



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACION DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERÍA  
CIVIL**

**“ANÁLISIS DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS Y GOLPE DE ARIETE DE TUBERÍAS  
LARGAS EN EL PROYECTO SALVE FACCHA”**

**DAVID AYALA A.**

**DAVID CATHME**

**DIRECTOR: ING. CARLOS LUIS NAVAS**

**CORRECTORES: ING. PATRICIA GARCÉS**

**ING. LUIS BURBANO**

## *DEDICATORIA*

En primer lugar al creador de todas las cosas que nos ha dado la fortaleza para continuar con este objetivo tan añorado, con toda humildad que nuestro corazón puede emanar dedicamos este trabajo a Dios.

Para las personas que siempre nos brindaron palabras de aliento en los momentos más difíciles de este camino, dándonos su cariño incondicional, tiempo para escuchar nuestros problemas y angustias, que han logrado implementar buenos valores y hábitos a nuestras vidas, este esfuerzo hecho de corazón y con la responsabilidad del caso va dedicado para ustedes que nos dieron la vida.

*(Gino Ayala y Amparo Almeida; Rafael Cathme y Rudht Ortega)*

A nuestros hermanos, que nos dieron la dicha de compartir todos estos años la amistad más grande y sincera en las buenas y en las malas. con todo cariño les dedicamos.

A nuestros compañeros y amigos quienes pusieron su fe en nosotros, llenándonos de alegría y optimismo para superarnos cada día, compartiendo de todo corazón su tiempo y paciencia para brindar conocimientos profesionales y de vida esperando sólo a cambio cariño y amistad.

## *AGRADECIMIENTO*

A nuestros padres por el apoyo brindado a lo largo de nuestra carrera, que nos ha servido de inspiración para esforzarnos día a día, enfrentándonos a las adversidades que tiene la vida.

Agradecemos también a nuestro director de tesis el Ing. Carlos Luis Navas, por habernos brindado la información adecuada para nuestro trabajo y por darnos la oportunidad de conocer al Ing. Edmundo Mendoza quien nos colaboró con su tiempo y paciencia para enseñarnos temas relacionados con la presente tesis.

A los ingenieros Patricia Garcés y Luis Burbano, quienes fueron correctores, por su guía y ayuda a lo largo de la elaboración de la presente disertación.

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por darnos la oportunidad de pertenecer a la facultad de Ingeniería Civil que es una de las más renombradas a nivel del país y Latinoamérica.

## **RESUMEN**

La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) construyo un proyecto a gravedad llamado Sistema Optimización Papallacta con el objetivo de aprovechar el agua cruda de nuevas vertientes naturales, la obra más importante de este proyecto es la presa Salve Faccha que es la encargada de regular el caudal y embalsar el agua para tiempos de estiaje.

El caudal regulado de 1000lt/s por la Presa Salve Faccha es conducido a gravedad por una tubería de presión de 10,8 km de longitud hasta un tanque rompe presiones ubicado en Quillugsha; con el objetivo de aprovechar toda la energía que se tiene entre estos dos puntos con una diferencia de altura de 81,2 m de altura la EPMAPS decidió construir una central hidroeléctrica con el fin de aprovechar al máximo el Sistema Optimización Papallacta.

Nuestro trabajo consiste en dar una solución a los problemas de golpe de ariete que se tendría en la turbina por un cierre repentino de la misma, a pesar de que el tiempo cierre de las turbinas está controlado para evitar estos problemas, siempre se debe considerar un evento crítico en el cual la turbina deba cerrarse instantáneamente, este cierre instantáneo es el que provoca graves accidentes por la sobrepresiones.

La central hidroeléctrica Quillugsha no tiene un sistema de amortiguamiento de sobrepresiones a la entrada de la turbina, nuestra objetivo es dar una solución factible y aplicable a este proyecto, haciendo un análisis con elementos reductores de golpe de ariete, llegando a la conclusión de que la Cámara de aire es la opción más adecuada para La Central Hidroeléctrica Quillugsha, presentando resultados que corroboran nuestro estudio.

Para el estudio realizado de las transientes se utilizó el software Bentley Hammer V8i nombrado varias veces dentro de la presente tesis, ya que el mismo nos ayudó además de presentar nuestra propuesta de solución a los problemas de golpe de ariete por el cierre instantáneo de la turbina, a indicar la ubicación a la que debe colocarse este sistema de amortiguamiento presentando resultados, los mismos que se pueden tomar en cuenta para este proyecto, es decir una propuesta que puede ser tomada en cuenta por la EPMAPS.

## Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. ANTECEDENTES</b> .....                                  | <b>1</b>  |
| 1.1. INTRODUCCIÓN .....                                       | 1         |
| 1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OPTIMIZACIÓN PAPALLACTA.....     | 2         |
| 1.2.1. CAPTACIÓN.....   | 2         |
| 1.2.2. TANQUE ROMPE PRESIÓN 2 – QUILLUGSHA.....               | 4         |
| 1.2.3. CONDUCCIÓN.....  | 5         |
| 1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....                            | 5         |
| 1.4. ALCANCE.....   | 7         |
| 1.5. OBJETIVOS.....   | 7         |
| 1.5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                             | 7         |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....                                 | <b>8</b>  |
| 2.1. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS .....                          | 8         |
| 2.2. COMPONENTES DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....           | 8         |
| 2.2.1. EMBALSE.....   | 8         |
| 2.2.2. PRESA .....  | 9         |
| 2.2.3. CAPTACIÓN.....   | 9         |
| 2.2.4. OBRAS DE CONDUCCIÓN.....                               | 9         |
| 2.2.5. TUBERÍA DE PRESIÓN .....                               | 9         |
| 2.2.6. CASA DE MÁQUINAS .....                                 | 9         |
| 2.2.7. TURBINAS.....  | 10        |
| 2.2.7.1. TURBINAS DE ACCIÓN .....                             | 10        |
| 2.2.7.2. TURBINAS DE REACCIÓN .....                           | 10        |
| 2.2.7.2.1. TURBINA FRANCIS .....                              | 10        |
| 2.2.8. POTENCIA HIDROELÉCTRICA.....                           | 12        |
| <b>2.3. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE</b> ..... | <b>12</b> |
| 2.3.1. TEORÍA DE LA COLUMNA RÍGIDA DE AGUA.....               | 13        |
| 2.3.2. ECUACIONES BÁSICAS.....                                | 15        |
| 2.3.3. CASOS EN LOS QUE SE PUEDE PRODUCIR EL FENÓMENO.....    | 16        |
| 2.3.4. EFECTOS DEL GOLPE DE ARIETE.....                       | 17        |
| 2.3.4. ARTEFACTOS MITIGADORES GOLPE DE ARIETE.....            | 18        |
| 2.3.4.1. TANQUES DE CARGA.....                                | 18        |
| 2.3.4.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO .....                    | 20        |
| 2.3.4.1.2. VENTAJAS DE SU USO.....                            | 20        |
| 2.3.4.1.3. LIMITACIONES.....                                  | 21        |
| 2.3.4.2. CHIMENEAS DE EQUILIBRIO.....                         | 21        |
| 2.3.4.2.1. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO .....                    | 21        |
| 2.3.4.2.2. VENTAJAS .....                                     | 23        |
| 2.3.4.2.3. LIMITACIONES.....                                  | 23        |
| 2.3.4.3. CÁMARA DE AIRE O TANQUE HIDRONEUMÁTICO .....         | 23        |
| 2.3.4.3.1. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO .....                    | 23        |
| 2.3.4.3.2. VENTAJAS.....                                      | 24        |
| 2.3.4.3.3. DESVENTAJAS: .....                                 | 24        |
| <b>3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO</b> .....            | <b>25</b> |
| 3.1. PRESA SALVE FACCHA.....                                  | 25        |
| 3.2. TANQUE ROMPE PRESIÓN 2 – QUILLUGSHA.....                 | 25        |
| 3.3. CONDUCCIÓN SALVE FACCHA – ESTACIÓN QUILLUGSHA .....      | 26        |
| 3.4. CENTRAL HIDROELÉCTRICA QUILLUGSHA .....                  | 27        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.5. EQUIPAMIENTO MECÁNICO.....   | 29        |
| 3.5.1. TURBINA HIDRÁULICA .....   | 29        |
| 3.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA .....  | 29        |
| <b>4. INGRESO DATOS BENTLEY HAMMER V8I Y RESULTADOS.....</b>                                      | <b>30</b> |
| 4.1. PRESA SALVE FACCHA.....  | 30        |
| 4.2. CONDUCCIÓN SALVE FACCHA – ESTACIÓN QUILLUGSHA .....  | 31        |
| 4.2.1. CELERIDAD .....  | 31        |
| 4.3. TURBINA.....   | 35        |
| 4.3.1. CAPACIDAD INSTALADA DE LA TURBINA.....   | 35        |
| FUENTE: BENTLEY HAMMER V8I. “INGRESO DE DATOS” .....  | 37        |
| 4.3.2. LEY DE CIERRE O APERTURA DE LA TURBINA.....  | 37        |
| 4.4. EQUIPOS PARA REDUCIR EL GOLPE DE ARIETE EN EL PROYECTO QUILLUGSHA .....                      | 44        |
| 4.4.1. CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....  | 44        |
| <b>5. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>57</b> |
| 5.1. CONCLUSIONES PARA OBJETIVOS GENERALES .....  | 57        |
| 5.2. CONCLUSIONES PARA OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....   | 57        |
| <b>6. RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>58</b> |
| <b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>8. ANEXOS.....</b>   | <b>60</b> |
| ANEXO 1: DATOS PARA LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN .....  | 60        |
| ANEXO 2: DATOS DE LAS GRÁFICAS DE PRESIÓN PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE .....               | 60        |
| ANEXO 3: DATOS DE LAS GRÁFICAS PARA EL CÁLCULO DE LA UBICACIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO ..... | 60        |
| ANEXO 4: DATOS DE LAS GRÁFICAS PARA EL CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE GAS PARA LA CÁMARA DE AIRE.....   | 60        |
| ANEXO 5: DATOS DE LAS GRÁFICAS PARA EL CÁLCULO DE LA UBICACIÓN DE LA CÁMARA DE AIRE.....          | 60        |
| ANEXO 6: MEMORIA DE CÁLCULO PARA EL VOLUMEN DE LA CÁMARA DE AIRE .....                            | 60        |

## Índice de Tablas.

|   |    |
|---|----|
| TABLA 3- 1. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA SALVE FACCHA.....                       | 25 |
| TABLA 3- 2. CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN.....                    | 26 |
| TABLA 3- 3. QUIEBRES IMPORTANTES DE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN .....              | 27 |
| TABLA 3- 4. FICHA TÉCNICA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA QUILLUGSHA .....         | 27 |
| TABLA 3- 5. DATOS DE LA TURBINA .....   | 29 |
| <br>  |    |
| TABLA 4- 1. DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA CELERIDAD.....                          | 32 |
| TABLA 4- 2. VALORES DE LA CELERIDAD .....                                       | 32 |
| TABLA 4- 3. DATOS PARA EL ÁBACO DE PARMAKIAN .....                              | 32 |
| TABLA 4- 4. CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA Y QUIEBRES IMPORTANTES.....           | 33 |
| TABLA 4- 5. GOLPE DE ARIETE SIN EQUIPAMIENTO MECÁNICO .....                     | 43 |
| TABLA 4- 6. GOLPE DE ARIETE CON CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....                     | 44 |
| TABLA 4- 7. DATOS DE LA CHIMENEA PARA EL INGRESO EN EL BENTLEY HAMMER V8I ..... | 46 |
| TABLA 4- 8. GOLPE DE ARIETE CON CHIMENEA DE EQUILIBRIO. ....                    | 49 |
| TABLA 4- 9. DATOS DE LA CÁMARA PARA INGRESO EN EL BENTLEY HAMMER .....          | 51 |

|   |    |
|---|----|
| TABLA 4- 10. VALORES DE LA CURVA DE PRESIÓN DE GAS VS PORCENTAJE DE GOLPE DE ARIETE ..... | 52 |
| TABLA 4- 11. PORCENTAJE DE GOLPE DE ARIETE PARA DISTINTAS DISTANCIAS DE LA TURBINA.....   | 53 |
| TABLA 4- 12. GOLPE DE ARIETE CON CÁMARA DE AIRE .....                                     | 56 |

## Índice de Gráficos.

|   |    |
|---|----|
| GRÁFICO 1- 1. TRAMO 1 PRESA SALVE FACCHA- TRP2 QUILLUGSHA.....                            | 2  |
| GRÁFICO 1- 2. PRESA SALVE FACCHA .....  | 3  |
| GRÁFICO 1- 3. TANQUE ROMPE PRESIÓN .....  | 4  |
| GRÁFICO 2- 1. CENTRAL HIDROELÉCTRICA .....  | 8  |
| GRÁFICO 2- 2. TURBINA FRANCIS .....   | 11 |
| GRÁFICO 2- 3. PROCESO DEL GOLPE DE ARIETE CON LLAVE DE PASO .....                         | 13 |
| GRÁFICO 2- 4. TEORÍA DE LA COLUMNA RÍGIDA .....   | 14 |
| GRÁFICO 2- 5. TANQUE DE CARGA .....   | 19 |
| GRÁFICO 2- 6. CHIMENEA DE EQUILIBRIO SIMPLE .....   | 21 |
| GRÁFICO 2- 7. CÁMARA DE AIRE .....  | 24 |
| GRÁFICA 3- 1. UBICACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA QUILLUGSHA .....                     | 29 |
| GRÁFICA 4- 1. INGRESO DE DATOS DE LA PRESA SALVE FACCHA .....                             | 30 |
| GRÁFICA 4- 2. ÁBACO VELOCIDAD DE ONDA DE PRESIÓN .....                                    | 33 |
| GRÁFICA 4- 3. INGRESO DE DATOS PARA LOS PUNTOS DE QUIEBRE.....                            | 34 |
| GRÁFICA 4- 4. INGRESO DE DATOS PARA LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN .....                        | 34 |
| GRÁFICA 4- 5. INGRESO DE DATOS DE LA TURBINA .....  | 36 |
| GRÁFICA 4- 6. INGRESO DE DATOS CURVA DE LA TURBINA .....                                  | 37 |
| GRÁFICA 4- 7. VENTANA PARA LEY DE CIERRE O APERTURA .....                                 | 37 |
| GRÁFICA 4- 8. LEY DE CIERRE O APERTURA PARA RECHAZO DE CARGA INSTANTANEA .....            | 38 |
| GRÁFICA 4- 9. LEY DE CIERRE O APERTURA PARA RECHAZO DE CARGA .....                        | 38 |
| GRÁFICA 4- 10. LEY DE CIERRE O APERTURA PARA VARIACIÓN DE CARGA .....                     | 39 |
| GRÁFICA 4- 11. LEY DE CIERRE O APERTURA PARA ACEPTACIÓN DE CARGA.....                     | 39 |
| GRÁFICA 4- 12. GRADIENTE HIDRÁULICO.....  | 40 |
| GRÁFICA 4- 13. PRESIÓN EN CADA PUNTO DE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN .....                    | 40 |
| GRÁFICA 4- 14. RECHAZO DE CARGA INSTANTÁNEA.....  | 41 |
| GRÁFICA 4- 15. RECHAZO DE CARGA .....   | 42 |
| GRÁFICA 4- 16. VARIACIÓN DE CARGA .....   | 42 |
| GRÁFICA 4- 17. VARIACIÓN DE CARGA.....  | 43 |
| GRÁFICA 4- 18. INGRESO DE DATOS PARA EL PUNTO DE UBICACIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO.. | 45 |
| GRÁFICA 4- 19. INGRESO DE DATOS PARA EL TUBO DE CONEXIÓN CON LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO..  | 45 |
| GRÁFICA 4- 20. CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....  | 46 |
| GRÁFICA 4- 21. INGRESO DE DATOS PARA CHIMENEA DE EQUILIBRIO. ....                         | 47 |
| GRÁFICA 4- 22. RECHAZO DE CARGA INSTANTÁNEA CON CHIMENEA DE EQUILIBRIO .....              | 47 |
| GRÁFICA 4- 23. RECHAZO DE CARGA CON CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....                           | 48 |
| GRÁFICA 4- 24. VARIACIÓN DE CARGA CON CHIMENEA DE EQUILIBRIO .....                        | 48 |
| GRÁFICA 4- 25. ACEPTACIÓN DE CARGA CON CHIMENEA DE EQUILIBRIO .....                       | 49 |
| GRÁFICA 4- 26. INGRESO DE DATOS DEL PUNTO DE UBICACIÓN DE LA CÁMARA DE AIRE .....         | 50 |

|  |    |
|--|----|
| GRÁFICA 4- 27. INGRESO DE DATOS DEL TUBO DE CONEXIÓN ENTRE LA CÁMARA Y LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN..... | 50 |
| GRÁFICA 4- 28. CURVA DE PRESIÓN DE GAS VS GOLPE DE ARIETE. ....                                      | 52 |
| GRÁFICA 4- 29. INGRESO DE DATOS EN EL BENTLEY HAMMER PARA LA CÁMARA DE AIRE .....                    | 53 |
| GRÁFICA 4- 30. RECHAZO DE CARGA INSTANTÁNEA CON CÁMARA DE AIRE.....                                  | 54 |
| GRÁFICA 4- 31. RECHAZO DE CARGA CON CÁMARA DE AIRE .....   | 55 |
| GRÁFICA 4- 32. VARIACIÓN DE CARGA CON CÁMARA DE AIRE .....   | 55 |
| GRÁFICA 4- 33. ACEPTACIÓN DE CARGA CON CÁMARA DE AIRE.....   | 56 |

## **1. ANTECEDENTES**

### **1.1. Introducción**

La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de la Ciudad de Quito, (EPMAPS) es la responsable de operar el Sistema Papallacta, en operación desde 1990, contempla la captación y el tratamiento de 3.000 litros por segundo (l/s), caudal que es conducido mediante un sistema mixto de bombeo y gravedad, hasta la Planta de Bellavista en la ciudad de Quito.

Con el propósito de suministrar agua cruda, que al potabilizarla, será usada para el consumo en el Distrito Metropolitano de Quito, la EPMAPS diseñó y construyó el proyecto a gravedad denominado Optimización del Sistema Papallacta (OSP), el cual entro en funcionamiento progresivamente desde enero de 1998. El sistema aporta un caudal de 1400 l/s al Sistema Papallacta.

El proyecto OSP aprovecha el recurso hídrico de varias vertientes y lagunas localizadas en el sector alto de Papallacta, a través de una serie de infraestructura de captaciones, conducciones y sistema de control, que permiten que el agua recolectada fluya por gravedad hasta la entrada del túnel Quito. De esta manera el sistema Optimización le permite a la EPMAPS ahorrar ingentes recursos económicos.

La obra más importante del Proyecto OSP es la presa Salve Faccha misma que regula el caudal, mantiene una reserva para las épocas de estiaje y dota de manera eficiente agua para la ciudad de Quito. El caudal desciende desde la presa Salve Faccha ubicada en la cota 3880 msnm hasta los tanques del reservorio en Papallacta en la cota 2840.

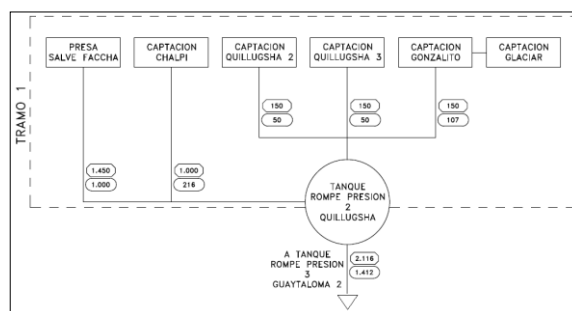
Para obtener un mejor funcionamiento del sistema hidráulico, se plantearon alternativas para eliminar la presión y entre las alternativas se estudió la de aprovechar el desnivel existente entre la Presa Salve Faccha y el Tanque Rompe Presión 2 - Quillugsha, para producir energía mediante una turbina hidráulica, la cual será la encargada de regular las condiciones hidráulicas de la conducción para su adecuado funcionamiento; y, transformar la energía cinética que tiene el fluido, en energía mecánica, la que posteriormente se transformará en energía eléctrica.

Actualmente, se encuentra instalada una válvula disipadora de energía, tipo Polyjet de 20”, marca C.M. Bailey Industries Inc., en la Estación de Control donde se ubica el Tanque Rompe Presión 2 - Quillugsha (TRP 2). (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

## 1.2. Descripción del Sistema Optimización Papallacta

El funcionamiento actual del Proyecto Optimización Papallacta depende de una infraestructura de captaciones, conducciones y sistema de control; compuesto de 3 tramos. El caudal regulado que entrega el Tramo 1 es de 1.412 l/s y consta de las siguientes captaciones: Captación Chalpi, Quillugsha 2, Captación Quillugsha 3, Captación Gonzalito y Glaciar.; que sumados con los Tramos 2 y 3, el OSP entrega un total de 2.567 l/s a la Estación Elevadora en Papallacta, para luego ser conducida para generación en la Central Hidroeléctrica Recuperadora y luego dirigida hacia la Planta de Tratamiento de agua potable de Bellavista, al nororiente de la ciudad de Quito. (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

**Gráfico 1- 1. Tramo 1 Presa Salve Faccha- TRP2 Quillugsha**



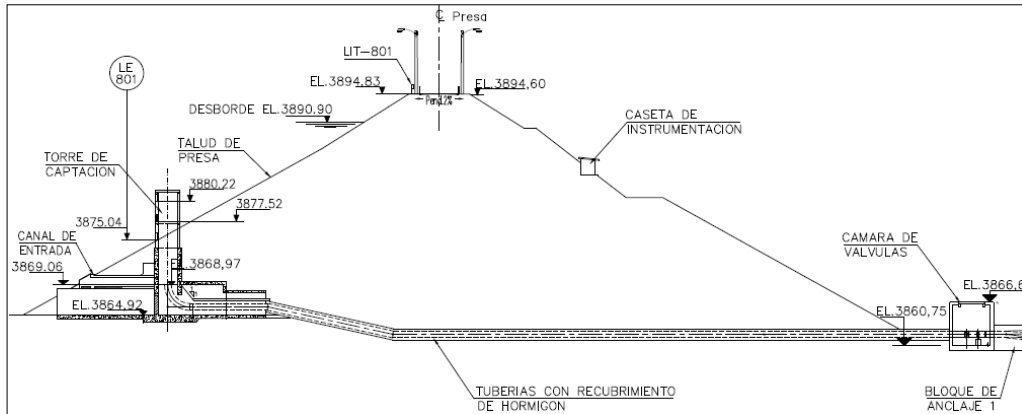
**Fuente:** EPMAPS, “Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado”

### 1.2.1. Captación

La captación con mayor aportación de caudal es la presa Salve Faccha, la misma que fue construida con dos propósitos; como regulador de caudal de ingreso y como reserva de 10.500.000 m<sup>3</sup> de volumen de agua. La presa se compone de materiales sueltos. Tiene una altura máxima de 44 m y una longitud de la corona de 190 m.

La estructura de toma trabaja sumergida para una capacidad máxima teórica de 1.200 l/s.

**Gráfico 1- 2. Presa Salve Faccha**



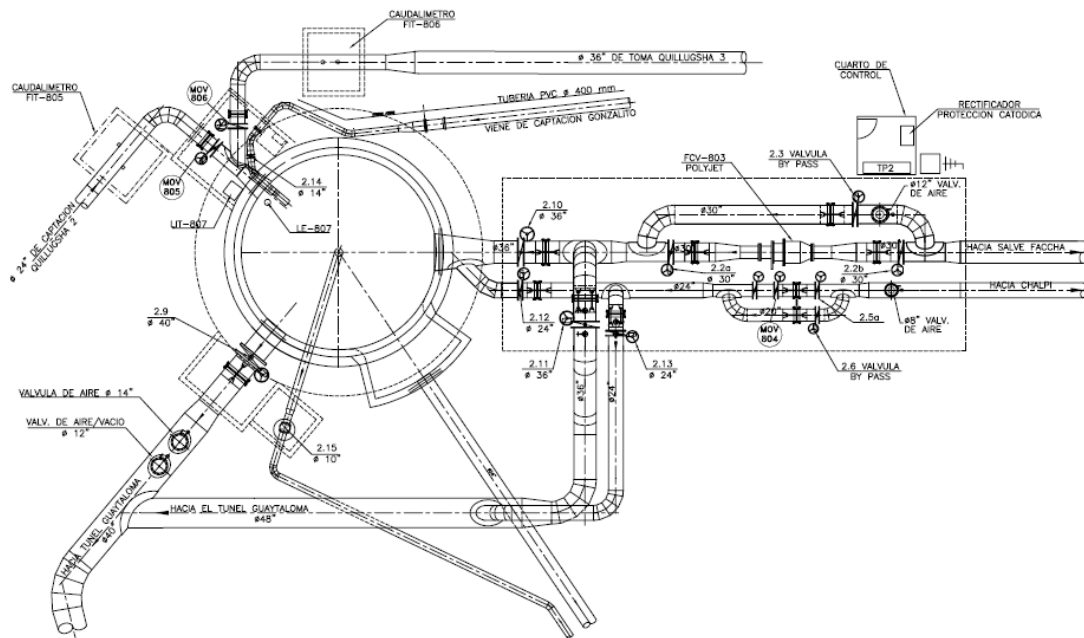
Fuente: EPMAPS, “Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado”

En la parte inferior de la presa se encuentra una tubería de 1,20 metros de diámetro que funciona como desagüe, la estructura de control de excesos está conformado por un vertedero lateral de 8 m de ancho y una rápida de 470 m que trabaja a flujo libre para una capacidad máxima de descarga de 20 m<sup>3</sup>/s

La torre de captación, tiene dos compartimentos conectados independientemente a tuberías de acero: uno a 3.869,42 msnm (al eje del tubo de 33”) para la limpieza de fondo del embalse; y el segundo con ventanas de aducción a 3.875,04 y 3.880,22 msnm (al lado inferior de las ventanas de 0,85 x 1,00 metros cada una), para la conducción hacia el Tanque Rompe Presión TRP 2, ubicado en Quillugsha. (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

## 1.2.2. Tanque Rompe Presión 2 – Quillugsha

Gráfico 1- 3. Tanque Rompe Presión



Fuente: EPMAPS, “Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado”

Debido a que la presión que se genera desde el embalse hasta Quillugsha, se construyeron tanques rompe presiones con la finalidad de disminuir el espesor de la tubería de presión. El primero está ubicado al inicio de la tubería, inmediatamente después de la presa Salve Faccha a una cota de 3.866,00 msnm.

El segundo Tanque se encuentra a los 10.780 m. de la Presa Salve Faccha a la cota de 3802,00 msnm cerca de la quebrada Quillugsha, denominado Tanque Rompe Presión 2 – Quillugsha.

El proyecto Optimización Sistema Papallacta además de brindar agua cruda, reduce las presiones que se generan producto de la diferencia de altura entre el nivel de desborde de la presa Salve Faccha a 3.890,90 msnm y el Tanque Rompe Presión 2 (TRP2) que está ubicado a los 10.780 metros de distancia a la cota de 3802,00 msnm. Cerca de la quebrada Quillugsha.

La Estación Quillugsha – TRP2 está conformada por dos tuberías de acero, una para recibir el caudal de conducción de Chalpi de 24” y la otra de 36” de diámetro y 6,35

mm de espesor, proveniente de Salve Faccha, la cual para disminuir la presión está conectada a una válvula Polyjet de 20” que funciona con una apertura variable según el caudal despachado por la presa. Como la presa entrega un caudal constante a través de la tubería de conducción de 1.000 l/s, la apertura es de 80%. Su operación es manual desde el pie de válvula, y de manera automática remota a través del SCADA.

Las tuberías que forman parte de este sistema se encuentran montadas en bloques de apoyo simples independientes de la parte estructural de la casa de válvulas; de manera que el funcionamiento de la válvula Polyjet y cualquier posible vibración del sistema, sea natural o irregular, no se transmitan al resto de obras civiles, eliminando fisuras por vibraciones en el sistema de obras civiles de la casa de válvulas, el tanque o los apoyos. (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

### **1.2.3. Conducción**

La longitud total de la tubería de conducción va desde la captación en Salve Faccha hasta el TRP 2 y es de 10,78 Km utilizando una tubería de acero A283-GRADO C. El trazado de la tubería se encuentra en su mayoría cerca de caminos de acceso con la finalidad de evitar la construcción de vías adicionales, además en su mayor longitud la tubería se encuentra enterrada. (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

### **1.3. Descripción del problema**

Según la información proporcionada por los técnicos de la EPMAPS, la tubería de presión y la válvula disipadora de energía Polyjet ubicada en el Tanque Rompe Presión 2 - Quillugsha (TRP 2) sufren fuertes ruidos y vibraciones continuas, por este problema se procede a realizar el estudio de comprobación del comportamiento hidráulico para definir si el motivo de este fenómeno se debe a causas hidráulicas.

Del análisis realizado, se define que el funcionamiento hidráulico de la tubería de presión por el trazado de la tubería y los quiebres que presenta, podría ser crítico para

caudales superiores a 1248 l/s pero para caudales inferiores, presenta una estabilidad hidráulica.

Las presiones a la que está sometida la tubería de presión por causa del manejo normal a la que está expuesta la tubería por la operación de la presa Salve Faccha, son soportadas por las características físicas de la tubería, sin llegar a los límites de diseño ni al valor de la fluencia del material. Consecuentemente no existe riesgo en lo relacionado a sobrepresiones que puedan poner en riesgo el abastecimiento de agua a Quito.

Debido a que la tubería se encuentra enterrada en su mayor parte, tiene como sostenimiento frente a las variaciones de caudales y sismos, el peso propio del suelo, esta situación puede ocasionar la transmisión de vibraciones a lo largo de la tubería y ser causante del fenómeno, sin embargo en el actual diseño de la mini central Quillugsha contempla la construcción de anclajes los cuales podrían suplir esta ausencia, actualmente, la tubería de presión y la válvula Polyjet sufren vibraciones continuas.

El sistema propuesto para utilizar la energía hidráulica es la Minicentral Hidroeléctrica Quillugsha, que consiste en la construcción e implementación de una nueva caseta de generación que utilizará la captación y conducción de Salve Faccha, como estructuras existentes construidas por la EPMAPS para el proyecto de Optimización del Sistema Papallacta, OSP, para abastecimiento de agua para la ciudad de Quito. La potencia instalada es de 547,88 kW, implementando una turbina tipo Francis de eje horizontal.

Al tener una caída de columna de agua de 85 m, y una tubería de conducción de 10.78 km de longitud, desde la presa Salve Faccha al Tanque Rompe Presión 2 - Quillugsha (TRP 2), se presenta un problema de transientes hidráulicos, el golpe de ariete el cual puede dañar a la turbina.

En esta disertación de grado se analizó el comportamiento de la tubería de conducción ante el problema del golpe de ariete por las sobrepresiones, con y sin equipo de protección, por lo cual se propone colocar una cámara de aire, que tiene

como finalidad proteger a la turbina que se colocara en la Minicentral Hidroeléctrica Quillugsha y a la tubería de presión del golpe de ariete producido por el cierre brusco, o las maniobras normales de apertura y cierre de la turbina, consecuentemente no sería un factor de ayuda para las vibraciones, esto se lo analizó con la ayuda del programa Bentley Hammer Vi8.

#### **1.4. Alcance**

El alcance de esta disertación de grado es:

- Aplicación de software especializado en el análisis de los elementos (chimenea de equilibrio y cámara de aire) implementado para la solución del problema del golpe de ariete.
- Análisis y comparación de resultados para la implementación elementos (chimenea de equilibrio y cámara de aire) de amortiguamiento.
- Ubicación de elementos (chimenea de equilibrio y cámara de aire) necesarios para el amortiguamiento de la presión hidráulica producida por el golpe de ariete en lugares estratégicos

#### **1.5. Objetivos.**

Objetivo general

- Definir el comportamiento de la tubería de conducción desde Salve Faccha, durante la operación de la Central Hidroeléctrica Quillugsha.

##### **1.5.1. Objetivos específicos**

- Analizar el comportamiento de la tubería de conducción para transientes hidráulicos.
- Determinar el lugar de ubicación de los elementos (chimenea de equilibrio y cámara de aire) van amortiguar el golpe de ariete.
- Analizar la tubería de conducción una vez implementado los elementos de amortiguamiento.

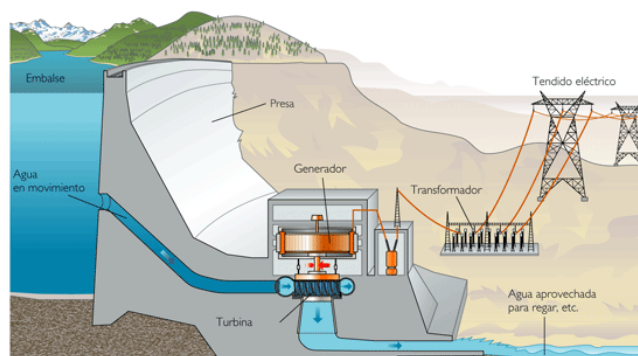
## 2. Marco teórico

### 2.1. Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas son obras civiles construidas con el fin de aprovechar los grandes volúmenes de agua que tienen los ríos, para generar energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a los generadores.

Las centrales hidroeléctricas utilizan la energía potencial gravitatoria de un cauce natural que se encuentra en una topografía con desnivel, aprovechando la pendiente del mismo. El agua viaja a través de canales o tuberías hasta llegar a donde se encuentran las turbinas, las mismas que transmiten la energía a un generador que es el encargado de transformarla en energía eléctrica. (Curso de Centrales Hidroeléctrica del Ing. Carlos Luis Navas, 2014).

**Gráfico 2- 1. Central Hidroeléctrica**



**Fuente:** <http://www.ecovive.com/?s=central+hidroelectrica&x=11&y=13>, “Central Hidroeléctrica”

### 2.2. Componentes de una Central Hidroeléctrica

#### 2.2.1. Embalse

Es un depósito de agua, el mismo que puede ser natural o artificial, que sirve para regular la magnitud y la distribución del caudal de un río en el tiempo. Los embalses hacen posible la utilización de los excesos de agua cuando hay periodos de estiaje. (Curso de Centrales Hidroeléctricas del Ing. Carlos Luis Navas, 2014).

### **2.2.2. Presa**

La presa es una estructura sólida, que sirve para detener el cauce que normalmente tiene el río, para acumular el nivel del agua y regularlo mediante un conducto, el mismo que regula el caudal para que este se permanezca dentro de la tubería de conducción. (Curso de Centrales Hidroeléctricas del Ing. Carlos Luis Navas, 2014).

### **2.2.3. Captación**

Es la estructura hidráulica que se debe construir antes del embalse o la presa y sirve para derivar la dirección del cauce de una vertiente natural de agua, para ser utilizada en un fin específico. (Curso de Centrales Hidroeléctricas del Ing. Carlos Luis Navas, 2014).

### **2.2.4. Obras de conducción**

Esta construcción es la encargada de llevar el caudal de agua hasta las turbinas, las mismas que pueden ser naturales o artificiales, según los requerimientos del proyecto o de las limitaciones de la naturaleza. (Curso de Centrales Hidroeléctricas del Ing. Carlos Luis Navas, 2014).

### **2.2.5. Tubería de presión**

Las tuberías de presión son construidas con el fin de soportar la presión generada por la diferencia de altura, y tienen como objeto conducir el agua desde donde se tiene una energía potencial hasta la casa de máquinas, en algunos casos comienza desde el embalse en otros desde el tramo final del túnel de conducción o desde la cámara de presión. (Curso de Centrales Hidroeléctricas del Ing. Carlos Luis Navas, 2014).

### **2.2.6. Casa de máquinas**

Es el lugar donde se encuentra el conjunto de equipos usados directa o indirectamente para la generación de energía eléctrica, incluidos los edificios y obras civiles necesarias, compuertas de entrada y de salida, las mismas que se ocupan cuando se necesita hacer algún tipo de mantenimiento y poder evacuar el agua que se

encuentra dentro de la casa de máquinas. (Curso de Centrales Hidroeléctricas del Ing. Carlos Luis Navas, 2014).

### **2.2.7. Turbinas**

La turbina es el elemento principal de una central hidroeléctrica, con el cual se transforma la energía hidráulica en energía mecánica y está conectada directamente con el generador para trabajar conjuntamente y atender la demanda de energía eléctrica. (Navas, 2014, p. 6).

#### **2.2.7.1. Turbinas de acción**

En este tipo de turbinas las presiones a la entrada y salida del rodete son iguales, adicional a esto el caudal cambia solamente de dirección mas no de aceleración. El tipo de turbina de acción más utilizado es la turbina Pelton, aunque existen otros como la Turgo con inyección lateral y la turbina de doble impulsión o de flujo cruzado, también conocida por turbina Ossberger o Banki-Michell. Tomado de Ortiz (2011, p. 334).

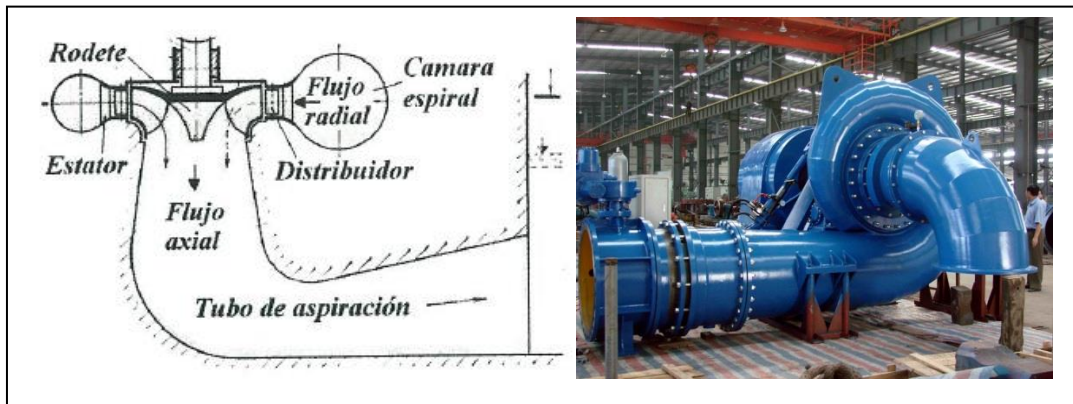
#### **2.2.7.2. Turbinas de reacción**

Este tipo de turbinas cuentan con un diseño de rotor que permite aprovechar la presión que aún le queda al agua a su entrada para convertirla en energía cinética. Esto hace que el agua al salir del rotor tenga una presión por debajo de la atmosférica. Las turbinas de reacción más utilizadas son las Francis y la Kaplan. Tomado de Ortiz (2011, p. 334).

##### **2.2.7.2.1. Turbina Francis**

Esta turbina se adapta muy bien a todo tipo de saltos y caudales, y cuenta con un rango de utilización que va de los 40-60 hasta los 500-700 metros. Se caracteriza por recibir el fluido de agua en dirección radial, y a medida que ésta recorre la máquina hacia la salida se convierte en dirección axial.

**Gráfico 2- 2. Turbina Francis**



Fuente: <http://spanish.hydropower-turbine.com>, “turbinas Francis” y Ramiro Ortiz Flores, “Pequeñas Centrales Hidroeléctricas”

El rendimiento de las turbinas Francis es superior al 90% en condiciones óptimas de funcionamiento. Permite variaciones de caudales entre el 40% y el 105% del caudal de diseño, y en salto entre 60% y el 125% del nominal. (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Ramiro Ortiz Flores, 2011).

En una turbina Francis o de reacción el criterio para golpe de ariete es no sobrepasar el 50% de sobrepresión, no sobrepasar el -15% de subpresión y la sobrevelocidad no debe sobrepasar el promedio de la velocidad de embalamiento y la de operación. (Curso De Golpe de Ariete del Ing. Edmundo Mendoza, 2009)

Los elementos que componen este tipo de turbinas son los siguientes:

Distribuidor.- Contiene una serie de álabes fijos y móviles que orientan el agua hacia el rodete.

Rodete.- Formado por una corona de paletas fijas, con una forma tal que cambian la dirección del agua de radial a axial.

Cámara de entrada.- Puede ser abierta o cerrada, y tiene forma espiral para dar una componente radial al flujo de agua.

Tubo de aspiración o de salida de agua.- Puede ser recto o acodado, y cumple la función de mantener la diferencia de presiones necesaria para el buen

funcionamiento de la turbina. (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Ramiro Ortiz Flores, 2011).

### **2.2.8. Potencia hidroeléctrica**

La potencia es una de las principales características de una central eléctrica. En el caso de las centrales hidroeléctricas está en función del desnivel existente entre el nivel medio del embalse y el nivel medio de las aguas debajo de la central, y del caudal máximo turbinable, además de las características de las turbinas y de los generadores usados en la transformación.

La potencia de una central hidroeléctrica se mide generalmente en vatios (W) y se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$Pe = \rho \cdot 9.81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot Q \cdot H$$

Dónde:

Pe = potencia en vatios (W)

$\rho$  = densidad del fluido en kg/m<sup>3</sup>

$\eta_t$  = rendimiento de la turbina hidráulica (entre 0,85 y 0,94)

$\eta_g$  = rendimiento del generador eléctrico (entre 0,92 y 0,97)

$\eta_m$  = rendimiento mecánico del acoplamiento turbina alternador (0,95/0,99)

Q = caudal turbinable en m<sup>3</sup>/s

H = desnivel disponible entre la captación y el eje de la turbina, en metros (m)

### **2.3. Descripción del fenómeno de golpe de ariete**

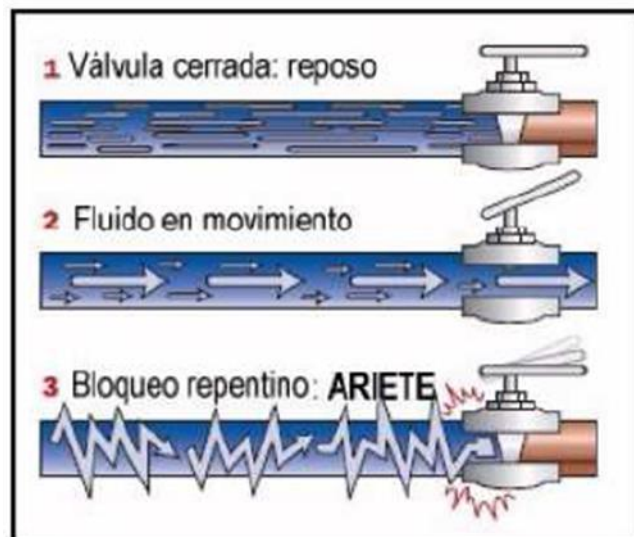
El golpe de ariete o también conocido golpe hidráulico fue descrito por primera vez en el año 1889 por N. J. Zhukovsky, un eminente científico ruso. Zhukovsky nos dice que el golpe de ariete es la variación de la presión en los conductos de agua, provocada por el aumento o la disminución brusca de la velocidad de movimiento del líquido, esta variación puede ser ocasionada por el cierre o abertura de una llave,

grifo o válvula; también puede producirse por la puesta en marcha o detención de un motor o bomba hidráulica.

Siempre que el tiempo de cierre de la válvula sea inferior al tiempo de prolongación de ondas de choque (desde la válvula hasta la embocadura de la tubería y vuelta de nuevo hasta la válvula) se manifestará este fenómeno.

Un ejemplo sencillo lo tenemos en el efecto que se produce sobre la tubería cuando se cierra rápidamente una llave de paso, un grifo, etc.

**Gráfico 2- 3. Proceso del golpe de ariete con llave de paso**



Fuente: <http://larocamadrehg.blogspot.com/2013/03/golpe-de-ariete-o-pulso-de-zhukowski.html>, “Proceso del golpe de ariete con llave de paso”

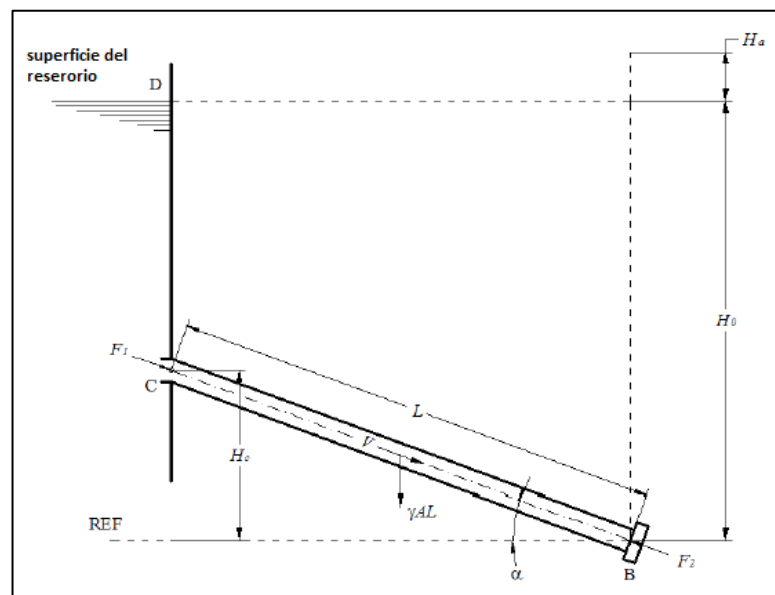
La sobrepresión se origina en la válvula que se cierra, y viaja por la tubería a una velocidad que se llama celeridad “C”. La celeridad es la velocidad de propagación de la onda.

### **2.3.1. Teoría de la Columna Rígida de Agua.**

El fenómeno del golpe de ariete analizado en su forma más simple, toma el nombre de columna rígida de agua y toma las siguientes consideraciones: Las paredes de la tubería no sufren ningún tipo de deformación a causa de la sobrepresión.

- La tubería se encuentra llena en todo momento.
- El líquido es incompresible.
- Pérdidas por fricción despreciables.
- La velocidad del fluido es uniforme en cualquier sección transversal de la tubería.
- Presión del fluido uniforme en cualquier sección transversal de la tubería.
- Los cambios en altura de velocidad son significantes en comparación con los cambios de presión.
- El diámetro de la tubería constante y con el nivel del reservorio constante.

**Gráfico 2- 4. Teoría de la columna rígida**



Fuente: Parmakian, "Waterhammer Analysis"

Se realiza el siguiente análisis equilibrando fuerzas:

$L$ = longitud de la tubería.

$V$ = velocidad del fluido.

$A$ = área de la sección de la tubería.

$\gamma$ = peso específico del fluido.

$H_0$  = altura en el punto B por la presión del fluido

$H_a$  = altura producida por el golpe de ariete.

$H_c$  = altura en el punto C por la elevación.

$\alpha$  = ángulo de inclinación de la tubería.

$F_1$  y  $F_2$  = fuerzas resultantes en los puntos C y B

### 2.3.2. Ecuaciones Básicas

Cuando el sistema de cierre comienza a actuar, produce una fuerza que actúa sobre toda la columna de agua ( $F_2$ ). Planteando el equilibrio dinámico al líquido, mediante la segunda ley de Newton y tomando como dirección positiva la dirección del flujo se obtiene:

$$F_1 = (H_0 - H_c)A\gamma$$

$$F_2 = (H_0 + H_a)A\gamma$$

$$(H_0 - H_c)A\gamma + LA\gamma \sin(\alpha) - (H_0 + H_a)A\gamma = \frac{\gamma}{g} LA \frac{dV}{dt}$$

Pero:

$$H_c = L \sin(\alpha)$$

Reemplazando y simplificando se obtiene:

$$H_a = -\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \tag{2.1}$$

El caudal que pasa por la válvula es:

$$Q_0 = AV_0 = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_0} \tag{2.2}$$

Donde:

$A_v$  = área de la válvula.

$C_d$  = coeficiente de descarga de la válvula.

$g$  = constante de gravedad.

$V_0$  = velocidad inicial del fluido.

Si reordenamos la ecuación tenemos:

$$V_0 = B_0 \sqrt{H_0}$$

Donde:

$$B_0 = \frac{(C_d A_v)_0 \sqrt{2g}}{A}$$

En cualquier momento durante el movimiento:

$$V = B \sqrt{H_0 + H_a}$$

Si realizamos una división:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{B}{B_0} \sqrt{1 + \frac{H_a}{H_0}} = \tau \sqrt{1 + \frac{H_a}{H_0}} \quad (2.3)$$

$B/B_0$  es designado como  $\tau$ , y es una función del tiempo que define la relación de la apertura efectiva de la válvula en cualquier instante de tiempo respecto de la apertura efectiva de la válvula en tiempo 0.

Las ecuaciones (2.1) y (2.3) son las ecuaciones básicas de golpe de ariete para la teoría de columna rígida para el cierre de compuerta. (Waterhammer Analysis de Parmakian, 1963)

### 2.3.3. Casos en los que se puede producir el fenómeno

Además del caso ejemplificado anteriormente, existen diversas maniobras donde se induce el fenómeno:

- Cierre y Apertura de Válvulas.
- Arranque de Bombas y Turbinas.

- Detención de Bombas y Turbinas.
- Funcionamiento inestable de bombas y turbinas.
- Llenado inicial de tuberías.
- Cambios de elevación del embalse.

En general, el fenómeno aparecerá cuando, por cualquier causa, en una tubería se produzcan variaciones de velocidad y, por consiguiente, en la presión. Todos estos eventos deben ser considerados en las etapas de diseño y operación de los sistemas hidráulicos, los cuales deben ser capaces de soportar condiciones de operación tanto normales como anormales.

#### **2.3.4. Efectos del golpe de ariete**

Cualquier perturbación sobre la velocidad del flujo en un sistema hidráulico genera ondas de presión que se propagan a lo largo y ancho de la red a la velocidad del sonido, generando con ello los siguientes efectos y consecuencias:

Efecto: altas presiones → consecuencia: falla o rotura de tuberías, pérdidas de agua, etc.

Efecto: bajas presiones → consecuencia: intrusión de aire y/o contaminantes.

Efecto: vibraciones → consecuencia: deformaciones, falla o rotura de tuberías, etc.

Al analizar las consecuencias del golpe de ariete es posible concluir que el daño proveniente de las altas presiones se debe a la interacción entre la carga y la materia (tubería, agua), produciéndose vibraciones, deformaciones, fatigas y roturas. Las bajas presiones inducen una interacción entre la materia y el medio (aire), generando con ello el colapso de la tubería o corrosión.

Hace falta eliminar las causas que provocan la aparición del golpe hidráulico, es decir, no permitir una variación rápida de la velocidad de movimiento del agua en las tuberías, o sea no se puede abrir o cerrar rápidamente las válvulas. En la mayoría de los casos es posible hacer esto. Por lo que se empezaron a desarrollar y utilizar tipos de llaves en vez de grifos de tapón. Con ayuda de las llaves el flujo de líquido en las

tuberías se detiene con relativa lentitud. Como conclusión podemos decir que el método más eficiente de reducir el golpe de ariete es el cierre lento de la llave.

Sin embargo, en una serie de casos es imposible realizarlo. En el caso de las turbinas hidráulicas, es imprescindible cerrar rápidamente su dispositivo guía y cortar el suministro de agua a la turbina. De lo contrario, la frecuencia de rotación de la turbina aumenta bruscamente, lo que puede conducir a su deterioro. Pero por otro lado tenemos que el cierre rápido del dispositivo guía provocará inevitablemente el golpe hidráulico.

### **2.3.4. Artefactos mitigadores golpe de ariete**

#### **2.3.4.1. Tanques de carga**

Los tanques de carga o presión son equipos amortiguadores de energía que unen las tuberías o canales de baja presión con la tubería forzada o de presión.

El proceso de conversión de energía es gravitacional; las velocidades en las conducciones son diferentes, siendo baja antes de ingresar al tanque de carga y alta en la tubería de presión.

Para diseñar un tanque de carga se debe tener en cuenta ciertos parámetros como son: caudal, volumen del tanque, altura de agua sobre la entrada de la tubería de presión, la velocidad del agua en los elementos del tanque de presión, la topografía del terreno y la geología de la zona. Además el tanque debe cumplir con las siguientes funciones:

Debe tener un volumen de agua necesario que permita satisfacer a las turbinas cuando exista aumentos bruscos de demanda.

Disponer de un volumen que le permita amortiguar el golpe de ariete, debido al cierre brusco de las válvulas.

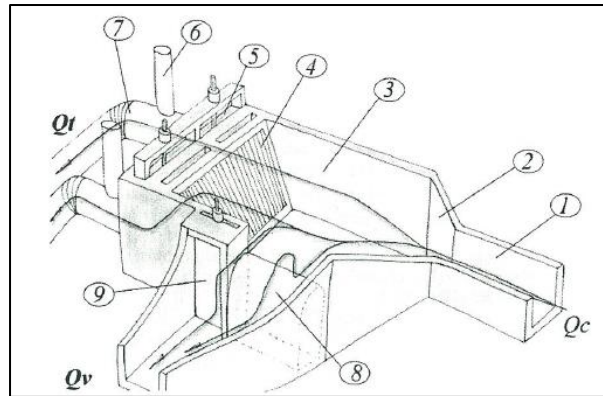
Mantener sobre la tubería un volumen de agua suficiente que evite el ingreso de aire.

Impedir el ingreso de materiales sólidos y flotantes a la tubería de presión.

Decantar materiales sólidos en suspensión y permitir su lavado.

Verter el exceso de agua en las horas en las que el caudal de agua consumido por las turbinas sea inferior al caudal de diseño.

**Gráfico 2- 5. Tanque de Carga**



Fuente: Ramiro Ortiz Flores, "Pequeñas Centrales Hidroeléctricas"

- 1) Transición del fluido
- 2) Canal
- 3) Reservorio
- 4) Rejilla
- 5) Compuerta de cierre al paso de agua
- 6) Venteo
- 7) Tubería de presión
- 8) Aliviadero
- 9) Compuerta de fondo

(Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Ramiro Ortiz Flores, 2011)

#### **2.3.4.1.1. Descripción del mecanismo**

La cámara de carga está conformada por un reservorio con la capacidad suficiente para garantizar la partida o parada brusca de las turbinas; esta se conecta al canal por medio de una transición y del cual el agua pasa a la tubería de presión a través de una rejilla, la cual evita la entrada de elementos sólidos flotantes.

También existe una compuerta de cierre al paso del agua ubicada entre la rejilla y la tubería de presión, la misma que se acompaña con unas guías en las paredes para la instalación de compuertas de apoyo, necesarias en reparaciones como elementos de seguridad. Los excesos de agua en el tanque se vierten a través de un aliviadero, acompañado de una compuerta de fondo que permite su vaciado y el lavado de sedimentos. El aliviadero y la compuerta se conectan a un canal común que lleva el agua al río. (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Ramiro Ortiz Flores, 2011)

#### **2.3.4.1.2. Ventajas de su uso**

- Una de las ventajas principales de los tanques de carga ocurre después de la interrupción en la corriente, el volumen agua en el tanque de carga constituye una fuente de energía potencial, sirve para amortiguar las ondas de presión (golpe de ariete) causadas por el cierre brusco de las turbinas, restableciendo rápidamente la estabilidad.
- En caso de mantenimiento o reparación de las turbinas, se desvía el flujo de agua a través de un vertedero de descarga lateral con capacidad para verter el caudal de entrada por el canal de conducción.
- Además, la cámara de carga es necesaria para aquietar el agua y puede tener incorporados elementos para permitir la decantación de arenas y partículas sólidas. En dicho caso, la cámara de carga debe tener las dimensiones adecuadas para cumplir esta función y estará constituida de hormigón o en mampostería de piedra. (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Ramiro Ortiz Flores, 2011)

### 2.3.4.1.3. Limitaciones

Estos tanques tienen limitadas condiciones de diseño, debido fundamentalmente a los grandes caudales que se utilizan en las turbinas, lo que no permite aprovechar el tanque de carga para el almacenamiento de agua. (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Ramiro Ortiz Flores, 2011)

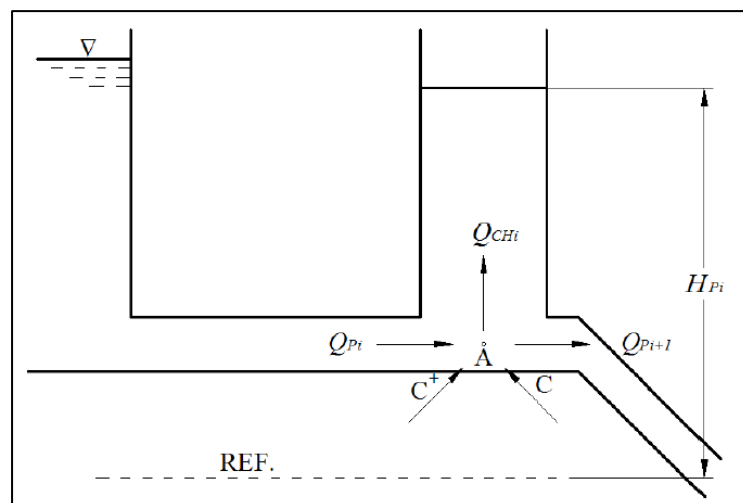
### 2.3.4.2. Chimeneas de equilibrio

La chimenea de equilibrio al igual que el tanque de carga responde a las variaciones en la demanda de energía, especialmente en el arranque o en la parada de las turbinas; por tal motivo se debe disponer una cantidad de volumen de agua para el arranque y colchones de aire a presión atmosférica para amortiguar el golpe de ariete.

#### 2.3.4.2.1. Descripción del mecanismo

El mecanismo consiste en un tubo conectado al sistema de manera vertical como se muestra en la figura, con una abertura lo suficientemente grande como para despreciar los efectos de la fricción del agua que entre o salga del pozo.

**Gráfico 2- 6. Chimenea de Equilibrio Simple**



Fuente: Juan Sebastián Bahamonde, “golpe de ariete en tuberías de presión de centrales hidroeléctricas”

Las ecuaciones que rigen esta condición de frontera son cuatro, las dos ecuaciones para las líneas características:

$$H_{Pi} = C_p - C_H Q_{Pi}$$

$$H_{Pi} = C_N + C_H Q_{Pi+1}$$

La tercera ecuación es la correspondiente a la continuidad en el punto A, donde  $Q_{CHi}$  corresponde al flujo en la chimenea:

$$Q_{CHi} = Q_{Pi} - Q_{Pi+1}$$

El caudal de la chimenea puede ser expresado en función con la variación en la altura en la chimenea:

$$Q_{CH} = \frac{dH}{dt} A_{CH}$$

Y para la cuarta ecuación tenemos:

$$Q_{CHi} = (H_{Pi} - H_P) \frac{A_{CH}}{\Delta t}$$

Donde los subíndices Pi corresponden al instante t, y los subíndices P al instante t-Δ, las ecuaciones se resuelven simultáneamente para cada instante t.

La condición general que se debe tomar en cuenta en las chimeneas de equilibrio es que si el tiempo de cierre de la directriz es menor de 3 seg. Se requiere chimenea de equilibrio.

Las chimeneas de equilibrio son elementos que se ubican en la parte donde se provoca el golpe de ariete. De esta manera la chimenea se convierte en un depósito no ideal que convierte la pulsación de alta intensidad y frecuencia del fenómeno golpe de ariete a una pulsación de baja intensidad y frecuencia, que se lo interpreta como una oscilación de masa. (Tesis de Juan Sebastián Bahamonde, 2005)

#### **2.3.4.2.2. Ventajas**

Las chimeneas de equilibrio tienen gran simplicidad tanto en el cálculo como en el diseño. La mayoría de ingenieros procuran solucionar las sobrepresiones con las chimeneas de equilibrio debido a que su mantenimiento es nulo y además no necesita ningún dispositivo adicional, otra ventaja sería que el golpe de ariete no se transmite aguas abajo de su ubicación.

#### **2.3.4.2.3. Limitaciones**

Para utilizar las chimeneas de equilibrio, la altura de la misma debe ser superior a la altura piezométrica para el caudal máximo, y la cota inferior debe ser menor que la altura piezométrica en ese punto para el caso de caudal nulo.

Además se tiene fuertes inversiones del flujo aguas arriba de la chimenea, incluso superiores a las que aparecerían si no hubiese chimenea. (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Ramiro Ortiz Flores, 2011)

#### **2.3.4.3. Cámara de aire o tanque hidroneumático**

Los tanques hidroneumáticos son recipientes cerrados donde se acumula el agua bajo presión. Este almacenamiento da la posibilidad de disponer de la cantidad limitada de agua para distintos usos y facilitando la lectura de los controles (presostatos, transductores de presión, manómetros) al ingresar el agua a presión dentro del tanque, dándole lugar al líquido, esto se debe al aire por ser un gas tiene sus moléculas, más separadas y por ello tiende a comprimirse mucho más fácil que el agua.

##### **2.3.4.3.1. Descripción del mecanismo**

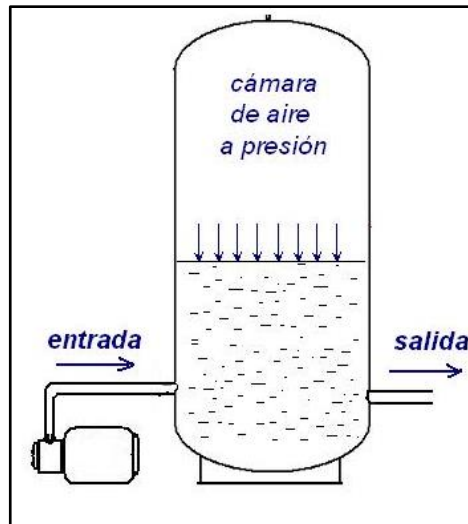
Un tanque hidroneumático contiene aire y agua bajo presión. El aire tiene contacto directo con el agua. El aire comprimido sirve como un cojín para ejercitar o absorber presión. Este tipo de tanque tiene tres funciones principales:

Entregar el agua según un rango de presión seleccionada.

Prevenir que una bomba no empieza de nuevo cada vez que el sistema de distribución haga una pérdida menor de agua.

Reducir al mínimo los golpes de ariete.

**Gráfico 2- 7. Cámara de Aire**



Fuente: [www.fullmecanica.com/component/content/article/20-t/1678-tanque-hidroneumatico](http://www.fullmecanica.com/component/content/article/20-t/1678-tanque-hidroneumatico), “Tanque Hidroneumático”

#### **2.3.4.3.2. Ventajas.**

- La protección frente a las ondas de presión no depende de la cota de agua del estanque, lo cual le da ventaja frente a otros dispositivos.
- Su instalación se mantiene en total independencia.
- Controla totalmente las ondas de depresión, amortiguándolas en función del tamaño del estanque.

#### **2.3.4.3.3. Desventajas:**

- No suprime a la onda de presión, sino que solo la amortigua, por lo que a veces se necesita actuar con otro dispositivo de protección adicional.
- El mantenimiento tiene un costo elevado.

### 3. Descripción detallada del proyecto

#### 3.1. Presa Salve Faccha

La Presa Salve Faccha forma un embalse que sirve como reserva de un volumen de 10.500.000 m<sup>3</sup>, para luego abastecer con un caudal regulado de 1.000 l/s al Sistema Papallacta. La estructura de toma trabaja sumergida para una capacidad máxima teórica de 1.200 l/s. (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

**Tabla 3- 1. Características de la Presa Salve Faccha**

| <b>Parámetro</b>                  | <b>Valor</b>                |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Tipo de presa                     | Materiales sueltos          |
| Materiales del cuerpo de la presa | Morrena, filtros, escollera |
| Zona impermeable                  | Núcleo de morrena           |
| Altura máxima                     | 44 m                        |
| Longitud de coronamiento          | 190 m                       |
| Cota de coronamiento              | 3.894,00 msnm               |
| Cota máxima de embalse en crecida | 3.892,50 msnm               |
| Cota del vertedero de excesos     | 3.890,90 msnm               |
| Cota de la captación              | 3.877,52 msnm               |

Fuente: EPMAPS, "Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado."

#### 3.2. Tanque Rompe Presión 2 – Quillugsha

El primer tanque está ubicado al inicio de la tubería a continuación de la presa Salve Faccha, la cota de este tanque es la 3.866,00 msnm. Con el fin de disminuir la dimensión de la tubería.

El segundo Tanque está ubicado a una distancia de 10.780 m. de la presa con una cota de 3802,00 msnm. El sistema del TRP 2 se compone de: una casa de válvulas en

hormigón, el tanque rompe presión de hormigón armado con forma cilíndrica, y una serie de pozos de inspecciones para las conducciones menores. Los otros caudales como son Quillugsha 2 y 3 y Gonzalito ingresan al tanque directamente.

El TRP 2, rompe la presión producida por los desniveles desde la presa a los 3.892,00 msnm y las captaciones a su cota de 3.805,00 msnm. La estructura central está conformada por dos tuberías, una de 914,4 mm” de diámetro y 6,35 mm de espesor, proveniente de Salve Faccha, la cual para disminuir la presión está conectada a una válvula Polyjet de 20” que funciona con una apertura variable según el caudal despachado por la presa. (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

### 3.3. Conducción Salve Faccha – estación Quillugsha

La tubería de presión que se utilizará para el abastecimiento de agua desde la presa Salve Faccha, será la que actualmente se encuentra instalada para el proyecto de agua potable de la EPMAPS.

Las Características de esta tubería son las siguientes:

**Tabla 3- 2. Características de la Tubería de Conducción**

| Concepto         | Descripción  |
|------------------|--------------|
| Material         | A283-GRADO C |
| Normativa        | AWWA         |
| Diámetro interno | 914.4 mm     |
| Espesor          | 6.35 mm      |
| Longitud         | 10780 m      |
| Apoyos           | Ninguno      |

Fuente: EPMAPS, “Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado”

El perfil de construcción de la tubería presenta los siguientes quiebres significativos.

**Tabla 3- 3. Quiebres importantes de la Tubería de Conducción**

| Abscisa | Cota     | Diámetro | Espesor |
|---------|----------|----------|---------|
| 0+000   | 3.890,90 | 0,9144   | 6,35    |
| 0+000   | 3.866,00 | 0,9144   | 6,35    |
| 2+100   | 3830.20  | 0,9144   | 6,35    |
| 3+005   | 3.872,10 | 0,9144   | 6,35    |
| 4+620   | 3.822,60 | 0,9144   | 6,35    |
| 7+557   | 3.869,00 | 0,9144   | 6,35    |
| 10+779  | 3.802,20 | 0,9144   | 6,35    |

Fuente: EPMAPS, “Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado”

### 3.4. Central Hidroeléctrica Quillugsha

A continuación se presentan algunas de las características que posee la central hidroeléctrica.

**Tabla 3- 4. Ficha Técnica de la Central Hidroeléctrica Quillugsha**

|            |  |
|------------|--|
| Provincia: | Napo   |
| Cantón:    | Quijos   |
| Parroquia: | Papallacta   |
| Río:       | Cunuyacu   |
| Ubicación: | Dentro del Parque Nacional Cayambe – Coca, a los 3.808 msnm, en la abscisa 10+780 del tramo de conducción de la Presa Salve Faccha, en la Estación Quillugsha. Se accede por la vía que es utilizada para la operación y |

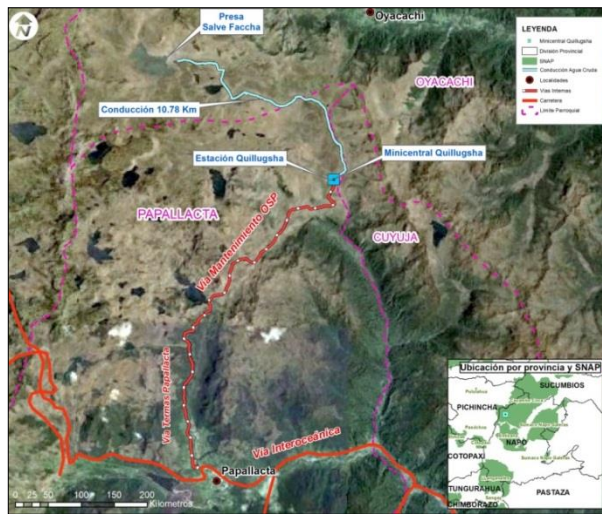
|                     |   |
|---------------------|---|
|                     | mantenimiento del Sistema de Optimización Papallacta. |
| Cota de captación:  | 3.877,52 msnm   |
| Cota de descarga:   | 3.808,68 msnm   |
| Tipo de captación:  | Embalse   |
| Tipo de conducción: | Tubería   |
| Caudal de diseño:   | 1.000 l/s   |
| Caída neta:         | 64,58 m   |
| Tipo de turbina:    | Francis   |
| Potencia instalada: | 547,88 kW   |

Fuente: EPMAPS, “Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado”

La Minicentral Hidroeléctrica Quillugsha, se ubica en la Provincia de Napo, Cantón Quijos, Parroquia Papallacta, dentro de los límites del Parque Nacional Cayambe – Coca.

Se ubica a los 3.808 msnm, en la abscisa 10+780 del tramo de conducción de la Presa Salve Faccha, en la Estación Quillugsha. Se accede por la vía que es utilizada para la operación y mantenimiento del Sistema de Optimización Papallacta, en las coordenadas 544.605 Este y 9.969.820 Norte. (Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del Sistema Papallacta integrado, EPMAPS 2014).

**Gráfica 3- 1. Ubicación de la Central Hidroeléctrica Quillugsha**



Fuente: Google Earth 2014, “Ubicación de la Central Hidroeléctrica Quillugsha”

### 3.5. Equipamiento mecánico.

#### 3.5.1. Turbina hidráulica.

Con los datos de caudal, altura e información técnica, se concluye que el tipo de turbina aplicable corresponde a una máquina tipo Francis de 900 rpm. Las características de la turbina, han sido estudiadas, seleccionadas y recomendadas, por los técnicos de la EPMAPS.

#### 3.5.2. Características de la turbina

Las características de la turbina fueron datos entregados en los estudios de la EPMAPS. A continuación se muestran los datos de la turbina que se usaron para el cálculo de los transitorios hidráulicos, en el programa Bentley Hammer V8i:

**Tabla 3- 5. Datos de la Turbina**

|                              |       |                   |
|------------------------------|-------|-------------------|
| <b>Velocidad de rotación</b> | 900   | rpm               |
| <b>Inercia de la turbina</b> | 12.2  | kg-m <sup>2</sup> |
| <b>Inercia del generador</b> | 130.8 | kg-m <sup>2</sup> |

Fuente: EPMAPS, “Estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado”

#### 4. Ingreso Datos Bentley Hammer V8i y Resultados

Los datos que se ingresaron en el programa Bentley Hammer V8i, fueron los entregados por la EPMAPS, estos datos se muestran a continuación marcados de color rojo, los valores que se editaron en el programa.

##### 4.1. Presa Salve Faccha

Elevation (m) 3890.9, es la Cota del vertedero de excesos de la Presa Salve Faccha.

Elevation (Inlet/Outlet Invert) (m) 3866, El primer tanque rompe presión uno TRP1, ubicado al inicio de la tubería a continuación de la presa Salve Faccha, la cota de este tanque es la 3.866,00 msnm. Con el fin de disminuir la dimensión de la tubería.

Gráfica 4- 1. Ingreso de datos de la Presa Salve Faccha

| Presa Salve Faccha                   |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| <Show All>                           |                       |
| Property Search                      |                       |
| <b>&lt;General&gt;</b>               |                       |
| ID                                   | 29                    |
| Label                                | Presa Salve Faccha    |
| Notes                                |                       |
| GIS-IDs                              | <Collection: 0 items> |
| Hyperlinks                           | <Collection: 0 items> |
| <b>&lt;Geometry&gt;</b>              |                       |
| X (ft)                               | -36,03                |
| Y (ft)                               | 2,61                  |
| <b>Active Topology</b>               |                       |
| Is Active?                           | True                  |
| <b>Operational</b>                   |                       |
| Controls                             | <Collection>          |
| <b>Physical</b>                      |                       |
| Elevation (ft)                       | 3.890,90              |
| Zone                                 | <None>                |
| Hydraulic Grade Pattern              | Fixed                 |
| <b>Transient (Physical)</b>          |                       |
| Elevation (Inlet/Outlet Invert) (ft) | 3.866,00              |
| <b>Water Quality</b>                 |                       |
| Age (Initial) (hours)                | 0,000                 |
| Concentration (Initial) (mg/L)       | 0,0                   |
| Is Constituent Source?               | False                 |
| Trace (Initial) (%)                  | 0,0                   |

Fuente: Bentley Hammer V8i, "Propiedades de la Presa Salve Faccha"

## 4.2. Conducción Salve Faccha – Estación Quillugsha

El coeficiente de Manning usado para los cálculos de transitorios hidráulicos fue,  $n=0.012$ , este dato depende del material de la tubería, en este caso se usa una tubería de acero (Steel) A283-GRADO C.

La tubería de conducción salve Faccha – estación Quillugsha, tiene un diámetro interno de 914.4mm.

### 4.2.1. Celeridad

Para el cálculo del parámetro de celeridad en nuestro proyecto, nos guiamos según el libro de J. Parmakian, trabajando con las unidades en sistema americano, para luego transformar el resultado final en el Sistema Internacional de Medida.

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{D \cdot c1}{E \cdot e} \right)}}$$

Dónde:

$a$  = velocidad de onda depresión m/s

$g$  = aceleración de la gravedad  $m/s^2$

$D$  = diámetro de la tubería m (obtenido del estudio de factibilidad de la tubería de presión de acero)

$e$  = espesor de la tubería m (obtenido del estudio de factibilidad de la tubería de presión de acero)

$E$  = módulo de Young  $kg/m^2$

$K$  = Modulo de volumen de agua  $kg/m^2$

$w$  = peso específico del agua  $kg/m^2$

$u$  = módulo de Poisson.

## Resolución

Remplazamos los parámetros de la fórmula por los valores de los mismos obtenidos en los datos.

**Tabla 4- 1. Datos para el cálculo de la Celeridad**

| Parámetros | Valor    | Unidad             | Valor     | Unidad            |
|------------|----------|--------------------|-----------|-------------------|
| W          | 62,4     | lb/ft <sup>3</sup> | 1000      | kg/m <sup>3</sup> |
| G          | 32,185   | ft/s <sup>2</sup>  | 9,81      | m/s <sup>2</sup>  |
| K          | 43200000 | lb/ft <sup>2</sup> | 210924422 | kg/m <sup>2</sup> |
| D          | 36       | inch               | 0,914     | m                 |
| E          | 4,32E+09 | lb/ft <sup>2</sup> | 2,109E+10 | kg/m <sup>2</sup> |
| e          | 0,25     | inch               | 0,006     | m                 |

Fuente: J. Parmakian, "Valores utilizados en la fórmula de la celeridad"

**Tabla 4- 2. Valores de la Celeridad**

| Tubería | Celeridad | Unidad | Celeridad | Unidad |
|---------|-----------|--------|-----------|--------|
| D1      | 867,86625 | m/s    | 2847,33   | ft/s   |
| D2      | 946,356   | m/s    | 3104,841  | ft/s   |

Fuente: J. Parmakian, "Valores de la celeridad"

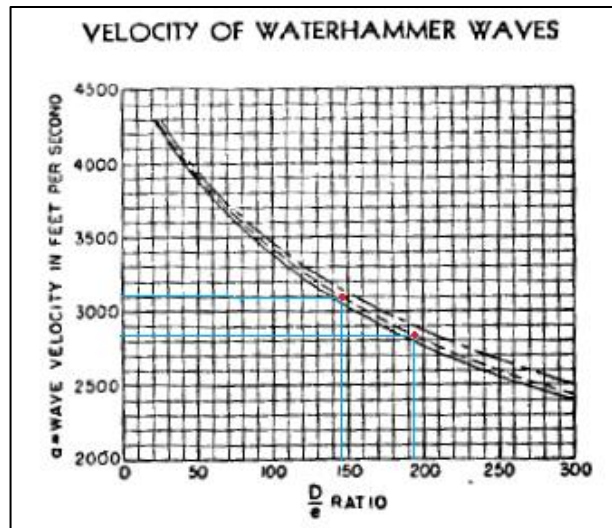
Si utilizamos el abaco de parmakian obtenemos aproximadamente los mismos resultaos.

**Tabla 4- 3. Datos para el ábaco de Parmakian**

| TUBERÍA | D/e |
|---------|-----|
| D1      | 192 |
| D2      | 144 |

Fuente: J. Parmakian, "Relación diámetro espesor de la tubería"

**Gráfica 4- 2. Ábaco velocidad de onda de presión**



Fuente: J. Parmakian, “velocidad de Onda de Presión”

Como se observa en la gráfica de Parmakian, la celeridad para  $D1/e=192$ , es  $a=3100\text{ft/s}$  ( $944.88\text{m/s}$ ), y para  $D2/e=144$ , obtenemos una celeridad  $a=2850\text{ft/s}$  ( $868.68\text{m/s}$ ). Para los análisis siguientes se utilizara una celeridad de  $1000\text{m/s}$ .

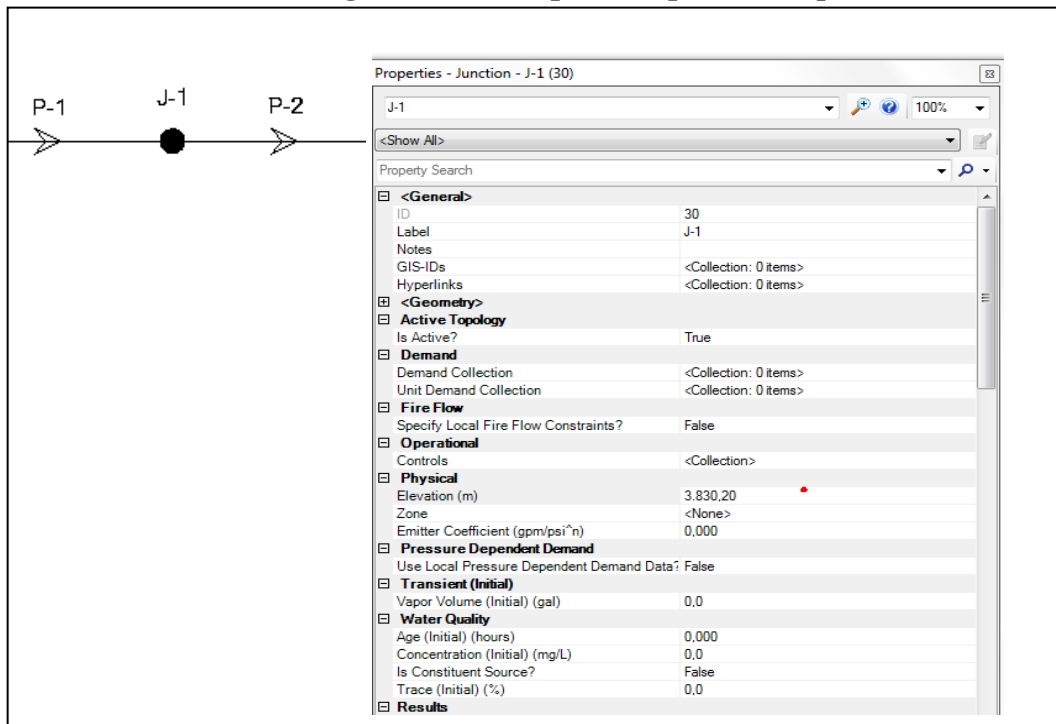
Para un breve análisis se pueden usar los quiebres importantes, valores con los cuales se obtuvieron mismos resultados que con el ingreso de toda la tubería de conducción. Estos valores son los siguientes:

**Tabla 4- 4. Características de la Tubería y quiebres importantes**

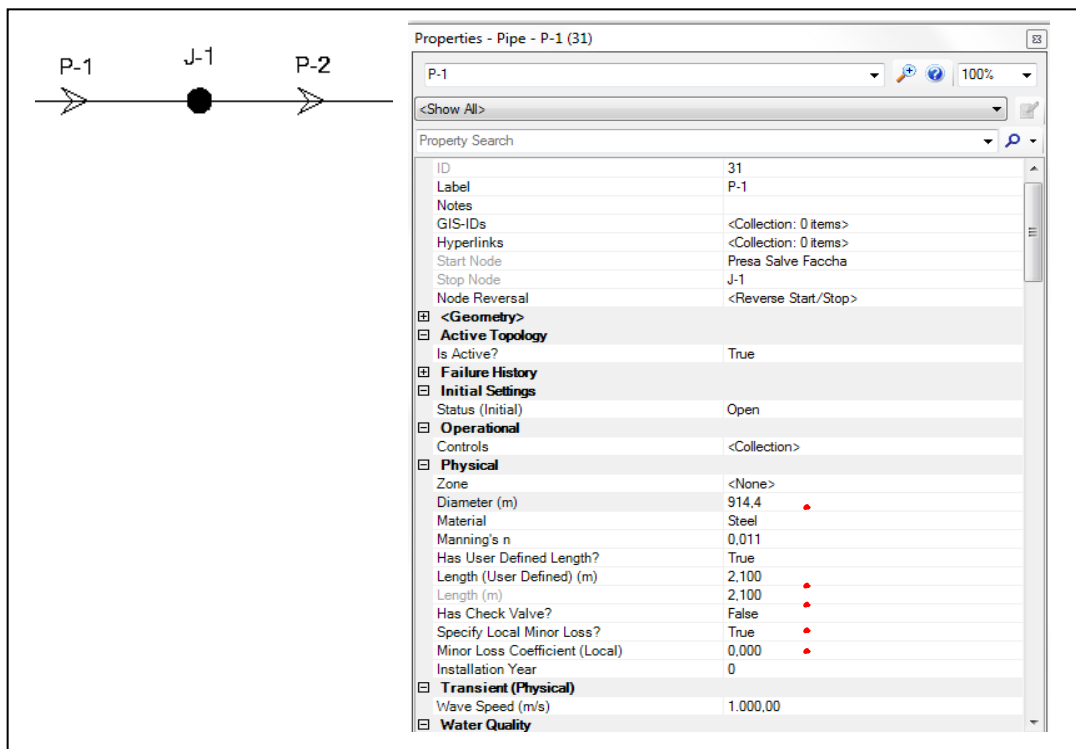
| Etiqueta | Longitud (m) | Diámetro (mm) | Material | Onda de presión | Coefficiente de Manning | Etiqueta | Elevación (m) |
|----------|--------------|---------------|----------|-----------------|-------------------------|----------|---------------|
| Embalase | 0            | 914,4         | Steel    | 1.000,00        | 0,012                   | Embalase | 3.890,90      |
|          | 0            | 914,4         | Steel    | 1.000,00        | 0,012                   |          |               |
| P-1      | 2.100        | 914,4         | Steel    | 1.000,00        | 0,012                   | J-1      | 3.830,20      |
| P-2      | 905          | 914,4         | Steel    | 1.000,00        | 0,012                   | J-2      | 3.872,10      |
| P-3      | 1.615        | 1.219,20      | Steel    | 1.000,00        | 0,012                   | J-3      | 3.822,60      |
| P-4      | 2.937        | 1.219,20      | Steel    | 1.000,00        | 0,012                   | J-4      | 3.869,00      |
| P-5      | 3.222        | 914,4         | Steel    | 1.000,00        | 0,012                   | J-5      | 3.802,20      |

Fuente: J. Parmakian, “velocidad de Onda de Presión”

**Gráfica 4- 3. Ingreso de Datos para los puntos de quiebre.**



**Gráfica 4- 4. Ingreso de datos para la tubería de conducción**



Fuente: Bentley Hammer V8i, "Ingreso de Datos"

En la Gráfica anterior se muestra un ejemplo de cómo ingresar los datos de la tubería, diámetro, material, coeficiente de Manning, longitud del tramo de tubería, y la elevación en cada punto de la conducción, se debe hacer lo mismo para el resto de la conducción.

Para el estudio de los transitorios hidráulicos, se ingresó todas las cotas y abscisas de la conducción Salve Faccha – Estación Quillugsha, datos que se encuentra en el ANEXOS 1

### **4.3. TURBINA**

Downstream Pipe P-1463, la tubería aguas abajo a la que se debe conectar la turbina Elevation (m) 3803.92, cota donde se ubicara la turbina Francis, dentro del Parque Nacional Cayambe – Coca, a los 3803.92 msnm, en la abscisa 10+780 del tramo de conducción de la Presa Salve Faccha, en la Estación Quillugsha.

Diameter (Spherical Valve) (mm) 900, dato de las características físicas de la turbina.

#### **4.3.1. Capacidad instalada de la turbina**

La potencia a nivel de la placa en la turbina de la Minicentral Quillugsha será:

Fórmula 4. 1. Potencia total

$$P_t = g \cdot \eta_t \cdot Q_{max} \cdot H_n$$

$$P_t = 9,81 \cdot 0,92 \cdot 1 \cdot 64,58$$

$$P_t = 582,85 \text{ kW}$$

La potencia instalada de la turbina será:

$$P_i = P_t \cdot \eta_g$$

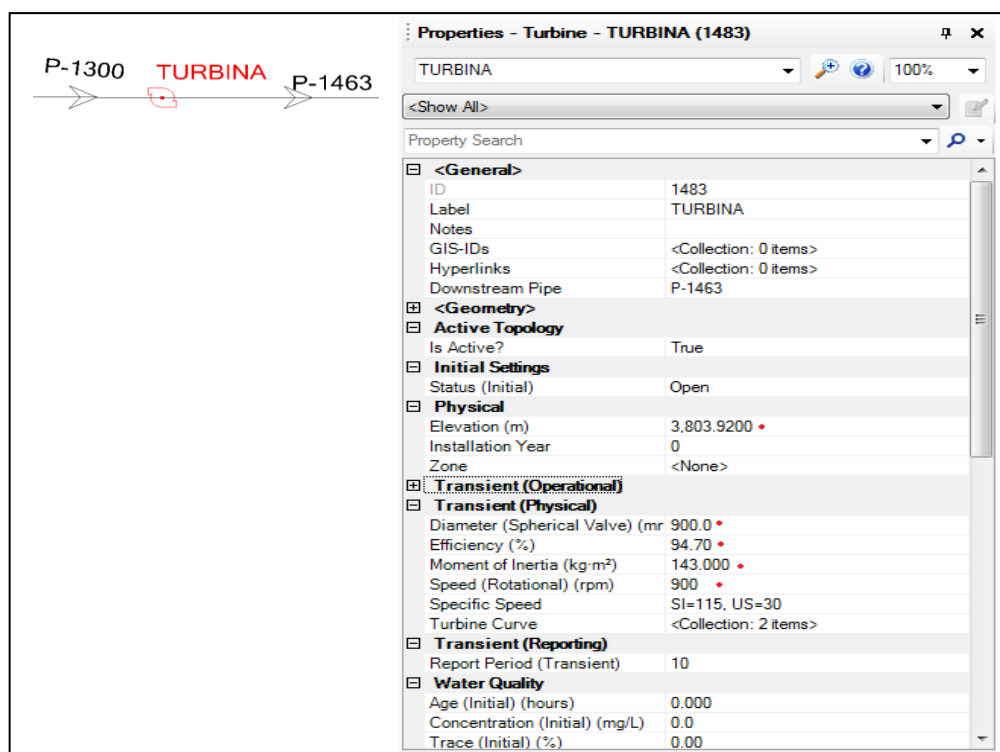
$$P_i = 582,85 \cdot 0,94 = 547,88 \text{ kW}$$

Al ser una turbina Francis, el valor de la eficiencia es 94,7%.

El momento de inercia que se utilizó en el programa Bentley Hammer, es el sumatorio de la inercia de la turbina (12.2kgm<sup>2</sup>) y la inercia del generador (130.8kgm<sup>2</sup>), lo que se obtuvo el valor de 143kgm<sup>3</sup>.

La velocidad rotacional es de 900rpm, ya que con esta velocidad se demostró que la turbina tiene las mejores características.

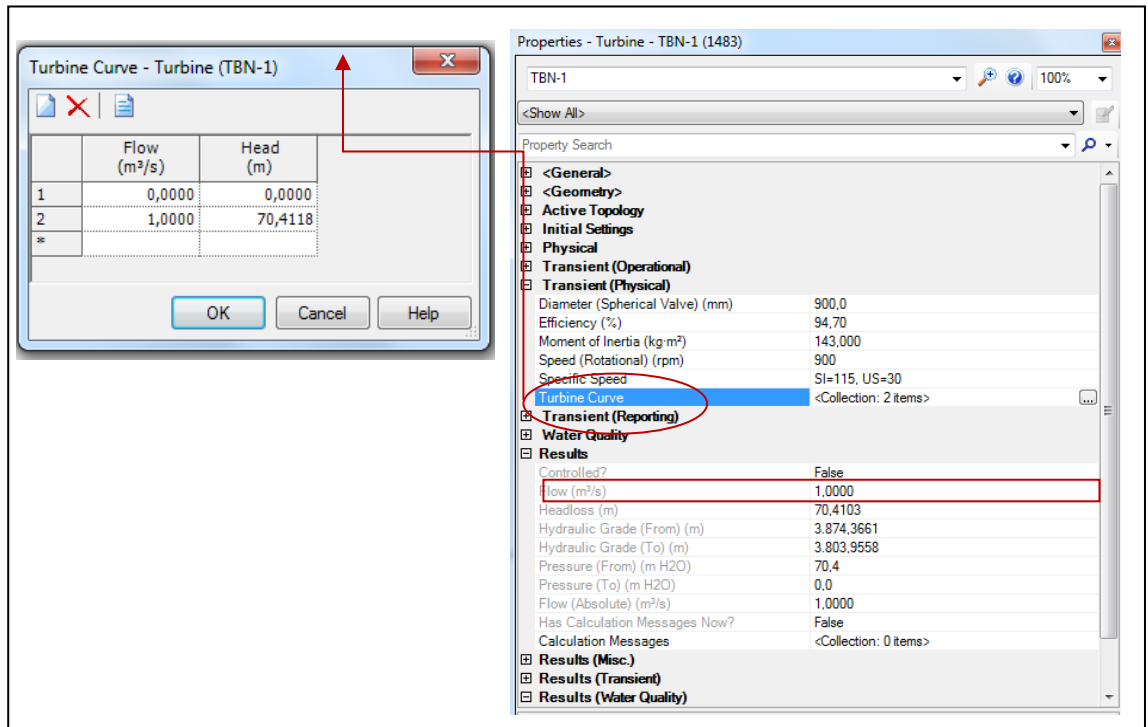
**Gráfica 4- 5. Ingreso de datos de la Turbina**



Fuente: Bentley Hammer V8i, "ingreso de datos"

Para que la tubería conduzca un caudal de 1 m<sup>3</sup>/s, se introducen valores de la curva de la turbina (Turbine Curve), la curva de la turbina es Caudal (Flow) vs Altura de presión (Head), con los siguientes valores se obtuvo el caudal requerido, en el programa Bentley Hammer V8i

**Gráfica 4- 6. Ingreso de Datos curva de la Turbina**

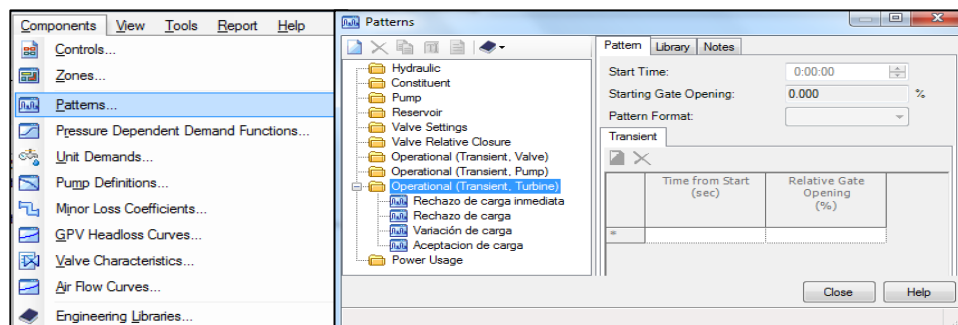


Fuente: Bentley Hammer V8i. “Ingreso de datos”

### 4.3.2. Ley de Cierre o Apertura de la Turbina

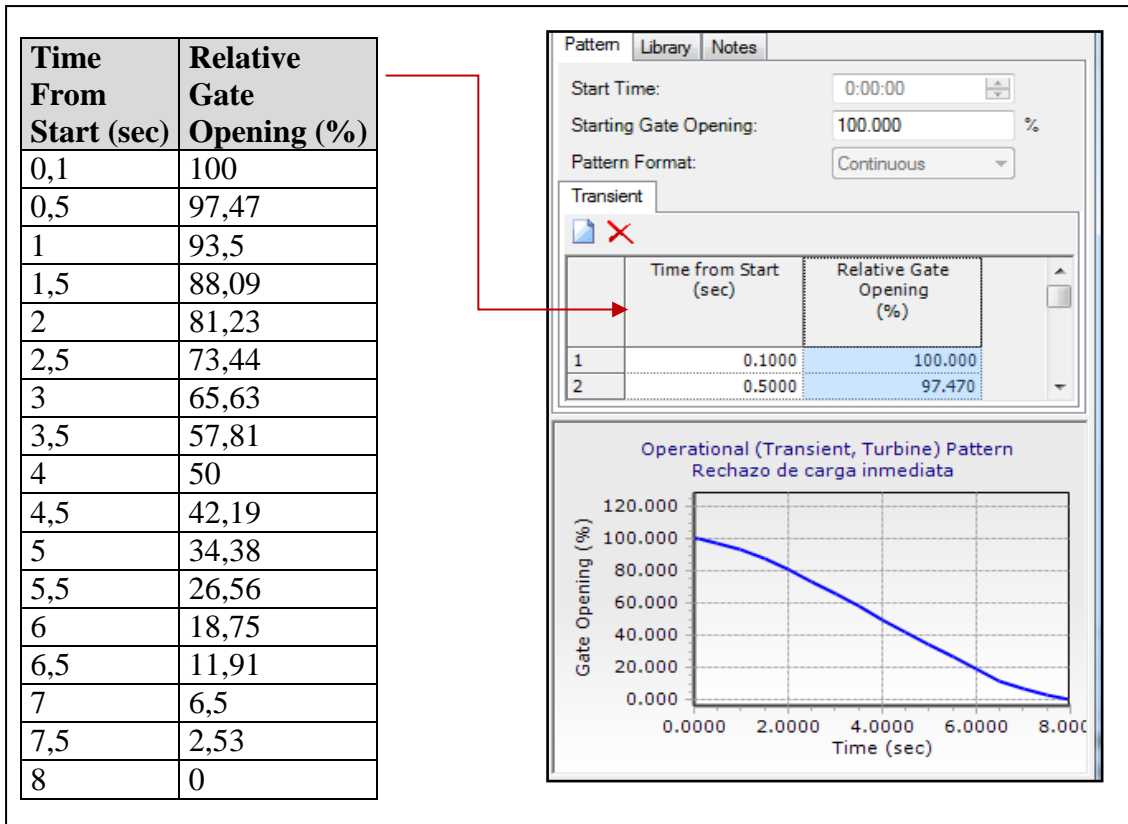
La turbina para el estudio de transitorio hidráulico, fue sometida a diferentes casos de apertura, las curvas para los diferentes casos de cierre o apertura de la turbina fueron datos, entregados por el ingeniero Edmundo Mendoza, responsable de los estudios de transitorios hidráulicos del proyecto Minicentral hidroeléctrica Quillugsha.

**Gráfica 4- 7. Ventana para ley de cierre o apertura**

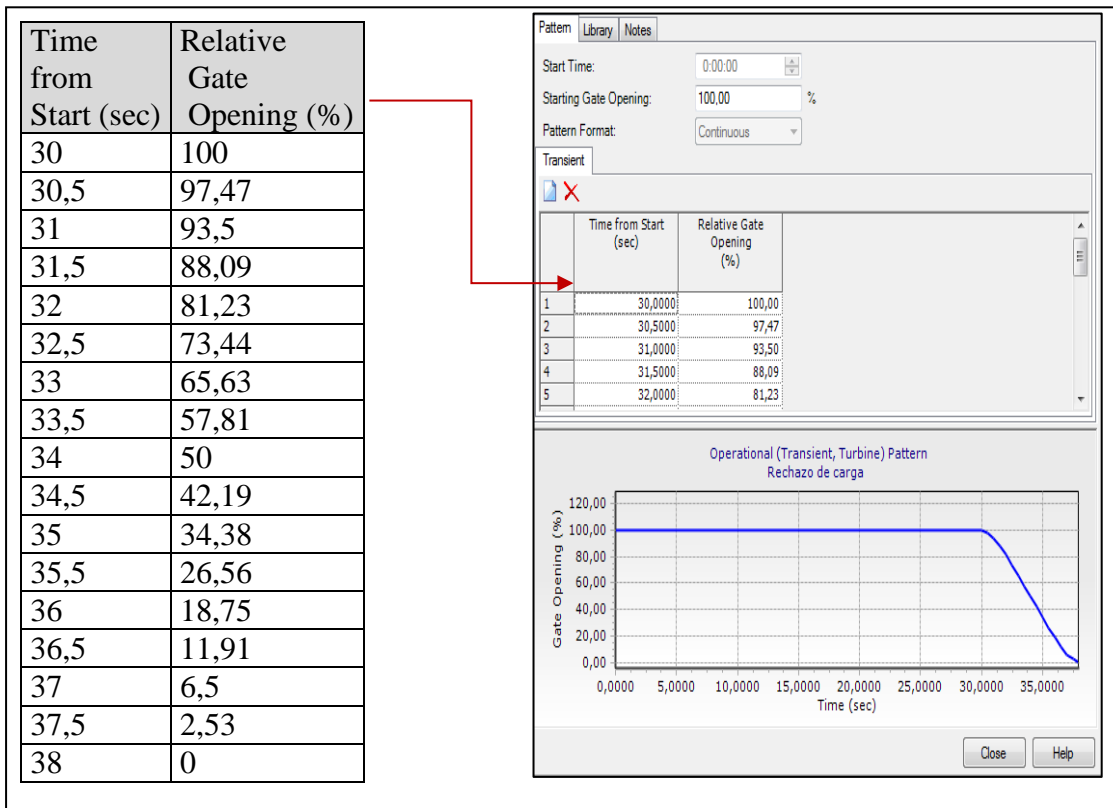


Fuente: Bentley Hammer V8i, “Ingreso a la venta para cambiar las opciones de cierre o apertura”

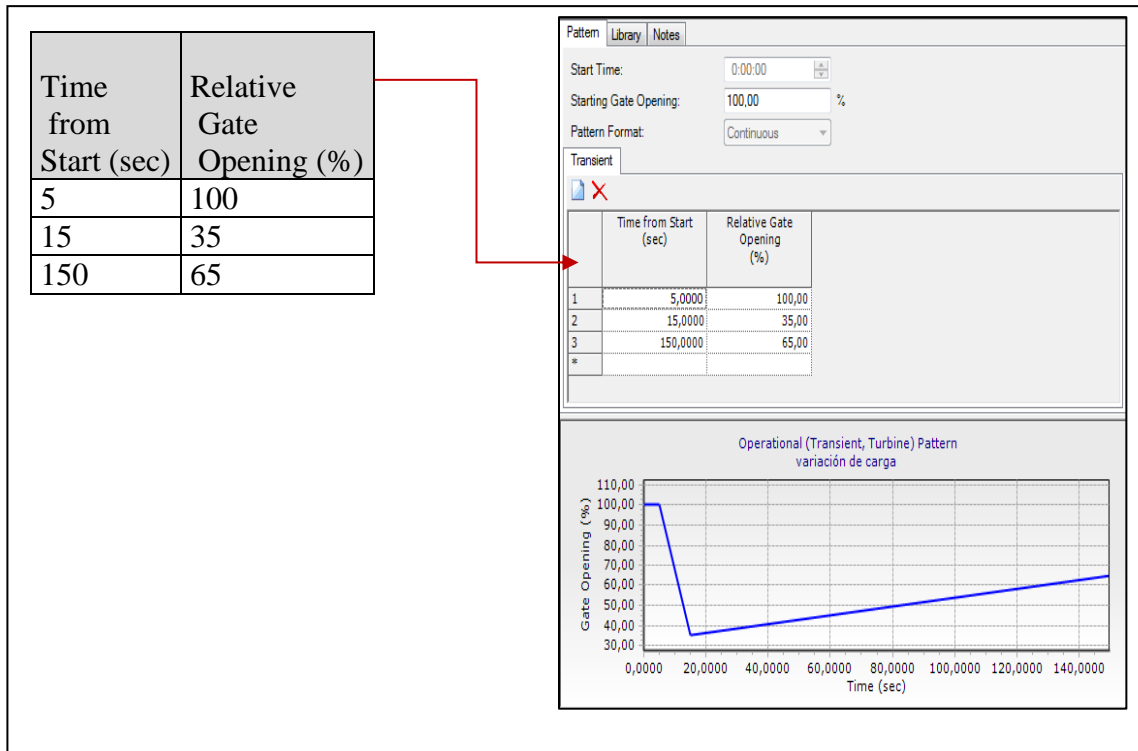
**Gráfica 4- 8. Ley de cierre o apertura para Rechazo de Carga Instantánea**



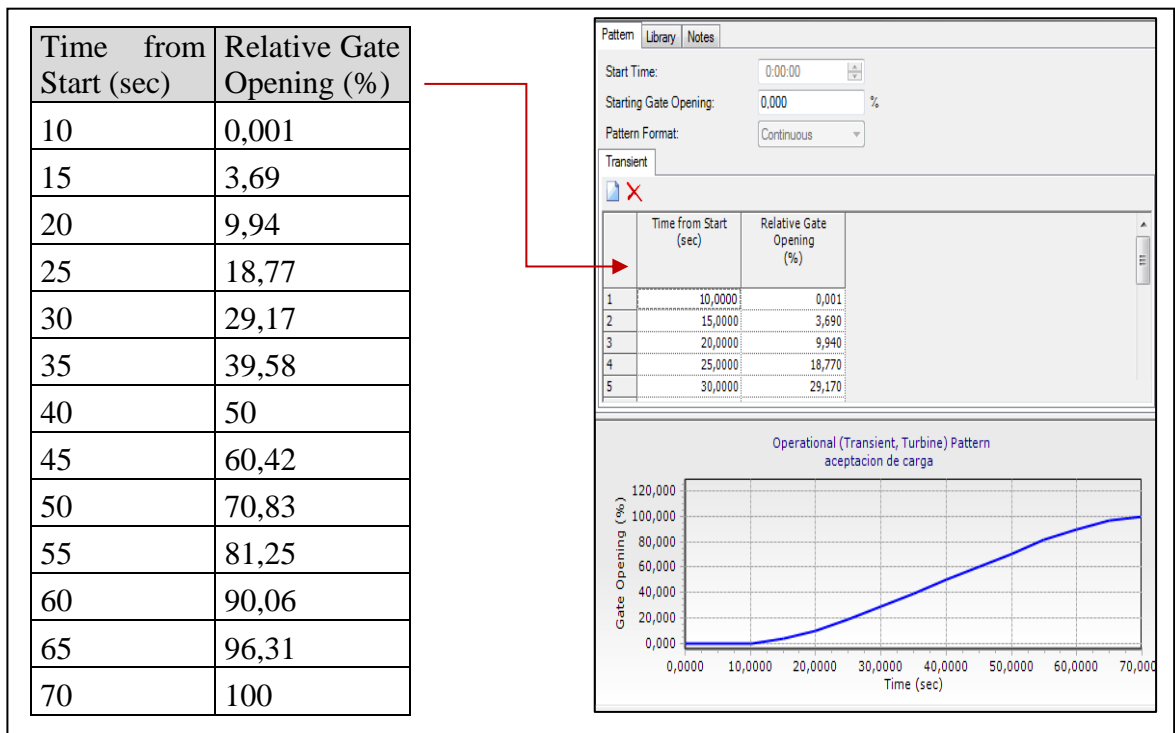
**Gráfica 4- 9. Ley de cierre o apertura para Rechazo de Carga**




**Gráfica 4- 10. Ley de cierre o apertura para Variación de Carga**



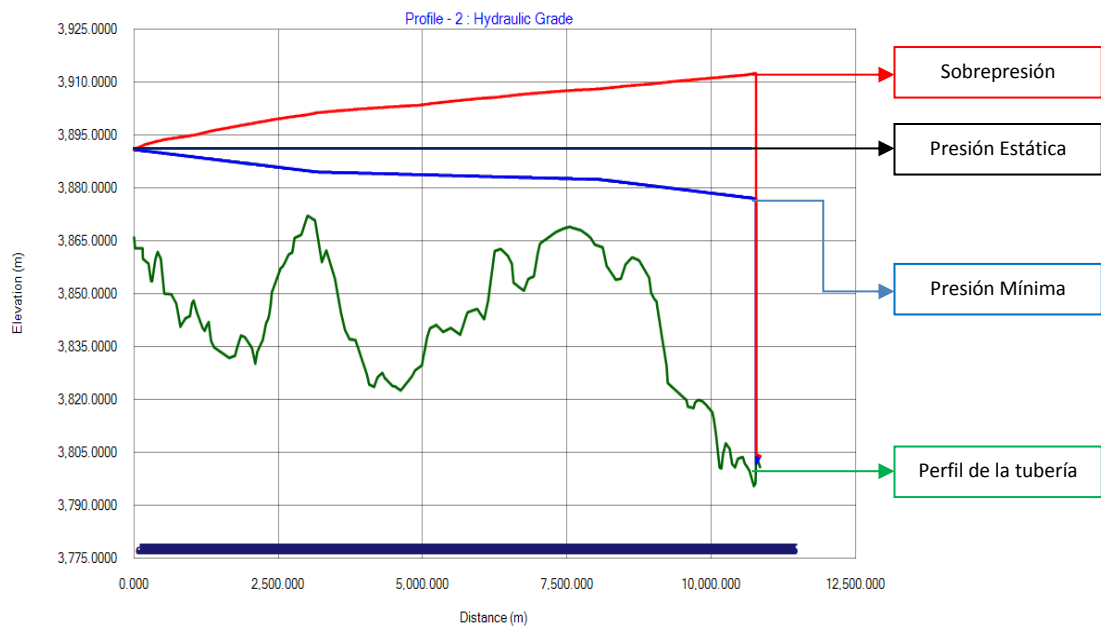
**Gráfica 4- 11. Ley de cierre o apertura para Aceptación de Carga**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “leyes de cierre o apertura de la turbina”

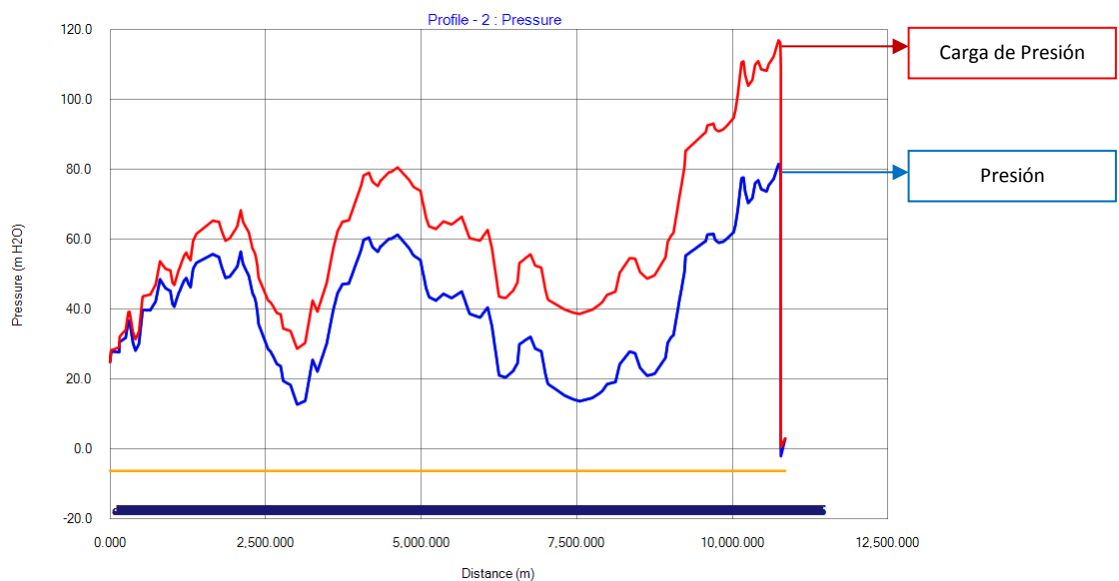
Una vez ingresado los valores de la Ley de cierre, para cada uno de los casos de operación de transientes de la turbina, click  en (Compute), para obtener el análisis de los transitorios hidráulicos, los siguientes gráficos muestran el comportamiento de la presión en la tubería de conducción.

**Gráfica 4- 12. Gradiente Hidráulico**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “perfil de la tubería con el gradiente hidráulico”

**Gráfica 4- 13. Presión en cada punto de la tubería de conducción**



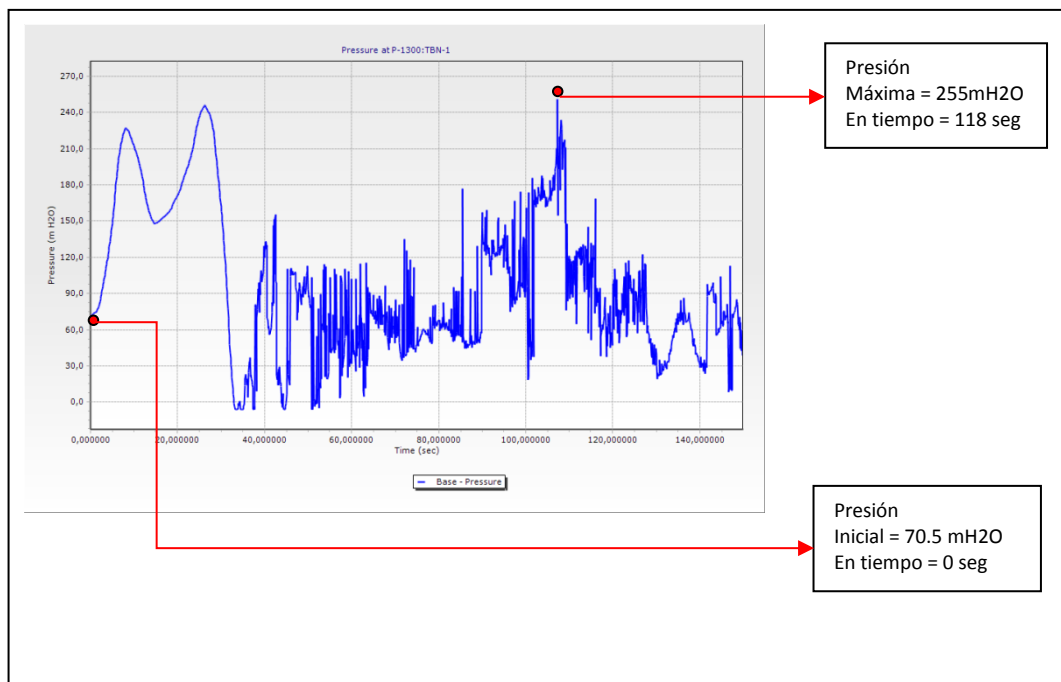
Fuente: Bentley Hammer V8i, “perfil de presiones de la tubería”

Para el cálculo del porcentaje del golpe de ariete del sistema, con los diferentes casos de apertura o cierre de la turbina, se utilizó la fórmula 4.3.

$$\%GA = \left( \frac{\text{Presión máxima}}{\text{Presión inicial}} - 1 \right) \times 100$$

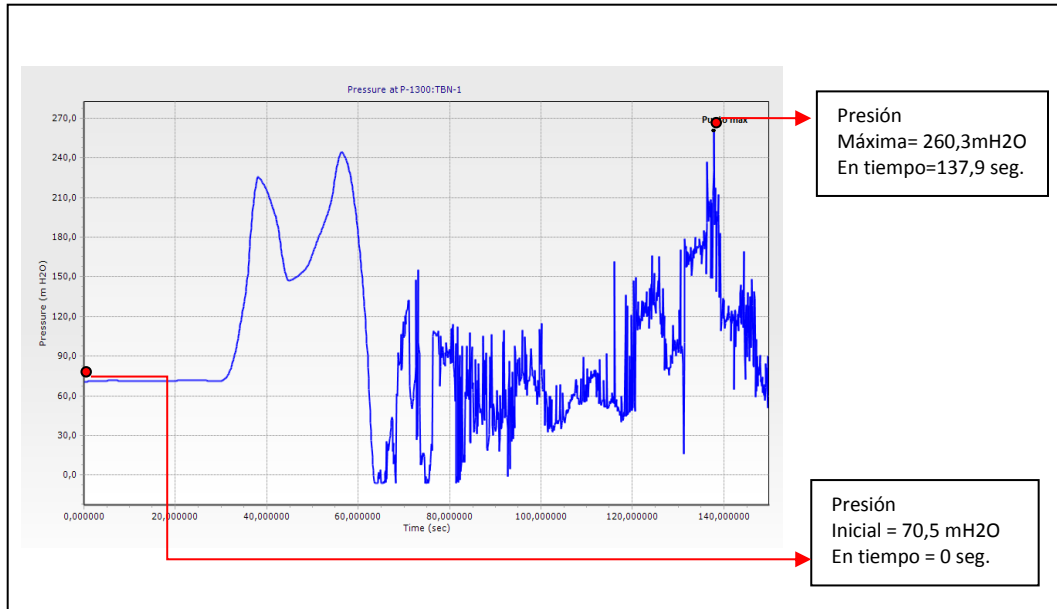
Con la ayuda del programa Bentley Hammer V8i se obtuvieron los valores de la Presión máxima y presión inicial, con los cuales se realiza el cálculo del porcentaje de golpe de ariete, a continuación se indican estos valores para cada ley de cierre o apertura de la turbina. Los datos de las siguientes gráficas se encuentran en el ANEXO 2

**Gráfica 4- 14.Rechazo de carga instantánea**



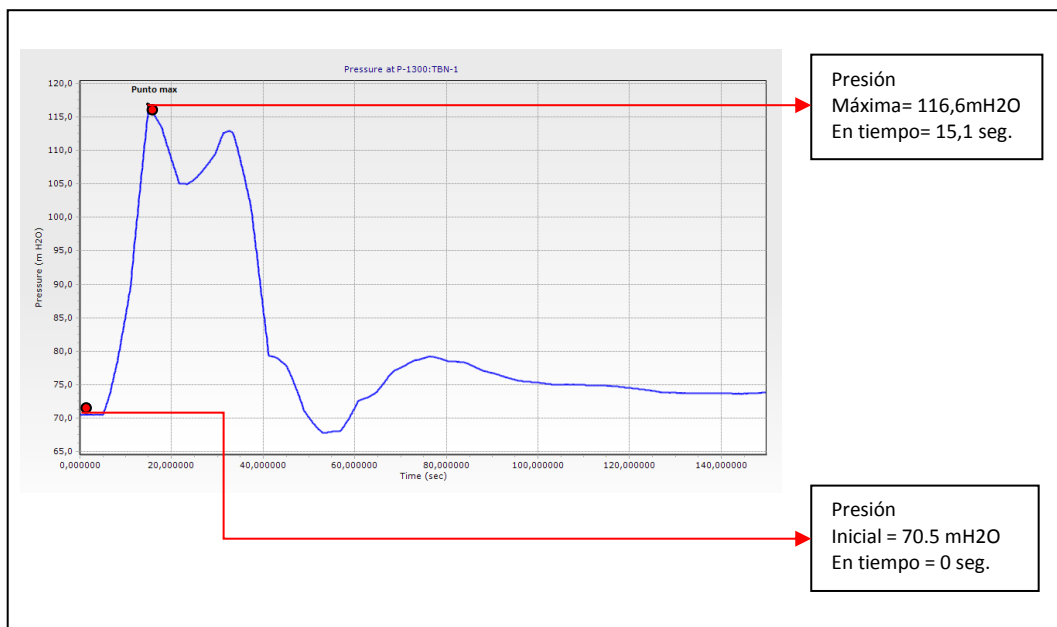
Fuente: Bentley Hammer V8i, “Presión de la tubería sin equipamiento mecánico para rechazo de carga instantánea”

**Gráfica 4- 15. Rechazo de Carga**



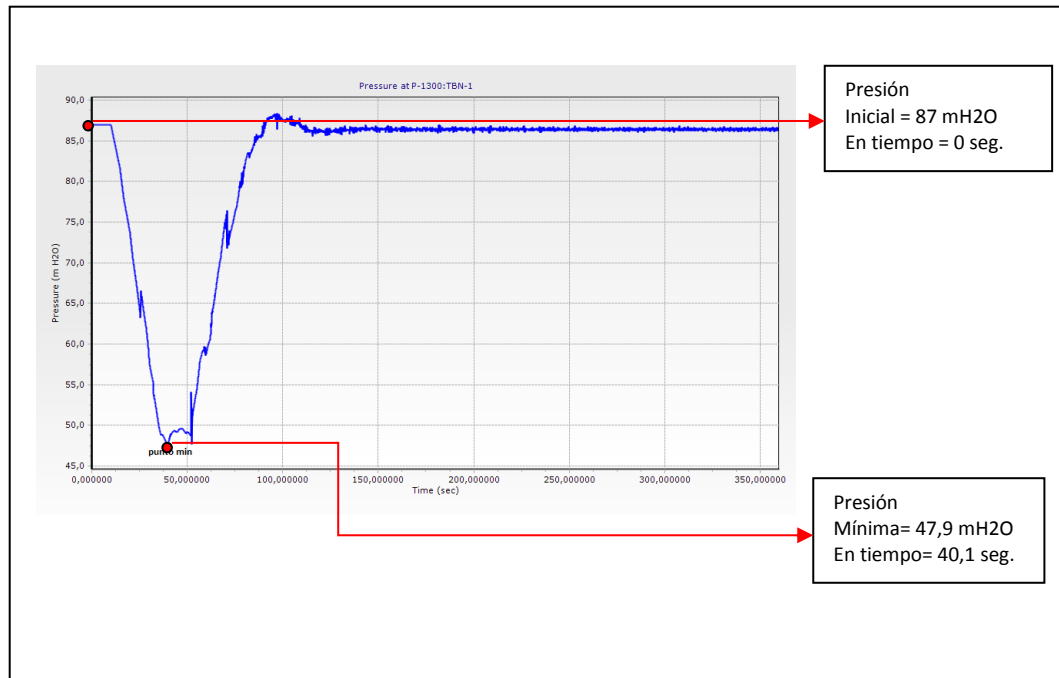
Fuente: Bentley Hammer V8i, “Presión de la tubería sin equipamiento mecánico para rechazo de carga”

**Gráfica 4- 16. Variación de carga**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Presión de la tubería sin equipamiento mecánico para variación de carga”

**Gráfica 4- 17. Variación de Carga**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Presión de la tubería sin equipamiento mecánico para aceptación de carga”

Del análisis que se realizó en el programa Bentley Hammer V8i, del comportamiento de la tubería de conducción para transientes hidráulicos, se demuestra que la conducción requiere equipo de protección, ya que los valores de porcentaje de Golpe de Ariete están fuera del rango de tolerancia de las turbinas Francis, esto se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 4- 5. Golpe de ariete sin equipamiento mecánico**

| Cierre o apertura de turbina | Presión Ini. | Presión Max | %G.A. | % Admisible Turbina | Cumple |
|------------------------------|--------------|-------------|-------|---------------------|--------|
| Rechazo de carga instantáneo | 70,5         | 255         | 262   | -15 a 50            | No     |
| Rechazo de carga             | 70,5         | 260,3       | 269   | -15 a 50            | No     |
| Variación de carga           | 70,5         | 116,6       | 65    | -15 a 50            | No     |
| Aceptación de carga          | 87           | 47,9        | -45   | -15 a 50            | No     |

Fuente: Bentley Hammer V8i, “Golpe de ariete para cada ley de cierre o apertura de la turbina”

#### **4.4. Equipos para reducir el golpe de ariete en el proyecto Quillugsha**

Del análisis del comportamiento de la tubería sin elementos de protección, se obtuvieron % de golpe de ariete fuera de los rangos de tolerancia de las turbinas Francis, motivo por el cual con ayuda del programa Bentley Hammer V8i se analizara la tubería con elementos de protección, chimenea de equilibrio y cámara de aire.

##### **4.4.1. Chimenea de Equilibrio**

La distancia a la que se debe colocar la Chimenea de equilibrio se calculó utilizando el programa Bentley Hammer V8i (ANEXO 3), colocando la chimenea de equilibrio a cada 100 metros de la turbina obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4- 6. Golpe de ariete con Chimenea de Equilibrio**

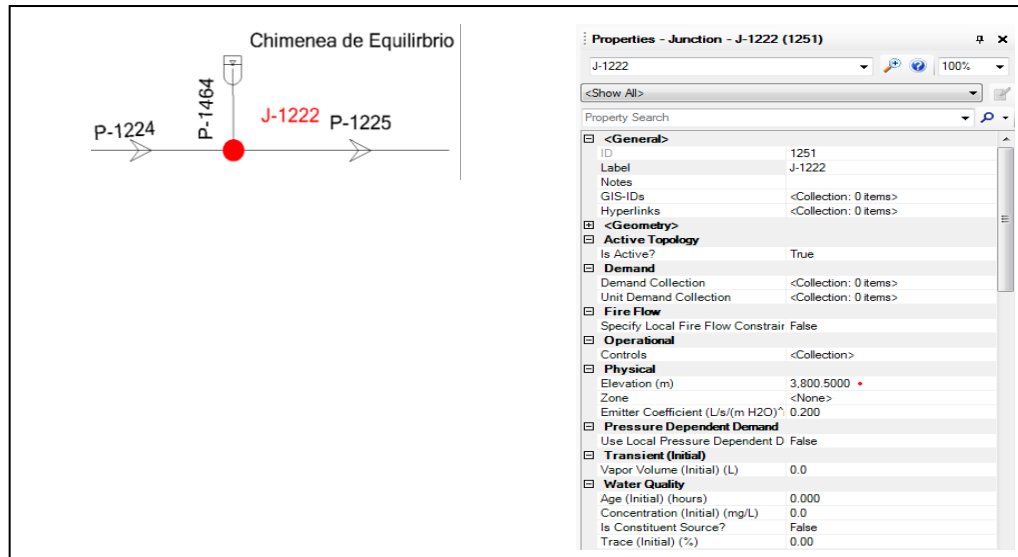
| <b>Distancia</b> | <b>G.A</b> |
|------------------|------------|
| 100              | 39,86      |
| 200              | 40,43      |
| 300              | 46,52      |
| 400              | 52,77      |
| 500              | 59,86      |
| 600              | 65         |
| 700              | 70,21      |
| 800              | 77,45      |

Fuente: Bentley Hammer V8i, “Golpe de ariete para del sistema para cada 100m con chimenea de equilibrio”

Dada la topografía donde está la tubería de conducción, se vio la posibilidad de colocar una chimenea de equilibrio a 600 m de la turbina en la cota 3800,5 msnm, obra que requeriría una estructura tipo tubo de 2m de diámetro y 75.4 metros de altura para mantener la pérdida por fricción desde la presa Salve Faccha.

Para el análisis en el programa Bentley la chimenea de equilibrio se ingresó de la siguiente manera:

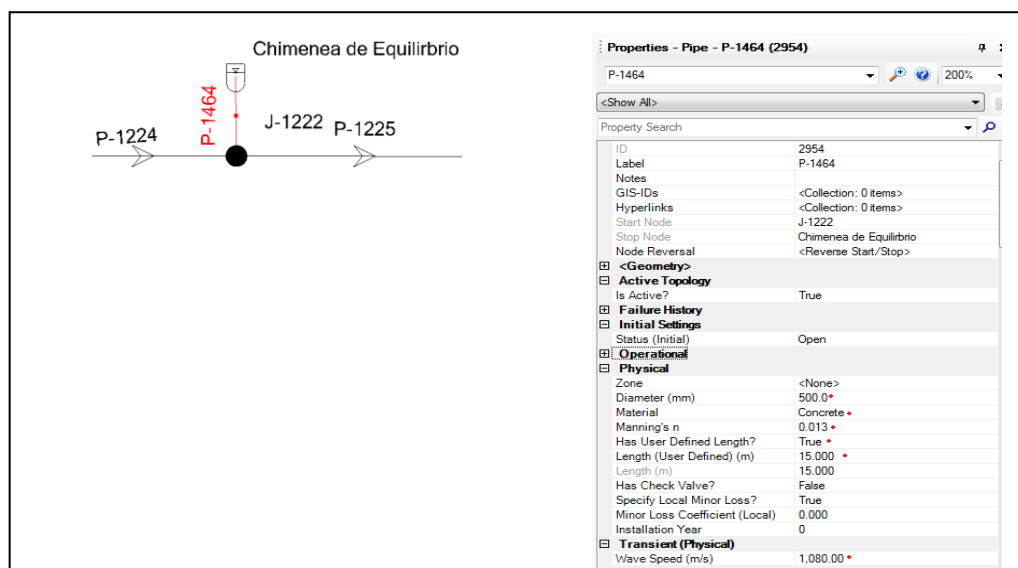
**Gráfica 4- 18. Ingreso de datos para el punto de ubicación de la chimenea de equilibrio**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Ingreso de datos””

En la cota 3800.5 m de la tubería de conducción de la Presa Salve Faccha al TRP2 Quillugsha, se colocó una tubería de hormigón de 500mm diámetro, con coeficiente de Manning 0.013 y 15 m de longitud, la cual conduce el agua desde la tubería de conducción hasta la chimenea de equilibrio.

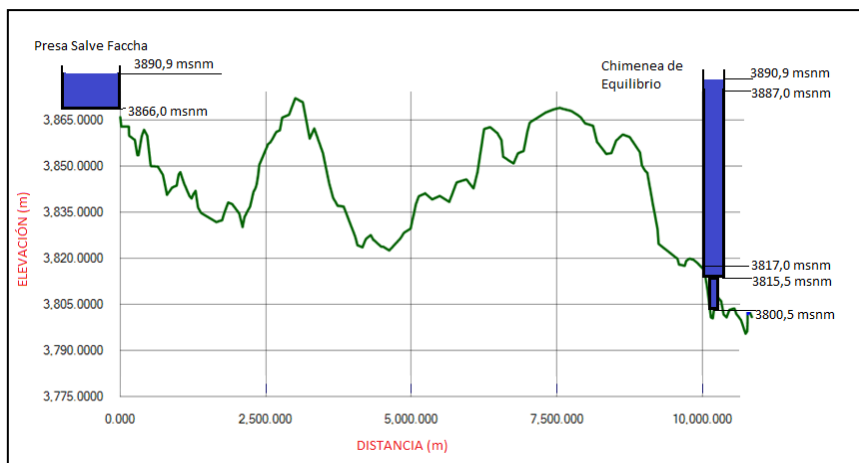
**Gráfica 4- 19. Ingreso de datos Para el tubo de conexión con la chimenea de equilibrio**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Ingreso de datos””

Elevación de la Base de la chimenea de equilibrio será la cota 3800.5 más los 15 m de la tubería de hormigón, es decir 3815.5 m está ubicada la base, la elevación mínima 3817 m y la elevación inicial 3887 m fueron valores asumidos para el ingreso en el programa, la elevación máxima de la chimenea se puso la misma cota del embalse de la presa salve Faccha 3890.9 m, con esto se obtuvo una chimenea de 75.4 m de altura, con un diámetro de 2m, diámetro que fue encontrado al realizar varias pruebas en el programa Bentley Hammer V8i, con este diámetro cumple su función de reducir las sobrepresiones (golpe de ariete).

**Gráfica 4- 20. Chimenea de Equilibrio**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Esquema de la ubicación de la chimenea de Equilibrio”

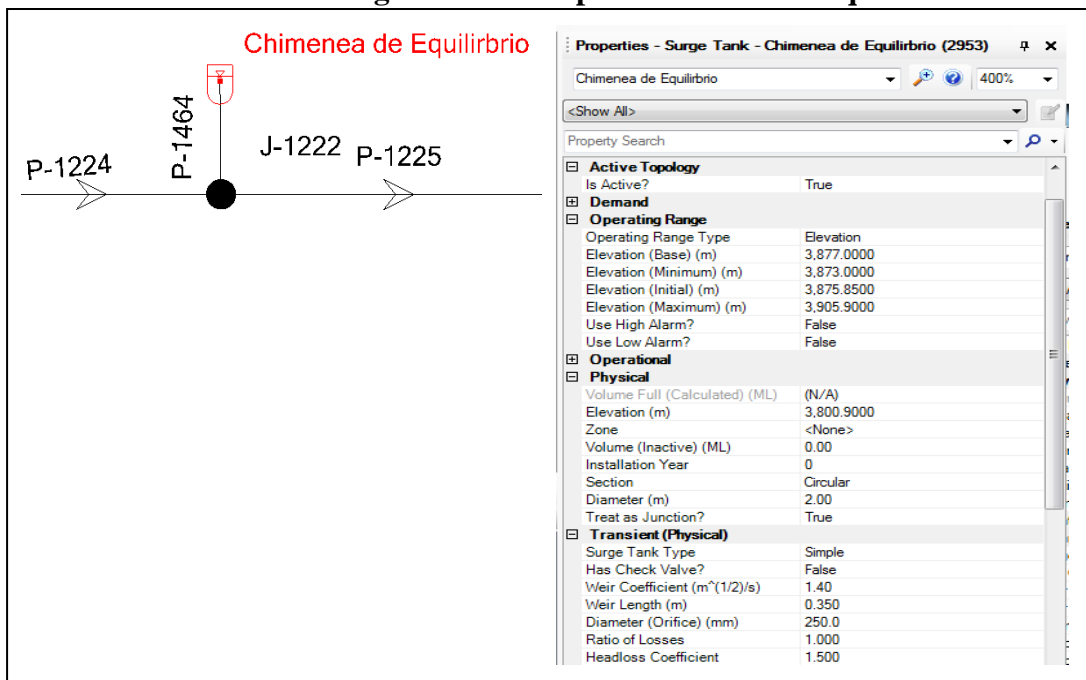
Los datos físicos de la chimenea de equilibrio para el estudio de transitorios, fueron datos entregados por el ingeniero Edmundo Mendoza, quien realizó los estudios de transitorios hidráulicos del proyecto Mini central hidroeléctrica Quillugsha.

**Tabla 4- 7. Datos de la chimenea para el Ingreso en el Bentley Hammer V8i**

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| Weir Coefficient ( $m^{(1/2)}/s$ ) | 1.4  |
| Weir Length (m)                    | 0.35 |
| Diameter (Orifice)(mm)             | 250  |
| Ratio of Losses                    | 1    |
| Headloss Coefficient               | 1.5  |

Fuente: Ing. Edmundo Mendoza, “datos importantes para la chimenea de equilibrio”

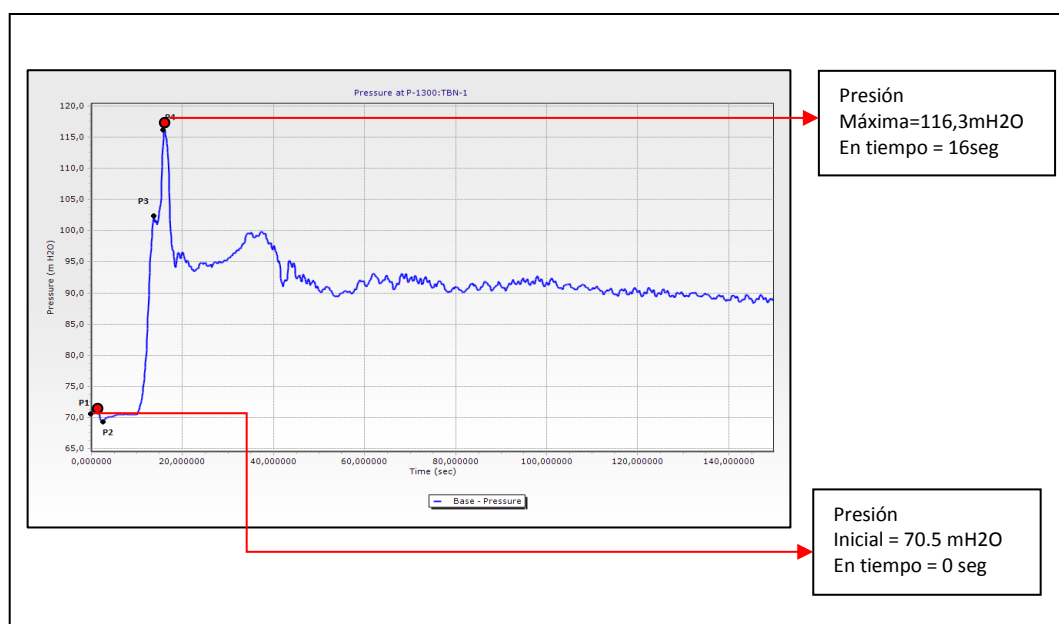
**Gráfica 4- 21. Ingreso de datos para chimenea de equilibrio.**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Ingreso de datos”

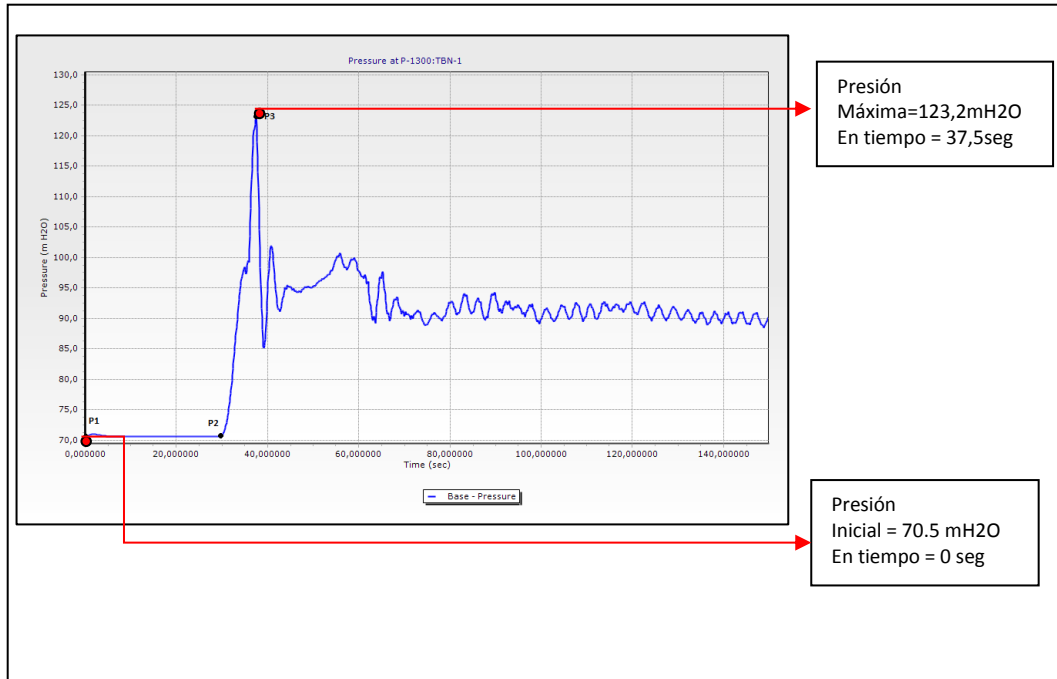
Al analizar la tubería con chimenea de equilibrio se obtuvieron los siguientes resultados, Los datos de las siguientes gráficas se encuentran en el ANEXO 2

**Gráfica 4- 22 Rechazo de carga instantánea con Chimenea de Equilibrio**



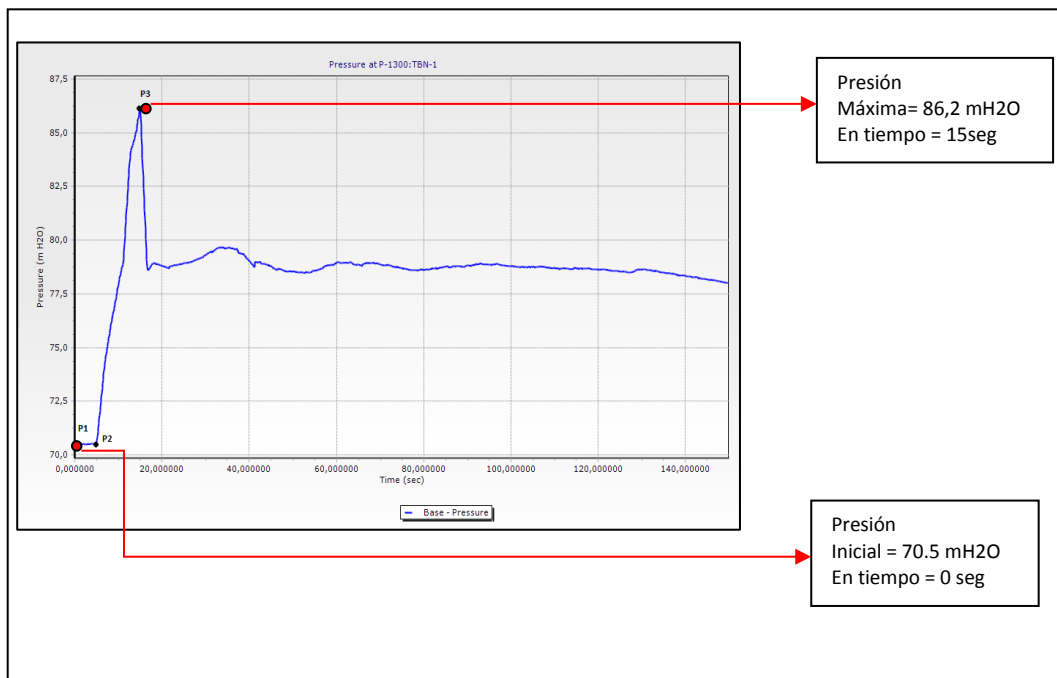
Fuente: Bentley Hammer V8i, “gráfico de presiones con chimenea de equilibrio”

**Gráfica 4- 23.Rechazo de carga con Chimenea de Equilibrio**



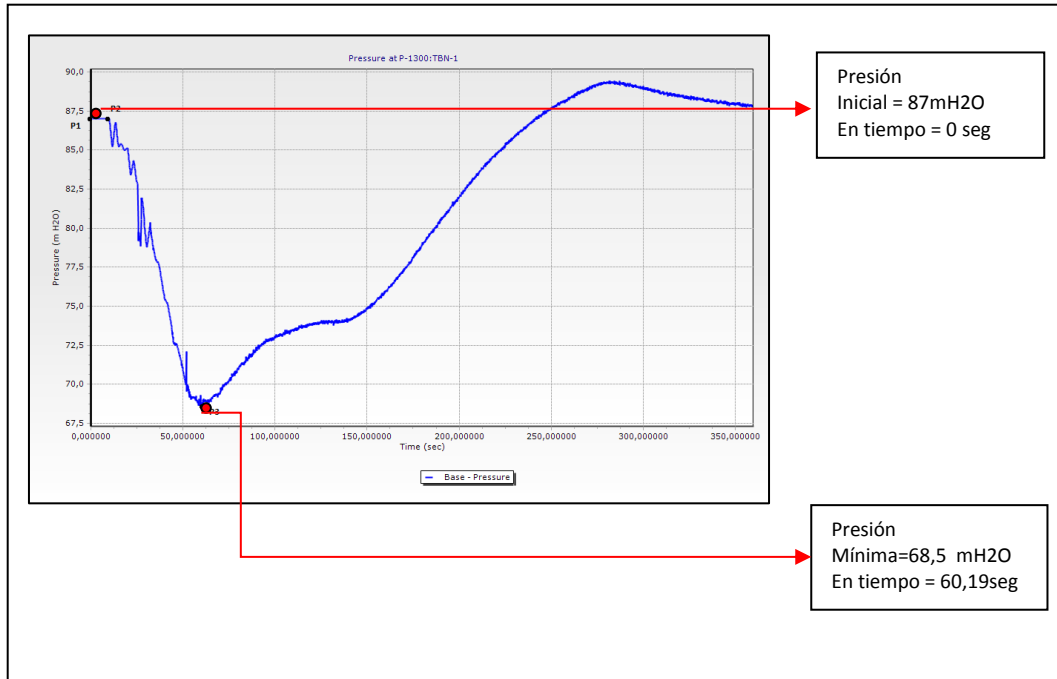
Fuente: Bentley Hammer V8i, “grafico de presiones con chimenea de equilibrio”

**Gráfica 4- 24. Variación de Carga con Chimenea de Equilibrio**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “grafico de presiones con chimenea de equilibrio”

**Gráfica 4- 25. Aceptación de Carga con Chimenea de Equilibrio**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “gráfico de presiones con chimenea de equilibrio”

Con los Gráficos anteriores se puede hacer el cálculo del porcentaje de golpe de ariete con la implementación de la Chimenea de Equilibrio.

**Tabla 4- 8.Golpe de ariete con Chimenea de equilibrio.**

| Cierre o apertura de turbina | Presión Ini. | Presión Max | %G.A. | % Admisible de la turbina | Cumple |
|------------------------------|--------------|-------------|-------|---------------------------|--------|
| Rechazo de carga instantáneo | 70,5         | 116,3       | 65    | -15 a 50                  | No     |
| Rechazo de carga             | 70,5         | 123,2       | 75    | -15 a 50                  | No     |
| Variación de carga           | 70,5         | 86,2        | 22    | -15 a 50                  | Si     |
| Aceptación de carga          | 87           | 68,5        | -21   | -15 a 50                  | No     |

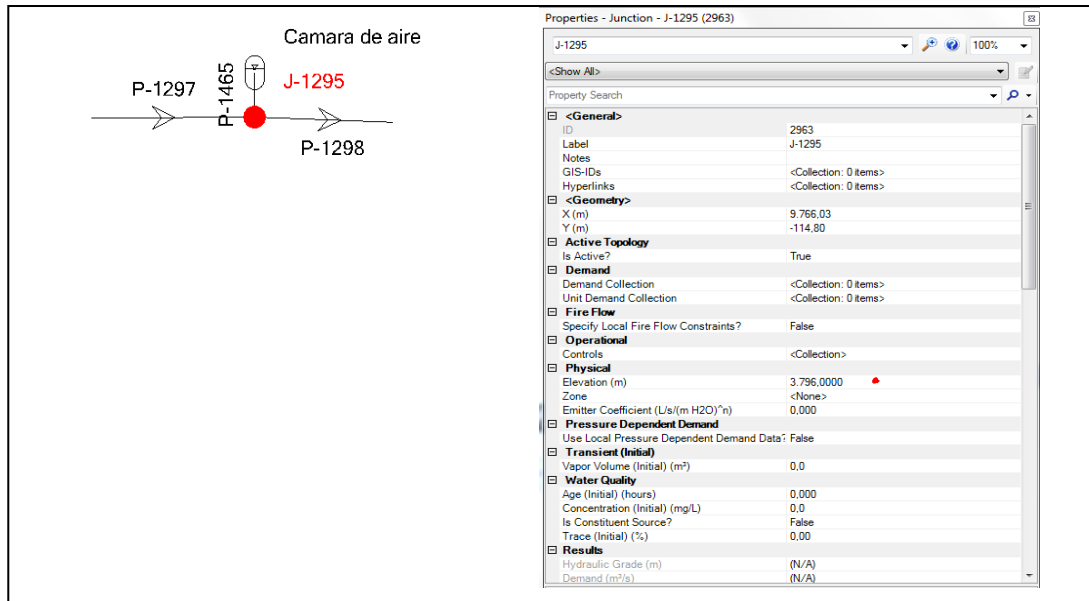
Fuente: Bentley Hammer V8i, “Golpe de ariete para cada ley de cierre o apertura de la turbina”

Como se observa en la tabla anterior, implementando la Chimenea de Equilibrio la presión en la turbina disminuye notablemente, pero no cumple con los valores admisibles de porcentaje de golpe de ariete para la turbina Francis, adicionalmente cumple con su función de disminuir la sobrepresión.

#### 4.4.2. Cámara de aire

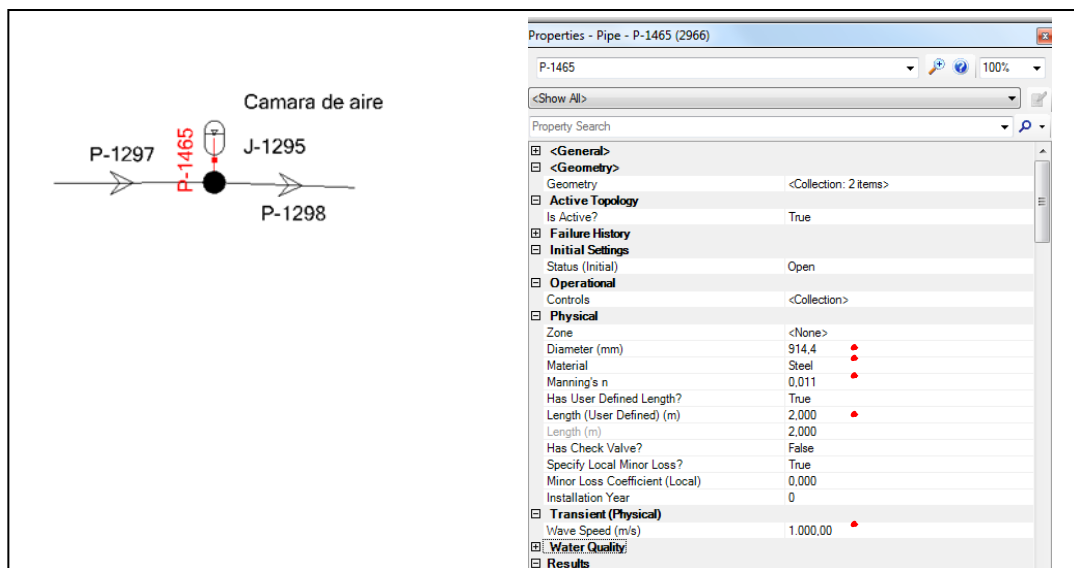
Para el análisis de la tubería en el programa Bentley Hammer, los datos de la cámara de aire se ingresaron de la siguiente manera:

**Gráfica 4- 26. Ingreso de datos del punto de ubicación de la cámara de aire**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Ingreso de datos””

**Gráfica 4- 27. Ingreso de datos del tubo de conexión entre la cámara y la tubería de conducción**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Ingreso de datos””

En la cota 3796 m de la tubería de conducción de la Presa Salve Faccha al TRP2 Quillugsha, se colocó una tubería de acero de 914.4mm diámetro, con coeficiente de Manning 0.011 y 2 m de longitud, la cual conduce el agua desde la tubería de conducción hasta la cámara de aire.

La elevación de la Base de la cámara de aire será la cota 3796 más los 2 m de la tubería de acero, es decir a 3798 m está ubicada la base.

El valor de la elevación será el mismo valor de la elevación de la base 3798m, el volumen de la cámara de aire es de 70 m<sup>3</sup>, diseñada de acuerdo a J. Parmakian, esto se detalla en el Anexo 6, dado que el proyecto está ubicado en la cota 3890.9m, la presión atmosférica será de 6,3 mca.

Los datos físicos de los transientes de la cámara de aire, fueron datos entregados por el ingeniero Edmundo Mendoza, quien realizo los estudios de transitorios hidráulicos del proyecto Mini central hidroeléctrica Quillugsha.

**Tabla 4- 9. Datos de la cámara para ingreso en el Bentley Hammer**

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| Diameter (Tank Inlet Orifice) (mm) | 360 |
| Ratio of Losses                    | 2.5 |
| Gas Law Exponent                   | 1.2 |
| Ratio of Losses                    | 1   |

Fuente: Ing. Edmundo Mendoza, “datos importantes para la cámara de aire”

Pressure (Gas-Preset)(mH<sub>2</sub>O), La presión de la cámara de aire es 250 mca, este valor se definió realizando varias pruebas en el programa Bentley Hammer con diferentes valores de Gas de 0 a 300mca, se tomó el valor de 250mca ya que con este valor la cámara de aire cumple con la función de reducir el porcentaje del golpe de ariete a los rangos que la turbina Francis puede soportar, en la siguiente tabla se muestra la variación del porcentaje de golpe de ariete según va aumentando la presión de gas en la cámara de aire. Los datos de la siguiente tabla se encuentran en el ANEXO 4

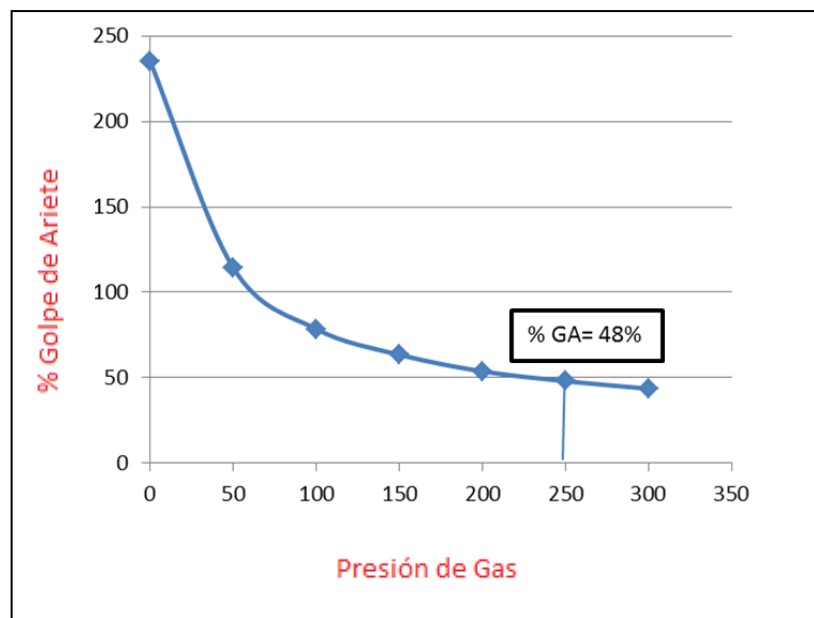
**Tabla 4- 10. Valores de la curva de Presión de gas vs porcentaje de Golpe de Ariete**

| Presión GAS mH2O | Tiempo(s) | Presión Inicial mH2O | Tiempo (s) | Presión máxima mH2O | Golpe de Ariete | % Golpe de Ariete |
|------------------|-----------|----------------------|------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| 0                | 0         | 73,1                 | 123,29     | 245,1               | 3,353           | 235               |
| 50               | 0         | 73,1                 | 40,2       | 156,8               | 2,145           | 115               |
| 100              | 0         | 73,1                 | 57,29      | 130,5               | 1,785           | 79                |
| 150              | 0         | 73,1                 | 69,5       | 119,5               | 1,635           | 63                |
| 200              | 0         | 73,1                 | 80,9       | 112,4               | 1,538           | 54                |
| 250              | 0         | 73,1                 | 93,19      | 108,2               | 1,48            | 48                |
| 300              | 0         | 73,1                 | 102,09     | 105                 | 1,436           | 44                |

Fuente: Bentley Hammer V8i, “Variación del porcentaje golpe de ariete a medida que aumenta la presión de gas”

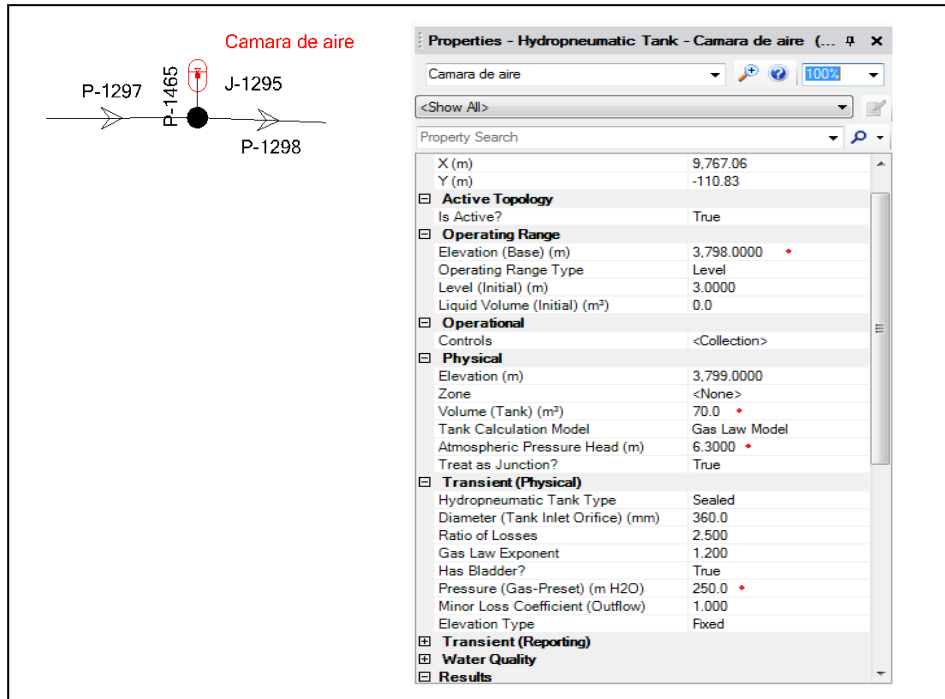
En la Grafica 4-28, se indica como al aumentar el gas en la camara de aire el porcentaje del golpe de ariete disminuye.

**Gráfica 4- 28. Curva de Presión de Gas vs Golpe de Ariete.**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “representación gráfica de la tabla 4-10.”

**Gráfica 4- 29. Ingreso de datos en el Bentley Hammer para la Cámara de Aire**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “Ingreso de datos”

Si la cámara de aire se ubica a una distancia mayor a 29 m de la turbina está pierde la efectividad deseada, ya que los valores de porcentaje del golpe de ariete están fuera del rango de tolerancia de las turbinas Francis por motivo de construcción y topografía, Los datos de la siguiente tabla se encuentran en el ANEXO 5

**Tabla 4- 11. Porcentaje de Golpe de ariete para distintas distancias de la turbina**

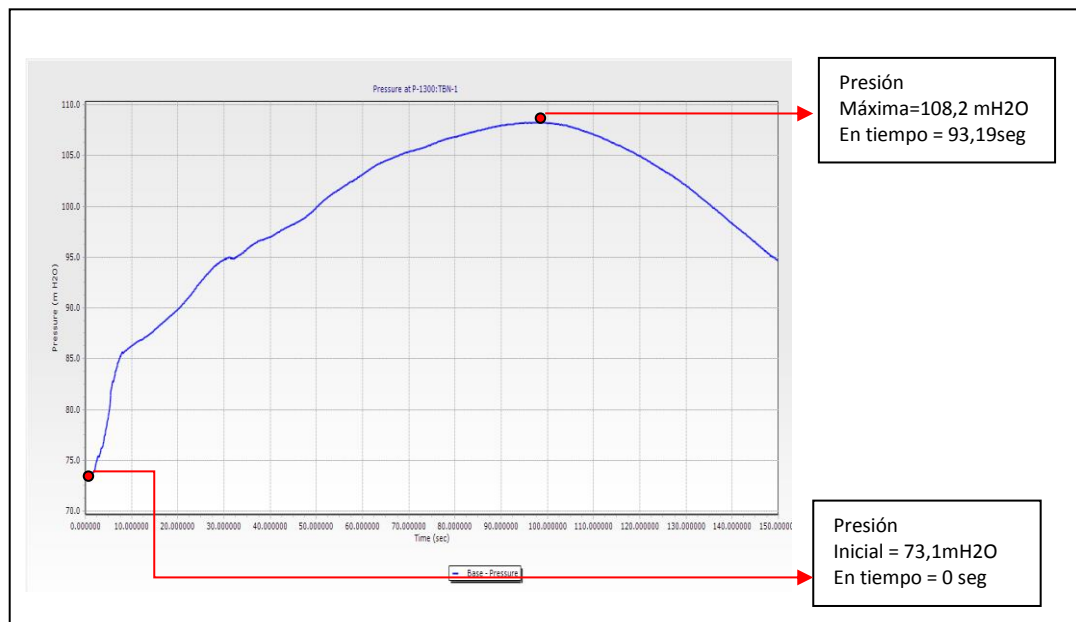
| Ubicación | Presión inicial mH2O | Presión Max mH2O | %G.A. | % G.A. Turbinas Francis | Cumple |
|-----------|----------------------|------------------|-------|-------------------------|--------|
| 5         | 73,1                 | 107,1            | 46,51 | 50% a -15%              | Si     |
| 11        | 73,1                 | 108,5            | 48,43 | 50% a -15%              | Si     |
| 20        | 73,1                 | 108,2            | 48,02 | 50% a -15%              | Si     |
| 29        | 73,1                 | 108,3            | 48,15 | 50% a -15%              | Si     |
| 38        | 73,1                 | 111,3            | 52,26 | 50% a -15%              | No     |
| 46        | 73,1                 | 111,3            | 52,26 | 50% a -15%              | No     |
| 55        | 73,1                 | 111,3            | 52,26 | 50% a -15%              | No     |
| 107       | 73,1                 | 115,6            | 58,14 | 50% a -15%              | No     |

Fuente: Bentley Hammer V8i, “variación del porcentaje de golpe de ariete para distintas distancias relativas a la turbina”

La Cámara de aire se puede colocar a una distancia de 5 a 29m de la turbina, dada las características de la topografía del lugar, se ha ubicado la Cámara de aire a 20 m de la turbina, con esto cumple con los criterios de tolerancia de porcentaje de sobrepresión por golpe de ariete de las turbinas Francis.

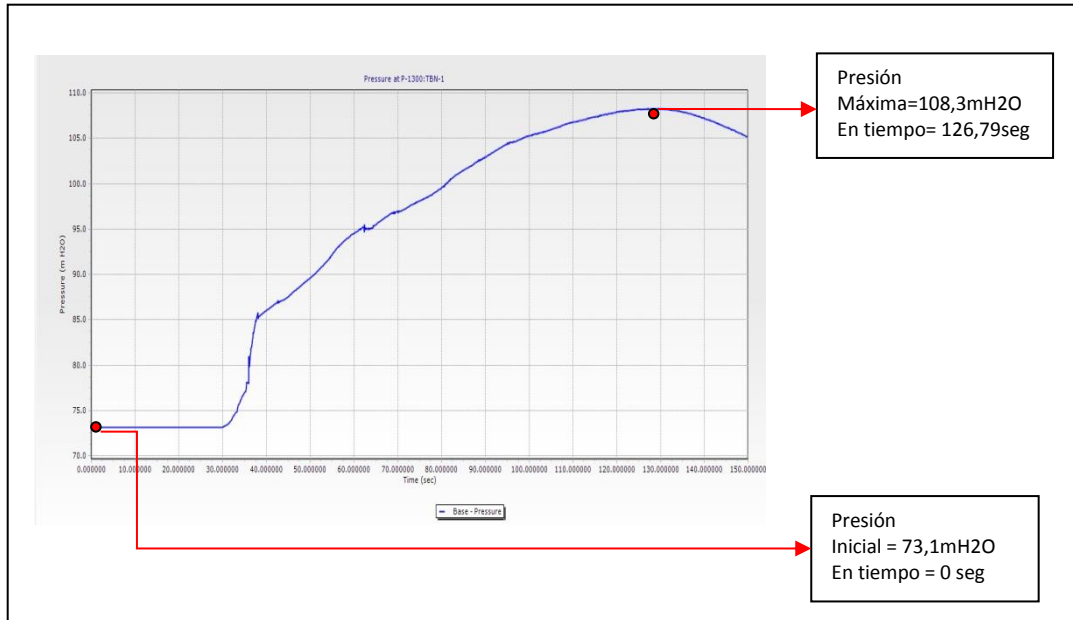
Al analizar el comportamiento de la tubería con la implementación de la cámara de aire como equipo de protección, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Gráfica 4- 30. Rechazo de Carga Instantánea con Cámara de Aire**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “gráfico de presiones con cámara de aire”

**Gráfica 4- 31. Rechazo de Carga con Cámara de Aire**



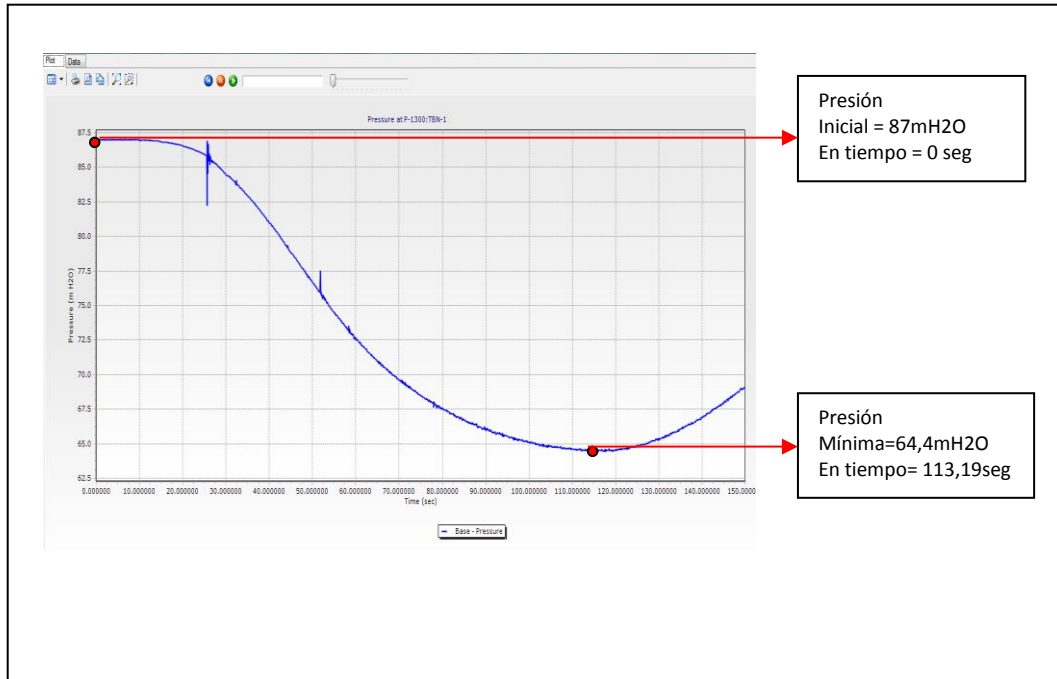
Fuente: Bentley Hammer V8i, “gráfico de presiones con cámara de aire”

**Gráfica 4- 32. Variación de Carga con Cámara de Aire**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “gráfico de presiones con cámara de aire”

**Gráfica 4- 33. Aceptación de Carga con Cámara de Aire**



Fuente: Bentley Hammer V8i, “gráfico de presiones con cámara de aire”

Con los Gráficos anteriores se puede hacer el cálculo del porcentaje de golpe de ariete con la implementación de la Cámara de Aire.

**Tabla 4- 12. Golpe de ariete con Cámara de Aire**

| Cierre o apertura de turbina | Presión Inicial | Presión Max | %G.A. | % Admisible de la turbina | Cumple |
|------------------------------|-----------------|-------------|-------|---------------------------|--------|
| Rechazo de carga instantáneo | 73,1            | 108,2       | 48    | -15 a 50                  | Si     |
| Rechazo de carga             | 73,1            | 108,3       | 48    | -15 a 50                  | Si     |
| Variación de carga           | 73,1            | 85,9        | 18    | -15 a 50                  | Si     |
| Aceptación de carga          | 87              | 64,4        | -26   | -15 a 50                  | No     |

Fuente: Bentley Hammer V8i, “Golpe de ariete para cada ley de cierre o apertura de la turbina”

## **5. CONCLUSIONES**

### **5.1. Conclusiones para Objetivos Generales**

Para definir el comportamiento de la tubería de conducción desde la presa Salve Faccha hasta el TRP 2 Quillugsha, se utilizó el programa Bentley Hammer Vi8 para analizar la tubería, sometida a diferentes casos de cierre o apertura de la turbina, obteniendo las gráficas de las envolventes de presión con las cuales se pudo definir el valor del porcentaje del golpe de ariete, y demostrar que la conducción necesita equipos de protección, para proteger la tubería y la turbina de las sobrepresiones ocasionada por la operación de la central hidroeléctrica Quillugsha.

### **5.2. Conclusiones para objetivos específicos.**

De acuerdo a los resultados, se propone implementar una chimenea de equilibrio o una cámara de aire, antes de la turbina, para proteger a la tubería y turbina del fenómeno del Golpe de ariete, producido por el cierre o apertura de la turbina, reducir las presiones y por lo tanto el % de Golpe de ariete a porcentajes admisibles de las turbinas Francis.

De los valores de la tabla 5.2. Se concluye que la turbina Francis se puede colocar a una distancia de 100 a 300m con valores de sobrepresión por golpe de ariete dentro del rango de valores admisibles de -15% de subpresión y 50% de sobrepresión para esta turbina, por condiciones de topografía se ubicó a 600m de la turbina con un porcentaje de sobrepresión de 65%, no llega a los rangos admisibles sin embargo cumple con su función de reducir las presiones y proteger a la tubería y turbina de las sobrepresiones por golpe de ariete.

En base a lo citado anteriormente y contrastando con la topografía donde se encuentra implantado la tubería la posibilidad de colocar una chimenea de equilibrio es una obra que requeriría una estructura tipo tubo de 75 metros de altura para mantener la pérdida por fricción desde la presa Salve Faccha, y cumplir con la función de reducir las sobrepresiones por golpe de ariete, pero realizar este tipo de estructura tendría un costo elevado por la altura de la chimenea.

Para evitar la colocación de una chimenea de equilibrio que significa un costo excesivo para el proyecto, se da la opción de colocar una cámara de aire muy próxima a la turbina que realice las mismas funciones de amortiguamiento del golpe de ariete producido por salidas emergentes o por la operación normal de apertura y cierre de la turbina.

## **6. RECOMENDACIONES**

Para la presión inicial de gas en la cámara de aire no se recomienda usar valores mayores a 250 mH<sub>2</sub>O. Debido a que esta presión es la óptima para que la cámara reduzca el porcentaje de golpe de ariete a valores admisibles para la turbina, además si se aumenta la presión de gas tendría una repercusión en la parte económica, aumentando el precio de la cámara por el aumento de espesor.

Para el diseño y ubicación de la Cámara de Aire se recomienda una presión de gas de 250 mH<sub>2</sub>O a una distancia de 20 metros con respecto a la turbina Francis para cumplir con los valores admisibles de subpresión y sobrepresión que soporta esta turbina, estos valores son los óptimos que se obtuvieron con el programa Bentley Hammer V8i colocando el equipamiento mecánico a diferentes distancias y presiones utilizando datos reales del proyecto.

No es recomendable utilizar chimenea de equilibrio por la razón de que esta podría ser una solución muy costosa y no viable para el proyecto, a pesar de que el mantenimiento en chimeneas de equilibrio es nulo, no justifica su instalación por tal motivo así que la cámara de aire con dimensiones mucho más pequeñas y con un mantenimiento apropiado, da una solución mucho más económica y viable al planteamiento del problema, adicionalmente no es aconsejable construir una estructura muy esbelta porque se tendría problemas de estabilidad por la altura debería tener la chimenea de equilibrio

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- John Parmakian, (1963), Waterhammer Analysis, Dover Publications, INC, New York.
- Ramiro Ortiz Flórez, (2011), Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, ediciones la U, Colombia, Bogotá.
- Ing. Carlos Luis Navas, (2014), Curso de Centrales Hidroeléctricas, (capítulo 2), Ecuador, Quito.
- Ing. Edmundo Mendoza, (2010), Curso: Golpe de Ariete, (Módulo 1, 2), TWYMAN Ingenieros Consultores MBA-UC EIRL.
- Bentley Hammer V8i User's Guide Edition 1.
- EPMAPS, (2013), estudio hidráulico de la estación Quillugsha del sistema Papallacta integrado.

## **8. ANEXOS**

**ANEXO 1: Datos para la Tubería de Conducción**

**ANEXO 2: Datos de las gráficas de presión para el cálculo del Golpe de Ariete**

**ANEXO 3: Datos de las Gráficas para el cálculo de la ubicación de la Chimenea de Equilibrio**

**ANEXO 4: Datos de las gráficas para el cálculo de la presión de gas para la Cámara de Aire**

**ANEXO 5: Datos de las gráficas para el cálculo de la ubicación de la Cámara de Aire**

**ANEXO 6: Memoria de cálculo para el volumen de la Cámara de Aire**