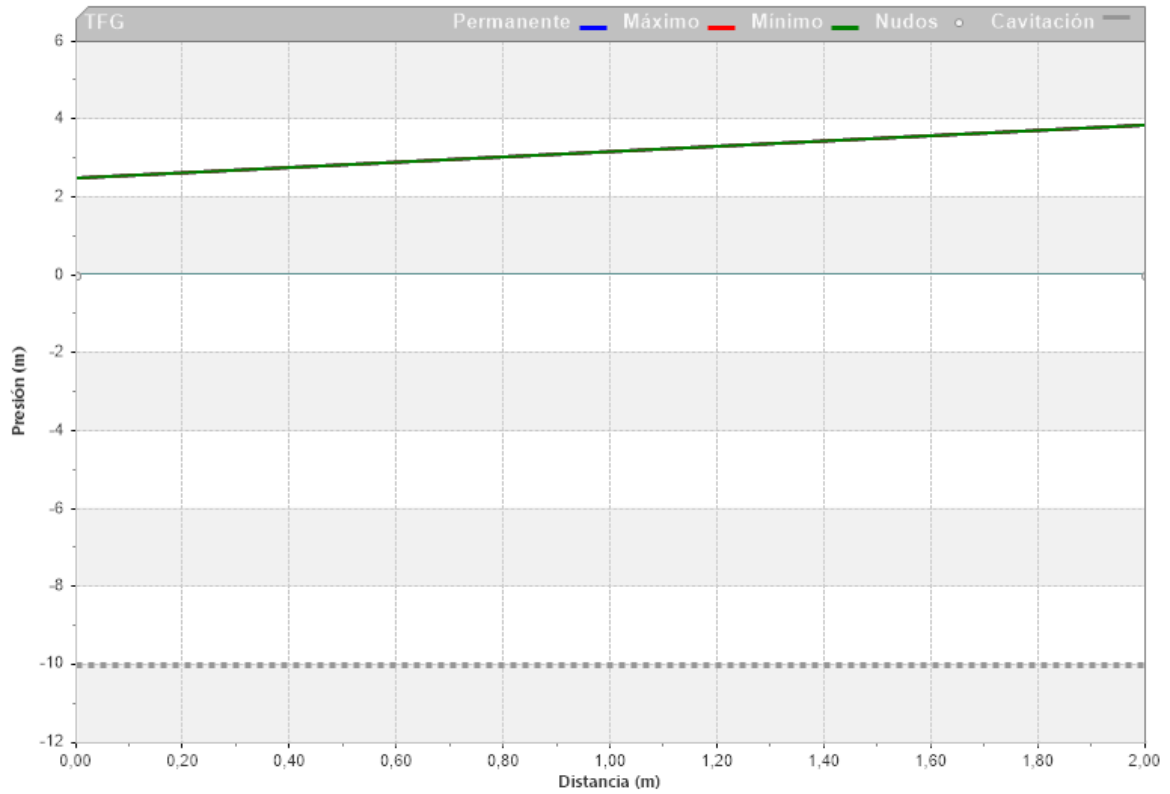


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	5	0	5
2	4,96063470840454	2	4,96063470840454

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	5	0	2,5
2	4,96062469482422	2	1,10000002384186

Cavitación X	Cavitación Y
0	-7,49999904632568
2	-8,89999902248383

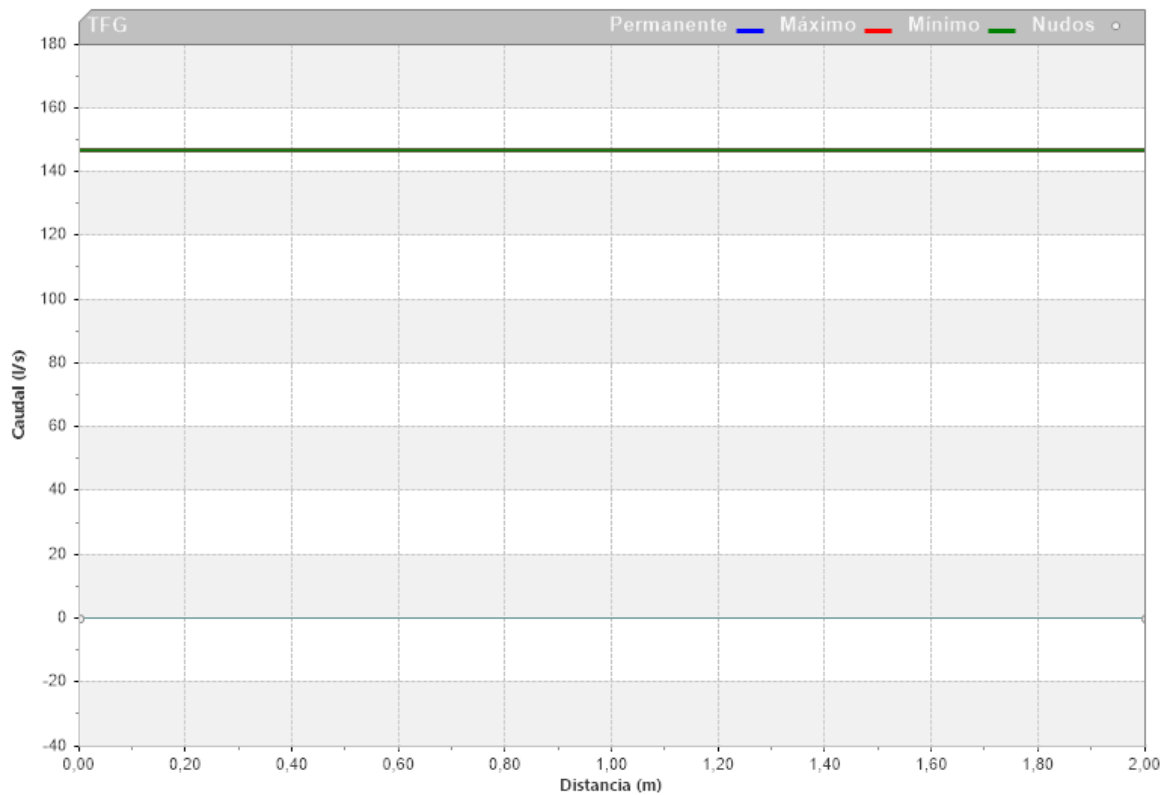
Figura 193. Envoltente de alturas piezométricas de la tubería Taux92 en el caso 3, al parar la bomba



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	2,5	0	2,5
2	3,86063480377197	2	3,86063480377197

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	2,5	0	-9,99999904632568
2	3,86062479019165	2	-9,99999904632568

Figura 194. Envoltente de presiones de la tubería Taux92 en el caso 3, al parar la bomba

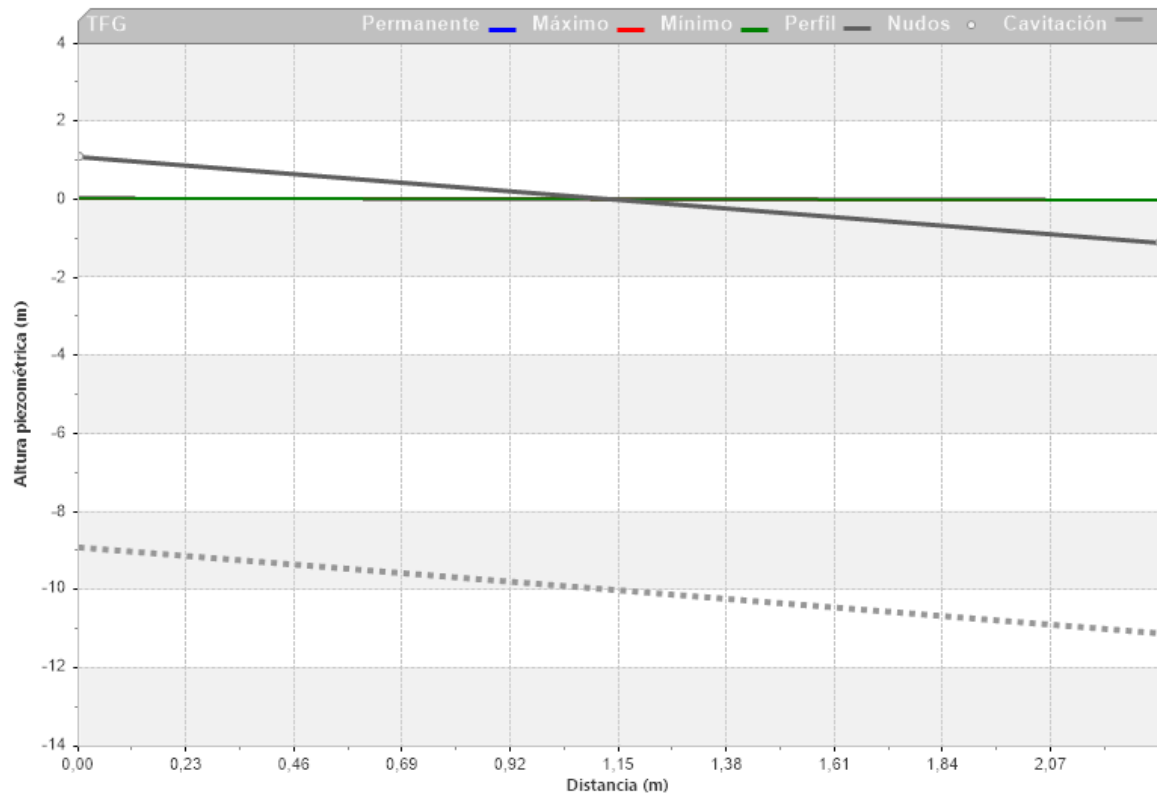


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	146,972503662109	0	146,973007202148	0	146,972503662109
2	146,972503662109	2	146,973007202148	2	146,972503662109

Figura 195. Envolvente de caudales de la tubería Taux92 en el caso 3, al parar la bomba

- Taux91

La tubería auxiliar 91 tiene una longitud de 2.3 m y conecta la turbina Kaplan con el pozo. Al igual que en la tubería aux92, esta zona del circuito no se ve afectada por la parada de la bomba, ya que el depósito de la turbina lo ha aislado.

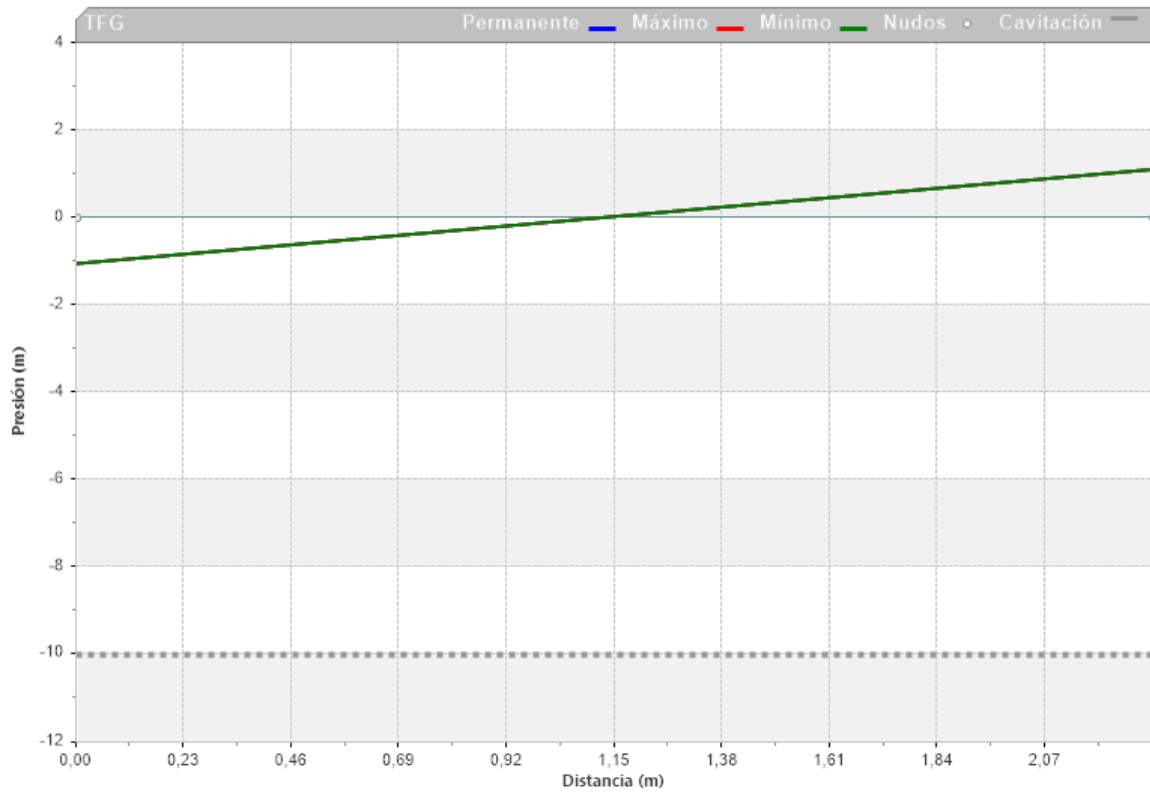


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	0,0452703386545181	0	0,0452816262841225
2,29999995231628	0	2,29999995231628	0

Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	0,0452698729932308	0	1,10000002384186
2,29999995231628	0	2,29999995231628	-1,10000002384186

Cavitación X	Cavitación Y
0	-8,89999902248383
2,29999995231628	-11,0999990701675

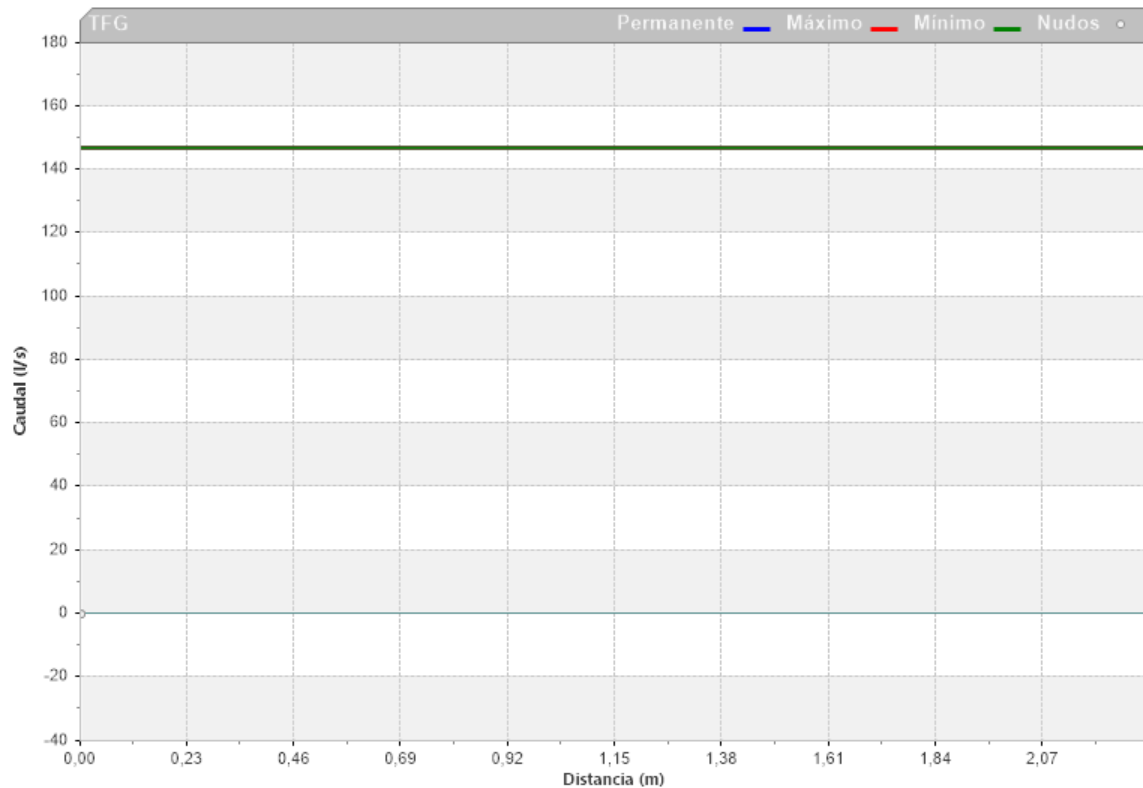
Figura 196. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería aux91 en el caso 3, al parar la bomba



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	-1,0547297000885	0	-1,05471837520599
2,29999995231628	1,10000002384186	2,29999995231628	1,10000002384186

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	-1,05473017692566	0	-9,99999904632568
2,29999995231628	1,10000002384186	2,29999995231628	-9,99999904632568

Figura 197. Envolvente de presiones de la tubería aux91 en el caso 3, al parar la bomba



Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	146,973007202148	0	146,972503662109
2,29999995231628	146,973007202148	2,29999995231628	146,972503662109

Figura 198. Envolvente de caudales de la tubería aux91 en el caso 3, al parar la bomba

5.3.4 TURBINA PELTON CON BOMBA SUMERGIDA (INYECTOR)

5.3.4.1 Análisis del sistema

A través de una tubería de aspiración, T1, del nudo 1 al 2, se abstrae el agua del pozo gracias a la diferencia de presiones causada por la bomba sumergida del nudo 2 al 3. A continuación una tubería, T2, que conecta la bomba con una válvula. Por último, la tubería 3 dirige el flujo hasta el inyector, donde el flujo se inserta en la bomba Pelton y pasa de nuevo al pozo.

Tan solo estudiaremos tanto el transitorio como el régimen permanente hasta el inyector, ya que la parte del circuito formada por la bomba Pelton y el Pozo están aislados por el inyector, por lo tanto, no van a ser afectados por las perturbaciones que se puedan dar.

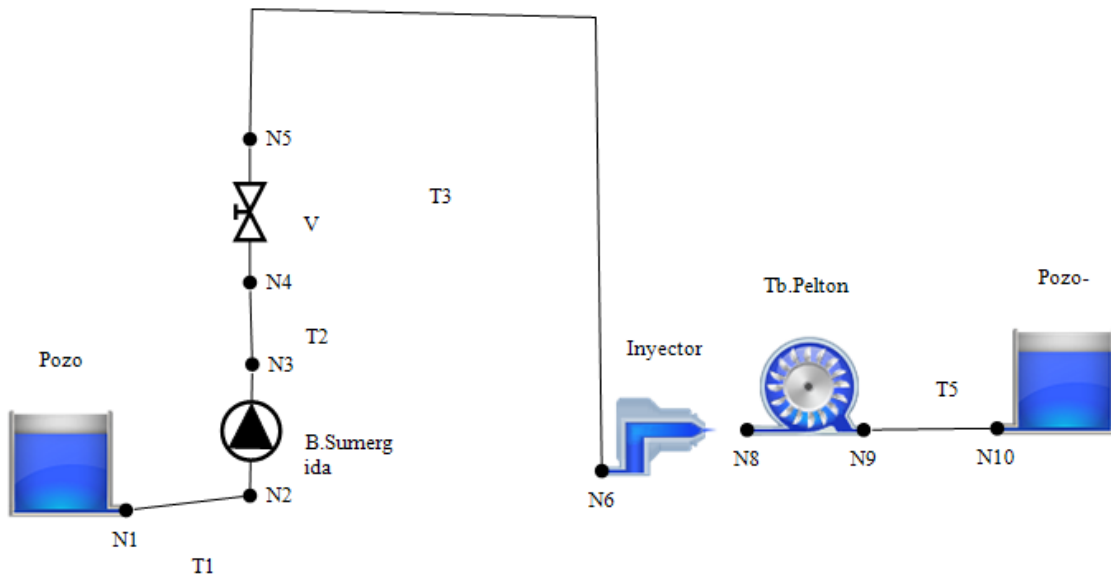


Figura 199. Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

	Nombre ▲	Cota (m)
	N1	-3
	N10	-3
	N2	-3
	N3	-3
	N4	2,5
	N5	2,5
	N6	2,5
	N8	2,5
	N9	2,5

Figura 200. Datos de los nudos del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Depósitos - Datos básicos							
Nombre ▼	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar
Pozo	---	N1	-3	GD ▼		-2	▼
Pozo-	N10	---	-3	GD ▼		-2	▼

Vertedero/Aliviadero				División y Vertedero				Aliviadero móvil			
L (m)	Z Cresta (m)	Cq	Descarga	Si (m ²)	Z Si (m)	Sf (m ²)	Z Sf (m)	Cresta	Zf (m)	Ti(s)	Tf(s)
			▼					▼			
			▼					▼			

Figura 201. Datos de los depósitos del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Tuberías - Datos básicos										
Nombre ▲	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)		Perfil
T1	N2	-3	N1	-3	105	5,5	5	1298,8145	Calc.	----
T2	N4	2,5	N3	-3	105	6	5	1298,8145	Calc.	----
T3	N5	2,5	N6	2,5	105	17	5	1298,8145	Calc.	----
T5	N9	2,5	N10	-3	105	5,5	5	0	Calc.	----

Pérdidas		Caudal nulo	
Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
0	0	<input type="checkbox"/>	▼
0	0	<input type="checkbox"/>	▼
0	0,65	<input type="checkbox"/>	▼
0	0	<input type="checkbox"/>	▼

Figura 202. Datos de las turbinas del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

La tubería 3 tiene pérdidas debido a los dos codos de 90°.

Diámetro (mm)	<input type="text" value="105,00000"/>
Espesor (mm)	<input type="text" value="5,00000"/>
Coef. material	<input type="text" value="0,50"/>
Celeridad (m/s)	<input type="text" value="1.298,8145"/>

Figura 203. Cálculo de la celeridad de la tubería 1, 2 y 3

La tubería 5 no interviene en el transitorio como se ha explicado previamente.

Válvula Regulación - Datos básicos							
Nombre ▲	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo
V	N4	N5	2,5	105	0,25	De compuerta ▼	

Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $Ap(t)=Ap0+A*\sen(2*Pi*t/T+B)$			
Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
Tabulada					

Figura 204. Datos de las válvulas del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Estación de bombeo - Datos básicos						
	Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva
<input type="checkbox"/>	B.Sumergi	N2	N3	-3	1	Universale

Rotación			
Nreg	Nnom	I	
3000	3000	0,344	Calc.

Parada/Arranque								
Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arrancan	Inst. arr.	Duración (s)	Nueva par	Inst. par.
En marcha	Si	10	No				No	

Rendimiento óptimo			
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)
27,7	180	49,998	97,83

V Regulación					V Retención		By-Pass
DN (mm)	Tipo	Modelo	Maniobra		K		K

Figura 205. Datos de la bomba sumergida del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Turbinas - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	D (m)	I	N reg
Tb.Pelton	N8	N9	2,5	0,9	2,7	1000

Rendimiento óptimo					
Q	H	P	Rend	N nom	
0,02	100	0,01471	74,97	1000	

Variación de la carga	Desconexión		Regulación PID			
	Cmin	Maniobra	Kp	Ki	Kd	Kra
(!)	20	(!)	0,9	10	0,4	100

Figura 206. Datos de la turbina Pelton del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Inyector - Datos básicos					
Nombre	Nudo	Z (m)	D (mm)	D Boq (mm)	k Ramal
Inyector	N6	2,5	105	38,2	0,25

Válvula inyector		Maniobra		Sinusoidal: $A_p = K + A \cdot \sin(2 \cdot \pi / T + B)$			
Tipo	Modelo	Tipo	Datos	K(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
De compuerta		Tabulada	(!)				

Figura 207. Datos del inyector Pelton del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

5.3.4.2 Régimen permanente

Nombre	H(m)	Pr(m)
N4	81.10	78.60
N2	-2.90	0.10
N3	82.08	85.08
N1_fin	-2.00	1.00
N1	-2.00	1.00
N5	80.62	78.12
N6	77.01	74.51
N6_fin	2.50	0.00

Figura 208. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
T3	43.68	5.04	0.01318	2.77	0.84	0.00	0	
T1	43.68	5.04	0.01318	0.90	0.00	0.00	0	
T2	43.68	5.04	0.01318	0.98	0.00	0.00	0	

Figura 209. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
V	1	43.68	0.48	100.00
Inyector	1	43.68	74.51	100.00

Figura 210. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

Nombre	bombas	Qb(l/s)	Hb(m)	Pot(Kw)	Rend(%)
B.Sumergid	1	43.68	84.97	50.75	71.74

Figura 211. Resultados del régimen permanente de la bomba del Circuito turbina Pelton con bomba sumergida

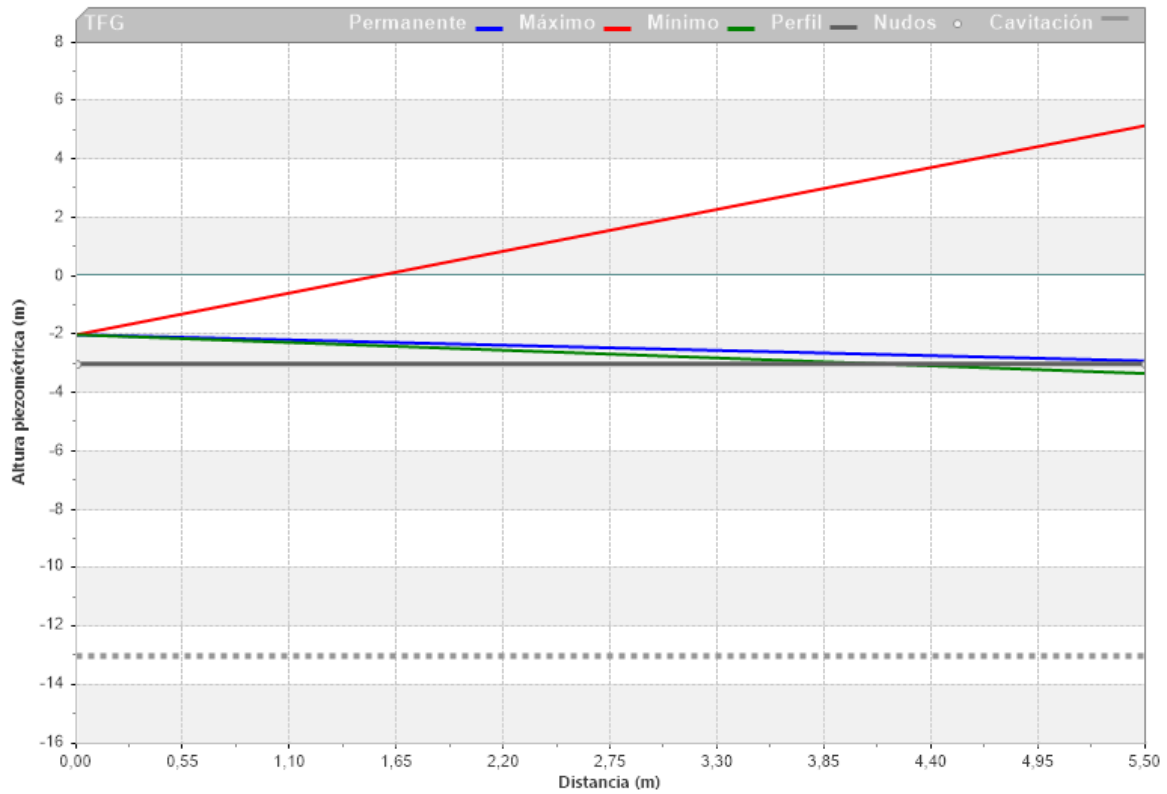
5.3.4.3 Régimen transitorio

Se estudia el circuito hidráulico en dos tramos de tuberías distintos. Los previos a la bomba, la tubería 1 y los posteriores, es decir, las tuberías 2 y 3. Ya que el régimen transitorio les afectará de distinta manera.

La perturbación que ocasiona el transitorio que se estudiará a continuación es la repentina parada de la bomba sumergida debido a un corte en el suministro eléctrico. Esto podría ocasionar un golpe de ariete con consecuencias catastróficas para el circuito, como la fisura de tuberías. Tanto por las sobrepresiones como por las depresiones. De este modo en función del material, grosor y diámetro de las tuberías se va a probar si pueden resistir el transitorio.

- T1

La tubería 1 conecta el pozo con la bomba sumergida, desde el nudo 1 al 2, con una longitud de 5.5 m, un diámetro interior de 105 mm y un espesor de 5 mm.

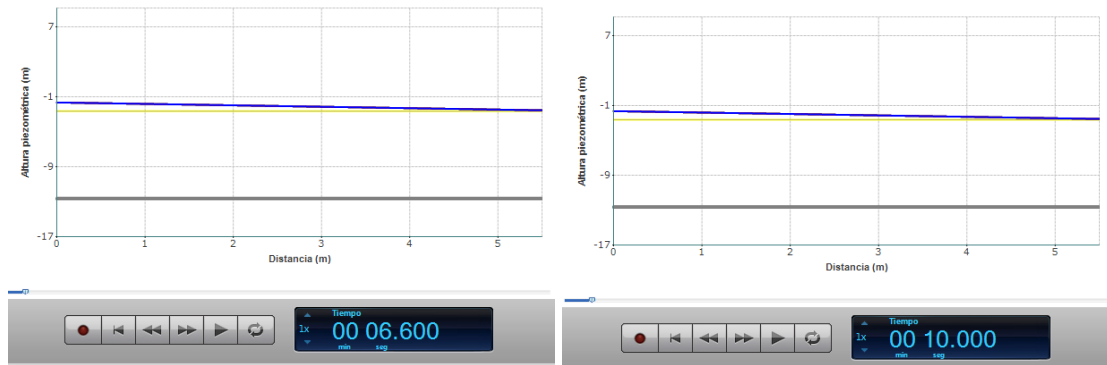


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	-2	0	-2
5,5	-2,89527082443237	5,5	5,16059589385986

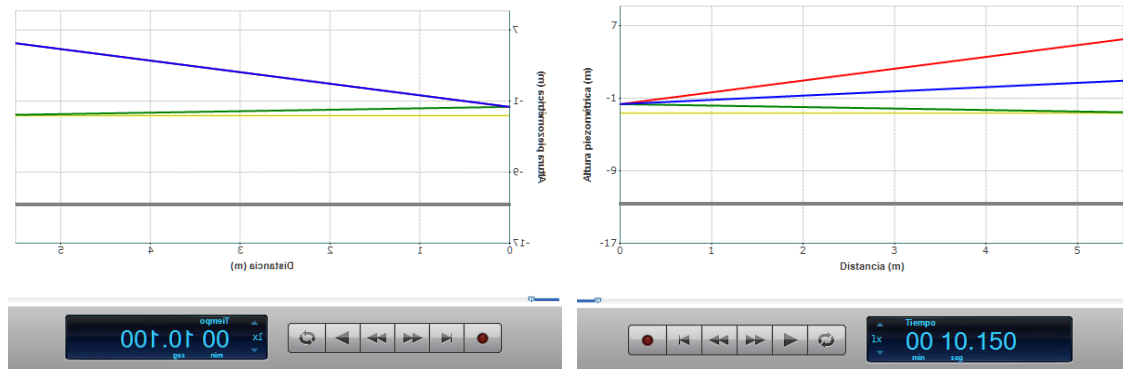
Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-2	0	-3
5,5	-3,3264274597168	5,5	-3

Cavitación X	Cavitación Y
0	-12,9999990463257
5,5	-12,9999990463257

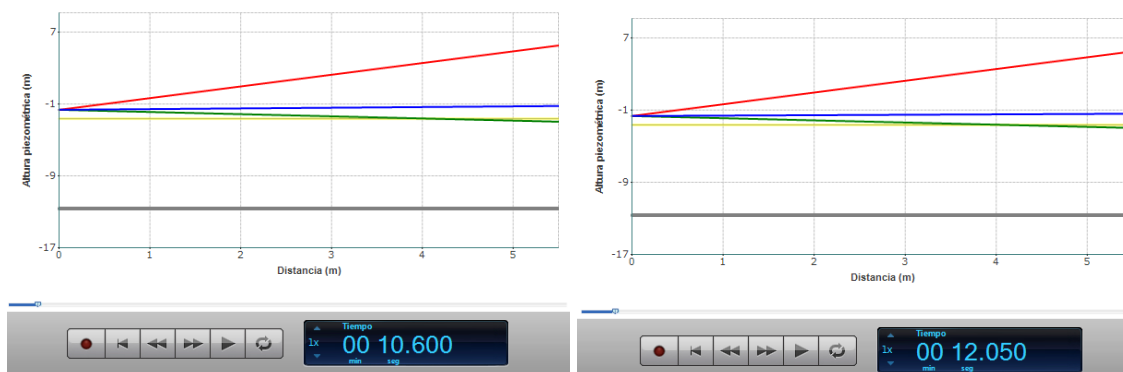
Figura 212. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 213. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 10 s.

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10.10 s.

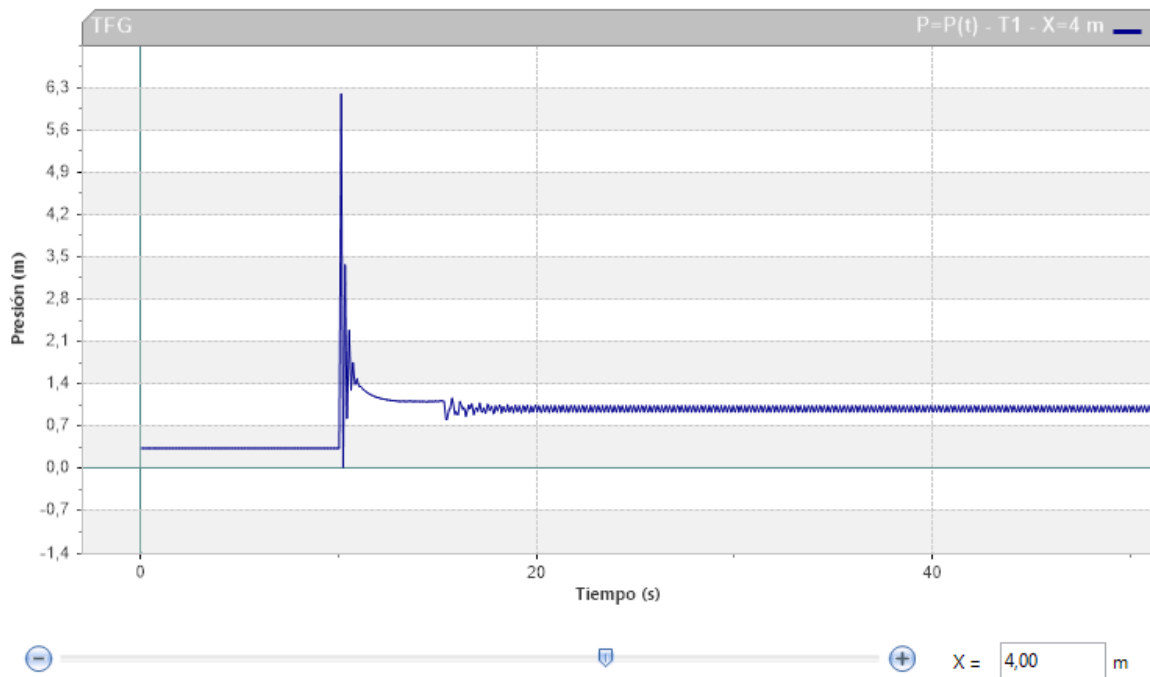
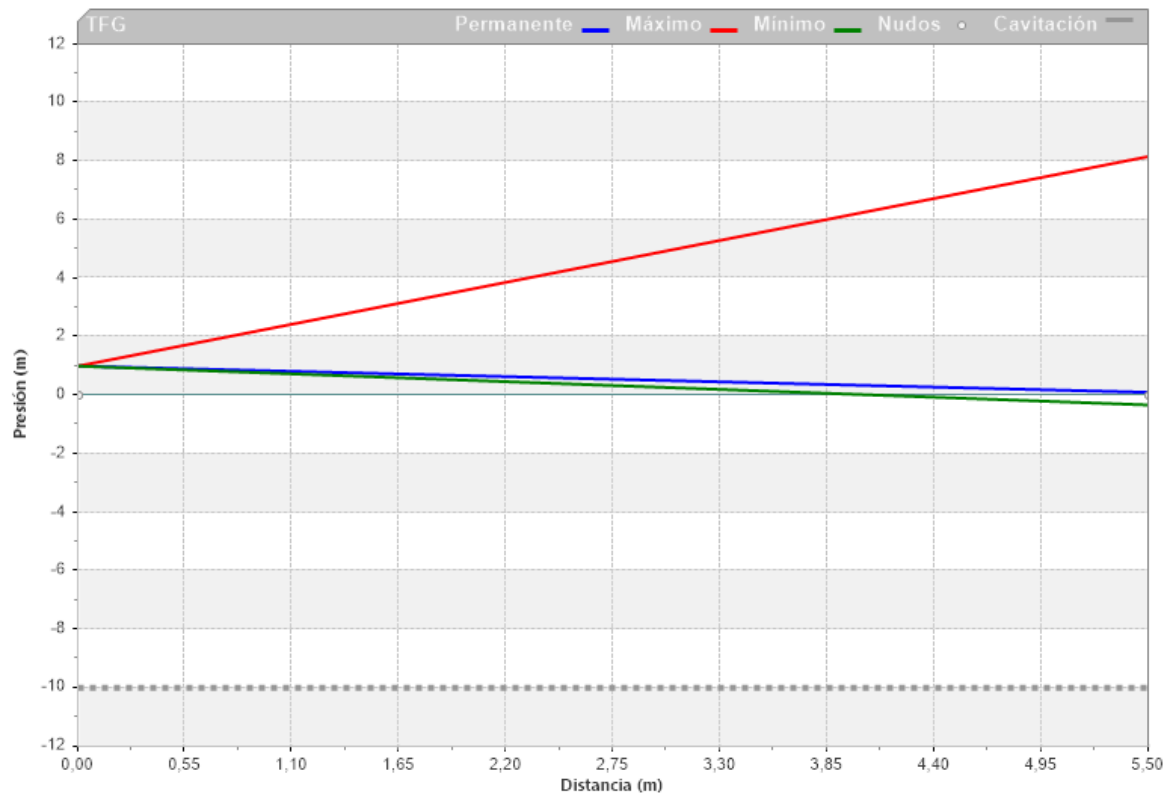


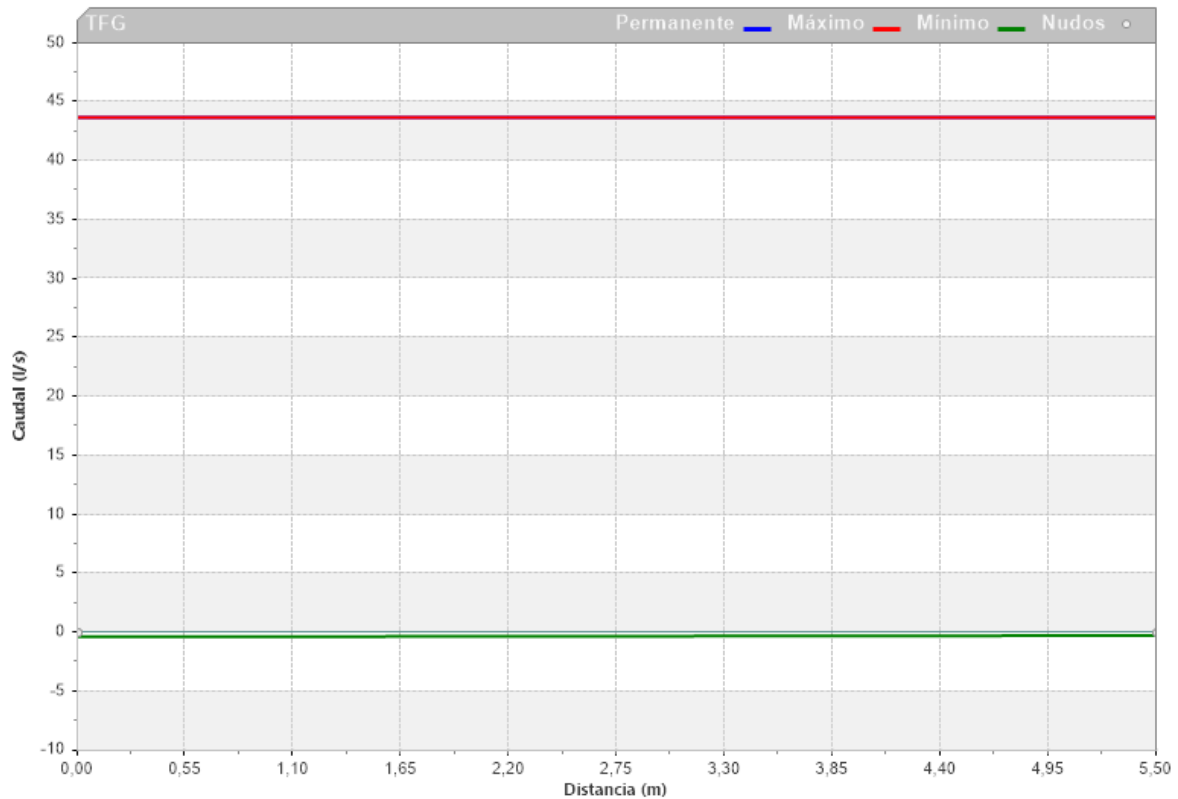
Figura 214. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x = 4$ m, de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	1	0	1
5,5	0,104729175567627	5,5	8,16059589385986

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	1	0	-9,99999904632568
5,5	-0,326427459716797	5,5	-9,99999904632568

Figura 215. Envolvente de presiones de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba

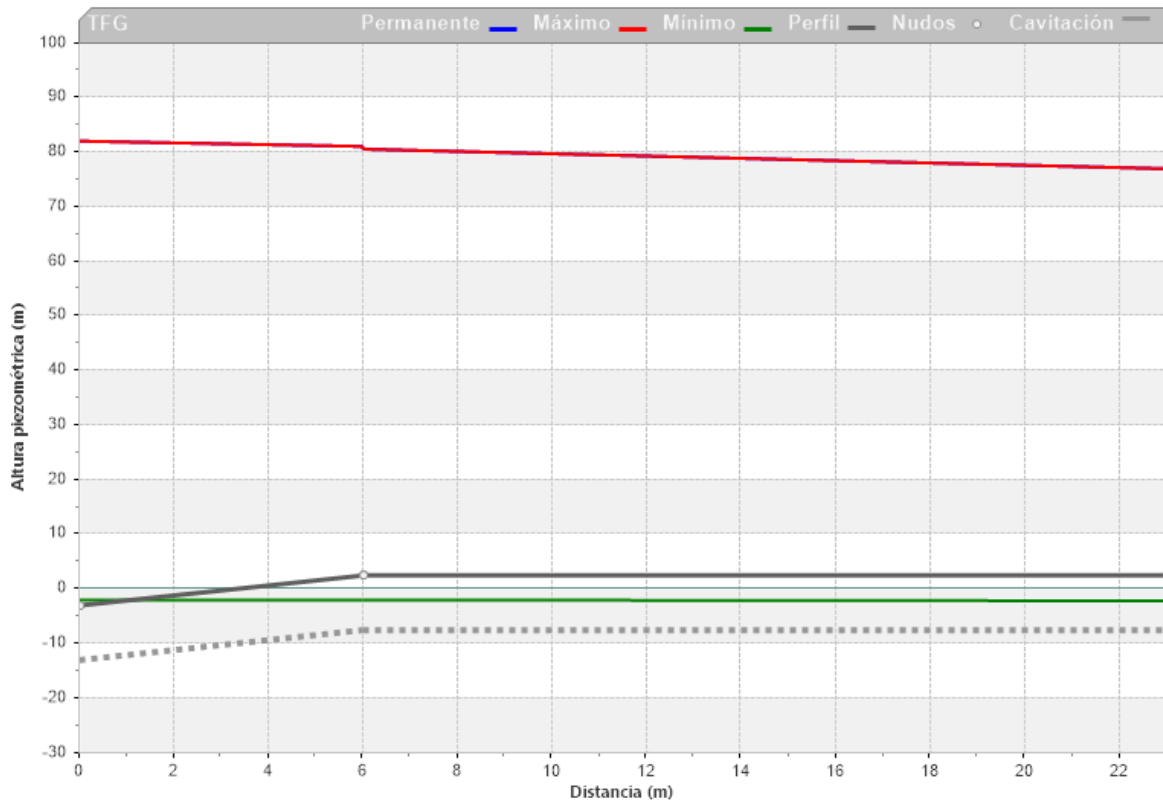


Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	43,6783676147461	0	-0,354640066623688
5,5	43,6783676147461	5,5	-0,237202450633049

Figura 216. Envolvente de caudales de la tubería 1 en el caso 4, al parar la bomba

- T2 y T3

La tubería 2 conecta la salida de la bomba con la válvula, desde el nudo 2 al 3 y tiene una longitud de 6 m. La tubería 3 conecta la válvula con el inyector de la turbina Pelton, del nudo 5 al 6 con una longitud de 17 m y dos codos de 90°.

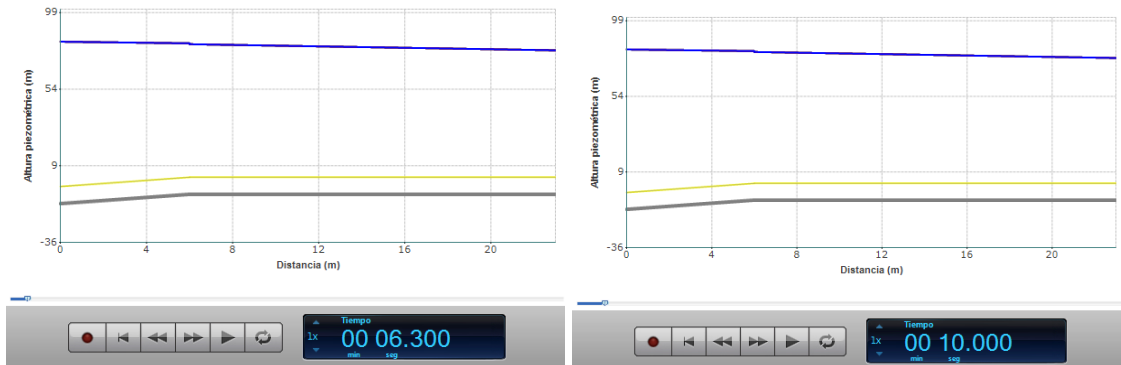


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	82,0752868652344	0	82,0752868652344
6	81,0986251831055	6	81,0986251831055
6	80,618782043457	6	80,618782043457
23	77,0086135864258	23	77,0086441040039

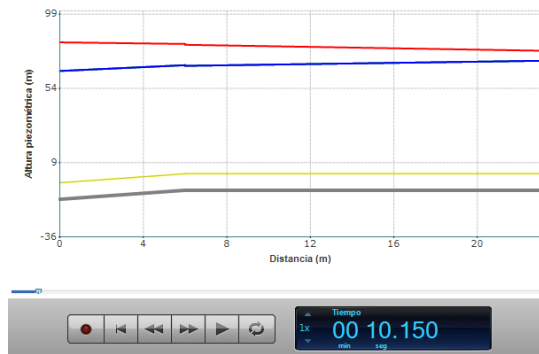
Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	-2,03858137130737	0	-3
6	-1,9841376543045	6	2,5
6	-1,98413777351379	6	2,5
23	-2,13981604576111	23	2,5

Cavitación X	Cavitación Y
0	-12,9999990463257
6	-7,49999904632568
6	-7,49999904632568
23	-7,49999904632568

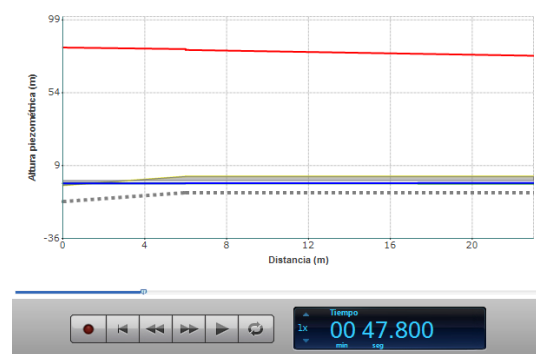
Figura 217. Envoltente de alturas piezométricas de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba



Antes de la parada de la bomba



Se para la bomba y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 218. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 10 s.

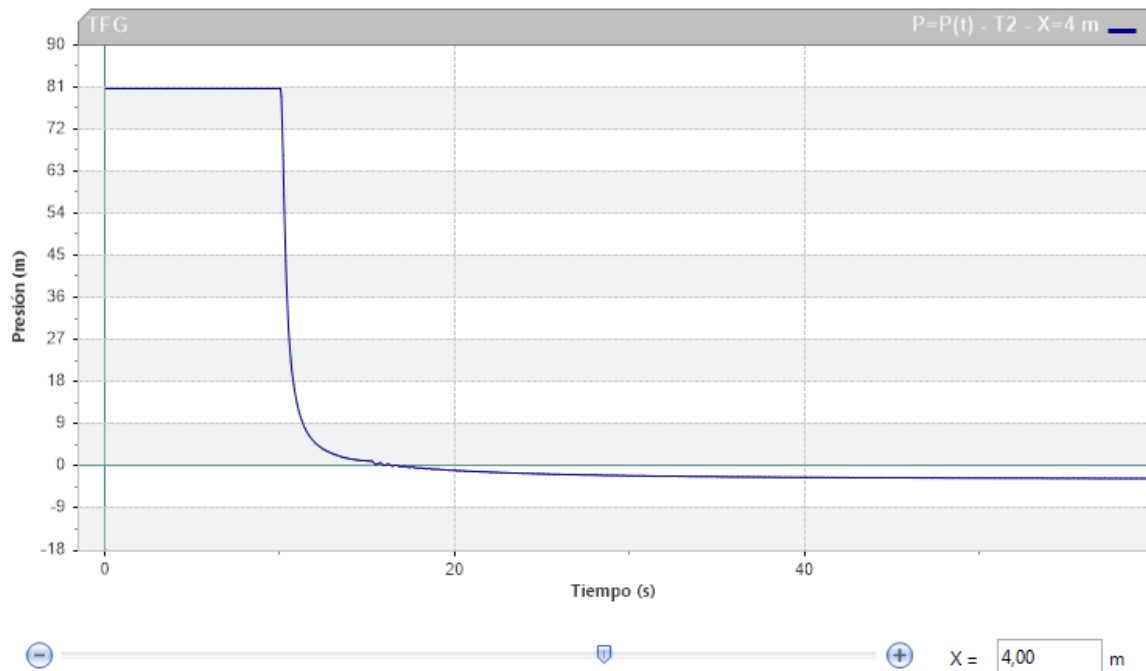


Figura 219. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=4$ m, de la tubería 2 en el caso 4, al parar la bomba

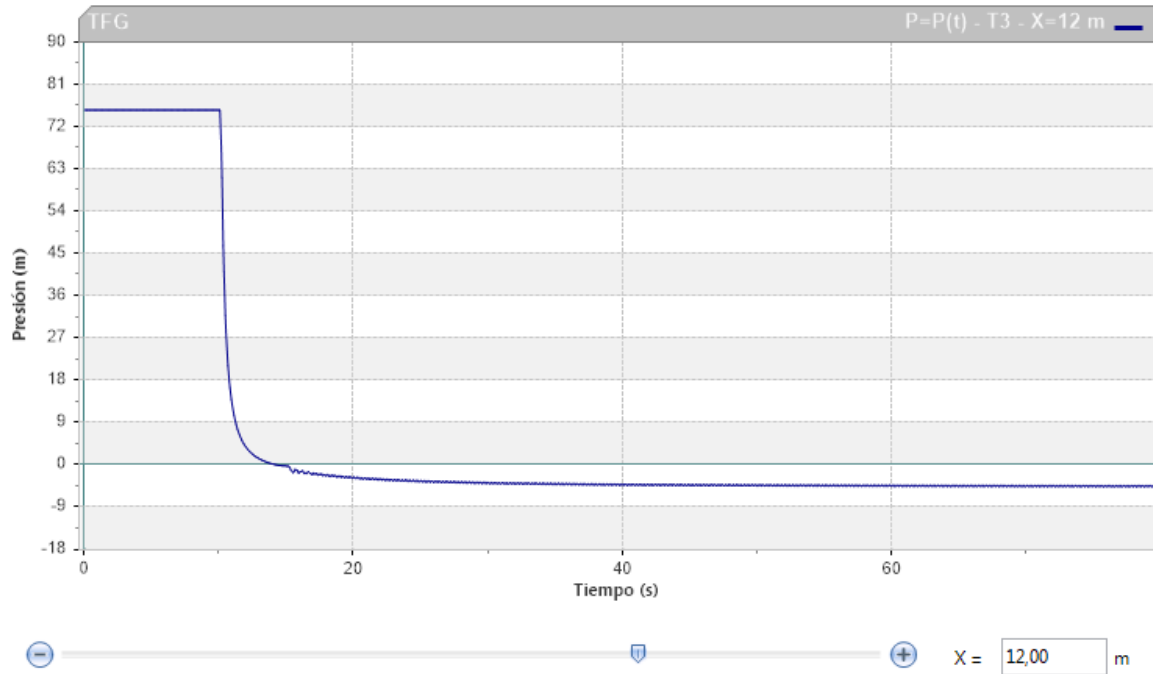
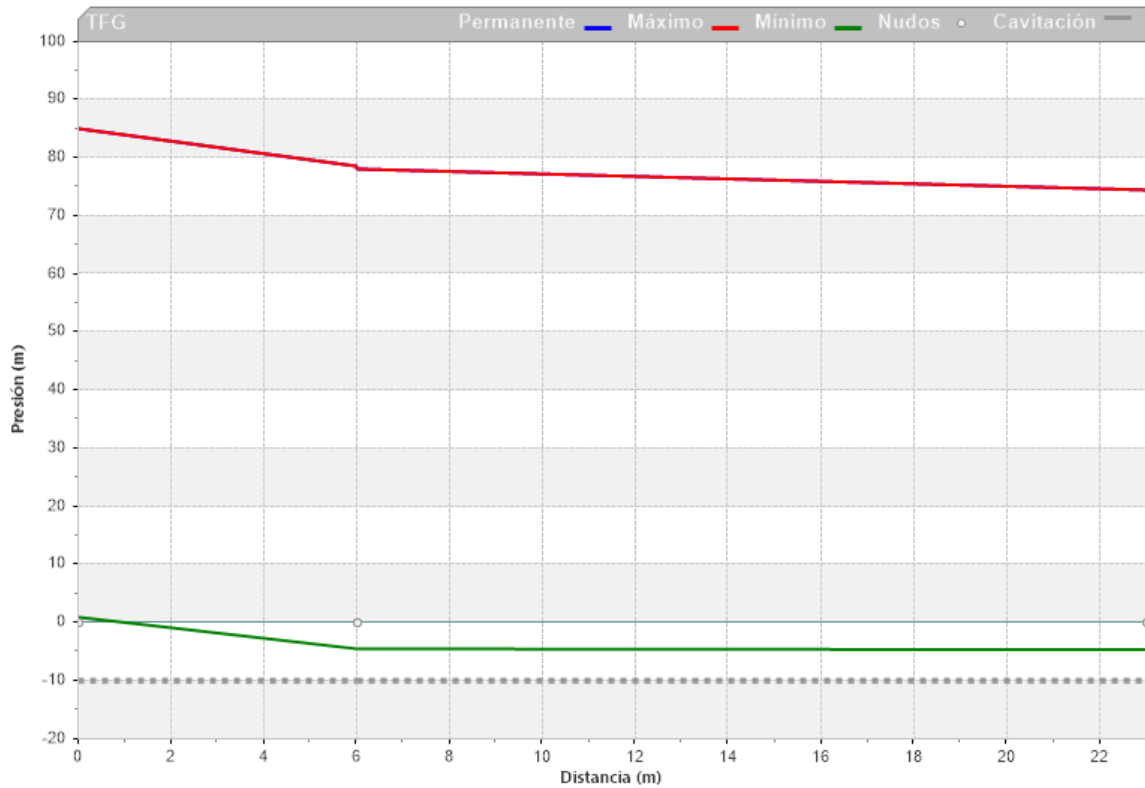


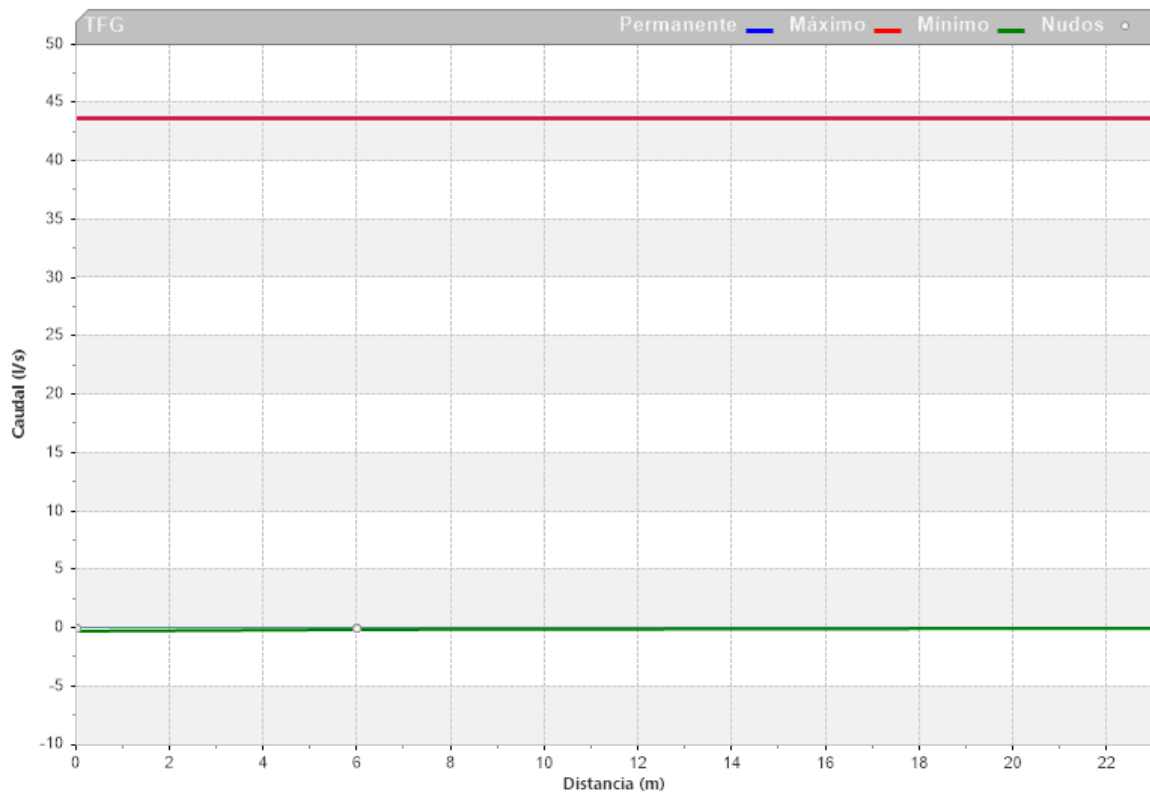
Figura 220. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x= 12$ m, de la tubería 3 en el caso 4, al parar la bomba



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	85,0752868652344	0	85,0752868652344
6	78,5986251831055	6	78,5986251831055
6	78,118782043457	6	78,118782043457
23	74,5086135864258	23	74,5086441040039

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	0,961418628692627	0	-9,99999904632568
6	-4,48413753509521	6	-9,99999904632568
6	-4,48413753509521	6	-9,99999904632568
23	-4,63981628417969	23	-9,99999904632568

Figura 221. Envoltente de presiones de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba



Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	43,6783676147461	0	-0,237202450633049
6	43,6783676147461	6	-0,0995866879820824
6	43,6783676147461	6	-0,0995866879820824
23	43,6783714294434	23	-5,54751920356689E-17

Figura 222. Envoltente de caudales de las tuberías 2 y 3 en el caso 4, al parar la bomba

5.3.5 TURBINA FRANCIS CON SALTO DE AGUA

5.3.5.1 Análisis del sistema

El circuito comienza en un depósito a 10 m de altura, este salto de agua conecta con la válvula 2, seguida de la turbina Francis. La cual desemboca en el pozo. En este caso, en

lugar de estudiar la parada de la bomba y sus efectos en el transitorio, se analizará el cierre brusco de la válvula.

La turbina Francis se utiliza en centrales hidráulicas con saltos de altura considerables. Este tipo de turbinas son muy polivalentes, en la siguiente tabla se presentan las distintas características posibles frente a las de la turbina del circuito del laboratorio de fluidos de ICAI. Su principal ventaja es la amplia gama de actividades que permite en comparación con la altura, es decir, la caída constructiva del fluido.

Turbina Francis	Características generales	Turbina del circuito 5
Caída constructiva		10 m
Logra un rendimiento óptimo en una caída constructiva	De 20 metros hasta 700 metros	
Potencia de salida	De 2 KW a 750 MW	22.07 KW
Diámetro del rotor	1 a 10 m	1.4 m
Velocidad de rotación	83 a 1000 rpm	600 rpm

Tabla 6. Turbina Francis características generales

Actualmente es una de las turbinas más utilizadas mundialmente, debido a su alta eficiencia.

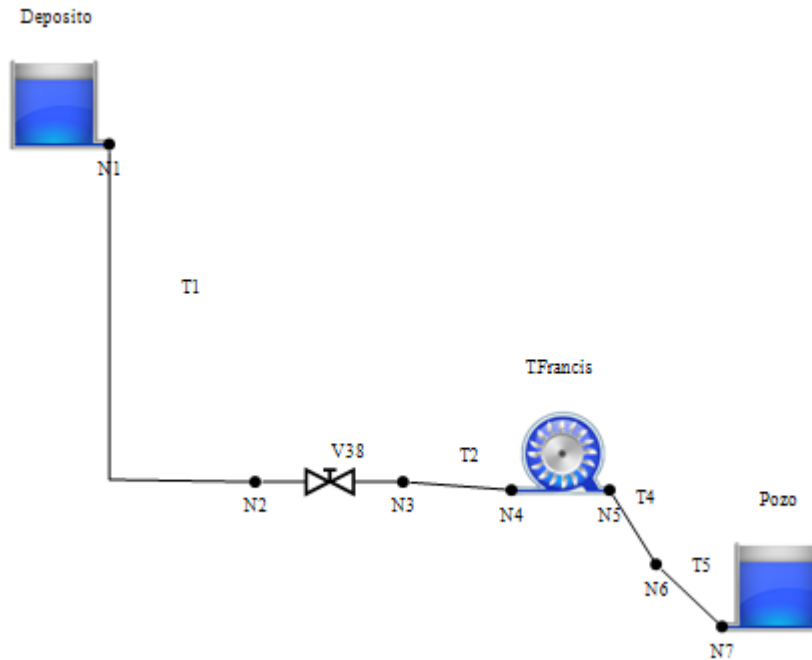


Figura 223. Circuito turbina Francis con Salto de agua

Nudos		
	Nombre ▲	Cota (m)
	N1	9,5
	N2	0,8
	N3	0,8
	N4	0,8
	N5	0,8
	N7	-1,65
	N6	0

Figura 224. Datos de los nudos del Circuito turbina Francis con Salto de agua

Depósitos - Datos básicos							
Nombre ▼	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar
Pozo	N7	---	-1,65	GD ▼		-1	▼
Deposito	---	N1	9,5	GD ▼		10	▼

Vertedero/Aliviadero				División y Vertedero				Aliviadero móvil			
L (m)	Z Cresta (m)	Cq	Descarga	Si (m ²)	Z Si (m)	Sf (m ²)	Z Sf (m)	Cresta	Zf (m)	Ti(s)	Tf(s)
			▼					▼			
			▼					▼			

Figura 225. Datos de los depósitos del Circuito turbina Francis con Salto de agua

Tuberías - Datos básicos								
Nombre ▲	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)
T1	N1	9,5	N2	0,8	346	10	10	992,4843 <input type="button" value="Calc."/>
T2	N3	0,8	N4	0,8	346	1	10	0 <input type="button" value="Calc."/>
T4	N5	0,8	N6	0	375	0,8	10	0 <input type="button" value="Calc."/>
T5	N6	0	N7	-1,65	568	1,65	10	859,085 <input type="button" value="Calc."/>

Pérdidas		Caudal nulo	
Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
0	0	<input type="checkbox"/>	▼
0	0	<input type="checkbox"/>	▼
0	0	<input type="checkbox"/>	▼
0	0	<input type="checkbox"/>	▼

Figura 226. Datos de las tuberías del Circuito turbina Francis con Salto de agua

La tubería 2 y 4 no intervienen en el transitorio, por lo tanto, la celeridad es nula.

Diámetro (mm)	<input type="text" value="346,00000"/>
Espesor (mm)	<input type="text" value="10,00000"/>
Coef. material	<input type="text" value="1,50"/>
Celeridad (m/s)	<input type="text" value="992,4843"/>

Figura 227. Cálculo de la celeridad de la tubería 1

Diámetro (mm)	<input type="text" value="568,00000"/>
Espesor (mm)	<input type="text" value="10,00000"/>
Coef. material	<input type="text" value="1,50"/>
Celeridad (m/s)	<input type="text" value="859,0850"/>

Figura 228. Cálculo de la celeridad de las tuberías 5

Válvula Regulación - Datos básicos							
Nombre ▲	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo
V38	N2	N3	0,8	346	0	De compuerta ▼	

Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $Ap(t) = Ap0 + A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T + B)$			
Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
Tabulada					

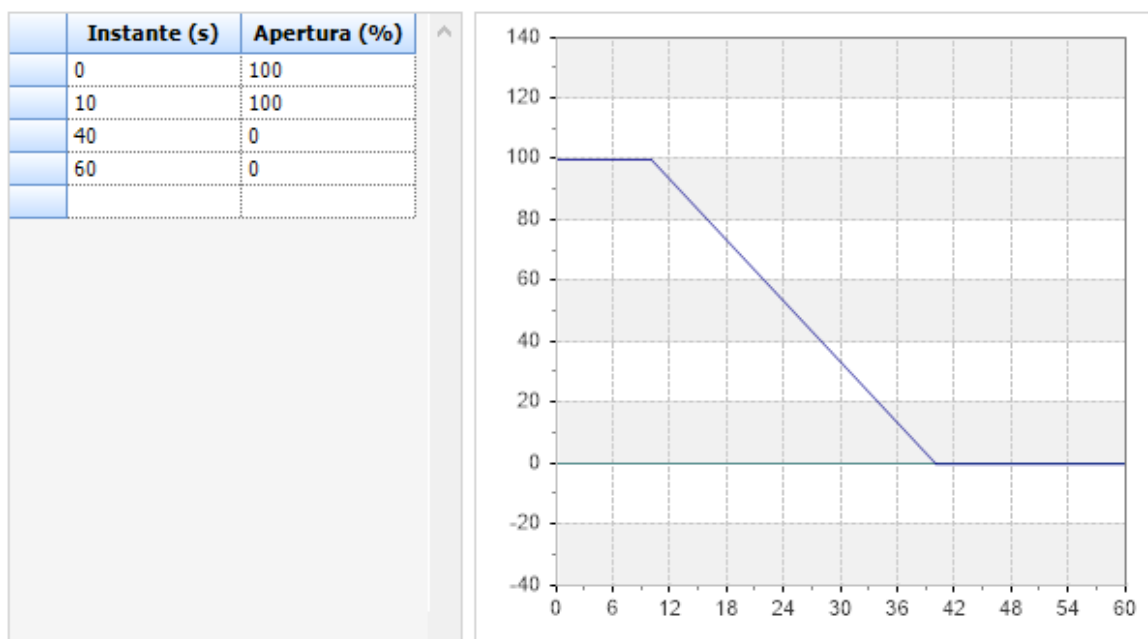


Figura 229. Datos de las válvulas del Circuito turbina Francis con Salto de agua

Turbinas - Datos básicos						
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	D (m)	I	N reg
T.Francis	N4	N5	0,8	1,4	5,1	600

Distribuidor		Rendimiento óptimo				
Ap inic	Ap max	Q	H	P	Rend	N nom
150	150	0,3	10	0,02207	74,99	600

Variación de la carga	Desconexión		Regulación PID			
	Cmin	Maniobra	Kp	Ki	Kd	Kra
(!)	35	(!)	0,8	12	0,7	100

Figura 230. Datos de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua

5.3.5.2 Régimen permanente

Resultado simulación

- Simulación finalizada con EXITO
- Finalizado el cálculo del régimen permanente en 336 iteraciones

Nombre	H(m)	Pr(m)
N0_fin	10.00	0.50
N1	10.00	0.50
N2	9.59	8.79
N3	9.43	8.63
N4	9.39	8.59
N5	-0.97	-1.77
N7	-1.00	0.65
N7_fin	-1.00	0.65
N6	-0.99	-0.99

Figura 231. Resultados del régimen permanente de los nudos del Circuito turbina Francis con Salto de agua

Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
T1	480.37	5.11	0.01073	0.41	0.00	0.00	0	
T2	480.37	5.11	0.01073	0.04	0.00			
T4	480.37	4.35	0.01087	0.02	0.00			
T5	480.37	1.90	0.01165	0.01	0.00	0.00	0	

Figura 232. Resultados del régimen permanente de las tuberías del Circuito turbina Francis con Salto de agua

Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
V38	1	480.37	0.16	100.00

Figura 233. Resultados del régimen permanente de las válvulas del Circuito turbina Francis con Salto de agua

Nombre	Qt (m ³ /s)	Ht (m)	Pot (Mw)	Rend(%)
T.Francis	0.48	10.36	0.03	57.91

Figura 234. Resultados del régimen permanente de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua

5.3.5.3 Régimen transitorio

En este último caso, el circuito no está formado por una bomba, de manera que el estudio del transitorio se trata de la de conexión de la turbina. Una maniobra que durará 30 segundos, tanto la desconexión como la variación de carga.

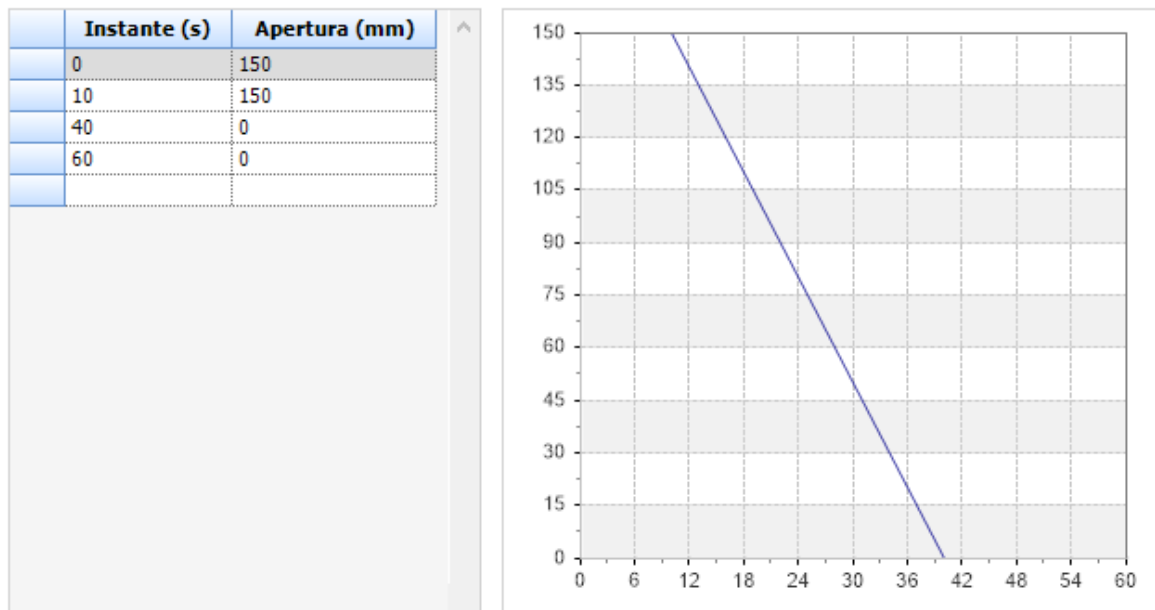


Figura 235. Maniobra de desconexión de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua

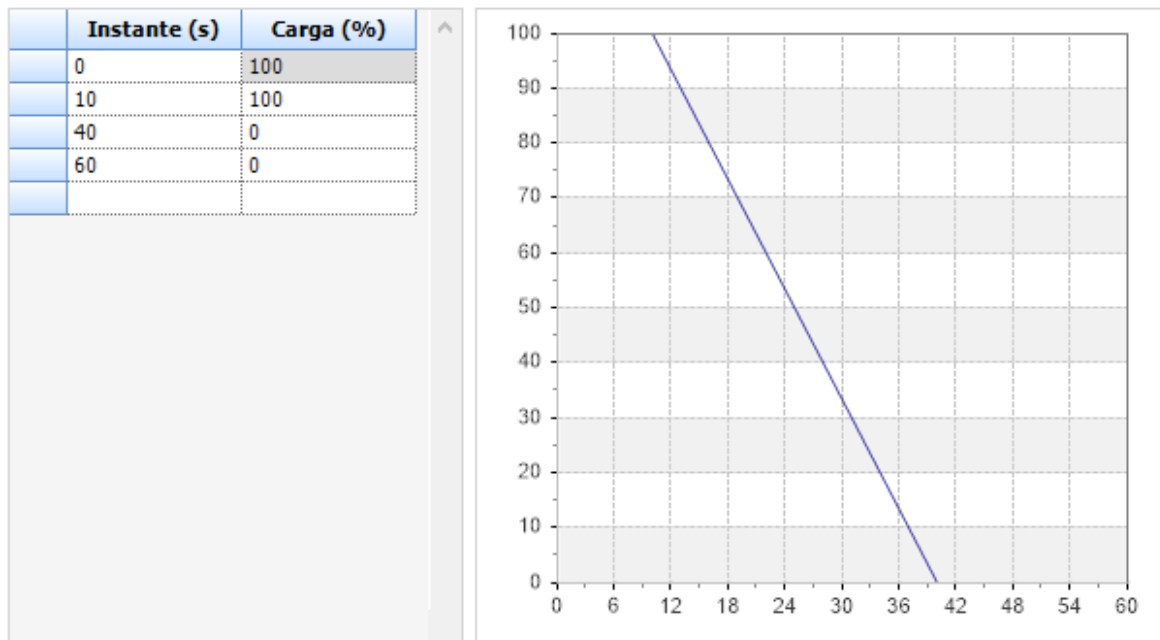
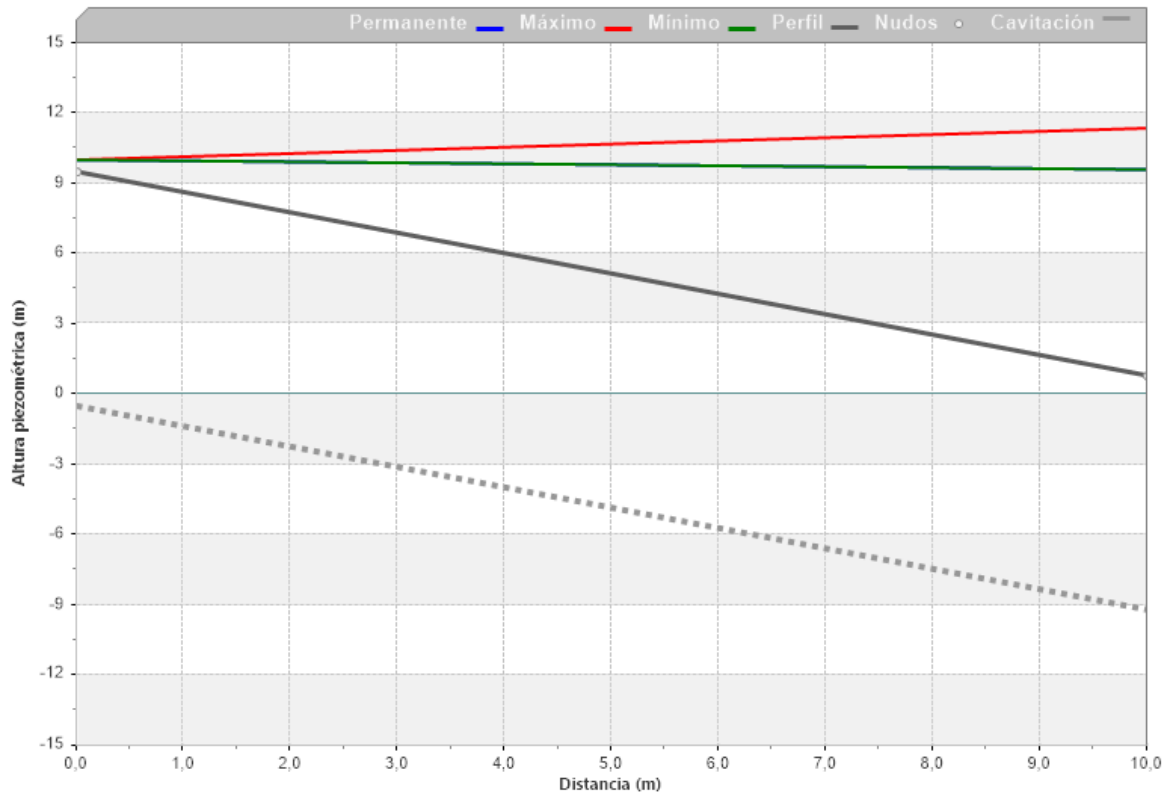


Figura 236. Variación de carga de la turbina del Circuito turbina Francis con Salto de agua

En el instante 10s comienza la maniobra de cierre, que dura 30 s. Por lo tanto, el transitorio comienza en el instante 40 s.

- T1

La tubería 1 tiene una longitud de 10 m y conecta el depósito de la planta superior que actúa como salto de agua, con la válvula 38 que da paso a la turbina. El pequeño tramo de tubería que está a continuación, T2, no interviene en el transitorio.

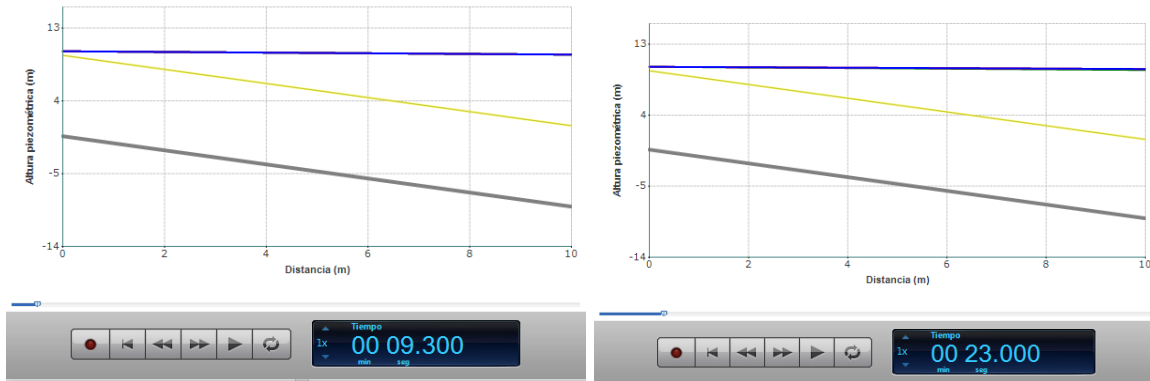


Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	10	0	10
10	9,58736324310303	10	11,3523855209351

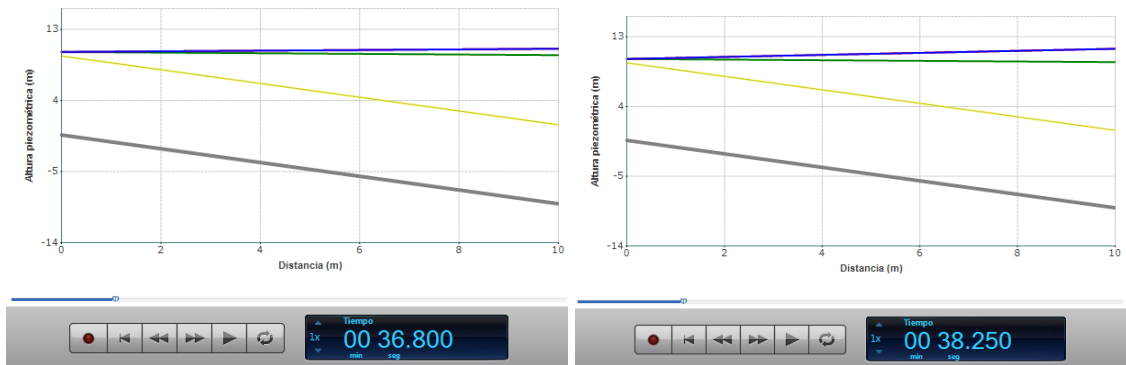
Mínimo X	Mínimo Y	Perfil X	Perfil Y
0	10	0	9,5
10	9,58736228942871	10	0,800000011920929

Cavitación X	Cavitación Y
0	-0,499999046325684
10	-9,19999903440475

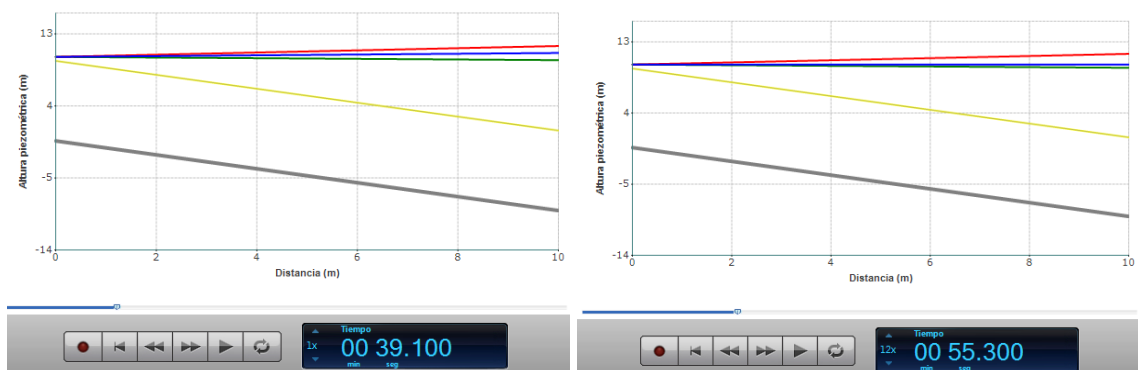
Figura 237. Envolvente de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina



Antes del cierre de la válvula



Se cerró la válvula y la presión comienza a aumentar



La línea de alturas piezométricas comienza a oscilar mientras que se mitigan las sobrepresiones y depresiones alcanzando el nuevo régimen permanente.

Figura 238. Secuencia de imágenes de las animaciones de la Envoltente de alturas piezométricas de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina

Se traza la línea de presiones mínimas en el instante 26 s. Antes de que se produzca e cierre total de la válvula y la parada de la turbina, ya que la maniobra dura 30 s.

Se traza la línea de presiones máximas en el instante 38 s. También antes de que se produzca e cierre total de la válvula y la parada de la turbina.

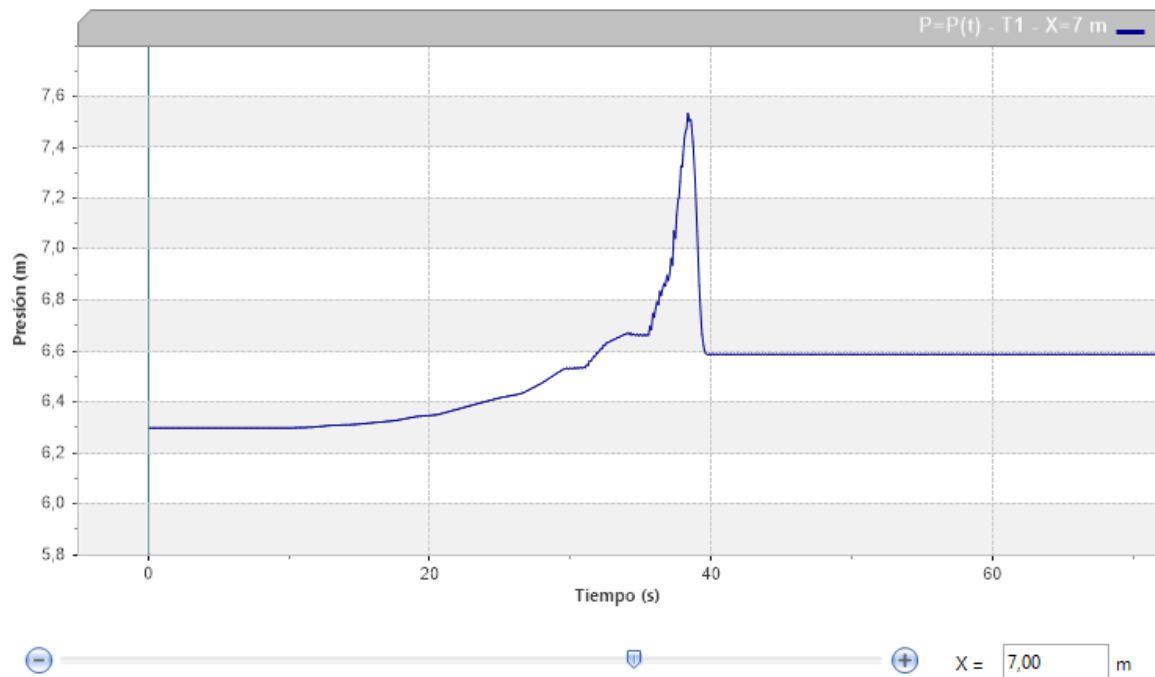
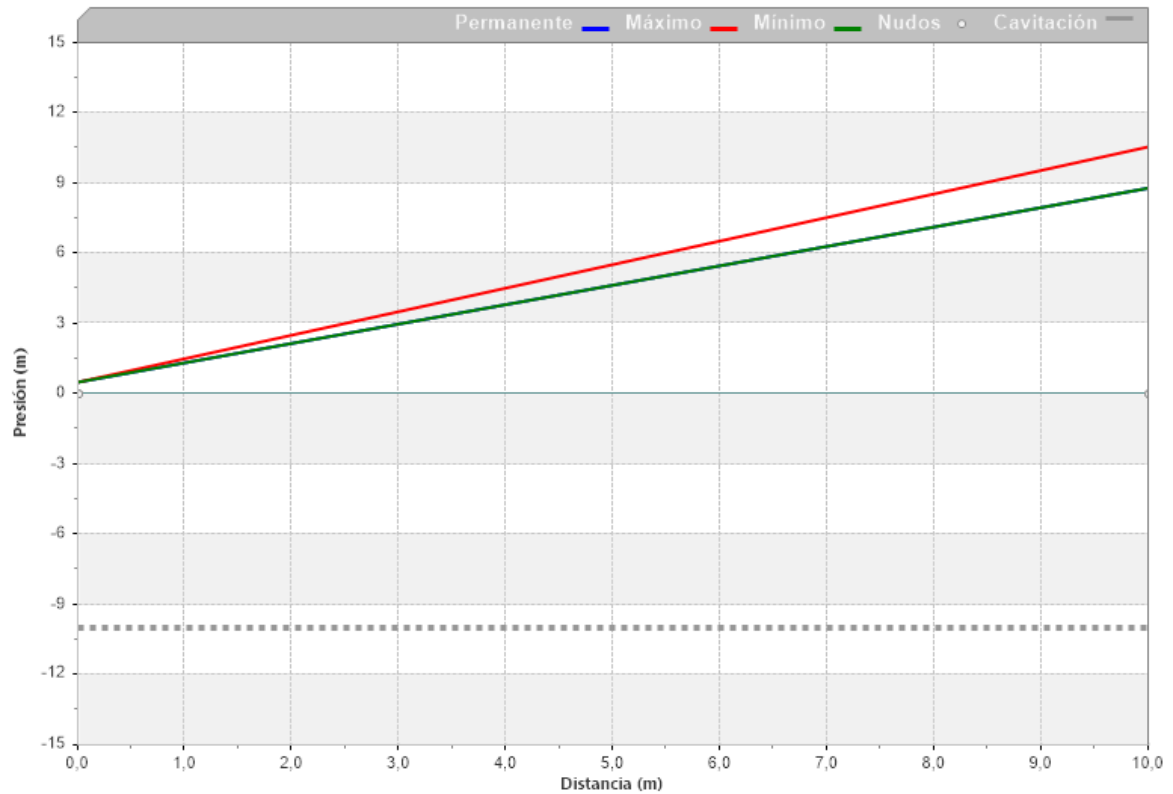


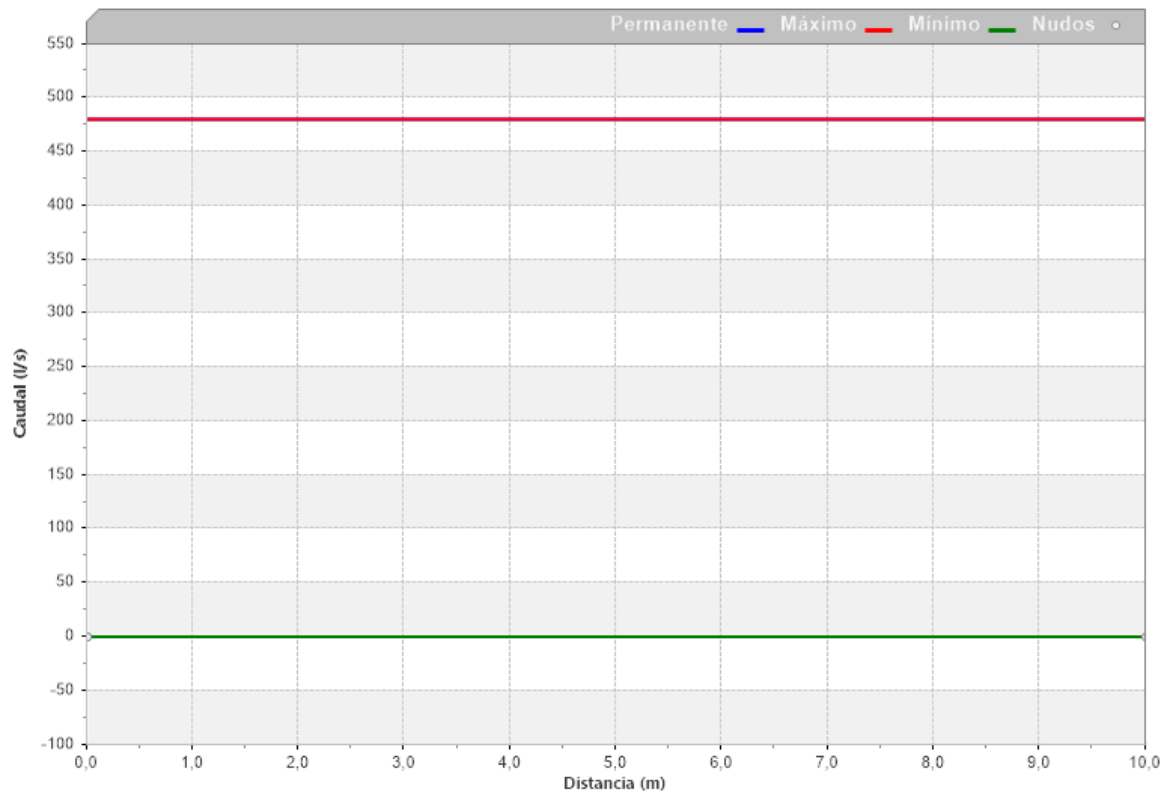
Figura 239. Curvas en función del tiempo para un punto determinado, $x=7$ m, de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina



Permanente X	Permanente Y	Máximo X	Máximo Y
0	0,5	0	0,5
10	8,78736305236816	10	10,5523853302002

Mínimo X	Mínimo Y	Cavitación X	Cavitación Y
0	0,5	0	-9,99999904632568
10	8,78736209869385	10	-9,99999904632568

Figura 240. Envoltente de presiones de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina



Máximo X	Máximo Y	Mínimo X	Mínimo Y
0	480,370483398438	0	-0,0111891441047192
10	480,370483398438	10	0

Figura 241. Envolvente de caudales de la tubería 1 en el caso 5, al desconectar la turbina

Capítulo 6. ANÁLISIS RESULTADOS

6.1 CANAL CON BOMBA WEISE

Taux82, T4, T2 y Taux51				
Altura piezométrica máxima	nudo 82	comienzo Taux82	3.3 m	Dint = 257.4 mm e = 5 mm Material = acero
Altura piezométrica mínima	nudo 82	comienzo Taux82	-3.5 m	
Altura piezométrica de cavitación			-9.44 m	
Presión máxima	nudo 82	comienzo Taux82	2.75 mca	
Presión mínima	nudo 8	comienzo tubería 4	-5.92 mca	
Presión de cavitación			-10	
Taux81				
Altura piezométrica máxima	Nudo 83	final Taux81	-1.20 m	Dint = 311 mm

Altura piezométrica mínima	Nudo 83	final Taux81	-2.76 m	e = 5 mm material = acero
Altura piezométrica de cavitación			-9.44 m	
Presión máxima	Nudo 84	comienzo Taux81	0	
Presión mínima	Nudo 83	final Taux81	-3.31 m	
Presión de cavitación			-10 m	

Tabla 7. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas Taux81, Taux82, T4, T2 y Taux51 en el caso 1, al parar la bomba

- Presión mínima

Las presiones negativas son superiores a las de cavitación, por lo tanto, en este circuito el Golpe de Ariete al cerrar la bomba no dañará las tuberías del circuito. Tanto en las tuberías Taux82, T4, T2 y Taux51 como en la Taux81.

- Presión máxima

Ante una parada repentina (por corte de suministro eléctrico), la presión máxima es menor que el valor máximo que puede resistir la tubería, la instalación está bien dimensionada.

$$p_{\max_{\text{Taux82,T4,T2 y Taux51}}} = 2.75 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{\text{adm}} CS}{D_{\text{int}}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{25.74} =$$

$$93.2401 \frac{Kg}{cm^2} = 932,401 \text{ mca}$$

Ecuación 31

$$p_{\max, \text{Taux81}} = 0 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{\text{adm}} CS}{D_{\text{int}}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{31.1} =$$

$$77.1704 \frac{Kg}{cm^2} = 771.704 \text{ mca}$$

Ecuación 32

6.2 CANAL CON BOMBA EMICA

Taux31				
Altura piezométrica máxima	nudo 33	final Taux31	0.2750 m	Dint = 316 mm e = 5 mm Material = acero
Altura piezométrica mínima	nudo 33	final Taux31	-3.2274 m	
Altura piezométrica de cavitación			-7.5 m	
Presión máxima	nudo 34	comienzo Taux31	0.0099 mca	

Presión mínima	nudo 33	final tubería 31	-5.7274 mca	
Presión de cavitación			-10 m	
Taux32 y T1				
Altura piezométrica máxima	Nudo 4	final T1	7.38733 m	Dint = 311 mm e = 5 mm
Altura piezométrica mínima	Nudo 3	Comienzo T1	-4.99202 m	material = acero
Altura piezométrica de cavitación			-9.30 m	
Presión máxima	Nudo 31	final Taux32	6.47965 m	
Presión mínima	Nudo 32	comienzo Taux32	-7.08463 m	
Presión de cavitación			-10 m	
Tpp				
Altura piezométrica máxima	Nudo 4	Comienzo Tpp	5.94286 m	Dint = 257,4 mm e = 5 mm
Altura piezométrica mínima	Nudo 4	Comienzo Tpp	-4.39414 m	material = acero

Altura piezométrica de cavitación			-7.5 m	
Presión máxima	Nudo 4	Comienzo Tpp	3.44286 m	
Presión mínima	Nudo 4	Comienzo Tpp	-6.89414 m	
Presión de cavitación			-10	
T6 y T2				
Altura piezométrica máxima	Nudo 41	Comienzo T6	5.65416 m	Dint =257,4mm e = 5 mm material = acero
Altura piezométrica mínima	Nudo 41	Comienzo T6	-4.57590 m	
Altura piezométrica de cavitación			-7.5 m	
Presión máxima	Nudo 41	Comienzo T6	3.15416 m	
Presión mínima	Nudo 41	Comienzo T6	-7.07590 m	
Presión de cavitación			-10 m	
Taux51				

Altura piezométrica máxima	Nudo 5	Comienzo Taux51	4.50135 m	Dint = 257,4 mm e = 5 mm material = acero
Altura piezométrica mínima	Nudo 5	Comienzo Taux51	1.32723 m	
Altura piezométrica de cavitación			-7.5 m	
Presión máxima	Nudo 5	Comienzo Taux51	2.001355 m	
Presión mínima	Nudo 5	Comienzo Taux51	-1.17276 m	
Presión de cavitación			-10	

Tabla 8. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas en Taux31, Taux32, T1, Tpp, T6, T2 y Taux51 en el caso 2, al parar la bomba

- Presión mínima

Las presiones negativas son superiores a las de cavitación, por lo tanto, en este circuito el Golpe de Ariete al cerrar la bomba no dañará las tuberías del circuito en ninguna de sus tuberías: Taux31, Taux32, T1, Tpp, T6, T2 y Taux51

- Presión máxima

Ante una parada repentina (por corte de suministro eléctrico), la presión máxima es menor que el valor máximo que puede resistir la tubería, la instalación está bien dimensionada.

$$p_{\max_{Taux31}} = 0.0099 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{adm} CS}{D_{int}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{31.6} =$$

$$75.94936 \frac{Kg}{cm^2} = 759.4936 \text{ mca}$$

Ecuación 33

$$p_{\max_{Taux32 y T1}} = 6.47965 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{adm} CS}{D_{int}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{31.1} =$$

$$77.17041 \frac{Kg}{cm^2} = 771.7041 \text{ mca}$$

Ecuación 34

$$p_{\max_{Tpp}} = 3.44286 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{adm} CS}{D_{int}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{25.74} =$$

$$93.2401 \frac{Kg}{cm^2} = 932.401 \text{ mca}$$

Ecuación 35

$$p_{\max_{T6 y T2}} = 3.15416 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{adm} CS}{D_{int}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{25.74} =$$

$$93.2401 \frac{Kg}{cm^2} = 932.401 \text{ mca}$$

Ecuación 36

$$p_{\max_{\text{Taux51}}} = 2.001355 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{\text{adm}} CS}{D_{\text{int}}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{25.74} =$$

$$93.2401 \frac{Kg}{cm^2} = 932.401 \text{ mca}$$

Ecuación 37

6.3 TURBINA KAPLAN CON BOMBA WEISE

Taux81				
Altura piezométrica máxima	Nudo 83	final Taux81	1.65974 m	Dint = 316 mm e = 5 mm Material = acero
Altura piezométrica mínima	Nudo 83	final Taux81	-0.05052 m	
Altura piezométrica de cavitación			-9.5 m	
Presión máxima	Nudo 84	comienzo Taux81	2.64000 mca	

Presión mínima	Nudo 83	final Taux81	-0.60052 mca	
Presión de cavitación			-10 m	
Taux82, T5 y Taux93				
Altura piezométrica máxima	Nudo 82	comienzo Taux82	5.71879 m	Dint = 257.4 mm e = 5 mm material = acero
Altura piezométrica mínima	Nudo 82	comienzo Taux82	1.15470 m	
Altura piezométrica de cavitación			-9.5 m	
Presión máxima	Nudo 82	comienzo Taux82	5.16879 m	
Presión mínima	Nudo 8	comienzo T5	-0.92197 m	
Presión de cavitación			-10 m	

Tabla 9. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas Taux81, Taux82, T5 y Taux93 en el caso 3, al parar la bomba

- Presión mínima

En las gráficas envolventes de alturas piezométricas de las tuberías de este circuito se observa que las presiones negativas que se alcanzan durante el transitorio no son de una magnitud que pueda causar daños en las tuberías.

- Presión máxima

Si calculamos la presión máxima, en función del diámetro y material de las tuberías del circuito, al compararla con la presión máxima a la que llegan a estar sometidas, se comprueba que es mucho menor. Por lo tanto, el transitorio causado por la parada repentina de la bomba no perjudicial.

$$p_{\max_{Taux81}} = 2.64000 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{adm} CS}{D_{int}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{31.6} =$$

$$75.94936 \frac{Kg}{cm^2} = 759.4936 \text{ mca}$$

Ecuación 38

$$p_{\max_{Taux82,T5 \text{ y } Taux93}} = 5.16879 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{adm} CS}{D_{int}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{25.74} =$$

$$93.2401 \frac{Kg}{cm^2} = 932.401 \text{ mca}$$

Ecuación 39

6.4 TURBINA PELTON CON BOMBA SUMERGIDA (INYECTOR)

T1				
Altura piezométrica máxima	Nudo 2	final T1	5.16059 m	Dint = 105 mm e = 5 mm Material = acero
Altura piezométrica mínima	Nudo 2	final T1	-3.32642 m	
Altura piezométrica de cavitación			-13 m	
Presión máxima	Nudo 2	final T1	8.16059 mca	
Presión mínima	Nudo 2	final T1	-0.32642 mca	
Presión de cavitación			-10 mca	
T2 y T3				
Altura piezométrica máxima	Nudo 3	comienzo T2	82.0752 m	Dint = 105 mm e = 5 mm material = acero
Altura piezométrica mínima	Nudo 6	comienzo T3	-2.13981 m	
Altura piezométrica de cavitación			-7.50 m	

Presión máxima	Nudo 3	comienzo T2	85.0752 m	
Presión mínima	Nudo 6	comienzo T3	-4.63981 m	
Presión de cavitación			-10 m	

Tabla 10. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas T1, T2 y T3 en el caso 4, al parar la bomba

- Presión mínima

En las gráficas de alturas envolventes se puede observar como la presión mínima es mayor que la de cavitación. Por lo tanto, no se produce la separación de columna de agua y no se ocasionan daños en la tubería. En la tabla se compara el punto de presión más bajo de la tubería con la presión de cavitación en este mismo punto.

- Presión máxima

Si comparamos la presión que puede llegar a soportar la tubería y a la presión máxima a la que está sometida durante el transitorio, se observa que esta es menor y por lo tanto no hay averías en el proceso transitorio.

$$p_{\max_{T1}} = 8.16059 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{\text{adm}} CS}{D_{\text{int}}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{10.5} =$$

$$228.571 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 2285.714 \text{ mca}$$

Ecuación 40

$$p_{\max_{T_2 \text{ y } T_3}} = 85.0752 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{\text{adm}} CS}{D_{\text{int}}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{10.5} =$$

$$228.571 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 2285.714 \text{ mca}$$

Ecuación 41

6.5 TURBINA FRANCIS CON SALTO DE AGUA

T1				
Altura piezométrica máxima	nudo 2	final T1	11.35238 m	Dint = 346 mm e = 5 mm Material = acero
Altura piezométrica mínima	nudo 2	final T1	9.58736 m	
Altura piezométrica de cavitación			-9.19999 m	
Presión máxima	nudo 2	final T1	10.55238 mca	
Presión mínima	nudo 1	Comienzo T1	0.5 mca	
Presión de cavitación			-10 m	

Tabla 11. Conclusión de presiones y alturas piezométricas máximas y mínimas en T1 en el caso 5, al cerrar la válvula

- Presión mínima

En las gráficas de alturas envolventes se puede observar como la presión mínima es mayor que la de cavitación. Por lo tanto, no se produce la separación de columna de agua y no se ocasionan daños en la tubería. En la tabla se compara el punto de presión más bajo de la tubería con la presión de cavitación en este mismo punto.

- Presión máxima

Si comparamos la presión que puede llegar a soportar la tubería y a la presión máxima a la que está sometida durante el transitorio, se observa que esta es menor y por lo tanto no hay averías en el proceso transitorio.

$$p_{\max_{T2 \text{ y } T3}} = 10.55238 \text{ mca} \leq \frac{2 e \sigma_{\text{adm}} CS}{D_{\text{int}}} = \frac{2 * 0.5 * 1600 * 1.5}{34.6} =$$

$$69.3641 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 693.641 \text{ mca}$$

Ecuación 42

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis de cinco circuitos hidráulicos en el laboratorio de fluidos de ICAI. Con el objetivo de conocer las alturas piezométricas y presiones en las tuberías no tan solo en el régimen permanente, sino también en el transitorio causado por el corte de suministro eléctrico y consecuente parada de la bomba o el cierre brusco de una válvula.

Los circuitos son los siguientes:

- Canal con bomba Weise
- Canal con bomba Emica
- Turbina Kaplan con bomba Weise
- Turbina Pelton con bomba Sumergida
- Turbina Francis con salto de agua

El proceso ha sido igual en todos los casos:

- En primer lugar, se realiza un análisis del sistema, donde se presentan los datos de nudos, depósitos, tuberías, válvulas, bombas y turbinas.
- En segundo lugar, se presentan los resultados del régimen permanente, es decir, las presiones a las que están sometidas las tuberías en su normal funcionamiento, para las que están diseñadas.
- En tercer lugar, se analiza el transitorio tras la perturbación en los distintos tramos de tuberías y se seleccionan los puntos críticos de mayores sobrepresiones y depresiones.
- Por último, con los datos obtenidos en el último apartado se compara la tensión máxima que puede llegar a soportar la tubería con la tensión máxima a la que está sometida. Se realiza en mismo proceso con la tensión mínima, comparándola con la de cavitación.

A continuación, se presentan brevemente de nuevo los datos más relevantes obtenidos en los análisis de cada circuito.

7.1 CANAL CON BOMBA WEISE

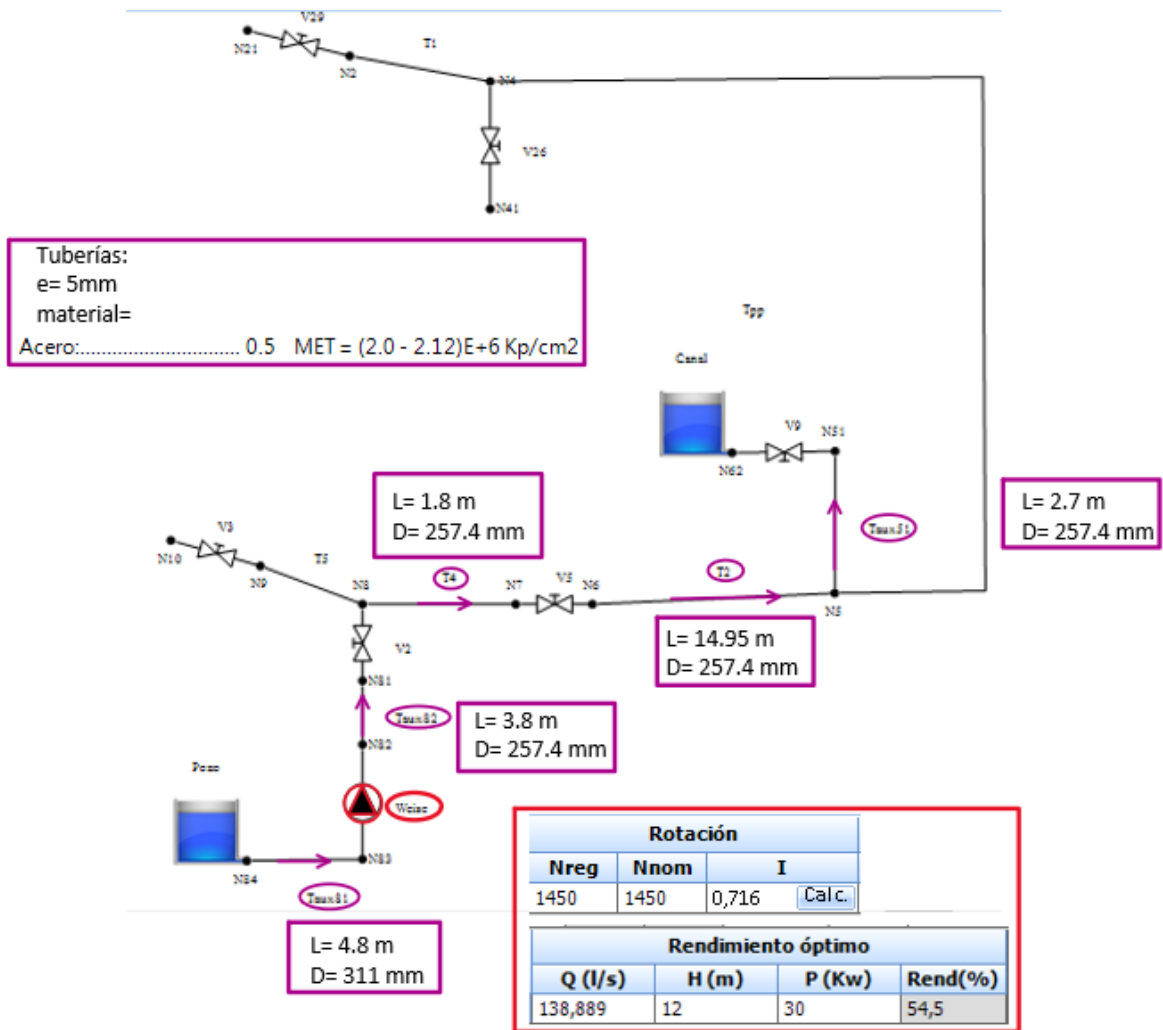


Figura 242. Análisis del sistema, circuito 1, Canal con Bomba Weise

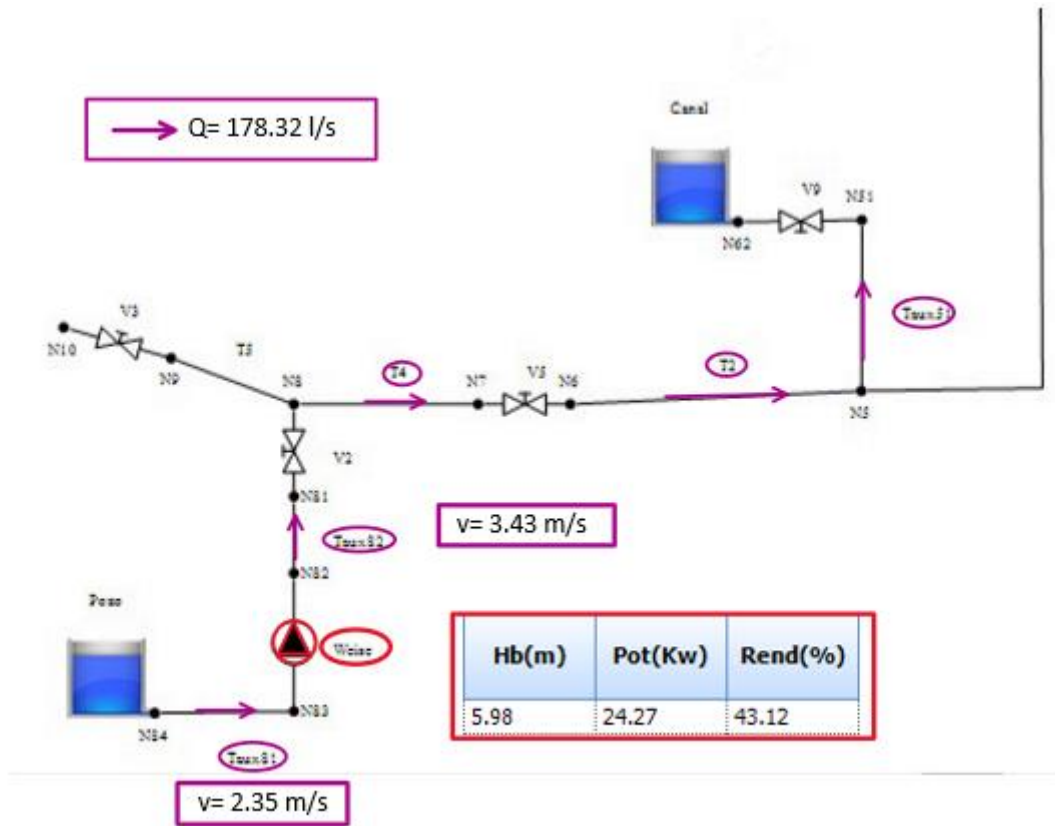


Figura 243. Régimen permanente, circuito 1, Canal con Bomba Weise

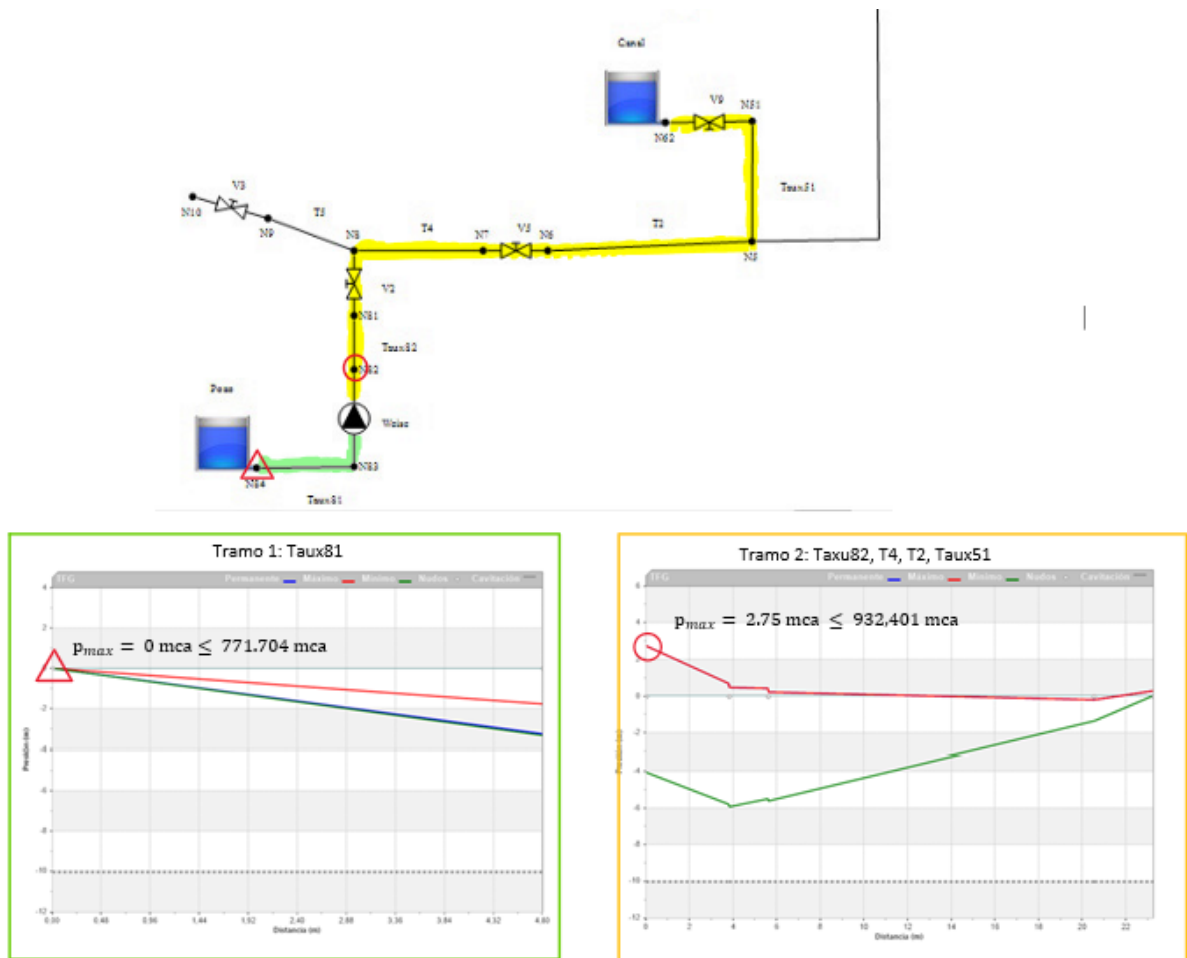


Figura 244. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise

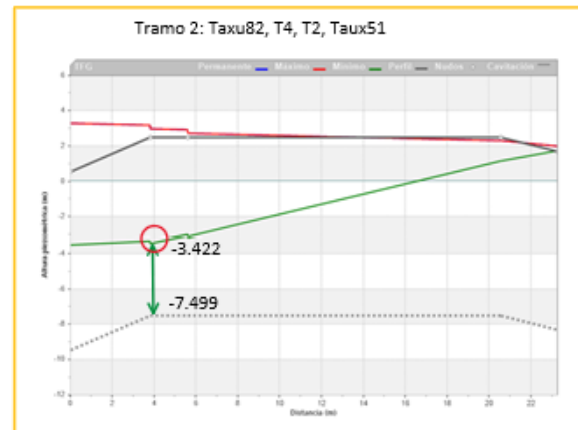
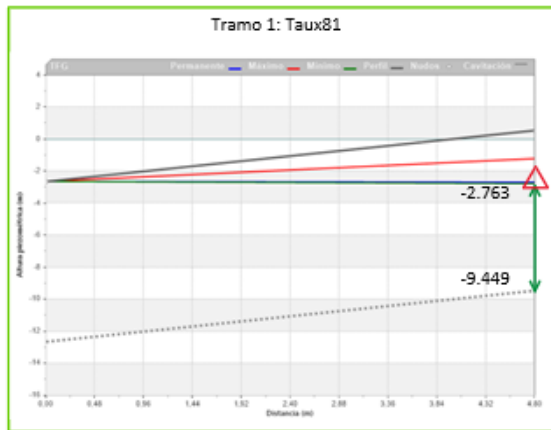
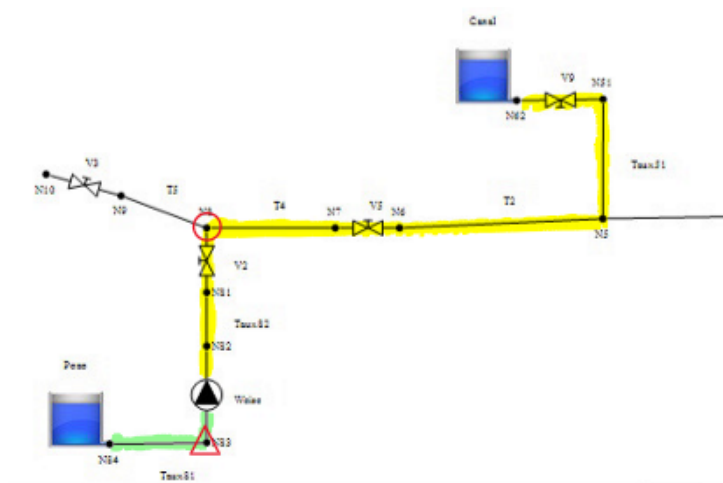


Figura 245. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 1, Canal con Bomba Weise

7.2 CANAL CON BOMBA EMICA

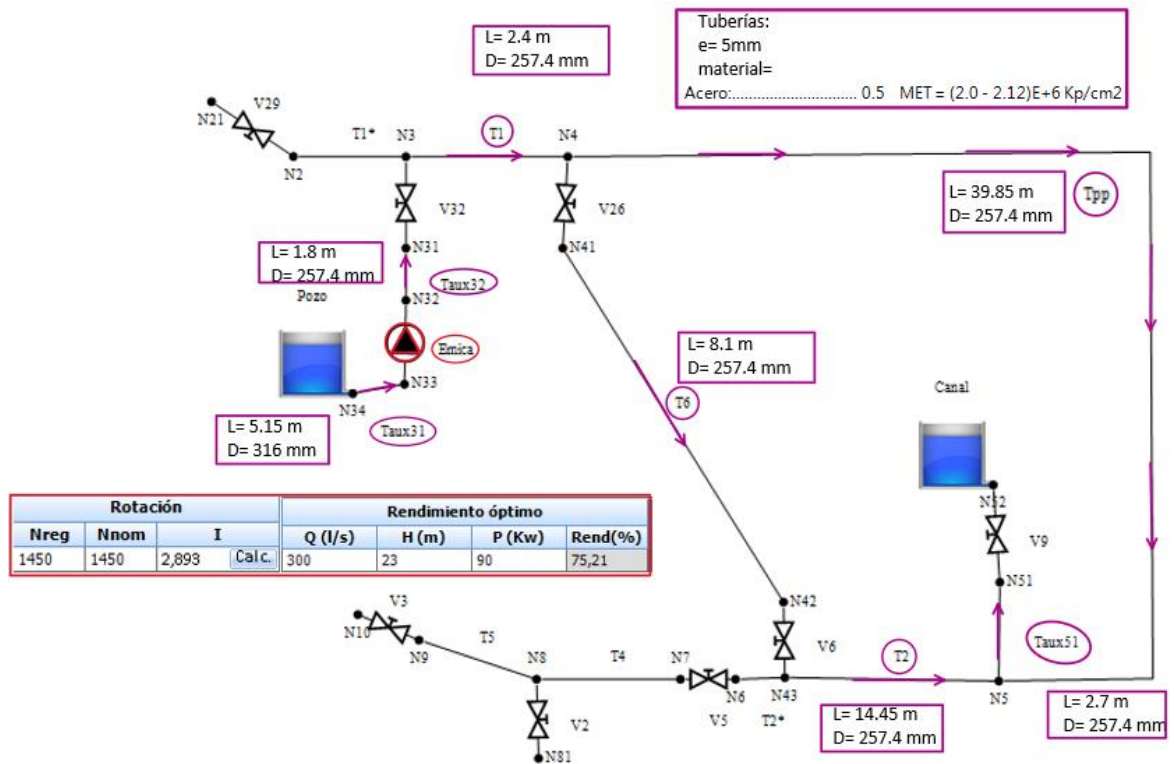


Figura 246. Análisis del sistema, circuito 2, Canal con Bomba Emica

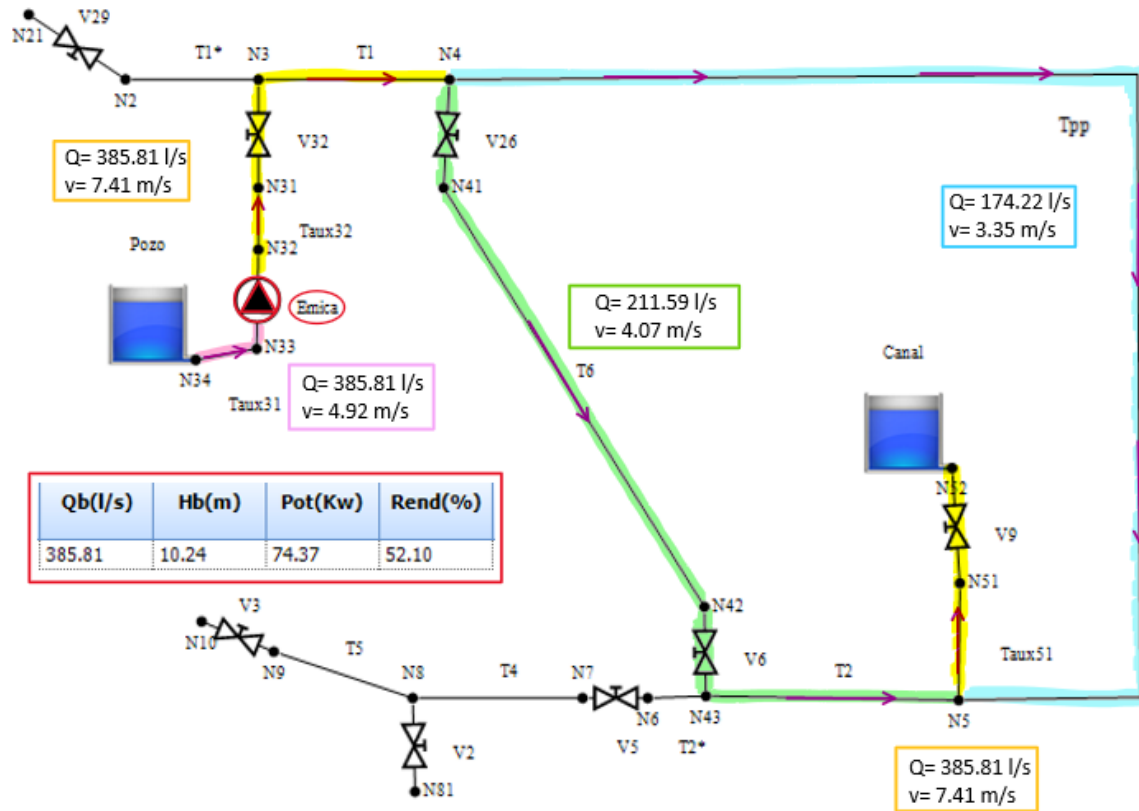
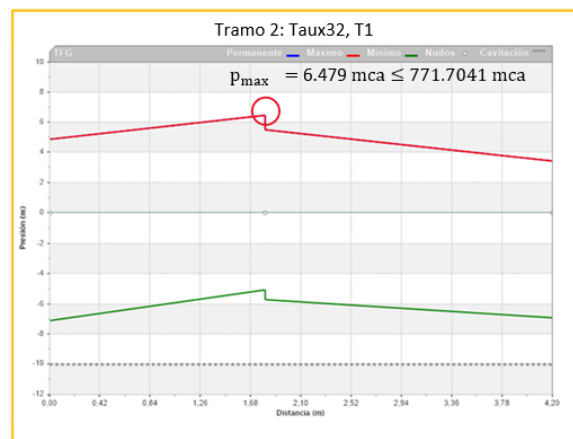
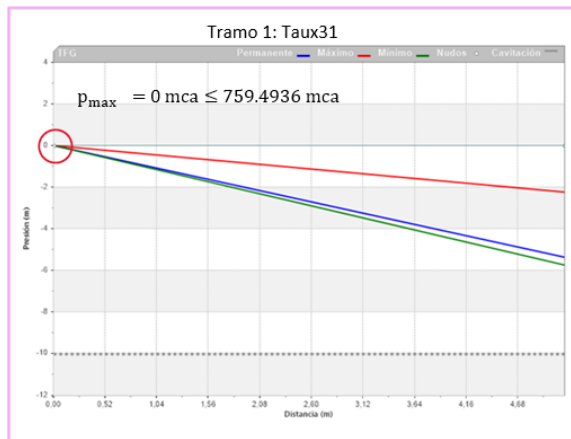
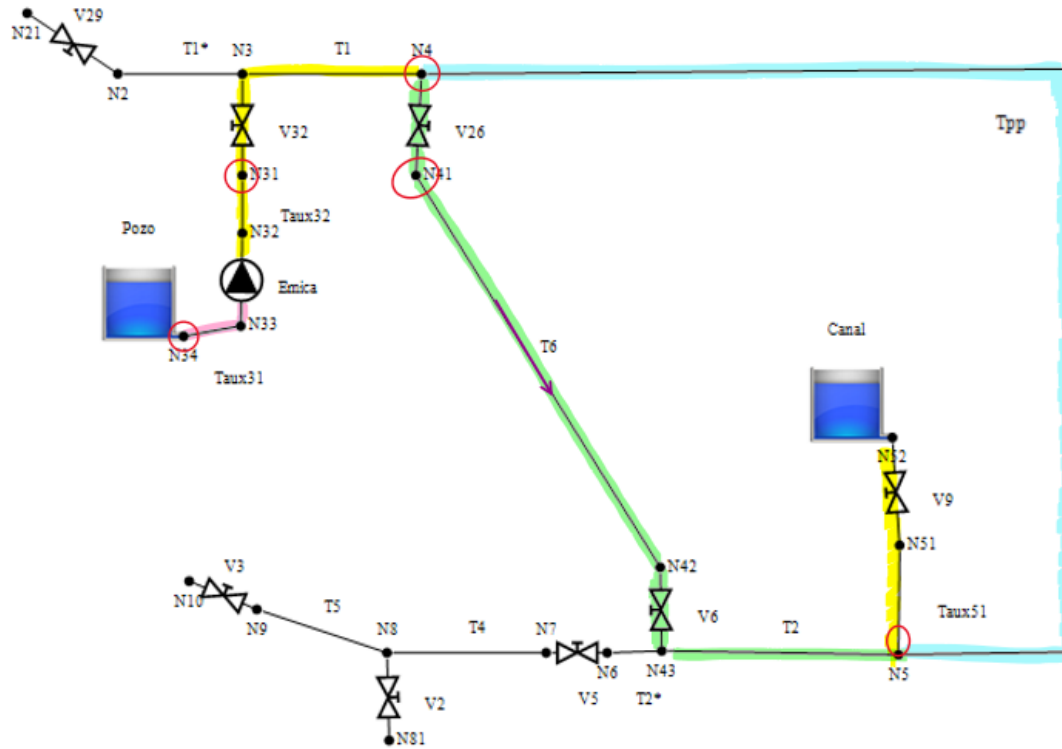


Figura 247. Régimen permanente, circuito 2, Canal con Bomba Emica



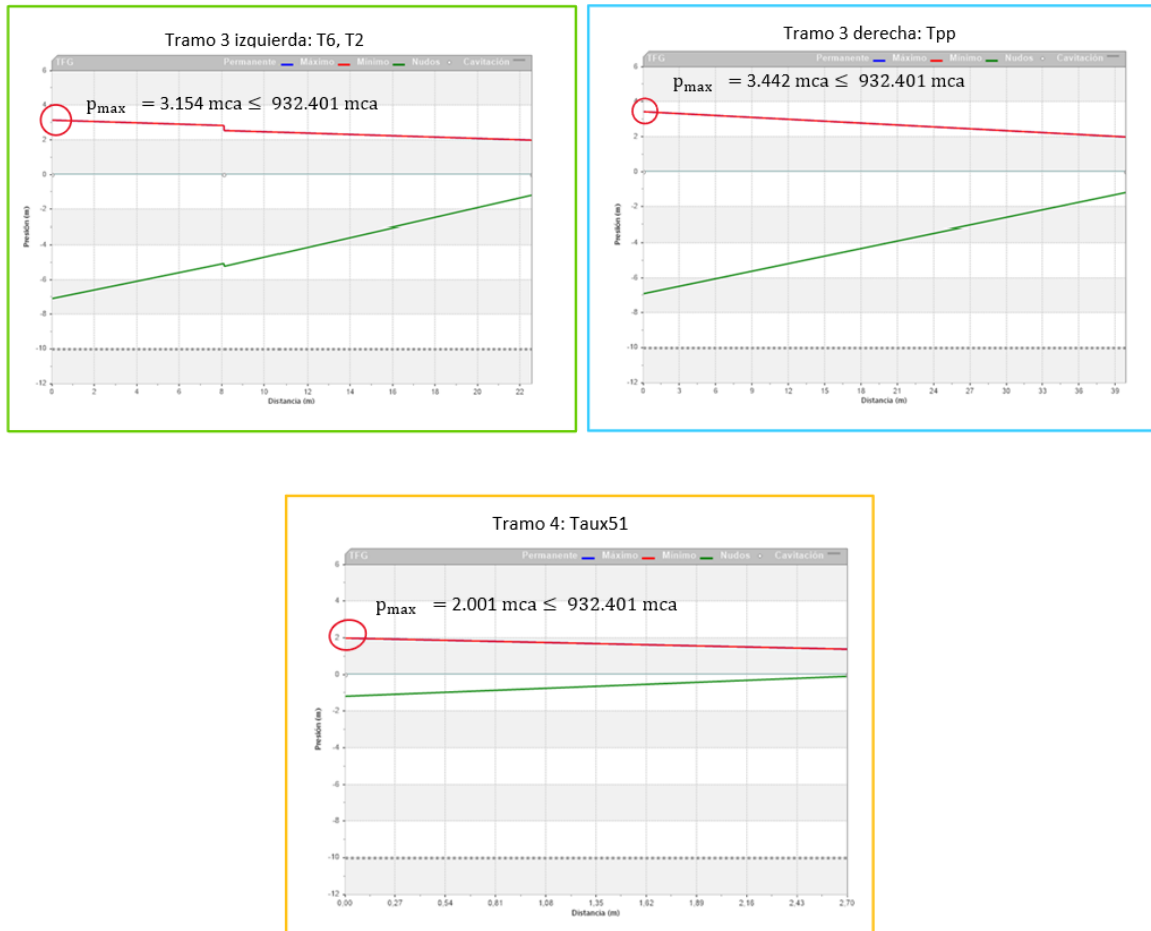
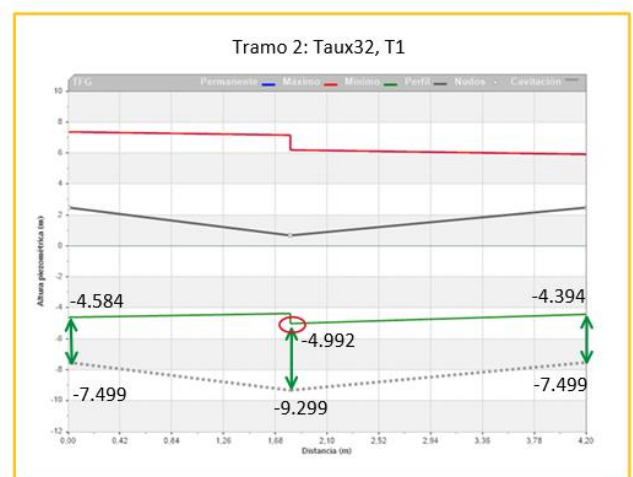
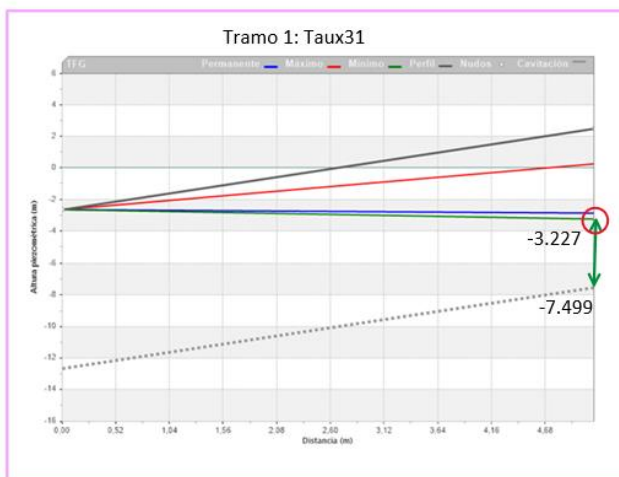
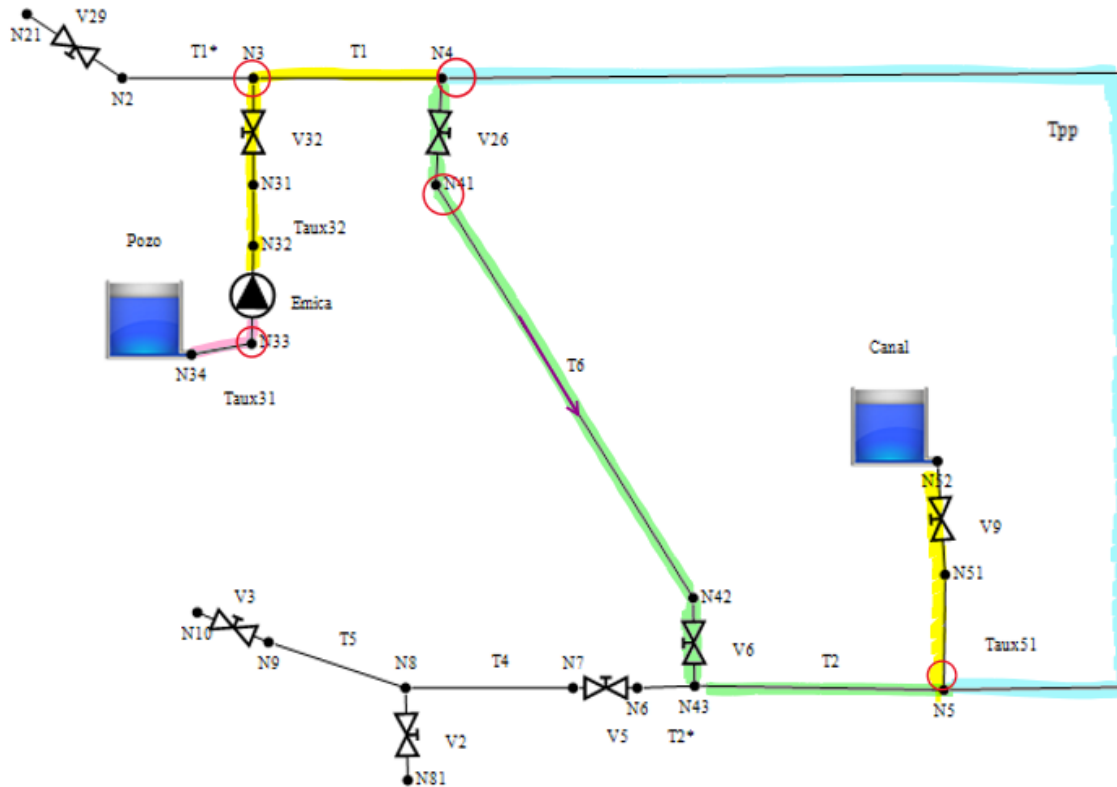


Figura 248. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica



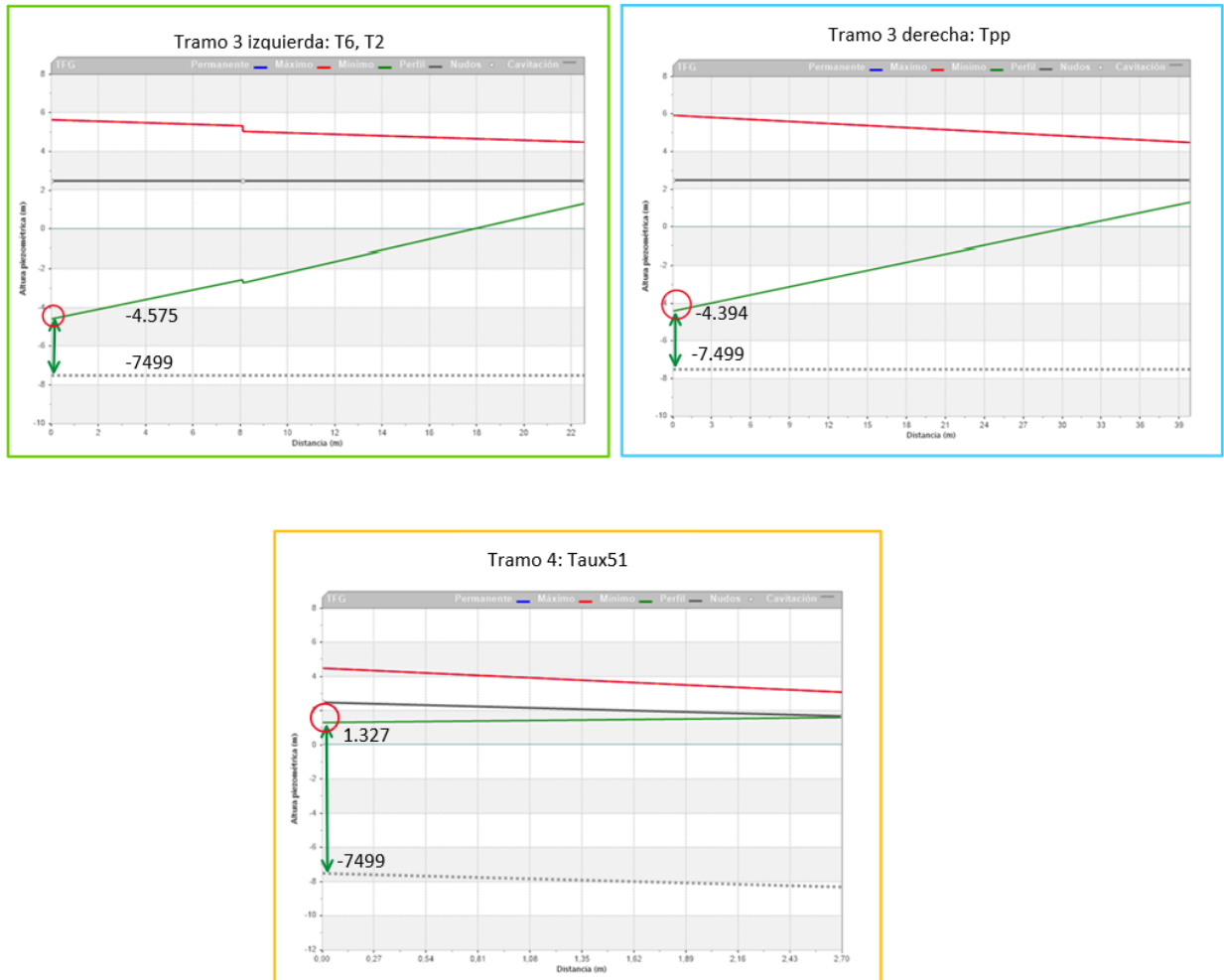


Figura 249. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 2, Canal con Bomba Emica

7.3 TURBINA KAPLAN CON BOMBA WEISE

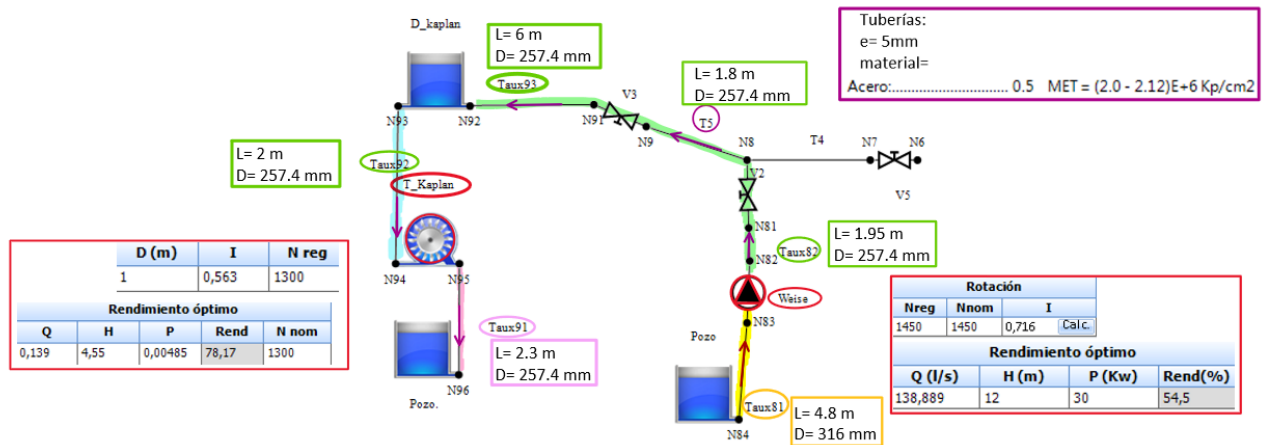


Figura 250. Análisis del sistema, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise

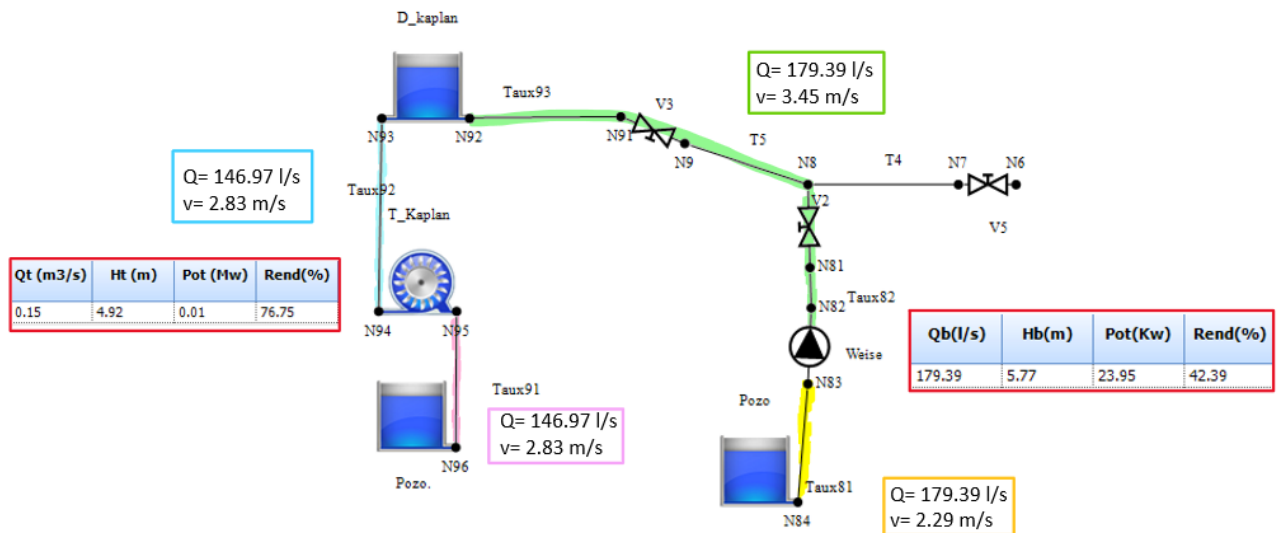


Figura 251. Régimen permanente, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise

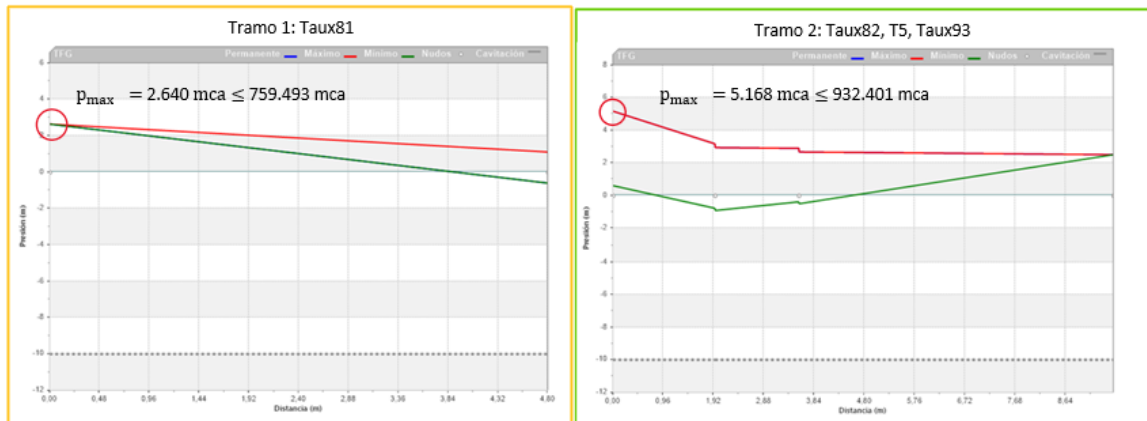
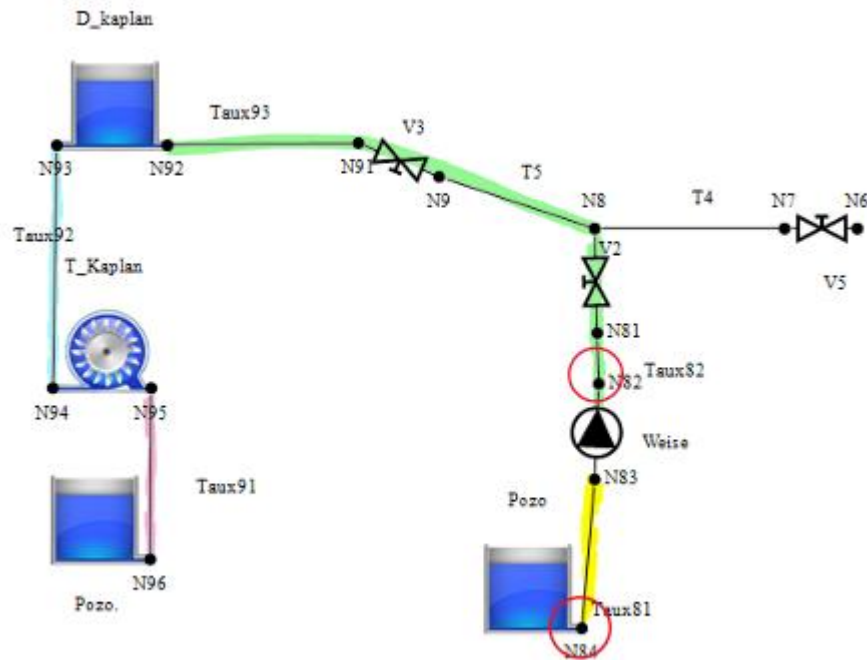


Figura 252. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise

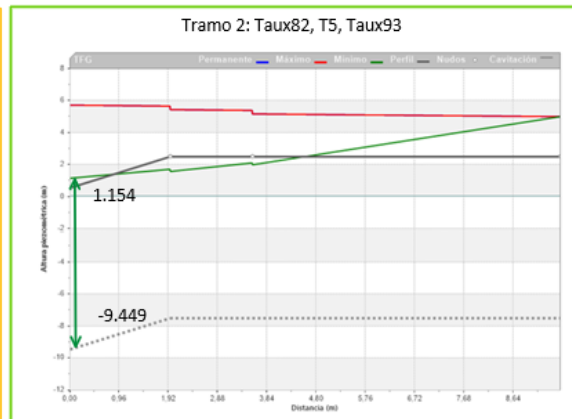
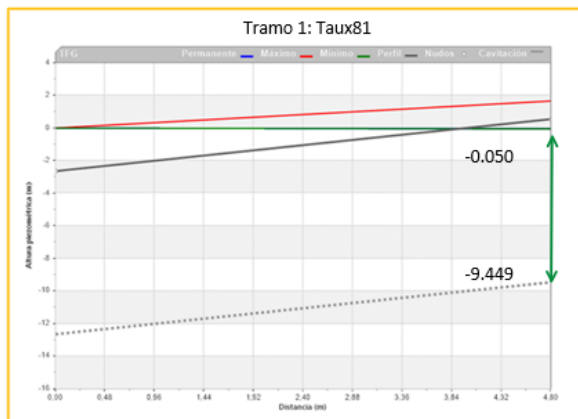
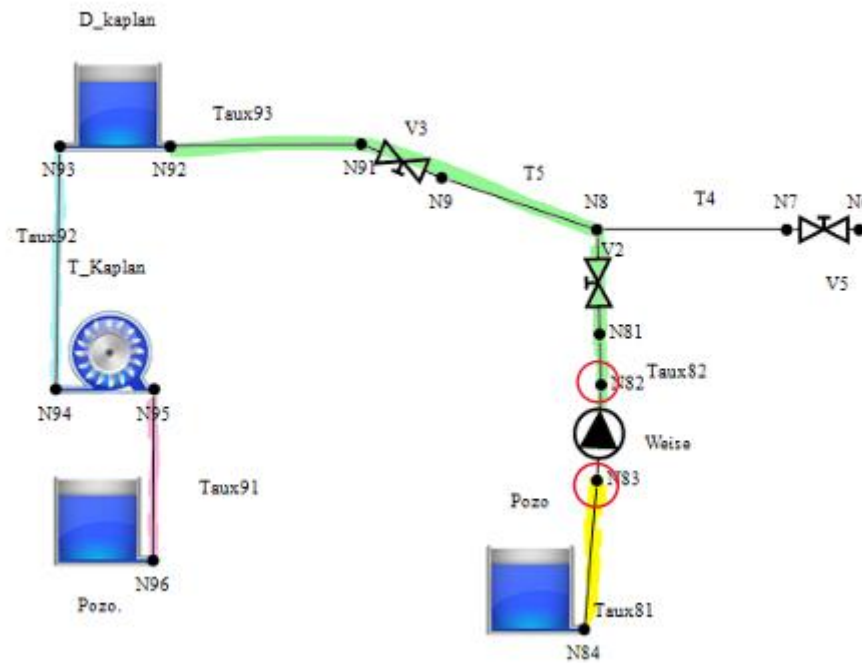


Figura 253. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 3, Turbina Kaplan con bomba Weise

7.4 TURBINA PELTON CON BOMBA SUMERGIDA

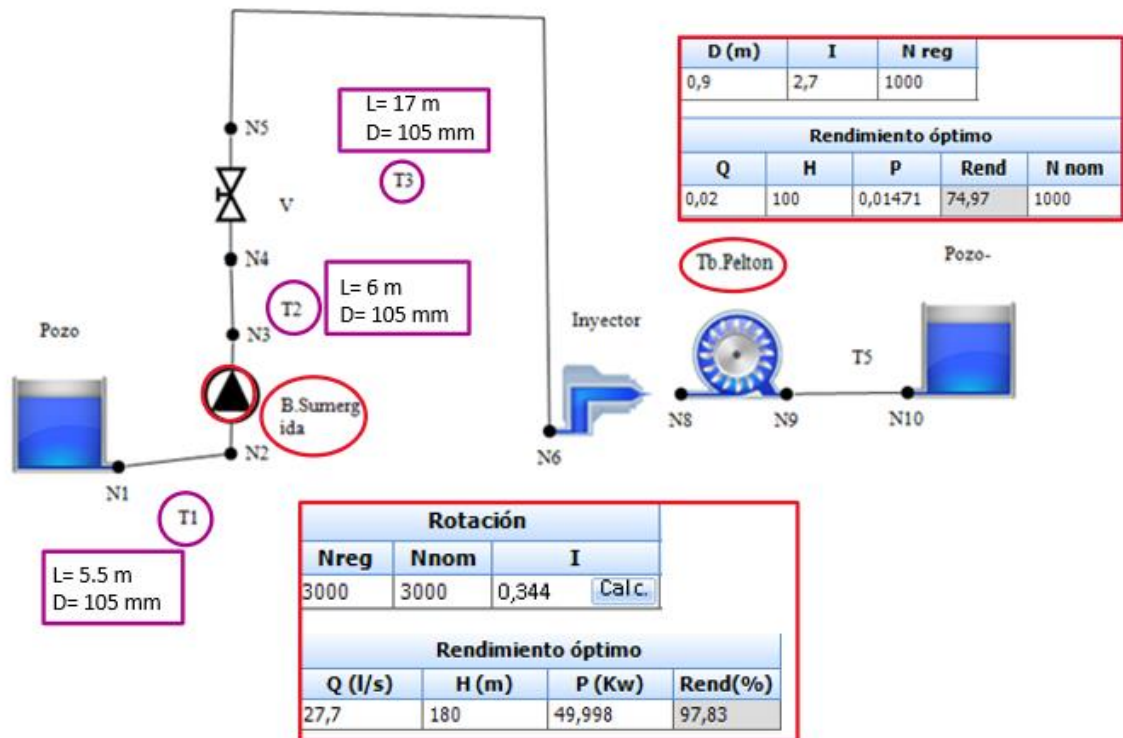


Figura 254. Análisis del sistema, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida

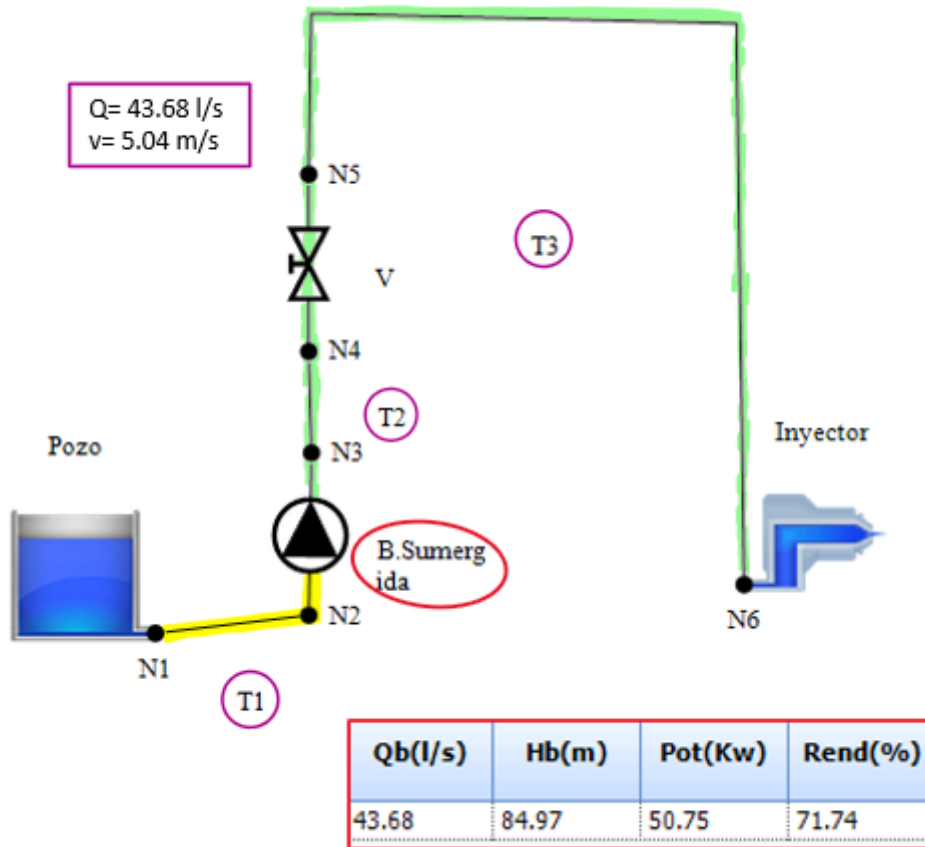


Figura 255. Régimen permanente, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida

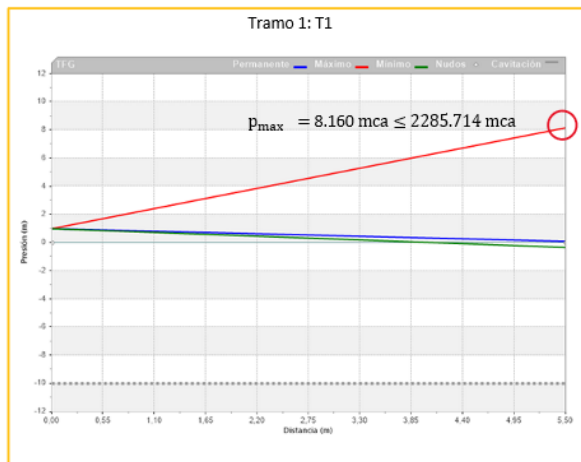
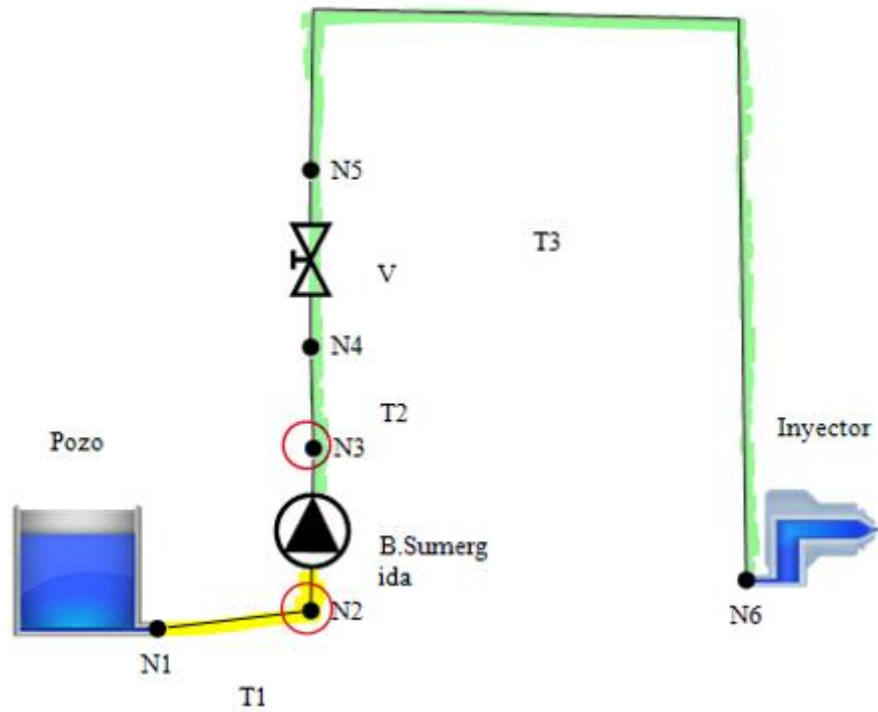


Figura 256. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida

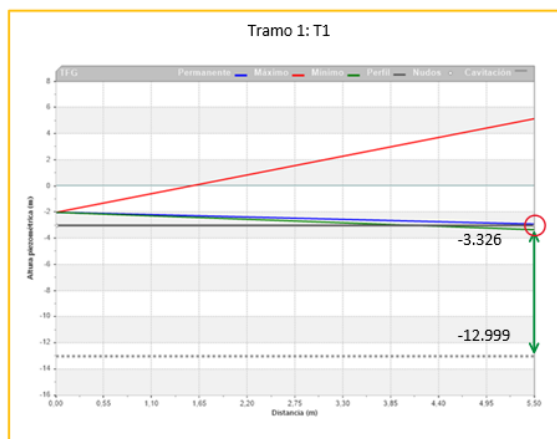
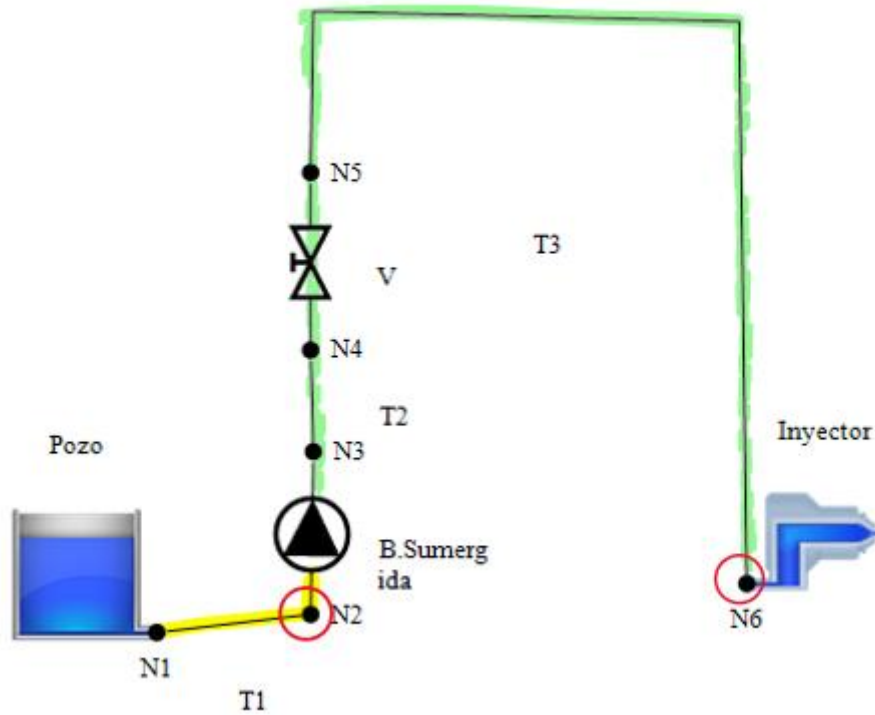


Figura 257. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 4, Turbina Pelton con bomba sumergida

7.5 TURBINA FRANCIS CON SALTO DE AGUA

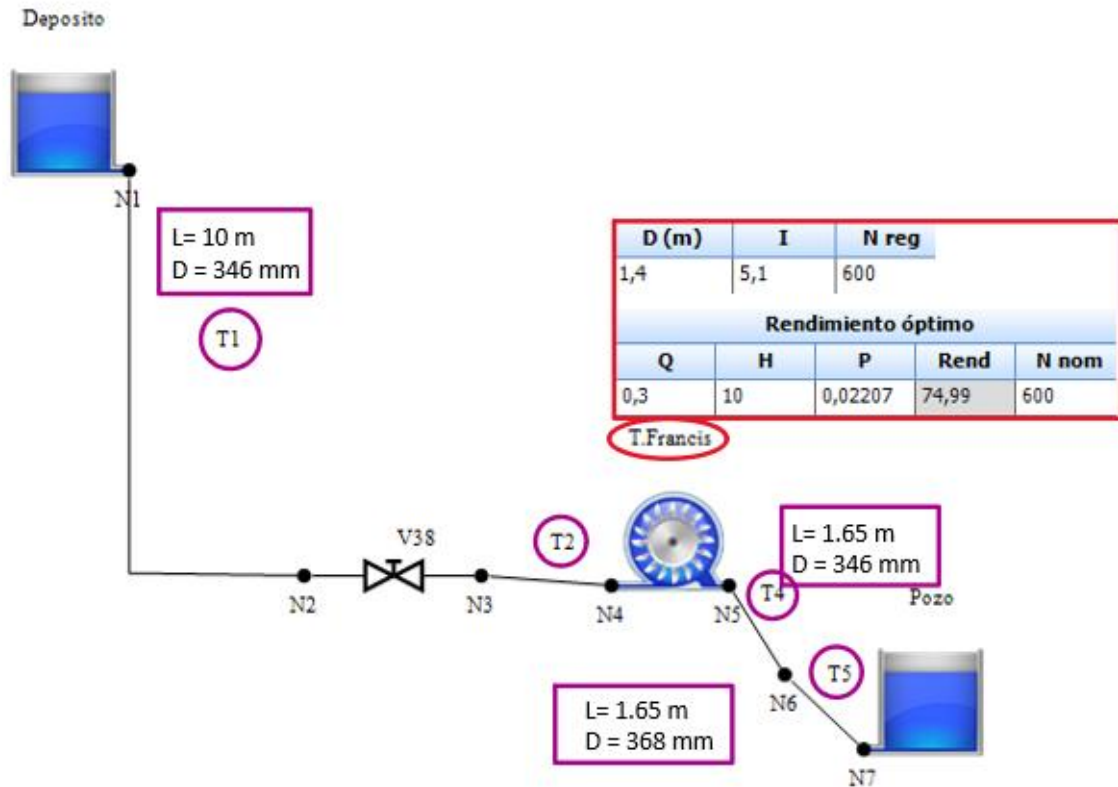


Figura 258. Análisis del sistema, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua

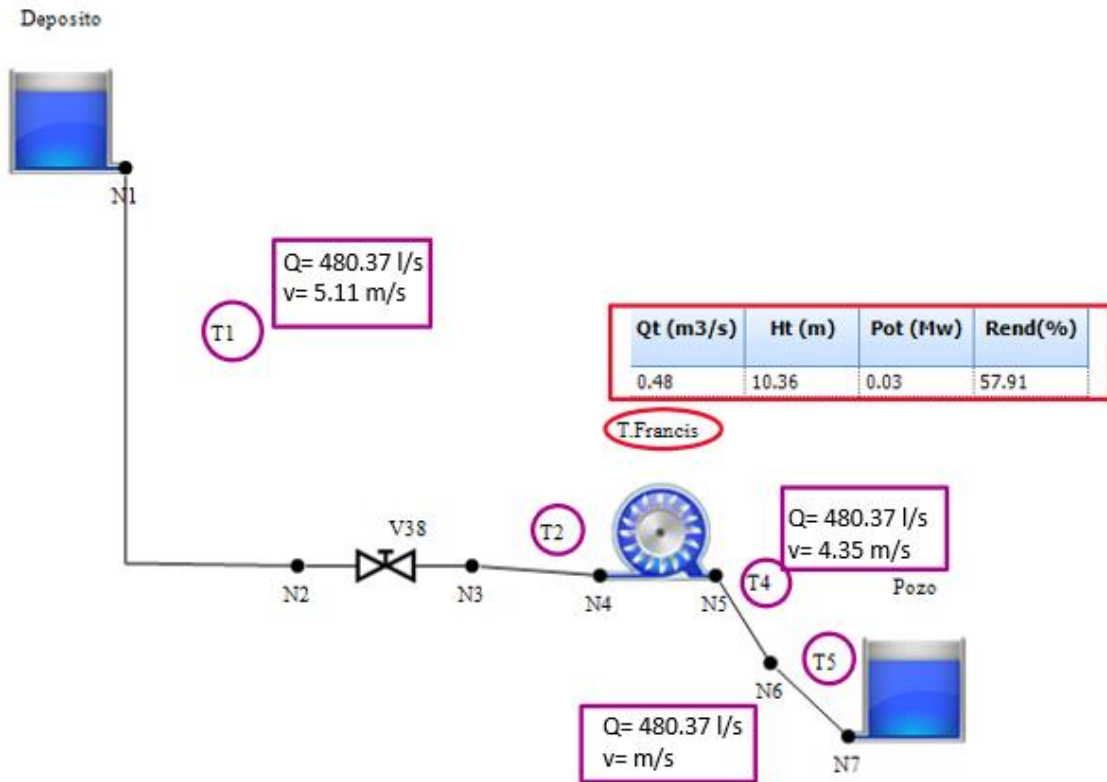


Figura 259. Régimen permanente, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua

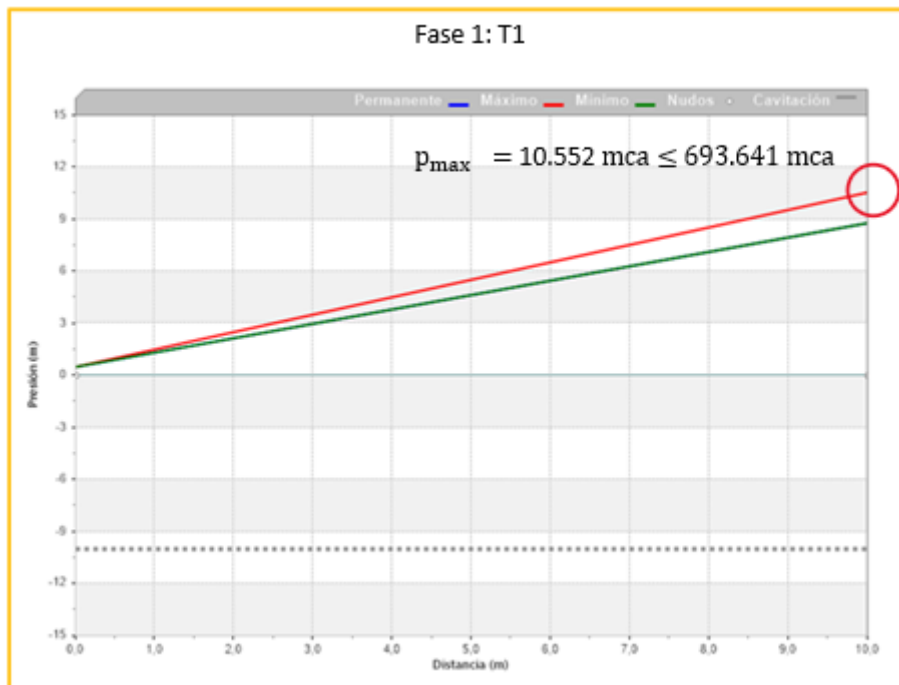
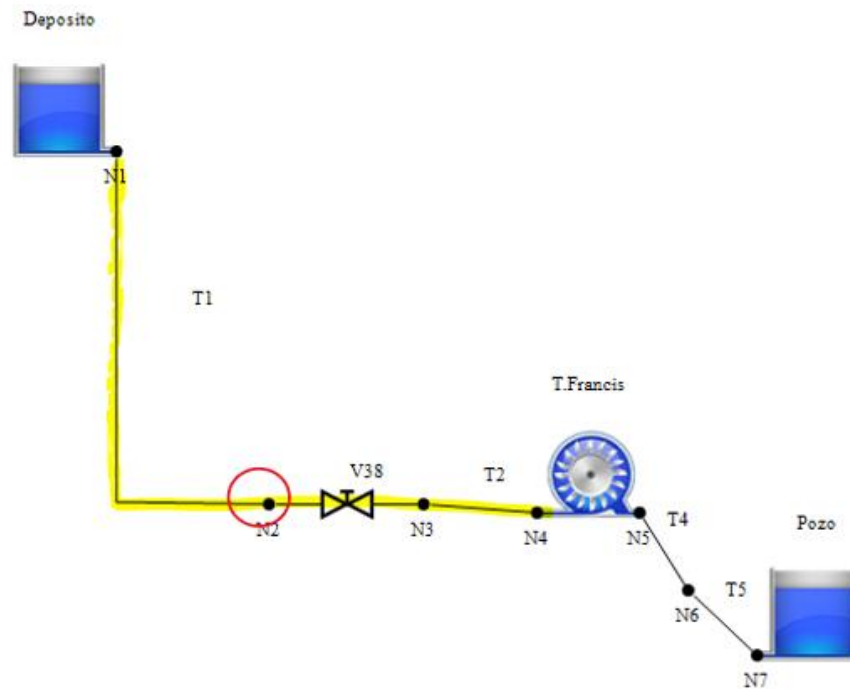


Figura 260. Régimen transitorio: Sobrepresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua

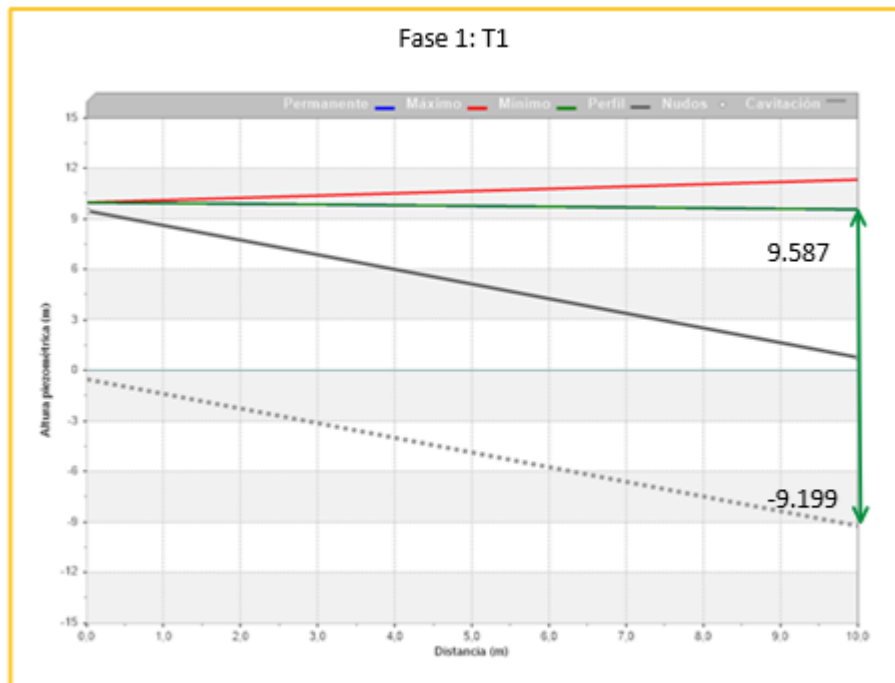
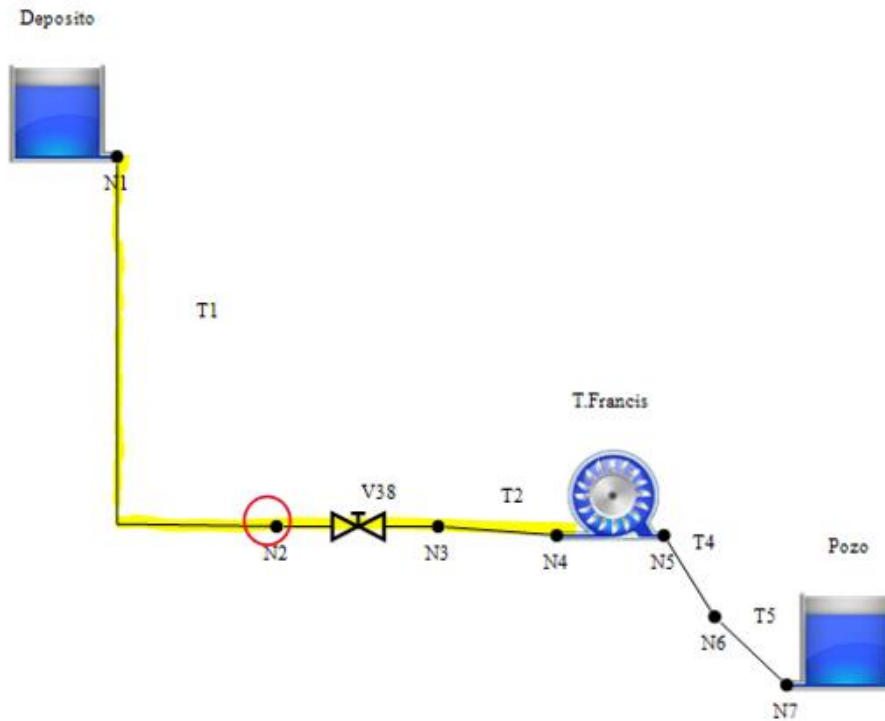


Figura 261. Régimen transitorio: Depresiones, circuito 5, Turbina Francis con salto de agua

Tras presentar para cada caso un breve resumen de los datos del sistema el régimen permanente y también del régimen transitorio, en todos los circuitos se llega a la misma conclusión:

- a) La altura piezométrica mínima es mayor que la de cavitación, por lo que en ninguno de los casos hay peligro de implosión
- b) La presión máxima es menor que la máxima que soportan las tuberías, por lo que no hay riesgo de rotura.

No obstante, en los años de vida de la instalación hidráulica del laboratorio han acontecidos varios golpes de ariete. Ninguno ha provocado daños catastróficos, pero sí pequeñas perforaciones puntuales de algunas tuberías, donde el espesor de las mismas está mermado por efectos de la corrosión. Piénsese que, globalmente considerada, la instalación hidráulica del laboratorio es un circuito abierto donde el aporte continuo de oxígeno durante el flujo de agua ha provocado reducciones puntuales del espesor de las tuberías.

Los estudios realizados en el presente proyecto demuestran que la instalación presenta seguridad intrínseca frente a fallos de grandes dimensiones (rotura o colapso de tuberías, rotura de válvulas, etc.) por golpes de ariete, pero la experiencia de uso demuestra que sí presenta riesgo por daños puntuales (perforación de tuberías).

Es por ello que se sugiere como medida de protección frente a la perforación puntual de tuberías ante golpe de ariete, la instalación de ventosas dispuestas cada 3 metros por toda la instalación del laboratorio.

Este elemento de protección de acción indirecta, se puede colocar a lo largo de una tubería y permiten controlar las depresiones en su entorno de influencia. Cuando la presión cae por debajo de la atmosférica se permite la entrada de aire en la conducción. De esta manera se evita que las presiones bajen por debajo de la atmosférica. Las ventosas normalmente consisten en un flotador que abre o cierra el orificio de contacto con la atmosfera en función de la presión.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Enrique Cabrera “Cursos de agua” Universidad politécnica de Valencia
- [2] Luis E.Pérez Farrás; Adolfo Guitelman “Estudio de Transitorios: Golpe de Ariete”, Catedra de construcciones hidráulicas, Universidad de Buenos Aires, Agosto 2005.
- [3] Martín Reina, Guillermo, “Pérdida de carga en redes hidráulicas”, Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización.
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/fichero/5+-+P%C3%89RDIDAS+DE+CARGA+EN+REDES+HIDR%C3%81ULICAS.pdf>
- [4] Farfan Perez, “APÉNDICE C VALORES DEL COEFICIENTE "k" PARA PÉRDIDAS DE ENERGÍA LOCAL”
https://www.academia.edu/7510814/AP%C3%89NDICE_C_VALORES_DEL_COEFICIENTE_k_PARA_P%C3%89RDIDAS_DE_ENERG%C3%8DA_LOCAL
- [5] Aprende ciencia y tecnología, <https://aprendecienciaytecnologia.com/2019/04/10/tipos-y-caracteristicas-de-turbinas-turbina-pelton-francis-y-kaplan/>
- [6] Temarios formativos profesionales,
<https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2014/03/turbinas-kaplan.pdf>
- [7] Energía Solar, <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-hidraulica/turbinas-hidraulicas/turbina-francis>
- [8] Pilar González Marcos,” Turbinas Pelton”. Febrero 2009
https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/6771/mod_resource/content/1/maquinas_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf
- [9] Naciones Unidas, “Objetivos de desarrollo sostenible”
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Con el fin de erradicar la pobreza y proteger el planeta se adoptaron en 2015 un conjunto de objetivos globales. Con el fin de poder alcanzar estos 17 objetivos se considera que todo el mundo tiene que hacer su parte por lo tanto la universidad alienta a los alumnos de 4º de grado y 2º de master a dedicar parte de su trabajo final a contribuir en alguna de estas metas.



Figura 262. Noveno objetivo de desarrollo sostenible de las naciones unidas



Figura 263. Séptimo objetivo de desarrollo sostenible de las naciones unidas



Figura 264. Sexto objetivo de desarrollo sostenible de las naciones unidas

La innovación permite realizar cálculos y análisis de forma computacional, ahorrando tiempo y evitando errores humanos. Además de convertir las centrales hidráulicas en lugares de trabajo mas seguros, con menos posibilidades de averías que pueden llegar a dañar no tan solo el circuito sino también a las personas que trabajan en él.

Los estudios de circuitos hidráulicos han ido mejorando y optimizando sus características de manera que se aprovecha casi toda la energía para la generación de energía eléctrica en las turbinas. La energía se está volviendo más sostenible y ampliamente disponible.

Del mismo modo, la capacidad de las bombas a mejorado, pueden transportar más caudal y a mayor velocidad. Pudiendo llegar a ampliar el acceso a agua potable.