



**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTOS DE LOS PROCESOS HIDRODINÁMICOS TRANSITORIOS EN
EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA
HIDRÁULICA**

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

AUTOR: Julio Wladimir Toapanta Cumbal

TUTOR: Jorge Iván Calero Hidalgo

Quito - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio Wladimir Toapanta Cumbal con documento de identificación N.º 1719771238 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de septiembre de 2022

Atentamente,



Julio Wladimir Toapanta Cumbal

1719771238

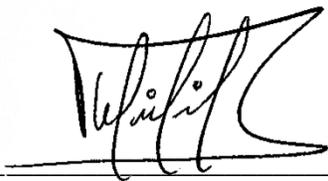
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Julio Wladimir Toapanta Cumbal con documento de identificación N.º 1719771238, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico manifiesto que: “Efectos de los procesos Hidrodinámicos Transitorios en el diseño de los Sistemas de Conducción de la Infraestructura Hidráulica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de septiembre de 2022

Atentamente,



Julio Wladimir Toapanta Cumbal

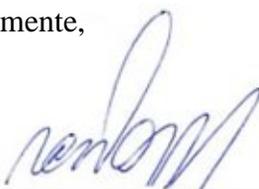
1719771238

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Iván Calero Hidalgo con documento de identificación N.º 1800480434, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EFECTOS DE LOS PROCESOS HIDRODINÁMICOS TRANSITORIOS EN EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA, realizado por Julio Wladimir Toapanta Cumbal con documento de identificación N.º 1719771238, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de septiembre de 2022

Atentamente,



Ing. Jorge Iván Calero Hidalgo, MSc.

1800480434

DEDICATORIA

Me gustaría dedicar este trabajo de titulación a toda mi familia, especialmente a mis padres Julio y María quienes, con su amor, comprensión y ayuda en momentos complicados y buenos me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, además por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades porque Dios están siempre conmigo.

A toda mi familia porque con sus consejos, oraciones y palabras de aliento creen en mí y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme con la vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, por ser el apoyo y fortaleza en momentos difíciles.

A mis padres, por ser los principales promotores de mis metas, por la confianza, por creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado a lo largo de mi existencia.

Mis sinceros agradecimientos, a los docentes de la carrera de ingeniería civil de la Universidad Politécnica Salesiana, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PROBLEMA DEL ESTUDIO.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	2
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.5. METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO II	5
SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	5
2.1. DEFINICIÓN DE SISTEMAS DE CONDUCCIÓN.....	5
2.2. CONDUCCIÓN POR BOMBEO.....	5
2.3. CONDUCCIÓN A PRESIÓN POR GRAVEDAD	6
2.4. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN	6
2.4.1 <i>Tuberías</i>	6
2.4.2 <i>Bombas Centrífugas</i>	7
2.4.3 <i>Válvulas</i>	7
2.4.4 <i>Turbinas Hidráulicas</i>	7
2.5. FLUJOS EN SISTEMAS DE CONDUCCIÓN A PRESIÓN	7
2.5.1 <i>Flujo permanente o estacionario</i>	7

2.5.2	<i>Flujo no permanente o transitorio</i>	7
2.6.	ANÁLISIS HIDRÁULICO EN SISTEMAS DE CONDUCCIÓN A PRESIÓN	8
2.6.1	<i>Sistemas de conducción a presión en régimen estacionario</i>	8
2.6.1.1	Conservación de la masa.....	8
2.6.1.2	Conservación de la energía	9
2.6.2	<i>Pérdidas de carga en sistemas de conducción a presión</i>	11
2.6.2.1	Pérdidas de fricción o principales	11
2.6.2.2	Pérdidas locales o puntuales	14
2.6.3	<i>Sistemas de conducción a presión en régimen transitorio</i>	14
2.6.3.1	Ecuación dinámica	15
2.6.3.2	Ecuación de continuidad	16
CAPÍTULO III.....		17
PROCESO TRANSITORIO GOLPE DE ARIETE.....		17
3.1.	DEFINICIÓN DE GOLPE DE ARIETE.....	17
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TRANSITORIO – GOLPE DE ARIETE	17
3.3.	PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO TRANSITORIO – GOLPE DE	
ARIETE.....	21
3.3.1	<i>Celeridad de Onda</i>	21
3.3.2	<i>Duración de la fase de Golpe de Ariete</i>	22
3.3.3	<i>Tiempo de perturbación transitoria o tiempo de cierre</i>	23
CAPÍTULO IV		24
CONCEPTOS BÁSICOS DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS		24

4.1.	MANERAS DE APROVECHAR EL RECURSO HÍDRICO	24
4.1.1	<i>Mediante sistemas fluviales de regulación</i>	25
4.1.2	<i>Mediante sistemas fluviales de derivación</i>	25
4.2.	TURBINA HIDRÁULICA.....	25
4.3.	TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS	26
4.3.1	<i>Turbina Pelton</i>	26
4.3.2	<i>Turbina Francis</i>	26
4.3.3	<i>Turbinas Kaplan</i>	27
4.4.	PARTES DE UNA TURBINA HIDRÁULICA A REACCIÓN	28
4.4.1	<i>Tubo de succión en las turbinas de reacción</i>	29
4.4.2	<i>Construcción del tubo de succión</i>	29
4.5.	CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS SEGÚN SU POTENCIA	29
4.6.	PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	30
4.6.1	<i>Toma de agua</i>	32
4.6.2	<i>Sistema de limpieza de sólidos</i>	32
4.6.3	<i>Sistemas de conducción</i>	32
4.6.4	<i>Tanques o cámaras de presión</i>	32
4.6.5	<i>Tubería a presión</i>	33
4.6.6	<i>Casa de máquinas</i>	33
4.6.7	<i>Tubo de succión</i>	33
4.6.8	<i>Canal de salida</i>	34
4.7.	GOLPE DE ARIETE EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA	34
CAPÍTULO V.....		36

SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE 36

5.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE SISTEMA DE AGUA POTABLE 36

5.2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE 37

 5.2.1 *Fuentes de abastecimiento de agua* 37

 5.2.1.1 Fuentes de abastecimiento subterráneas 37

 5.2.1.2 Fuentes de abastecimiento superficiales 38

 5.2.2 *Obras de captación* 38

 5.2.2.1 Bocatoma o captación lateral 38

 5.2.2.2 Captación por vertederos laterales 39

 5.2.2.3 Tomas laterales 39

 5.2.3 *Tubería de aducción* 39

 5.2.4 *Desarenadores* 39

 5.2.5 *Tubería de conducción* 39

 5.2.6 *Tanque de almacenamiento* 40

 5.2.7 *Red de Distribución* 40

 5.2.8 *Colector de aguas residuales* 40

 5.2.9 *Estaciones de bombeo* 41

 5.2.9.1 Bombas 41

 5.2.9.2 Selección de equipo de bombeo 42

5.3. GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE 43

 5.3.1 *Golpe de ariete en sistemas de conducción por bombeo* 43

 5.3.2 *Descripción del proceso transitorio de golpe de ariete en sistemas de bombeo* 44

CAPÍTULO VI..... 47

**FORMULACIÓN DE MODELO PARA ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE
TRANSICIÓN HIDRODINÁMICA EN LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LAS
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE DERIVACIÓN CON CARGA PEQUEÑA Y
MEDIANA..... 47**

6.1.	MODELO RÍGIDO DEL GOLPE DE ARIETE	47
6.2.	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE INERCIA DEL CONDUCTO DE CARGA.....	51
6.3.	CONSTANTE INERCIAL DEL CONDUCTO DE CARGA	52
6.4.	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE INERCIAL DE LA CÁMARA ESPIRAL	54
6.5.	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE INERCIAL DEL SISTEMA DE ÁLABES	57
6.6.	DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE INERCIAL DE CONDUCTO DE RESTITUCIÓN	58
6.7.	DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE INERCIAL DEL TRAMO SUPERIOR	60
6.8.	DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE INERCIAL DEL TRAMO INFERIOR	60
6.9.	DETERMINACIÓN COEFICIENTE INERCIAL DEL TRAMO DE CONDUCCIÓN.....	60
6.10.	DETERMINACIÓN DE RELACIÓN COEFICIENTE INERCIAL TRAMO SUPERIOR CON COEFICIENTE INERCIAL TRAMO CONDUCCIÓN	61
6.11.	DETERMINACIÓN DE RELACIÓN COEFICIENTE INERCIAL TRAMO INFERIOR CON COEFICIENTE INERCIAL TRAMO CONDUCCIÓN	61
6.12.	DETERMINACIÓN DE LA CARGA INERCIAL O INCREMENTO DE PRESIÓN POR GOLPE DE ARIETE PARA CADA FASE DE GOLPE HIDRÁULICO	65
6.13.	DETERMINACIÓN DE LA CARGA INERCIAL O INCREMENTO DE PRESIÓN POR GOLPE DE ARIETE EN EL TRAMO SUPERIOR	66

6.14. DETERMINACIÓN DE LA CARGA INERCIAL O INCREMENTO DE PRESIÓN POR GOLPE DE ARIETE EN EL TRAMO INFERIOR	66
6.15. DETERMINACIÓN DEL GOLPE RELATIVO	67
CAPÍTULO VII	68
FORMULACIÓN DE MODELO DE ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE TRANSICIÓN HIDRODINÁMICA EN LOS SISTEMAS DE AGUA POTABLE QUE OPERAN CON ESTACIONES DE BOMBEO CON CARGA PEQUEÑA Y MEDIANA.....	68
7.1. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE MANIOBRA.....	69
7.1.1 <i>Para el caso de cierre o interrupción rápida</i>	69
7.1.2 <i>Para el caso de cierre o interrupción lenta</i>	70
7.2. DETERMINACIÓN DEL INCREMENTO DE PRESIÓN POR EL GOLPE DE ARIETE	70
7.2.1 <i>Ecuación de Zhukovsky</i>	71
7.2.2 <i>Fórmula de Michaud</i>	72
7.3. CÁLCULO DE LA SOBREPRESIÓN PRODUCIDA POR EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE QUE OPERAN CON ESTACIÓN DE BOMBEO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE PARADA	73
7.3.1 <i>Determinación del tiempo de parada de bomba</i>	73
7.3.2 <i>Determinación de la longitud crítica</i>	77
7.3.3 <i>Impulsión corta</i>	77
7.3.4 <i>Impulsión larga</i>	78
7.3.5 <i>Determinación del incremento de presión por el golpe de ariete por medio de la ecuación de Allievi</i>	78
CAPÍTULO VIII.....	79

FORMULACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS DEL GOLPE DE ARIETE EN EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	79
8.1. ALGORITMO DE CÁLCULO	79
8.2. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DEL PROCESO TRANSITORIO GOLPE DE ARIETE EN LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	89
8.2.1 <i>Ejemplo de cálculo para determinar el incremento de presión por golpe de ariete en el tramo de conducción de una central hidroeléctrica de derivación</i>	<i>89</i>
8.2.1.1 Determinación del coeficiente inercial de conducto carga	90
8.2.1.2 Determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral	93
8.2.1.3 Determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes	94
8.2.1.4 Determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución	94
8.2.1.5 Determinación del coeficiente inercial del tramo de conducción	96
8.2.1.6 Determinación del coeficiente inercial del tramo superior	96
8.2.1.7 Determinación del coeficiente inercial del tramo inferior	96
8.2.1.8 Determinación relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción	97
8.2.1.9 Determinación relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción	97
8.2.1.10 Determinación del incremento por golpe de ariete en cada fase o intervalo de tiempo a lo largo del tramo de conducción	97
8.2.1.11 Determinación de la capacidad de flujo inicial	98
8.2.1.12 Determinación de la carga inercial del tramo de conducción	101

8.2.1.13 Determinación del golpe relativo del tramo de conducción.....	108
8.2.2 <i>Ejemplo de cálculo para determinar el incremento de presión por golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable.....</i>	<i>110</i>
8.2.2.1 Determinación de la celeridad	111
8.2.2.2 Determinación del tiempo de duración de la fase de golpe de ariete.....	111
8.2.2.3 Determinación del incremento de presión por golpe de ariete	112
8.2.3 <i>Ejemplo de cálculo para determinar el incremento de presión por golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable que opera con estación de bombeo en función al tiempo de parada (T_p).....</i>	<i>114</i>
8.2.3.1 Determinación de la altura manométrica	115
8.2.3.2 Determinación de la pendiente.....	115
8.2.3.3 Determinación de la celeridad	115
8.2.3.4 Determinación del tiempo de duración de la fase de golpe de ariete.....	115
8.2.3.5 Determinación del tiempo de parada	116
8.2.3.6 Determinación de la longitud crítica.....	116
8.2.3.7 Determinación del incremento de presión por golpe de ariete	117
CAPÍTULO IX.....	119
MEDIDAS PARA EVITAR O REDUCIR EL IMPACTO DEL GOLPE DE ARIETE EN LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA ..	119
9.1. PARA EL CASO DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE DERIVACIÓN	119
9.1.1 <i>Chimeneas de equilibrio</i>	<i>119</i>
9.1.2 <i>Válvulas de cierre y seguridad</i>	<i>120</i>
9.1.3 <i>Volante de inercia.....</i>	<i>120</i>

9.2. PARA EL CASO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE QUE OPERAN CON ESTACIONES DE BOMBEO.....	121
9.2.1 Cámaras de aire.....	121
9.2.2 Válvulas de retención.....	121
9.2.3 Válvulas anticipadoras de onda.....	121
9.2.4 Válvulas de alivio.....	122
CONCLUSIONES.....	123
RECOMENDACIONES	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
GLOSARIO DE SÍMBOLOS	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Tabla de valores para el coeficiente (C) según Mendiluce</i>	75
Tabla 2 <i>Tabla de valores para el coeficiente (K) según Mendiluce</i>	76
Tabla 3 <i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo</i>	89
Tabla 4 <i>Datos de los elementos geométricos de una turbina a reacción Kaplan</i>	90
Tabla 5 <i>Datos a usar para el cálculo de la sección de cada tramo de conducto de carga</i>	91
Tabla 6 <i>Datos a usar para el cálculo del coeficiente inercial de la cámara espiral</i>	93
Tabla 7 <i>Datos de las medidas geométricas del conducto de restitución</i>	95
Tabla 8 <i>Número de pasos con su respectivo intervalo de tiempo</i>	98
Tabla 9 <i>Número de pasos con su respectiva capacidad de flujo que varía en el tiempo</i>	100
Tabla 10 <i>Número de pasos con su respectivo incremento por golpe de ariete</i>	107
Tabla 11 <i>Incrementos por golpe de ariete para diferentes cargas netas y diámetros de rodete (Turbina Kaplan)</i>	108
Tabla 12 <i>Incrementos por golpe de ariete para diferentes cargas netas y diámetros de rodete (Turbina Francis)</i>	109
Tabla 13 <i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo</i>	110
Tabla 14 <i>Incrementos por golpe de ariete para diferentes diámetros, longitudes y material en sistemas de abastecimiento de agua potable</i>	113
Tabla 15 <i>Datos a usar para el ejemplo de cálculo</i>	114
Tabla 16 <i>Incremento de carga para diferentes diámetros, longitud, perdidas por fricción</i>	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Esquema de funcionamiento de una bomba</i>	5
Figura 2 <i>Esquema de una línea de conducción por gravedad</i>	6
Figura 3 <i>Representación gráfica de las líneas de energía, piezométrica y de posición</i>	10
Figura 4 <i>Variación de la presión producida por el golpe de ariete en el tiempo</i>	17
Figura 5 <i>Sistema hidráulico tanque – tubería – válvula</i>	18
Figura 6 <i>Representación gráfica del Cierre abrupto de la válvula</i>	19
Figura 7 <i>Representación gráfica de la dilatación de la tubería</i>	20
Figura 8 <i>Representación gráfica del golpe de ariete directo</i>	20
Figura 9 <i>Representación gráfica de la fase inversa del golpe de ariete</i>	21
Figura 10 <i>Vista lateral en corte de una casa de máquinas con turbina Francis</i>	27
Figura 11 <i>Vista en corte de una turbina Kaplan</i>	28
Figura 12 <i>Esquema de una central hidroeléctrica de derivación</i>	31
Figura 13 <i>Elementos de seguridad para mitigar los efectos de una parada brusca en una central hidroeléctrica</i>	35
Figura 14 <i>Elementos de un sistema de abastecimiento de agua potable</i>	36
Figura 15 <i>Esquema de una bomba centrífuga</i>	41
Figura 16 <i>Esquema de una bomba centrífuga con las tuberías de aspiración, impulsión y altura geométrica</i>	42
Figura 17 <i>Diagrama del golpe de ariete a lo largo de un conducto telescópico (turbinas cerradas)</i>	50
Figura 18 <i>Características geométricas de una turbina a reacción Kaplan</i>	55

Figura 19 <i>Cálculo del golpe de ariete en el tramo de conducción de una central hidroeléctrica de derivación.</i>	80
Figura 20 <i>Cálculo del golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable con opera con estación de bombeo.</i>	85
Figura 21 <i>Cálculo del golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable que opera con estación de bombeo en función al tiempo de parada (T_p).</i>	87
Figura 22 <i>Esquema de conducto de carga – turbina – conducto de restitución</i>	91

RESUMEN

El presente trabajo de titulación obedece a la necesidad del estudio de los procesos hidrodinámicos transitorios en el diseño de los sistemas de conducción de la infraestructura hidráulica, específicamente el proceso transitorio Golpe de ariete que afecta el tramo de conducción de las centrales hidroeléctricas de derivación y a los sistemas de conducción de agua potable que operan con estación de bombeo, dicho proceso transitorio se presenta en las tuberías de conducción por cambios en la velocidad del agua originado por el accionamiento de válvulas, compuertas, paralización o arranques de la máquinas hidráulicas, paro de equipos de bombeo o cualquier cambio en la velocidad, responde a esta necesidad implementar modelos de análisis de procesos transitorios, de esa manera determinar el incremento de presión generado por el Golpe de ariete.

En los primeros capítulos se indica de manera breve lo que es una central hidroeléctrica de derivación con sus respectivos componentes y los sistemas de abastecimiento de agua potable que operan con estación de bombeo con sus respectivos componentes.

Los demás capítulos se refieren al golpe de ariete en centrales hidroeléctricas de derivación y en sistemas de agua potable que operan con estación de bombeo, desde la definición del mismo, las causas que lo originan y las medidas que se pueden considerar para reducir el impacto por Golpe de ariete. Por otra parte, se incluye los modelos de análisis del proceso transitorio para cada infraestructura hidráulica para poder calcular la magnitud del golpe de ariete para diferentes escenarios.

Palabras claves: Transitorios, hidroeléctricas, modelación, escenarios, analizar.

ABSTRACT

This graduation work due to the need to study the transitories hydrodynamic processes in the design of the conduction systems of the hydraulic infrastructure, direct in the transitory water hammer process that affects the conduction section of the derivation hydroelectric plants and the potable water conduction systems that operate with a pumping station, said transitory process occurs in the conduction pipes due to changes in the velocity of the water caused by the activation of valves, hydraulic gates, stoppage or start-up of hydraulic machines, stoppage of equipment of pumping or any change in the velocity, responds to this need to implement analysis models of transitory processes, in this way calculate the increase in pressure generated by the Water Hammer. The first chapters quickly indicate what a derivation hydroelectric plant is with its respective components and the potable water supply systems that operate with a pumping station with their respective components.

The other chapters refer to water hammer in derivation hydroelectric power plants and in potable water systems that operate with a pumping station, from its definition, the causes that originate it and the measures that can be considered to reduce the impact by water hammer. On the other hand, the transitory process analysis models for each hydraulic infrastructure are included in order to calculate the magnitude of the water hammer for different scenarios.

Keywords: Transitory, hydroelectric, models, scenarios, analyze.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los sistemas de conducción de la infraestructura hidráulica son de gran importancia ya que son los encargados de transportar el agua y de esa manera cumplir con diferentes objetivos como por ejemplo en el abastecimiento de agua potable y sistemas de riego a poblaciones, como líneas de conducción de alimentación y desfogue de centrales hidroeléctricas; sin embargo en los sistemas de conducción generalmente ocurren perturbaciones en el flujo inicial debido a procesos de regulación del mismo, ya sea mediante maniobras de cierre o apertura de sistemas de regulación de caudal como válvulas o compuertas. Dichas perturbaciones dan origen a flujos transitorios en los conductos a presión, los cuales son situaciones anómalas, dicha situación comúnmente se lo conoce como el golpe de ariete.

Durante el proceso transitorio se originan variaciones de la presión, las cuales pueden causar efectos destructivos o a menudo motivo de fallas en los diferentes sistemas de flujo. Un ejemplo puede ser la ruptura o aplastamiento de la cáscara de la tubería. El estudio de este proceso transitorio es de gran importancia para solucionar problemas de construcción y operación de obras hidráulicas.

Habiendo establecido la importancia de este proceso transitorio, el trabajo de titulación propuesto pretende armar un modelo matemático que permita analizar el golpe de ariete, además de proporcionar una herramienta informática que permita obtener el máximo de información para su comprensión y observación de esta problemática.

1.2. Problema del estudio

La experiencia general en la operación de los sistemas de conducción de la infraestructura hidráulica de diferentes objetivos (hidroeléctricos, de agua potable, riego y otros) evidencia que entre las principales causas para la salida de operación y colapso de las tuberías están el golpe de ariete, las oscilaciones de la presión hidrodinámica, y la vibración; estadísticamente menores incidencias tienen los procesos de corrosión, los fenómenos naturales y los acontecimientos imprevisibles.

Durante el proceso transitorio, los líquidos, debido al cambio de la sección de flujo, originado por el accionamiento de válvulas y compuertas, paralización o arranque de las máquinas hidráulicas, cambia la velocidad de movimiento del líquido y, como resultado de estos procesos, se presentan ondas de incremento y disminución de la presión hidrodinámica, originando las consecuencias mencionadas.

Estos problemas anteriormente indicados en los casos de turbinas a reacción, sistemas de bombas centrífugas tienen la particularidad de la geometría compleja del conducto a presión que incluye a la estructura de ingreso, a la cámara de acercamiento y al conducto de restitución; originando escenarios que difícilmente pueden ser traducidos en modelos analíticos para un análisis confiable.

1.3. Justificación

En concordancia con el problema del estudio, el diseño y construcción de los sistemas hidráulicos de conducción a presión deben estar necesariamente ligados a la necesidad de conocer, interpretar correctamente y aplicar las bases teóricas para el análisis de los procesos que tienen lugar en dichos conductos, así como sustentar correctamente los métodos y mecanismos de

estabilización de los regímenes hidráulicos en ellos, con el fin de incrementar la confiabilidad de la operación y el servicio, así como la seguridad de la infraestructura y su entorno.

En este marco, el trabajo de titulación propuesto pretende armar un modelo matemático que permita analizar el golpe de ariete utilizando un modelo de golpe rígido, el cual nos permite obtener resultados con suficiente grado de aproximación para fines ingenieriles, con esto evitar efectos negativos y desastrosos, además de proporcionar una herramienta informática que permita obtener el máximo de información y racionalizar el esfuerzo intelectual a la hora de analizar el proceso transitorio golpe de ariete en los sistemas de conducción entre límites de cargas pequeñas y medianas: a) centrales hidroeléctricas con turbina de reacción Kaplan y Francis; b) sistemas de bombeo.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Formular y desarrollar algoritmos (Excel) en relación al modelo rígido del golpe de ariete para el análisis de los procesos hidrodinámicos transitorios, útil para el diseño de los sistemas de conducción de infraestructura hidráulica específica.

1.4.2 Objetivos específicos

Formular la base teórica general para el análisis de los procesos de transición hidrodinámica en las conducciones a presión.

Formular el modelo específico de análisis de los procesos de transición hidrodinámica en los sistemas de conducción de las centrales hidroeléctricas de derivación con carga pequeña y mediana.

Formular el modelo específico de análisis de los procesos de transición hidrodinámica en los sistemas de agua potable que operan con estaciones de bombeo con carga pequeña y mediana.

Elaborar y aplicar el algoritmo de cálculo (Excel) que permita obtener resultados con grado de aproximación suficiente para fines ingenieriles particularmente para conductos cortos con secciones transversales de geometría compleja consignando que corresponderá al modelo rígido del golpe de ariete, para los dos modelos específicos formulados.

1.5. Metodología

La metodología que se empleará para el análisis de los procesos hidrodinámicos transitorios en el diseño de los sistemas de conducción de la infraestructura hidráulica constará de lo siguiente:

- Formulación de la base teórica general
- Identificación de los métodos de análisis del golpe de ariete
- Formulación del modelo matemático para cumplir cada uno de los objetivos específicos
- Elaboración del algoritmo para cada uno de los objetivos específicos
- Verificación de los algoritmos elaborados
- Análisis de los resultados

Las bases de diseño hacen referencia, a la información recopilada y obtenida de fuentes bibliográficas digitales e impresas, para armar un modelo matemático que permita analizar el golpe de ariete utilizando un modelo de golpe rígido.

Se desarrollará algoritmos de cálculo a través de un software (Excel) que permita obtener resultados con grado de aproximación suficiente para fines ingenieriles para conductos de carga cortos con secciones transversales de geometría compleja consignando que corresponderá al modelo rígido del golpe de ariete.

Con los resultados obtenidos se procederá a analizarlos e identificar las relaciones entre los parámetros de entrada con los de salida o diseño.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

2.1. Definición de Sistemas de Conducción

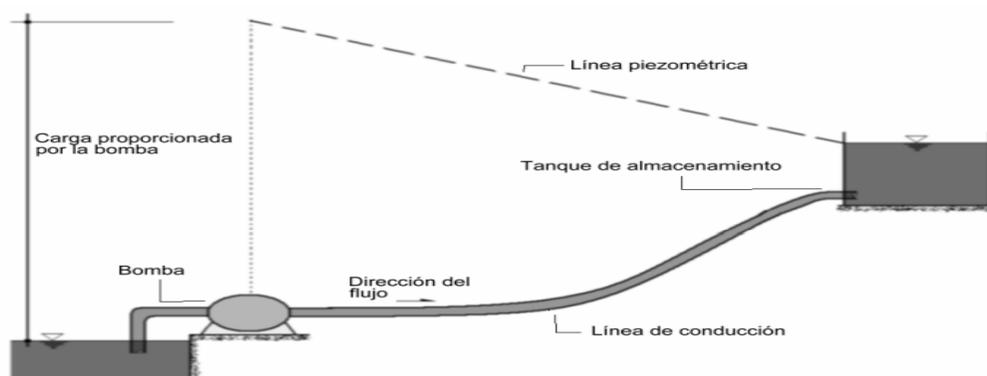
También se los conoce como línea de conducción, es aquella que cumple con la función de transportar el agua captada de la fuente hasta el lugar de su almacenamiento, tratamiento o distribución. Las líneas de conducción pueden presentarse como flujos a superficie libre, por ejemplo, como un canal o mediante un sistema de conducción a presión, estos sistemas de conducción pueden ser a gravedad o por un sistema de bombeo. El trazado de la línea de conducción va a depender de las condiciones topográficas del terreno.

2.2. Conducción por bombeo

La conducción por bombeo se emplea cuando la fuente de abastecimiento de agua se encuentra a un nivel inferior al del tanque de almacenamiento desde el cual el agua es entregada al usuario o usuarios del sistema. Por lo tanto, la conducción por bombeo proporciona una energía adicional y de esta manera transportar el caudal de diseño.

Figura 1

Esquema de funcionamiento de una bomba



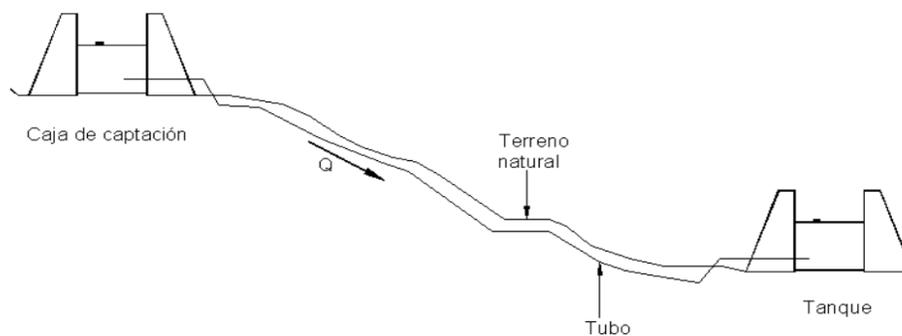
Nota. La gráfica representa un sistema de conducción que opera con estación de bombeo. Fuente: Ortiz Masek (2006).

2.3. Conducción a presión por gravedad

La conducción a presión por gravedad tiene lugar en tuberías de hormigón armado o de acero y se presenta cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es mayor a la altura piezométrica requerida o existente en el punto de entrega del agua, es decir, se hace uso de la topografía existente, pero siempre tomando en cuenta que la conducción trabaje a una presión aceptable.

Figura 2

Esquema de una línea de conducción por gravedad



Nota. La gráfica representa un sistema de conducción a gravedad. Fuente: Martínez Menes (2007).

2.4. Componentes de un sistema de conducción

2.4.1 Tuberías

Son elementos empleados para transportar fluidos, para los sistemas de conducción se utilizan tuberías de diversos materiales como son acero, fibrocemento, concreto presforzado, PVC, hierro dúctil, polietileno de alta densidad, poliéster reforzado con fibra de vidrio y el fierro galvanizado, entre otros. Las tuberías de acero son las más difundidas en los sistemas hidroeléctricos y de bombeo.

2.4.2 Bombas Centrífugas

“Es una máquina hidráulica que transfiere energía mecánica a un fluido, es decir, aumenta la carga disponible para lograr el desplazamiento del fluido en una tubería” (Ortiz Masek, 2006, p. 7).

2.4.3 Válvulas

Son elementos empleados en los sistemas de conducción (tuberías), que cumple con el objetivo de controlar el caudal que fluye a través de una tubería, existe una diversidad de válvulas, cada una cumpliendo con su respectiva función, pero siempre haciendo alusión al control del caudal.

2.4.4 Turbinas Hidráulicas

“Es una máquina que se emplea principalmente para la obtención de la energía hidroeléctrica, las turbinas extraen energía de un flujo de agua y la convierten en energía mecánica para mover generadores eléctricos” (Franzini & Finnemore, 1999, p. 441).

2.5. Flujos en sistemas de conducción a presión

El flujo a presión se divide en función de las propiedades hidrodinámicas de movimiento. Si las propiedades hidrodinámicas varían con el tiempo, se dividen en:

2.5.1 Flujo permanente o estacionario

Es aquel en que los parámetros hidrodinámicos de flujo en cualquier punto no varían con el tiempo, o sus variaciones son relativamente pequeñas con respecto al valor medio.

2.5.2 Flujo no permanente o transitorio

Es aquel que en un determinado punto del campo vectorial los parámetros hidrodinámicos varían en el tiempo.

2.6. Análisis hidráulico en sistemas de conducción a presión

2.6.1 *Sistemas de conducción a presión en régimen estacionario*

El comportamiento de los fluidos a presión en régimen estacionario o permanente está dado por un conjunto de leyes físicas, las cuales se representan a través de ecuaciones.

Las leyes como la conservación de la masa, la segunda ley de movimiento de Newton y la ley de la termodinámica, conforman la base principal para el análisis del flujo a presión a través de una tubería. El flujo estacionario presenta parámetros hidrodinámicos constantes, es decir no varían en el tiempo.

Las ecuaciones que rigen al flujo estacionario son conservación de la masa (continuidad) y conservación de la energía.

2.6.1.1 Conservación de la masa

El principio general de la conservación de masa afirma que la masa dentro de un sistema permanece constante con el tiempo. Además, este principio indica que un flujo es permanente e incompresible.

$$Q = V * A \quad (1)$$

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2 \quad (2)$$

Donde:

- Q: caudal (m³/s);
- V: velocidad media (m/s); y,
- A: área de la sección transversal (m²).

2.6.1.2 Conservación de la energía

La energía que entra en un sistema es igual a la que sale y más las pérdidas de carga, tomando en cuenta que en todo sistema siempre se generan pérdidas locales y por fricción.

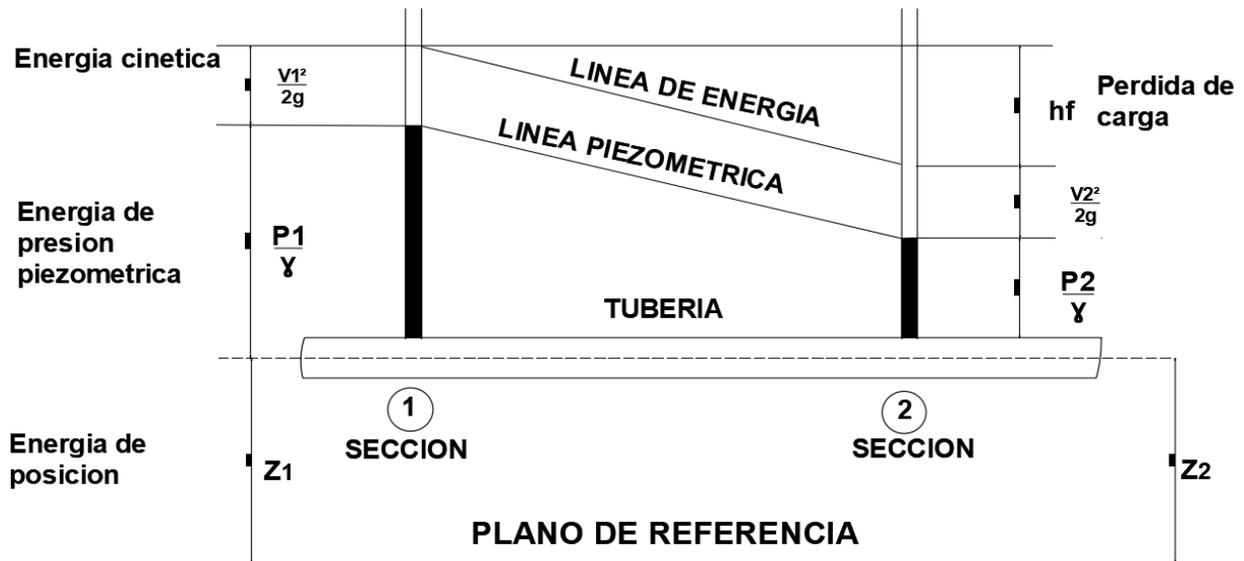
$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2}{2g} + \sum h_{p(1-2)} \quad (3)$$

Donde:

- Z_1 : Carga de posición en el punto uno;
- $\frac{P_1}{\gamma}$: Carga de presión en el punto uno;
- $\frac{V_1}{2g}$: Carga de velocidad en el punto uno;
- Z_2 : Carga de posición en el punto dos;
- $\frac{P_2}{\gamma}$: Carga de presión en el punto dos;
- $\frac{V_2}{2g}$: Carga de velocidad en el punto dos;
- $\sum h_{p(1-2)}$: Pérdida total entre el punto uno y dos; y,
- $h_p = \Delta h_l + \Delta h_j$: Pérdidas longitudinales + pérdidas locales.

Figura 3

Representación gráfica de las líneas de energía, piezométrica y de posición



Nota. La gráfica representa el movimiento dinámico de un fluido. Elaborado por: autor.

El flujo que circula por las tuberías está siempre acompañado de rozamiento de las partículas del fluido entre sí denominada pérdidas de carga. En el caso de tuberías horizontales, la pérdida de carga se manifiesta como una disminución de la presión en el sentido del flujo. Además, depende de otras variables fluido-dinámicas según sea el tipo de flujo, laminar o turbulento. (Arias Palacios & Zabala Morocho, 2013, p. 4)

En el caso del flujo laminar, es característico de fluidos con viscosidades altas donde las líneas de corriente fluyen en láminas perfectamente paralelas y horizontales.

En el flujo turbulento, sucede lo contrario es característico de fluidos con viscosidades bajas, que circulan por tuberías de rugosidad alta y se caracteriza por la presencia de velocidades transversales y de movimientos vorticosos de las líneas de corriente.

El tipo de flujo laminar o turbulento depende del valor de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, es decir del número de Reynolds (R_e).

2.6.2 Pérdidas de carga en sistemas de conducción a presión

Las pérdidas de carga constituyen energía específica pérdida irreversiblemente debido a la transformación de la energía cinética en calorífica que finalmente se disipa. Las pérdidas de carga están constituidas por pérdidas de fricción o principales (h_f) y pérdidas puntuales o locales o también conocidas como pérdidas menores (h_l). (Soria. G. (2016). “Mecánica de Fluidos I”. Clases presenciales UPS-Quito- Campus Sur)

2.6.2.1 Pérdidas de fricción o principales

Las pérdidas de fricción o principales se originan debido a la oposición al movimiento que se presenta a lo largo de la tubería como resultado de la interacción entre el líquido y la pared de la tubería (rugosidad absoluta y viscosidad).

Las pérdidas de fricción o principales se determinarán mediante la Ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Donde:

- f : factor de fricción;
- v : velocidad media (m/s);
- D : diámetro interno del conducto (m); y,
- l : longitud del tramo de análisis (m).

Determinación de las pérdidas de fricción o principales mediante la ecuación de Darcy-Weisbach

Como primer paso se determina el valor de Reynolds (R_e)

$$R_e = \frac{V * D}{\nu} \quad (5)$$

Donde:

- ν : viscosidad cinemática del fluido;
- V : velocidad en ese tramo; y,
- D : diámetro interno del conducto.

Si $R_e \leq 2000$ se obtiene un régimen de flujo laminar.

Si $R_e > 2000$ se obtiene un régimen de flujo turbulento.

Como siguiente paso es determinar el factor de fricción (f)

Para flujo laminar:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (6)$$

Donde:

- R_e : número de Reynolds.

Para flujo turbulento primeramente se debe determinar el tipo de zona, para lo cual se debe encontrar los límites de zona (Re' , Re'') con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$Re' = \frac{10}{\frac{\varepsilon}{D}} \quad (7)$$

$$Re'' = \frac{500}{\frac{\varepsilon}{D}} \quad (8)$$

Donde:

- ε : rugosidad absoluta; y,
- D : diámetro interno del conducto.

Si $Re < Re'$ es tubo liso.

Si $Re' < Re < Re''$ es precuadrática.

Si $Re \geq Re''$ es cuadrática.

Una vez determinada que tipo de zona es, se procede a determinar el factor de fricción para flujo turbulento.

Para tubo liso:

- Si $Re \leq 100000$ (Blasius)

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (9)$$

- Si $Re > 100000$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log (Re \sqrt{f} - 0.8) \quad (10)$$

Para zona precuadrática (Colebrook-White):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{\sqrt{f} * Re} + \frac{\varepsilon}{3.7} \right) \quad (11)$$

Para zona cuadrática:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \frac{\varepsilon}{3.7} \right)^2} \quad (12)$$

2.6.2.2 Pérdidas locales o puntuales

Estas pérdidas se originan por elementos considerados como puntuales que alteran el flujo uniforme, modificando el comportamiento de las líneas de corriente, dependen de un factor (K) y de la carga de velocidad. Estas pérdidas se presentan en elementos como ampliaciones bruscas o suaves, cambios de dirección, rejillas, accesorios como válvulas, codos, entradas y salidas de reservorios.

Las pérdidas locales originan saltos o escalones sobre la línea de energía debido a que el comportamiento puntual en estos sitios es de flujo no uniforme.

$$h_l = K \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Donde:

- K: coeficiente de resistencia local.

Cada coeficiente de resistencia local depende de la forma de dicha resistencia y de sus dimensiones geométricas.

2.6.3 *Sistemas de conducción a presión en régimen transitorio*

Un flujo es estacionario o permanente cuando los parámetros hidrodinámicos no varían con el tiempo. Pero si en algún punto del campo vectorial los parámetros varían con el tiempo, se dice que el flujo es transitorio o no permanente.

El flujo transitorio o no permanente se origina cuando se ponen en funcionamiento o parada de las bombas, al abrir y cerrar válvulas, en los procesos de llenado y vaciado de tuberías; es decir, siempre que se produzca un cambio brusco en la velocidad del fluido.

Las ecuaciones que rigen al flujo transitorio proceden de un balance diferencial de fuerzas y masas en un volumen de control considerando la inercia del agua.

Para desarrollar un mejor análisis del flujo transitorio en conductos a presión se estudia los procesos transitorios, en especial el golpe de ariete.

Para el análisis del flujo transitorio en conductos a presión se realizará bajo las siguientes hipótesis.

- Flujo en una sola dimensión y las velocidades se distribuyen de manera uniforme;
- La cáscara del conducto es indeformable;
- El fluido es incompresible; y,
- Se asume que el modelo de estimación de pérdidas de carga en flujo estacionario es válido para flujo transitorio.

Para la resolución matemática de estos procesos transitorios se aplicarán las leyes fundamentales de la hidrodinámica.

2.6.3.1 Ecuación dinámica

La ecuación de la dinámica se deriva de la segunda ley de Newton y relaciona la fuerza con la variación de la cantidad de movimiento. Por lo tanto, el proceso deductivo de la componente dinámica del sistema de ecuaciones diferenciales permite llegar a la siguiente presentación:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial X} \right) = 0 \quad (14)$$

El último término de esta ecuación caracteriza la aceleración convectiva. Esta aceleración puede ser despreciada en los casos cuando la velocidad de la onda del golpe es en dos o más órdenes de magnitud superior a la velocidad de flujo. En este caso la componente dinámica del sistema de ecuaciones toma la siguiente presentación:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (14.1)$$

Donde:

- V : velocidad;
- t : variable tiempo;
- g : aceleración de la gravedad;
- H : carga piezométrica;
- x : variable distancia;
- λ : factor de fricción; y,
- d : diámetro del conducto.

2.6.3.2 Ecuación de continuidad

La ecuación de la continuidad se origina de la aplicación del principio de conservación de la masa en un volumen de control para un diferencial de tiempo, es decir un volumen de líquido que ingresa es igual al volumen de fluido que sale.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

Donde:

- a : celeridad de onda (m/s);

Estas dos ecuaciones principales del flujo transitorio son ecuaciones diferenciales parciales de primer orden, con dos variables independientes espacio (x) y tiempo (t) y dos variables dependientes caudal (Q) y carga piezométrica (H). Además, permite la resolución de todos los transitorios ya sean en casos rápidos o lentos.

CAPÍTULO III

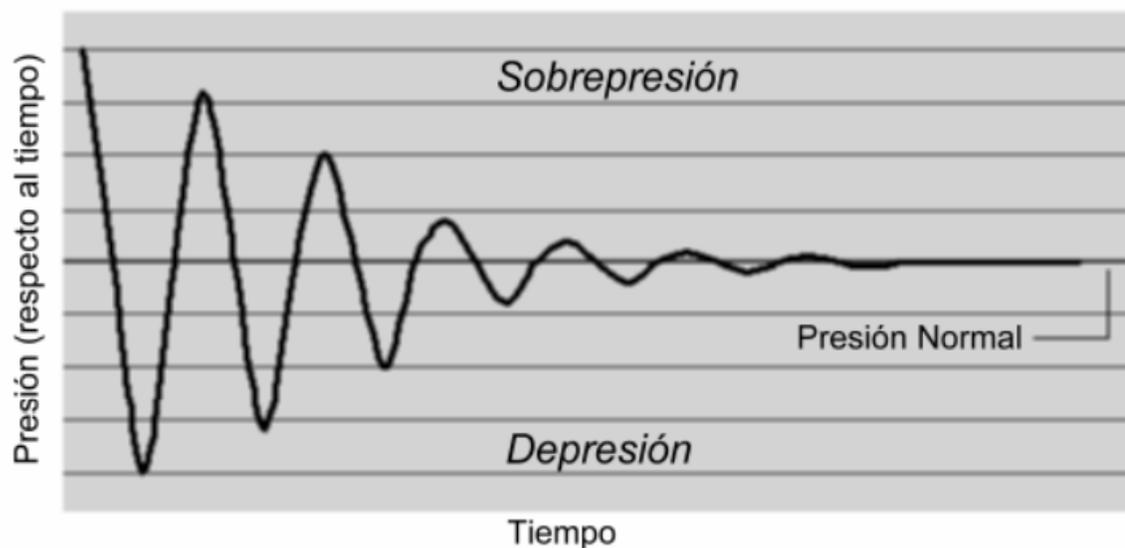
PROCESO TRANSITORIO GOLPE DE ARIETE

3.1. Definición de Golpe de Ariete

Es un proceso transitorio hidráulico ocasionado por rápidas fluctuaciones de flujo debido a su interrupción produciendo una variación de presión asociada a cambios bruscos en la velocidad del fluido, es decir, que se produce como respuesta a la variación brusca de velocidad del fluido conducido.

Figura 4

Variación de la presión producida por el golpe de ariete en el tiempo



Nota. La gráfica representa la variación de la presión en el tiempo. Fuente: Ortiz Masek (2006).

3.2. Descripción del Proceso Transitorio – Golpe de Ariete

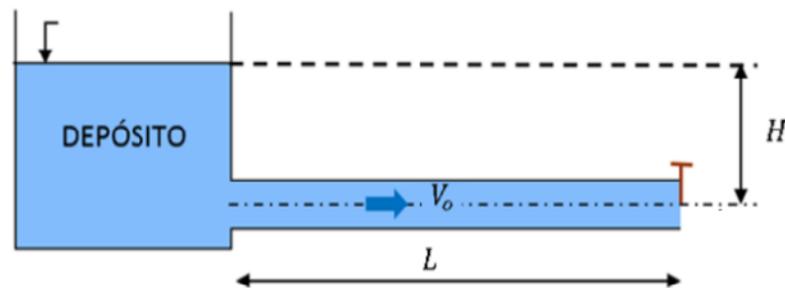
El proceso transitorio de golpe de ariete se explica con sistema hidráulico sencillo conformado por un tanque – tubería – válvula.

Tomado en cuenta las siguientes consideraciones, no existe fricción en la tubería, el sistema funciona con flujo permanente con la válvula totalmente abierta, por tanto, la velocidad (V_0) y la carga piezométrica inicial (H_0) se mantienen constante en la tubería, además se considera que el eje de referencia es positivo en dirección del flujo en régimen permanente. (Ríos Cando, 2016)

Para este modelo se considera un conducto de carga de longitud (L) con sección transversal (ω), que fluye agua uniformemente con velocidad (v), un tanque de cabecera y una válvula ubicada al final del conducto de carga como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Sistema hidráulico tanque – tubería – válvula



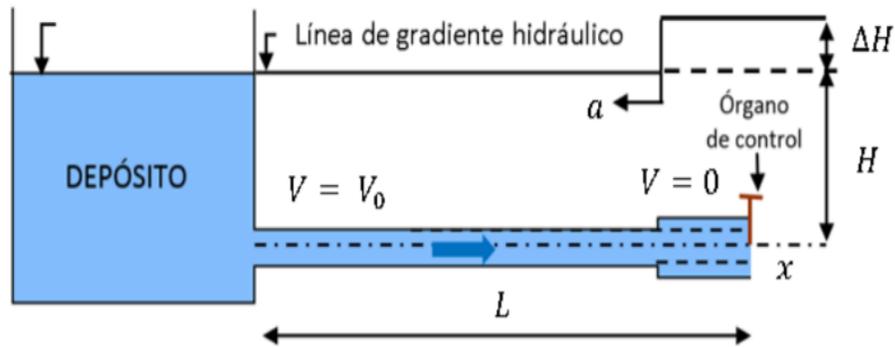
Nota. La gráfica representa un sistema hidráulico simple. Elaborado por: Autor.

Estableciendo que como condición inicial se presenta un estado ($t = 0$) en el cual se tiene una altura de presión determinada y un flujo constante en régimen permanente. Luego de este estado inicial, en la válvula ubicada al final del conducto se procede a realizar el cierre instantáneo o brusco, el agua en el conducto se detiene y, por tanto, la energía cinética del flujo de agua es igual a cero. En este caso, aumenta la energía potencial en donde se evidencia el desarrollo de un incremento adicional de la presión hidrodinámica debida al golpe, en una magnitud (Δp_{gol}). En

este instante de cierre de la válvula denominado $(t + \Delta t)$, la velocidad del fluido continúa en la misma dirección de la descarga por lo cual chocará con la válvula como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Representación gráfica del Cierre abrupto de la válvula

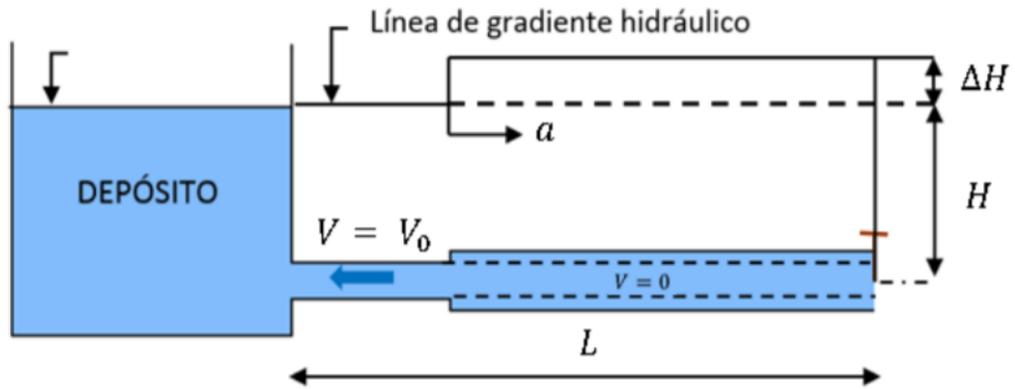


Nota. La gráfica representa el cierre de una válvula. Elaborado por: Autor.

En la Figura 7, se observa que al llegar al instante de tiempo $(t = \frac{L}{a})$ la velocidad del fluido es 0, el agua está comprimida por lo cual la presión aumenta y la tubería estará deformada. Seguido a esto, en el instante $(t = \frac{L}{a} + \Delta t)$ la onda regresa en la dirección positiva (hacia aguas arriba), es decir, hacia el tanque de cabecera, la velocidad con la que las ondas de sobrepresión se trasladan se denomina celeridad de onda (a) y su magnitud depende de las propiedades elásticas del material del conducto y del fluido. Las paredes del conducto en este tramo se dilatan.

Figura 7

Representación gráfica de la dilatación de la tubería

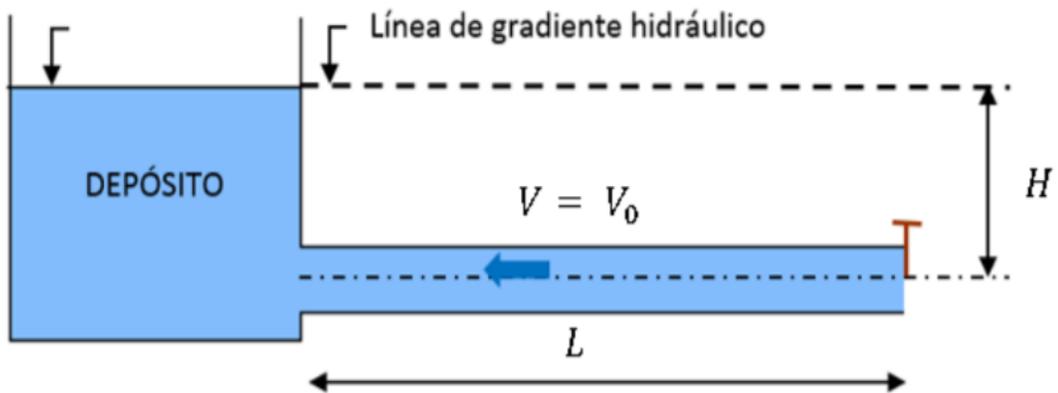


Nota. La gráfica representa la variación de la sección del conducto. Elaborado por: Autor.

En el instante de tiempo ($t = \frac{2L}{a}$) que coincide con el periodo de la onda, la tubería ya no se encuentra deformada y se termina la etapa directa del golpe de ariete; como se observa en la Figura 8.

Figura 8

Representación gráfica del golpe de ariete directo

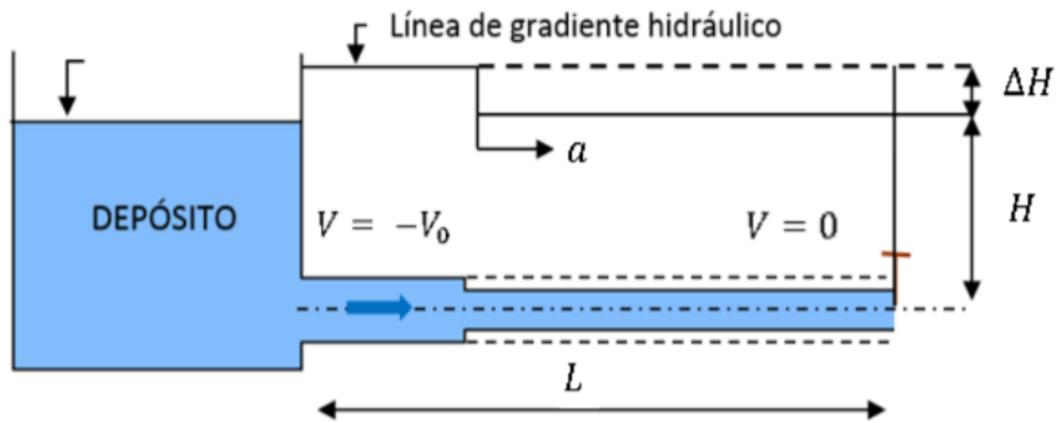


Nota. La gráfica representa el proceso transitorio golpe de ariete. Elaborado por: Autor.

La fase opuesta del golpe de ariete se presenta en la Figura 9, de igual manera tiene una duración de $(t = \frac{2L}{a})$ en la cual en el instante de tiempo $(t = \frac{3L}{a})$ la tubería se contrae completamente y la velocidad del agua es igual a cero. A partir de este último instante se repite la secuencia de la misma forma que en la fase directa del golpe de ariete.

Figura 9

Representación gráfica de la fase inversa del golpe de ariete



Nota. La gráfica representa el recorrido de la onda a lo largo del conducto. Elaborado por: Autor.

3.3. Parámetros que intervienen en el proceso transitorio – golpe de ariete

3.3.1 Celeridad de Onda

Es la velocidad con que se transporta la onda de presión al interior de la tubería, al existir una variación en el caudal del sistema.

Esta velocidad depende de las propiedades elásticas del material del conducto y del agua y, en caso de que el material del conducto fuera absolutamente rígido, se igualaría a la velocidad del sonido en el agua, es decir, 1425 m/s.

$$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}} \quad (16)$$

Dónde:

- a : celeridad de onda;
- E_o : módulo de compresibilidad del agua, igual a $2 * 10^3 MPa$;
- E : módulo de elasticidad del material de las paredes del conducto, por ejemplo, para el acero $E = 2 * 10^5 MPa$; y,
- δ y D : respectivamente, espesor de las paredes del conducto y diámetro del conducto.

De la ecuación de celeridad de onda, la relación entre el módulo de compresibilidad del agua y el módulo de elasticidad del material de las paredes del conducto ($\frac{E_o}{E}$), es un indicador de rigidez del sistema.

3.3.2 Duración de la fase de Golpe de Ariete

Es el tiempo que tarda una onda de presión en viajar desde el punto donde se interrumpe el flujo hasta donde inicia la tubería y vuelve otra vez al punto inicial.

La relación que define la duración de la fase de golpe de ariete es:

$$t_f = \frac{2L}{a} \quad (17)$$

Donde:

- t_f : Duración de la fase de golpe de ariete(s);
- L : longitud de la conducción (m); y,
- a : celeridad de onda (m/s).

3.3.3 Tiempo de perturbación transitoria o tiempo de cierre

“Entiéndase por perturbación transitoria a la maniobra en válvulas, bombas que generan un cambio brusco o gradual en el caudal del sistema y genera un flujo transitorio” (Ríos Cando, 2016, p. 50).

El golpe de ariete es un proceso transitorio que trae consigo gran cantidad de consecuencias negativas y hasta fatales por lo cual es necesario estudiarlo y comprenderlo.

CAPÍTULO IV

CONCEPTOS BÁSICOS DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

El caudal que fluye por el cauce de un río realiza un trabajo, ya que en su sección inicial tiene energía potencial y cinética. Cuanto mayor sea la diferencia de niveles, que está en función de la pendiente del cauce y la cantidad de caudal, mayor será la cantidad de energía que posee, esta energía se la conoce como energía hidráulica, en cambio, a la energía del río se la conoce como recurso hidro energético.

Una de las maneras de aprovechar el recurso hidro energético presente en un tramo de río es mediante la construcción de una central hidroeléctrica, en dicha construcción la energía hidráulica se transforma en energía eléctrica.

En este proceso de transformación de la energía hidráulica a energía eléctrica se producen pérdidas a las cuales, de acuerdo con su origen, pasan a denominarse: hidráulicas, mecánicas y eléctricas (Subbotin, 1983).

4.1. Maneras de aprovechar el recurso hídrico

La mejor manera de aprovechar la energía hidráulica se presenta cuando en una corta trayectoria de un río se concentra el mayor desnivel (diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo) posible.

Para poder conseguir esta manera de aprovechar el recurso hídrico, se tiene que buscar la manera de que se acorte la trayectoria del flujo en forma artificial, de esa manera se podrá concentrar la caída en el tramo más corto posible y así generar mayor energía. Esta idea es posible plasmarla a la realidad mediante algunos esquemas de diseño de centrales hidroeléctricas, que se describen a continuación.

Cabe anotar, que en la presente disertación se hará énfasis en las obras de derivación.

4.1.1 Mediante sistemas fluviales de regulación

Se caracterizan por incluir un reservorio o embalse, donde se acumula el agua durante los periodos de crecidas o excedentes hídricos para redistribuirlos en el tiempo, utilizándolos en los periodos de estiaje para satisfacer las demandas de agua provenientes del usuario o usuarios del sistema. En este caso se hace referencia la construcción de una presa. (Calero. I. (2018). “Obras Hidráulicas I”. Clases presenciales UPS-Quito- Campus Sur)

La ventaja de este sistema es que, dentro de un tramo bastante corto las pérdidas hidráulicas son mínimas y, por lo tanto, se puede aprovechar al máximo la caída generada por la presa. Este sistema se lo utiliza en sitios donde la pendiente del cauce natural es pequeña.

4.1.2 Mediante sistemas fluviales de derivación

Se caracterizan por no disponer de un embalse de regulación y aprovechar los caudales naturales disponibles en el cauce para satisfacer la demanda del usuario o usuarios del sistema. (Calero. I. (2018). “Obras Hidráulicas I”. Clases presenciales UPS-Quito- Campus Sur)

En este tipo de sistemas se destacan los siguientes elementos: la obra de toma, el desarenador, el canal de conducción, tanque de carga, la tubería de presión, la casa de máquinas y el sistema de descarga, mediante el cual el agua regresa al cauce natural. En el caso que los caudales superen las necesidades de la central, se los evacúa mediante vertederos de pequeña altura, denominados azudes.

4.2. Turbina Hidráulica

“Es el equipo en el cual se transforma la energía hidráulica en mecánica, está acoplada directamente al generador y en conjunto atienden la demanda de energía eléctrica” (Ortiz Flórez, 2011, p. 311).

4.3. Tipos de turbinas hidráulicas

Una vez conocido la carga neta y el caudal de diseño, se puede seleccionar el tipo de turbina que mejor se adapte para cada proyecto. Las turbinas se clasifican en activas y reactivas. Entre las activas están las turbinas Pelton y Michell- Banky y, entre las reactivas, las Francis y Kaplan.

En la presente disertación se hará énfasis a las turbinas de reacción Kaplan.

4.3.1 Turbina Pelton

“Es una turbina de acción de flujo tangencial que trabaja a presión atmosférica y de admisión parcial y está diseñada para condiciones de grandes saltos: 400 – 600 metros y bajos caudales” (Ortiz Flórez, 2011, p. 335).

4.3.2 Turbina Francis

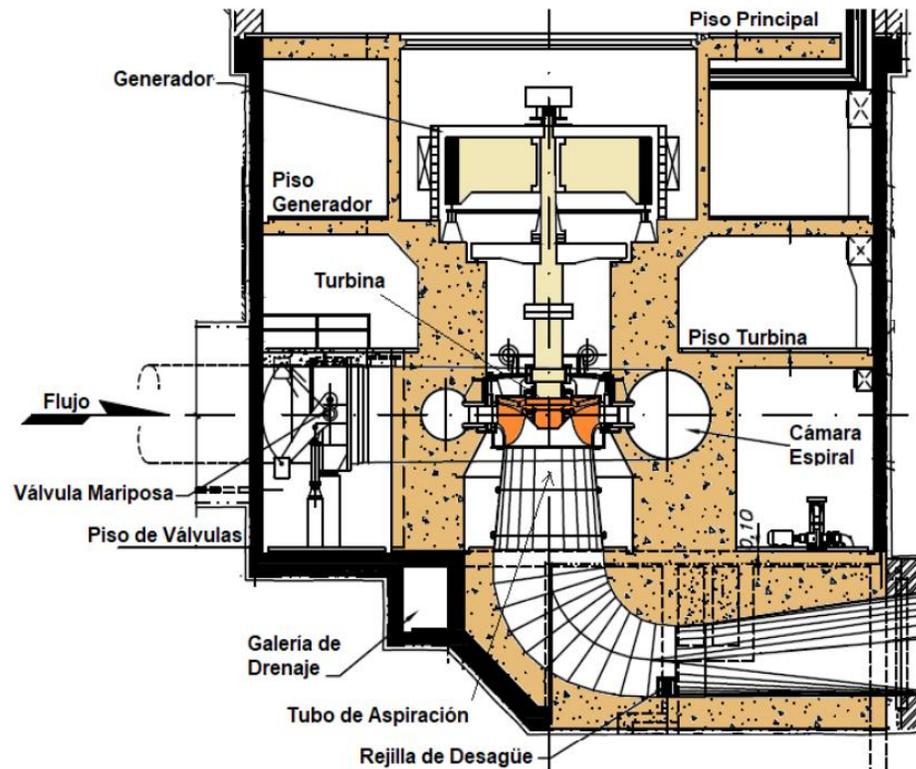
La turbina Francis presenta una peculiar característica, en esta turbina todo su cuerpo se encuentra sumergido en el agua y el flujo ingresa en dirección radial y sale en sentido axial respecto al eje de la turbina. La rotación de la turbina puede ser horizontal o vertical.

“Las turbinas Francis se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos que van de los 40 – 60 hasta 500 – 700 metros” (Ortiz Flórez, 2011, p. 340).

Las cargas recomendables van desde 15 a 300 m.

Figura 10

Vista lateral en corte de una casa de máquinas con turbina Francis



Nota. La gráfica representa una turbina a reacción Francis. Fuente: García, H. y Nava, A (2014).

4.3.3 Turbinas Kaplan

El flujo en las turbinas Kaplan es axial porque entran y salen en el mismo sentido, esta característica hace referencia a que los rodets son diferentes a los de las turbinas Francis y por lo general el eje de rotación es vertical.

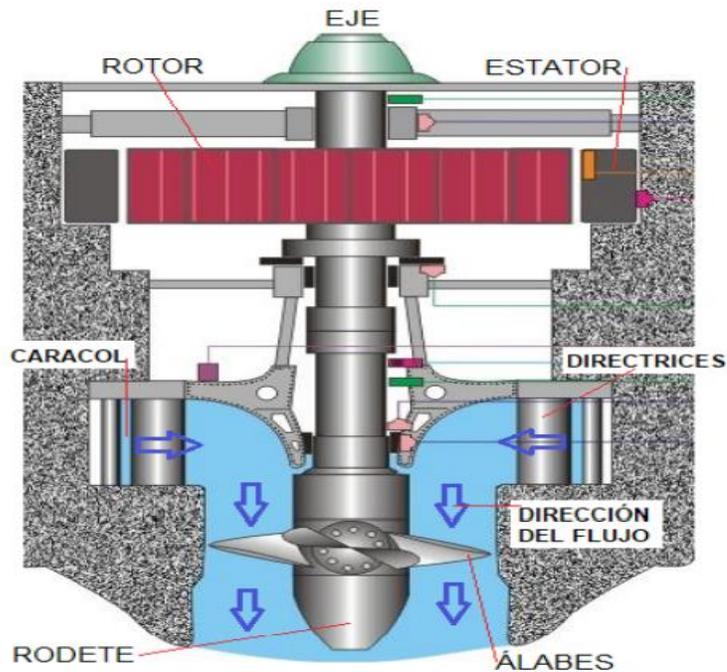
“Las turbinas Kaplan se puede diseñar para rangos de caída que van de lo 1-3 hasta 60 – 70 metros y pueden operar con muy buena eficiencia dentro de un rango amplio de caudal” (Ortiz Flórez, 2011, p. 344).

Se las utiliza en centrales con caídas de hasta 50 m y, generalmente, con grandes caudales.

Una de las características de este tipo de turbinas es que el caracol o distribuidor de caudal está ubicado sobre los álabes o paletas del rotor, para que el flujo sea axial.

Figura 11

Vista en corte de una turbina Kaplan



Nota. La gráfica representa una turbina a reacción Kaplan. Fuente: HACKER (2015).

4.4. Partes de una turbina hidráulica a reacción

Las partes de una turbina hidráulica son los siguientes:

- Distribuidor es un elemento estático, cuyas funciones es acelerar el flujo al transformar total o parcialmente la energía potencial del agua en energía cinética, además dirige el agua hacia el rodete y actúa como órgano regulador de caudal.
- Rodete es el elemento principal de la turbina, donde se transforma la energía cinética en energía mecánica y su tipo depende del caudal y caída que se disponga.

- Tubo de aspiración o succión es un elemento ubicado después del rodete, presenta una forma divergente, puede ser recto o acodado y es la que permite unir la descarga de agua de la turbina con el ducto o también puede ser un canal de salida de la central. Este elemento es característico en las turbinas de reacción.

“Se le llama tubo de aspiración porque crea una depresión a la salida del rodete y tiene dos funciones principales, la primera recuperar la energía cinética del agua y la segunda transformarla en energía de presión y posición” (García Gutierrez & Nava Mastache, 2014, p. 29).

4.4.1 Tubo de succión en las turbinas de reacción

El tubo de succión está ubicado a la salida del agua en la turbina, cuya forma es la de un conducto divergente que puede ser recto o acodado.

El tubo de succión influye en el comportamiento energético de las turbinas de reacción, además recupera parte de la energía cinética correspondiente a la velocidad del agua en la salida del rodete y la altura que se presenta entre la salida del rodete y el nivel de agua aguas abajo.

4.4.2 Construcción del tubo de succión

El tubo de succión está compuesto por cono, rodilla y el difusor. La rodilla presenta diferentes secciones geométricas, que permiten la transformación de una sección redonda del cono a una triangular de la sección del difusor.

El parámetro más importante del tubo de succión es su altura, mientras mayor sea su altura, mejor son las condiciones energéticas, pero aumentan las dimensiones de la casa de máquinas y consecuentemente su costo.

4.5. Clasificación de las centrales hidroeléctricas según su potencia

A continuación, se presenta una clasificación que se la podría aplicar para las centrales hidroeléctricas, según su potencia (P) (IDAE, 2006).

- Nano Central $P < 1 \text{ kW}$
- Pico Central $1 \text{ kW} < P < 10 \text{ kW}$
- Micro Centrales $10 \text{ kW} < P < 50 \text{ kW}$
- Minicentral $50 \text{ kW} < P < 1000 \text{ kW}$
- Pequeña Central $1 \text{ MW} < P < 5 \text{ MW}$
- Mediana Central $5 \text{ MW} < P < 50 \text{ MW}$
- Gran Central $P > 50 \text{ MW}$

Cabe recordar, que en esta disertación se enfatizará en las centrales hidroeléctricas pequeñas y medianas.

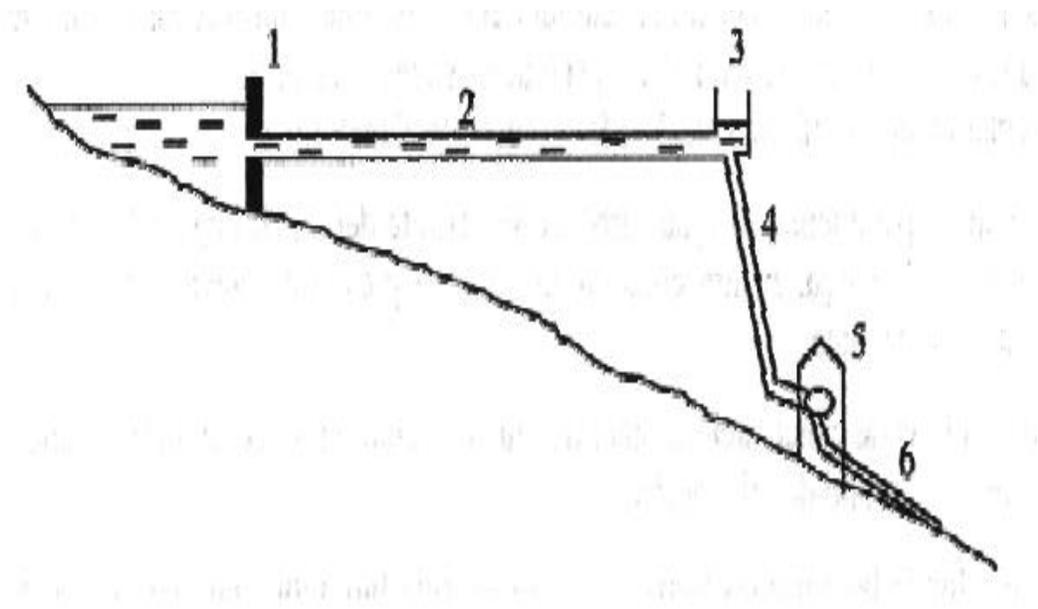
4.6. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas

Para el caso de una pequeña central hidroeléctrica se presenta el mismo grado de dificultad y responsabilidad que en una grande, pero tomando en cuenta que la parte económica, resultará menor.

Los elementos que conforman son: Toma de agua o bocatoma; desarenador; sistema de conducción a gravedad (canal) o presión (tubería); tanque de presión o carga; tubería forzada o de presión; chimenea de equilibrio; válvula de control; turbina; generador; tubo de succión o aspiración o descarga; y, canal de salida.

Figura 12

Esquema de una central hidroeléctrica de derivación



Nota. La gráfica representa una obra hidráulica de derivación. Fuente: Mancha.

Donde:

- 1: Pequeña presa de derivación;
- 2: canal de derivación;
- 3: chimenea de equilibrio;
- 4: tuberías de presión;
- 5: cámaras de turbinas; y,
- 6: canal de desagüe.

4.6.1 Toma de agua

Es una estructura que permite derivar una parte del caudal de un cauce para ser utilizado, por ejemplo, en la producción de energía eléctrica. Una toma de agua construida de hormigón puede brindar una mejor resistencia al empuje y a la erosión.

4.6.2 Sistema de limpieza de sólidos

Para eliminar los sólidos que ingresan por la obra de toma, es importante que en el ingreso del flujo se instalen rejillas con un espaciamiento razonable, de esa manera se limitará el tamaño de las partículas al momento de ingresar. Las partículas de menor diámetro ingresan con el flujo por lo que se requieren de desripadores, para las partículas más gruesas y de desarenadores, para las más finas.

La condición óptima para una pequeña central hidroeléctrica se la consigue construyendo desarenadores para retener partículas de entre 0,2 a 0,3 milímetros (IDAE, 2006).

4.6.3 Sistemas de conducción

Los sistemas de conducción se pueden presentar a través de canales, túneles y tuberías. Para evitar las pérdidas de energía a lo largo de los sistemas de conducción se puede emplear pendientes bajas.

Para evitar la contaminación debido a cuerpos flotantes y pesados, siempre se debe colocar rejillas en alguna parte de la trayectoria.

4.6.4 Tanques o cámaras de presión

La función de los tanques de presión es de estabilizar el nivel de presión que se necesita para las turbinas, están ubicados en la parte donde finalizan los canales o tuberías de flujo libre.

Debido a esta particularidad, los tanques de presión presentan un vertedero de excedentes, a través del cual se establece el nivel de operación y se impide que se presente una sobre carga en la central hidroeléctrica.

Los tanques de presión constan de un desagüe para las operaciones de limpieza y mantenimiento, y una rejilla que impide el paso de cualquier cuerpo a la tubería forzada.

4.6.5 Tubería a presión

La tubería que conduce el flujo desde la cámara de presión hasta la turbina debe ser capaz de soportar la presión de la columna de agua y la sobre presión originada por el golpe de ariete, en caso de que ocurra un cierre brusco de la válvula de control ubicada al ingreso a la turbina. (IDAE, 2006)

Por lo general, las tuberías a presión requieren de silletas cada cierta distancia y anclajes en cada cambio de dirección.

4.6.6 Casa de máquinas

Es aquel lugar en donde se instala toda el equipamiento hidráulico, mecánico y electrónico de esa manera poder operar la turbina. Sus dimensiones estarán en función del tipo y tamaño de las turbinas.

Es muy importante considerar la ubicación de la casa de máquinas, lo más recomendable es que la casa de máquinas se la debe construir sobre un suelo estable, sin la presencia de fallas geológicas o suelos susceptibles a deformaciones, por ejemplo, las arcillas expansivas.

4.6.7 Tubo de succión

El tubo de succión o de aspiración presenta una sección variable, que conduce el flujo hacia aguas abajo, en este tubo la presión es menor a la presión atmosférica.

Los tubos de succión pueden ser verticales o inclinados, para evitar una profundización importante en el suelo y, por consiguiente, la necesidad de excavar, el tubo de succión se lo puede girar y de esa manera formar un codo con cambio de sección circular a rectangular. La altura de succión depende de la ubicación de la turbina respecto al nivel del mar y se presenta que, a mayor altura, ésta resulta mayor en un valor negativo.

4.6.8 Canal de salida

Es un canal de empate o también puede ser una tubería, el cuál cumple con la función de restituir el flujo empleado para la generación de energía eléctrica al cauce natural. Generalmente, se lo conoce como conducto de restitución.

4.7. Golpe de ariete en una central hidroeléctrica

En una central hidroeléctrica, la energía hidráulica es transformada en energía mecánica por la turbina y esta a su vez es transformada en energía eléctrica por un generador para poder suministrar a la demanda energética de un sistema a través de líneas de interconexión.

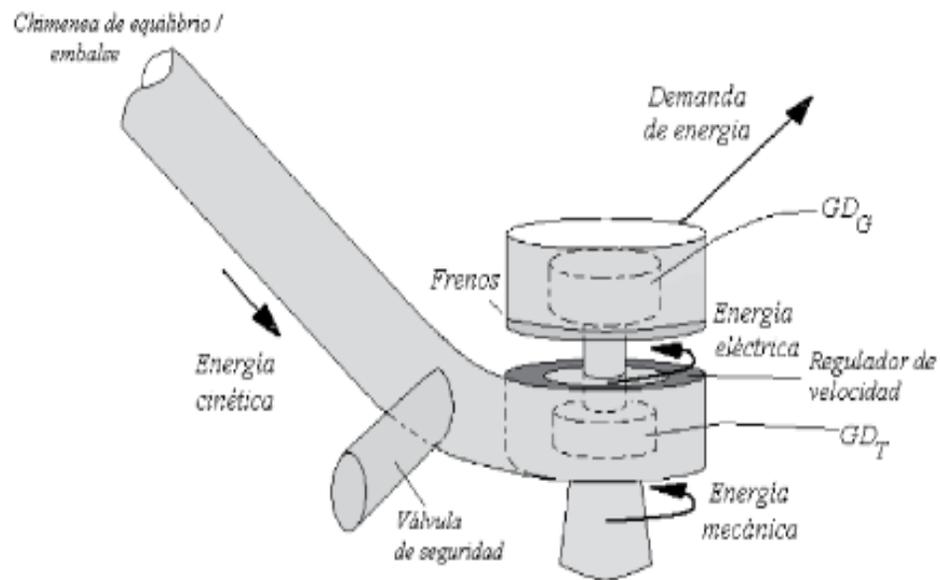
Cuando sucede una falla en la línea de interconexión o una reducción brusca debido a la cantidad de movimiento del líquido en la demanda origina una desestabilización en la transformación de energía en donde cambia los valores de voltaje y frecuencia esto conlleva a que la central hidroeléctrica se desconecte del sistema energético. (Ortíz Flores, 2011, p. 103)

La parada brusca origina procesos inerciales, por lo tanto, se debe evitar que no se genere un golpe de ariete fuerte en la tubería de presión y no permita el embalamiento de grupo turbina-generador, todo esto genera esfuerzos mecánicos y electromagnéticos por efecto de la sobrevelocidad del grupo.

Para mitigar estos esfuerzos se suele incrementar el momento de inercia del turbogenerador a través de la incorporación de un volante de inercia.

Figura 13

Elementos de seguridad para mitigar los efectos de una parada brusca en una central hidroeléctrica



Nota. La gráfica representa una maniobra controlada a través de un regulador de velocidad.

Fuente: Ortiz Flórez, R, (2011).

CAPÍTULO V

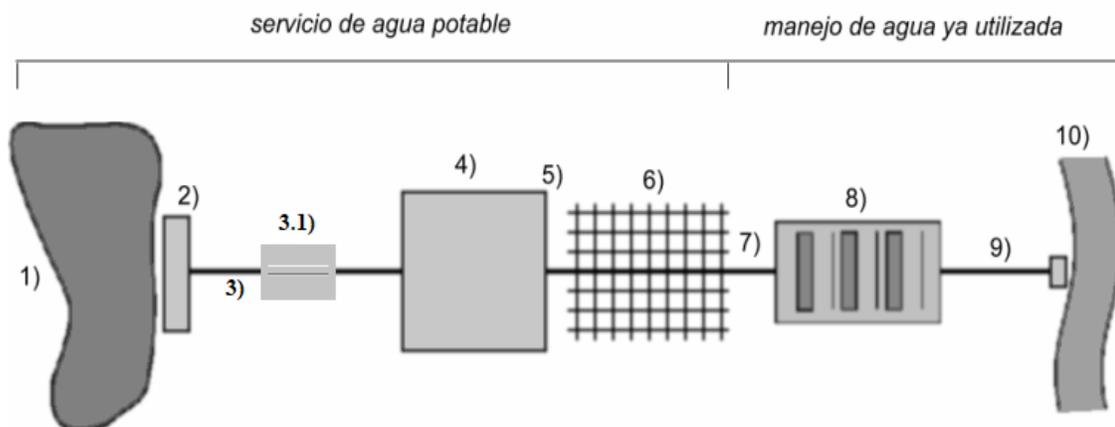
SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

5.1. Conceptos básicos de sistema de agua potable

Los sistemas de agua potable también conocidos como sistemas de abastecimiento, dotación o suministración, son aquellos que permiten que llegue el agua desde las fuentes naturales hasta el punto de consumo en condiciones sanitarias de calidad y cantidad requerida, para cumplir con dicha función el sistema debe estar compuesto por lo general por una fuente de abastecimiento, obra de captación, línea de conducción, tanque de distribución, distribución del agua y colector de aguas residuales.

Figura 14

Elementos de un sistema de abastecimiento de agua potable



Nota. La gráfica representa un sistema de conducción de agua potable. Fuente: Ortiz Masek, G.

A. (2006).

Donde:

1: Fuente de abastecimiento;

2: Obra de captación;

- 3: Línea de conducción;
- 3.1: Descripiador (partículas gruesas), desarenador (partículas finas);
- 4: Tanque de distribución;
- 5: Línea de alimentación;
- 6: Red de distribución;
- 7: Colector de aguas residuales;
- 8: Planta de tratamiento de aguas residuales;
- 9: Descarga de agua tratada; y,
- 10: Cuerpo receptor.

5.2. Elementos de un sistema de abastecimiento de agua potable

El sistema de agua potable consta de los siguientes elementos: (Soria. G. (2018). “Sanitaria”. Clases presenciales UPS-Quito- Campus Sur)

5.2.1 Fuentes de abastecimiento de agua

Es el lugar del cual proviene el agua que deseamos llevar hacia alguna población determinada, además constituye el elemento primordial para el diseño de los demás elementos de un sistema de Agua Potable, de forma tal, se requiere haber establecido previamente su localización, tipo, capacidad, y la calidad del agua a ser entregada.

Existen dos tipos de fuentes de abastecimiento: superficiales y subterráneas.

5.2.1.1 Fuentes de abastecimiento subterráneas

Los depósitos subterráneos constituyen una fuente principal de agua dulce, este tipo de depósitos tienen la ventaja de proporcionar agua que requiere de un menor grado de tratamiento por lo que las impurezas se eliminan de forma natural a medida que el agua atraviesa las capas de suelo y subsuelo, entre los abastecimientos subterráneos se tiene a los siguientes: pozos y nacimientos.

5.2.1.2 Fuentes de abastecimiento superficiales

Comúnmente las ciudades dependen de las fuentes de abastecimiento superficial ya sean de corrientes, lagos o embalses, pero no son seguras para el consumo humano debido a que presentan importantes cantidades de contaminantes (desechos de animales, fertilizantes, plásticos, etc.) y requieren de tratamiento, entre los abastecimientos superficiales se tiene a los siguientes: ríos, arroyos, lagos, lagunas, embalses o presas y escurrimiento.

5.2.2 Obras de captación

Es una estructura o grupo de estructuras que se colocan directamente sobre una fuente de abastecimiento de agua y que nos permita tomar de manera eficiente el agua.

En la obra de captación deben tomarse en cuenta ciertos aspectos, independientemente del tipo de fuente, con el fin de cumplir un correcto desempeño de la obra de captación, son los siguientes:

- Ubicar la captación en una zona del río donde el caudal de oferta sea mayor al caudal de diseño.
- Se debe presentar una zona que tenga un cauce estable y firmeza en sus orillas de tal forma que la ubicación de la captación no provoque derrumbes.
- La captación deberá colocarse en zonas de ríos cuya pendiente sea relativamente pequeña con el fin de asegurar velocidades bajas.

5.2.2.1 Bocatoma o captación lateral

Es una estructura que capta caudales relativamente grandes, además puede estar o no acondicionada a un embalse y podrá trabajar a gravedad o mediante bomba.

5.2.2.2 Captación por vertederos laterales

Consta de una estructura cuya cresta tiene una orientación paralela al sentido del flujo y sobre la cual fluirá caudal asegurando un gradiente hidráulico en sentido perpendicular a la cresta.

5.2.2.3 Tomas laterales

Son estructuras sencillas y muy comunes por lo general se derivan de caudales grandes o principales, esta derivación se la podrá hacer mediante tuberías o canales trabajando con flujo a superficie libre o a presión.

5.2.3 Tubería de aducción

Es la unidad que se encarga de transportar el caudal desde la unidad de captación hasta el desarenador o planta de tratamiento por lo general tiene una longitud pequeña y dependiendo de las condiciones topográficas suele trabajar como flujo a superficie libre o a presión.

5.2.4 Desarenadores

Son unidades que tienen como objetivo principal remover partículas de cierto tamaño que fueron recibidas por la captación, las variables que intervienen en la eficiencia del proceso son temperatura, viscosidad del agua, tamaño y forma de las partículas, gravedad específica de la partícula, porcentaje de la partícula que se requiere remover.

5.2.5 Tubería de conducción

Constituye la unidad más extensa de un sistema de agua potable se encarga de conducir agua tratada desde la planta de tratamiento hasta el tanque de almacenamiento, su trazado vertical puede variar dependiendo de las condiciones topográficas, por lo general una tubería de conducción se diseña a presión por lo que se tiene que considerar perdidas de carga longitudinales y perdidas locales que dependerán de los accesorios.

5.2.6 *Tanque de almacenamiento*

Es una estructura cuya función principal es el almacenamiento del agua a distribuir, nivelar las variaciones de consumo y mantener presiones adecuadas de servicio. Es importante tomar en cuenta que el tanque debe estar a un nivel más elevado que la red de distribución, tal que permita llevar el agua a su destino por medio de gravedad, es decir, evitar el uso de equipo de bombeo para distribuir el agua. (Ortiz Masek, 2006, p. 5)

De acuerdo a la posición con respecto al suelo, los tanques de almacenamiento pueden estar elevados, superficiales o enterrados.

De acuerdo a su material de fabricación, los tanques de almacenamiento pueden ser de mampostería, metálicos, de concreto armado o plásticos.

5.2.7 *Red de Distribución*

Es la última de las unidades del sistema de agua potable más cercana a los usuarios, entrega el caudal a la ciudadanía (domicilios), la red de distribución está compuesta por tuberías, a partir de las cuales se dirección a las tomas domiciliarias que llevan el agua hacia el usuario o usuarios del sistema.

Las redes de distribución pueden ser redes de distribución abiertas (poblaciones rurales) y cerradas (poblaciones urbanas).

5.2.8 *Colector de aguas residuales*

“El colector de aguas residuales no forma parte del sistema de abastecimiento de agua potable directamente, pero es importante recolectar el agua ya utilizada (aguas servidas) hacia el lugar en donde será tratada para poder reutilizarla” (Ortiz Masek, 2006, p. 6).

5.2.9 Estaciones de bombeo

Las estaciones de bombeo están compuestas por estructuras civiles, equipos, tuberías y accesorios, con el fin de tomar el agua directamente o indirectamente de la fuente de abastecimiento y elevarla desde un nivel inferior a uno superior (tanque de almacenamiento) a través de una bomba.

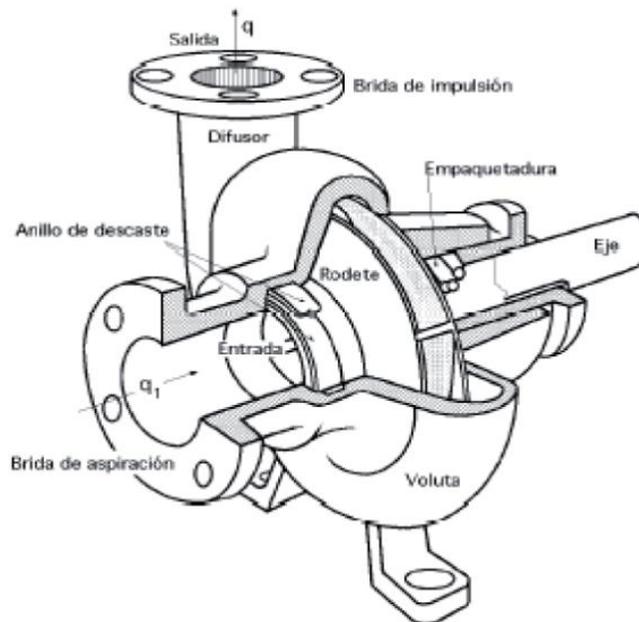
5.2.9.1 Bombas

“Una bomba es una máquina hidráulica que transfiere energía mecánica a un fluido, es decir, aumenta la carga disponible para lograr el desplazamiento del fluido en una tubería” (Ortiz Masek, 2006, p. 7).

Las bombas que generalmente son ocupadas en el abastecimiento de agua son las bombas centrífugas, horizontales, verticales, y las bombas sumergibles.

Figura 15

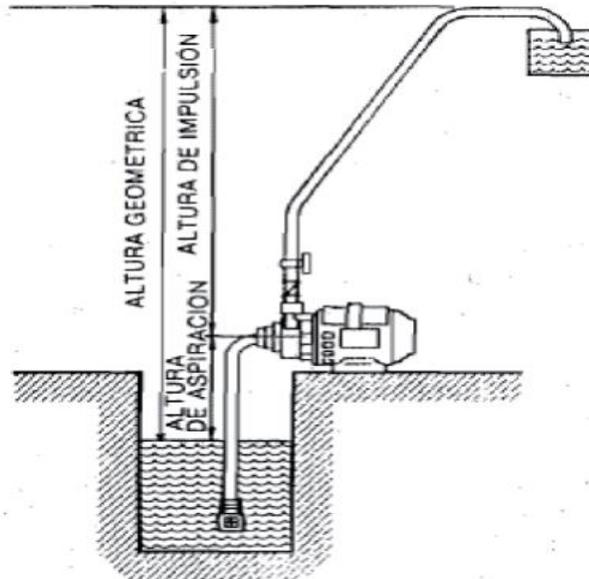
Esquema de una bomba centrífuga



Nota. La gráfica representa una maquina hidráulica. Fuente: Sánchez Domínguez.

Figura 16

Esquema de una bomba centrífuga con las tuberías de aspiración, impulsión y altura geométrica



Nota. La gráfica representa una estación de bombeo. Fuente: Sánchez Domínguez.

5.2.9.2 Selección de equipo de bombeo

El uso de un equipo de bombeo para el servicio de agua potable debe de evitarse, ya que su operación y mantenimiento representan un costo importante que encarece significativamente la prestación del servicio.

Para la selección de un equipo de bombeo se toma en cuenta las siguientes consideraciones (Ortiz Masek, 2006).

- Escoger una bomba con un rendimiento alto, el procedimiento consiste en analizar la curva característica de la bomba (proporcionada por el fabricante) y observar cual se ajusta más a las necesidades del proyecto, la bomba más adecuada será aquella en la cual el punto de funcionamiento este cerca del punto de máximo de rendimiento.

- La carga disponible que suministra la bomba elegida deberá ser mayor a la requerida en el sistema.
- Para seleccionar la potencia del equipo de bombeo se deberá tomar en cuenta los diámetros de las tuberías, ya que si se tiene diámetros de tubería pequeños se requiere equipos de bombeo de gran potencia y si se presentan diámetros de tubería grandes se necesita equipos de bombeo de menor potencia.

5.3. Golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable

Como se ha indicado anteriormente en esta disertación, el golpe de ariete se presenta por variaciones repentinas en el flujo dentro de una tubería, en el caso de sistemas de abastecimiento de agua potable el golpe de ariete se origina generalmente por la manipulación de accesorios que regulan el caudal como son las válvulas, esto se presenta en sistemas con conducción a gravedad otra de las causas para que se origine el golpe de ariete es en la operación de bombas, cuando la conducción es por bombeo.

5.3.1 Golpe de ariete en sistemas de conducción por bombeo

Por lo general, cuando se utiliza equipo de bombeo, las bombas no trabajan de manera permanente, muchas veces por razones económicas, por lo que se diseña la conducción por bombeo para funcionar en un plazo de horas diarias que son suficientes para brindar el volumen de agua necesario para cubrir la demanda del proyecto. También se interrumpe el funcionamiento por problemas fortuitos tales como la interrupción del suministro de energía a la bomba, cuando se excede la capacidad del tanque de almacenamiento, cuando existe algún desperfecto en la línea de la tubería, cuando la bomba necesita mantenimiento o cuando la bomba falla estando operando. (Ortiz Masek, 2006, p. 19)

Las maniobras que hacen alusión con la operación de las bombas pueden originar variaciones de presión como sobrepresiones, depresiones y fallas mecánicas en los dispositivos; la magnitud de estas presiones generalmente, dependen a gran escala de la configuración de los sistemas de bombeo y de sus características en la que se resalta a la longitud de la línea de impulsión.

En los sistemas de conducción que operan con estaciones de bombeo, se ha podido definir que los efectos más perjudiciales o críticos se producen en la línea de impulsión debido a un paro accidental de la estación de bombeo, ya sea por desperfectos mecánicos o una falla en el suministro eléctrico. Suponiendo que un desperfecto en la estación de bombeo ocasionará una disminución gradual de la velocidad nominal de la bomba puesto que la inercia de las masas rotantes del dispositivo es pequeña en relación a la inercia del líquido de la conducción; la pérdida de velocidad angular en el rodete de la bomba genera una disminución en el caudal del sistema y por consiguiente se produce flujo transitorio.

5.3.2 Descripción del proceso transitorio de golpe de ariete en sistemas de bombeo

Para la explicación del proceso transitorio se tomará en consideración a la maniobra que produce los efectos más perjudiciales, es decir el paro accidental de las bombas. El sistema hidráulico estará conformado por succión – bombas – línea de impulsión – descarga, agregando un aditamento especial a la salida de las bombas; una válvula de retención o descarga. Esta válvula tiene la función de separar la estación de bombeo de la línea de impulsión y evitar un flujo inverso de las bombas, en definitiva, funciona como un tapón que protege a la estación de bombeo. (Ríos Cando, 2016)

El proceso transitorio de golpe de ariete se produce en 4 escenarios que se indican a continuación:

- Escenario 1: debido al paro accidental de la bomba, el rodete presenta una reducción de velocidad angular, por lo tanto, el caudal que suministraba la bomba varía, la línea piezométrica empieza a descender de su condición de régimen estacionario, a medida que una onda de depresión se traslada desde el sitio de la bomba hasta el tanque de descarga. La onda de presión negativa que hace alusión a la depresión se produce debido a la disminución de caudal suministrado por la bomba.

El intervalo de tiempo para que se origine el escenario 1 es: $0 < t \leq \frac{L}{a}$

- Escenario 2: a continuación, la onda de presión negativa (depresión) llega al tanque de descarga, esta onda se redirecciona y se dirige hacia la bomba. Cuando la onda se dirige hacia la bomba, esta onda origina las condiciones de flujo permanente o estacionario, es decir el flujo retorna a su estado inicial.

El intervalo de tiempo para que se origine el escenario 2 es: $\frac{L}{a} < t \leq \frac{2L}{a}$

- Escenario 3: cuando la onda de presión llega a la bomba, se pueden dar dos situaciones: La primera situación es cuando la válvula de retención se encuentre abierta y exista un flujo inverso que ingrese a las bombas y origina una disipación de energía, en este caso puede originar un incremento de la velocidad en las máquinas. La segunda situación que se puede llevar a cabo es cuando la válvula de retención se encuentra cerrada, por lo tanto, originaría un incremento de presión; este incremento de presión se traslada hacia la descarga. La presencia de esta válvula de retención es una protección de la bomba, sin embargo, produce un incremento de presión relevante.

El intervalo de tiempo para que se presente el escenario 3 es de: $\frac{2L}{a} < t \leq \frac{3L}{a}$

- Escenario 4: cuando el incremento de presión llega al tanque de descarga, esta se redirecciona y se dirige a la bomba, por lo tanto, origina presiones que hace alusión al régimen

transitorio. Una vez que esta onda de disminución de presión llega a la válvula de descarga se redirecciona y produce una onda de presión negativa para dar inicio a un nuevo ciclo.

$$\text{Intervalo de ocurrencia del evento 4: } \frac{3L}{a} < t \leq \frac{4L}{a}$$

En los sistemas de conducción por gravedad como en impulsiones, la duración de cada una de estas fases es $\left(\frac{L}{a}\right)$, siendo (L) la longitud de la tubería y (a) la celeridad.

CAPÍTULO VI

FORMULACIÓN DE MODELO PARA ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE TRANSICIÓN HIDRODINÁMICA EN LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE DERIVACIÓN CON CARGA PEQUEÑA Y MEDIANA.

Como base para formular el modelo de análisis de los procesos de transición hidrodinámica en los sistemas de conducción de las centrales hidroeléctricas están básicamente por indicadores inerciales, los cuales consideran las propiedades geométricas del tramo de conducción, estos indicadores inerciales se determinan por medio de ecuaciones empíricas, estas ecuaciones son capaces de ponderar valores y todo esto analizado o experimentado en modelos físicos.

El modelo que se va a aplicar para el análisis del golpe de ariete se lo conoce como modelo rígido del golpe de ariete o golpe rígido.

6.1. Modelo rígido del golpe de ariete

Este modelo tiene menor grado de aproximación, pero es de menor complejidad en su formulación matemática, concordante en gran medida con el nivel de pregrado.

La experiencia de diseño y las observaciones en la realidad evidencian que este modelo puede dar resultados cercanos en los casos de conductos relativamente cortos y tiempos relativamente largos de activación de los elementos de control, por ejemplo, apertura (cierre) de válvulas. (Calero Hidalgo, 2021)

El modelo rígido del golpe de ariete permite obtener resultados con suficiente grado de aproximación para fines ingenieriles en el análisis de procesos de transición relativamente lentos. Por ejemplo, en el caso de centrales hidroeléctricas, el criterio constituye la relación del tiempo de cierre (apertura) del distribuidor (T_S) y el tiempo de la fase del golpe de ariete (t_f). La influencia

de la elasticidad en la forma del diagrama de presión y en su valor máximo es tanto mayor cuanto menor sea el número de fases del golpe hidráulico:

$$j = \frac{T_S}{t_f} \quad (18)$$

Para valores ($j > 8 - 10$), es prácticamente despreciable la divergencia entre el golpe determinado considerando y sin considerar la elasticidad.

Antes de iniciar con el modelo es importante conocer la ecuación básica de análisis del golpe de ariete por el modelo rígido, para lo cual se asumen las siguientes premisas (Calero Hidalgo, 2021).

- El agua es incompresible;
- La cáscara del conducto es indeformable;
- No se consideran las pérdidas de carga.

La ecuación fundamental para el análisis del golpe de ariete en el modelo rígido se obtiene de la ecuación fundamental de la dinámica, relativa a la variación de la cantidad de movimiento (Krivchenko, 1990)

En forma general la ecuación para el análisis del golpe de ariete por el modelo rígido para un conducto de sección constante tiene la siguiente presentación:

$$\Delta H = \pm \frac{L}{gF} \frac{dQ}{dt} \quad (19)$$

Donde:

ΔH : variación de la presión por el golpe de ariete (m);

L: longitud de la tubería (m);

F : sección transversal del conducto (m^2);

g : aceleración de la gravedad (m/s^2); y,

$\frac{dQ}{dt}$: derivada de la variación del caudal.

El signo negativo para el análisis del conducto de carga y el signo positivo para el análisis del conducto de restitución.

Para el caso de conductos de carga con diámetro variable llamados telescópicos la ecuación para el análisis del golpe de ariete por el modelo rígido es la siguiente:

$$\Delta H = \pm \left(\frac{1}{g} \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{F_i} \right) \frac{dQ}{dt} \quad (20)$$

Donde:

ΔH : variación de la presión por el golpe de ariete (m);

N : número de tramos;

l_i : longitud del tramo del conducto telescópico (m);

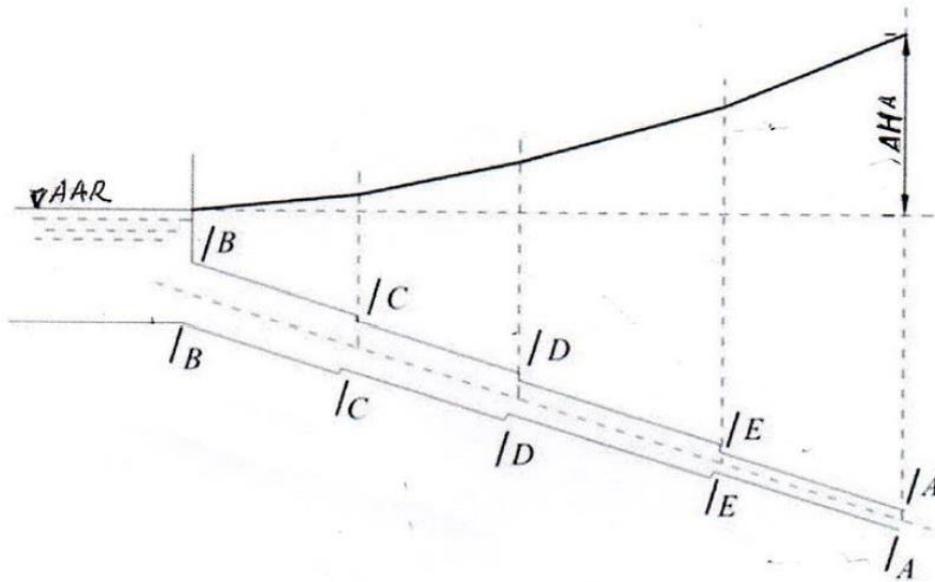
F_i : sección transversal del tramo del conducto telescópico (m^2);

g : aceleración de la gravedad (m/s^2); y,

$\frac{dQ}{dt}$: derivada de la variación del caudal.

Figura 17

Diagrama del golpe de ariete a lo largo de un conducto telescópico (turbinas cerradas)



Nota. La gráfica representa el incremento de presión por el golpe de ariete. Fuente: Calero Hidalgo, I. (2021).

Para iniciar con el análisis del modelo se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La aplicación del modelo rígido del golpe de ariete se realizará en conductos cortos con sección transversal variable de forma compleja, como es el caso del conducto de tránsito de las centrales hidroeléctricas con casa de máquinas en cauce, el mismo que incluye la captación, la turbo- cámara y el conducto de restitución. A este sistema se lo conocerá como el tramo de conducción.
- Se deberá conocer las propiedades geométricas como la sección (F_i), la longitud (l_i) del conducto de carga y del conducto de restitución, mientras para la turbina se deberá conocer

el diámetro nominal de rodete (D_1) con sus respectivas dimensiones relativas ($\overline{b_0}$, $\overline{D_2}$, $\overline{d_k}$) y además saber de cuantos tramos está constituido el conducto de carga.

- Para la parte de la turbo – cámara, se deberá contar con información muy valiosa, la cual hace referencia a las características geométricas de la cámara espiral, del sistema de álabes y del conducto de restitución, proporcionadas generalmente por el fabricante.
- Por otra parte, para dar inicio con el modelo es importante contar con el caudal máximo de diseño o caudal inicial (Q_{max}) y la carga neta (H_o).
- Conocer o determinar el número de fases del golpe hidráulico (j).
- La apertura de la turbina origina golpe de ariete positivo en el conducto de carga, en tanto que el cierre origina golpe de ariete negativo.
- La magnitud del golpe de ariete depende del tiempo de cierre (T_S) o tiempo de apertura (T_a) de la turbina. Además, la magnitud del golpe de ariete depende substancialmente del régimen de cierre de la turbina en el tiempo.

Tomando en cuenta estas consideraciones o datos de entrada se procede con el análisis y procedimiento del modelo.

6.2. Determinación del coeficiente de inercia del conducto de carga

La primera parte que se tendrá que cuantificar la inercia será el conducto de carga por medio del coeficiente inercial, para el efecto, se deberá conocer de cuantos tramos está constituido el conducto de carga con sus respectivas secciones y longitudes.

El coeficiente inercial de conducto de carga, es un parámetro que cuantifica el grado de inercia, para ello toma en consideración la geometría del conducto, por medio de la siguiente ecuación (Artemchuk, 2010)

$$K_{INCC} = \frac{1}{g} \sum_i^N \frac{l_i}{F_i} \quad (21)$$

Donde:

N : número de tramos;

l_i : longitud del tramo del conducto telescópico (m);

F_i : sección transversal del tramo del conducto telescópico (m²); y,

g : aceleración de la gravedad (m/s²).

La sección transversal del tramo del conducto carga se determina con la siguiente ecuación:

$$F_i = A_{C-C(i)} * B_{C-C(i)} \quad (22)$$

Donde:

$A_{C-C(i)}$: altura del conducto de carga (m); y,

$B_{C-C(i)}$: base del conducto de carga (m).

Por otra parte, el incremento de presión por el golpe de ariete en función del coeficiente inercial queda de la siguiente manera:

$$\Delta H = - K_{IN} \frac{dQ}{dt} \quad (23)$$

El signo negativo para el análisis del conducto de carga, esta ecuación es importante tomar en cuenta para los siguientes procedimientos del modelo de análisis.

6.3. Constante inercial del conducto de carga

Una vez obtenido el coeficiente inercial del conducto de carga (K_{INCC}), se procede a calcular la constante inercial del conducto de carga.

Este parámetro hace referencia al tiempo en el cual el caudal del agua aumenta de cero hasta un caudal máximo bajo acción de la carga neta (H_0), mediante la siguiente ecuación (Artemchuk, 2010).

$$T_w = \frac{Q_{max}}{H_0} \left(\frac{1}{g} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{F_i} \right) \quad (24)$$

Donde:

l_i : longitud del tramo del conducto telescópico (m);

Q_{max} : caudal máximo (m³/s);

H_0 : carga estática de la turbina (m);

F_i : sección transversal del tramo del conducto telescópico (m²); y,

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

Rangos que se debe tomar en cuenta con la constante inercial del conducto de carga:

- De inercia pequeña, cuando $T_w < 1,5 s$
- De inercia media, cuando $1,5s < T_w < 3s$
- De inercia alta, cuando $T_w > 3s$

El coeficiente inercial del conducto de carga en función de la constante inercial se presenta mediante la siguiente ecuación:

$$K_{IN} = T_w \frac{H_B}{Q_B} \quad (25)$$

Donde:

T_w : Constante inercial del conducto de carga (s);

H_B : la carga neta inicial; y,

Q_B : el caudal máximo de diseño.

T_s : Tiempo de cierre o apertura de válvulas (s).

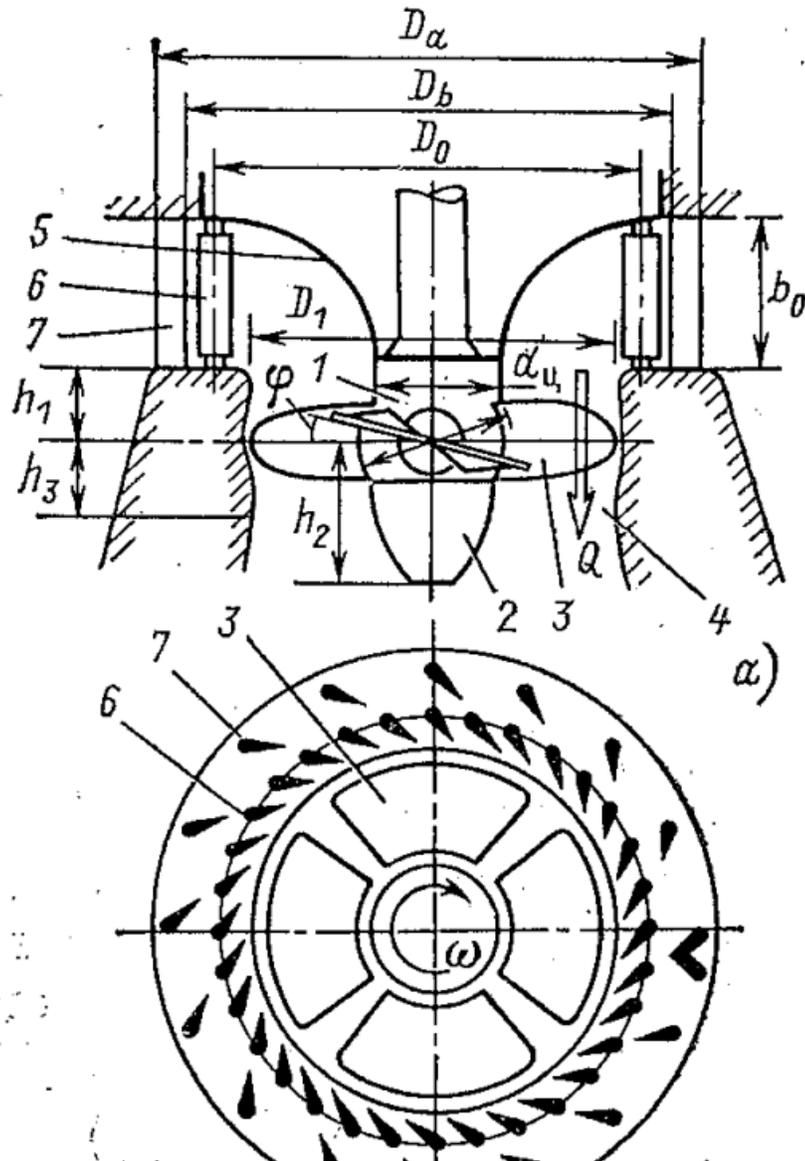
Para este modelo de análisis el parámetro de interés será el coeficiente inercial del conducto de carga (K_{INCC}), mientras que la constante inercial será un parámetro secundario, ya que solamente analiza el conducto de carga.

6.4. Determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral

Una vez obtenido el coeficiente inercial del conducto de carga (K_{INCC}), se procede a cuantificar la inercia del siguiente elemento del tramo de conducción, que corresponde a la turbina. Para lo cual se debe conocer e identificar las características geométricas de la turbina a reacción, a continuación, se presenta un gráfico de la turbina Kaplan con sus respectivas medidas. Cabe recalcar que el gráfico de la turbina Kaplan es suficiente porque el de la turbina Francis es semejante.

Figura 18

Características geométricas de una turbina a reacción Kaplan



Nota. La gráfica representa una turbina hidráulica a reacción. Fuente: Calero Hidalgo, I. (2021).

Donde:

D_1 : diámetro nominal de rodete;

D_0 : diámetro de ubicación de los ejes de giro de los álabes del distribuidor o elemento direccional;

b_0 : alto del elemento direccional o distribuidor;

1: Cuerpo del rodete;

2: Direccionador del flujo;

3: Aspas;

4: Cámara del rodete;

5: Direccionador estático del flujo;

6: Alabes del distribuidor o elemento direccional; y,

7: Columnas del estator.

Una vez identificado las medidas geométricas de la turbina a reacción, se procede con el cálculo del coeficiente inercial de la cámara espiral, para ello debemos saber qué tipo de cámara espiral es:

- Para cámara espiral metálica el coeficiente de cámara espiral es igual a:

$$\lambda_{CE} = 3,6$$

- Para cámara espiral de hormigón, dependiendo del ángulo de cobertura, coeficiente de cámara espiral es igual a:

$$\varphi_{cob} = 180^\circ - 270^\circ$$

$$\lambda_{CE} = 1,6 - 2,4$$

Por lo tanto, la ecuación para determinar el coeficiente de cámara espiral es igual a:

$$K_{IN.CE} = \frac{1}{g} \frac{\lambda_{CE} v_{CE}}{Q_{DIS} \varphi_{COB} / 360^\circ} D_1 \quad (26)$$

Donde:

λ_{CE} : coeficiente cámara espiral;

φ_{cob} : ángulo de cobertura;

Q_{DIS} : caudal de diseño (máximo);

v_{CE} : velocidad media; y,

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

6.5. Determinación del coeficiente inercial del sistema de álabes

Como siguiente paso es determinar el coeficiente inercial del siguiente elemento, que es el sistema de álabes, el cual empieza desde el estator hasta la salida del rodete. Para el coeficiente de sistema de álabes toca tomar en cuenta lo siguiente:

- Para las turbinas Francis y máquinas hidráulicas diagonales el coeficiente de sistema de álabes es igual a:

$$\lambda_{ALAB} = 0,9$$

- Mientras que para las turbinas Kaplan el coeficiente es igual a:

$$\lambda_{ALAB} = 1,3$$

Por lo tanto, la ecuación para determinar el coeficiente de sistema de álabes es igual a:

$$K_{IN.ALAB} = \frac{1}{g} \frac{\lambda_{ALAB}}{1,35 \left(\overline{b}_o + \frac{\overline{d}_{F2}^2}{4} \right)} \quad (27)$$

Donde:

λ_{ALAB} : coeficiente del sistema de álabes;

\overline{b}_o : altura relativa del distribuidor o elemento direccional;

\overline{D}_2 : diámetro relativo de salida desde el rodete;

\bar{d}_k : diámetro relativo del cuerpo del rodete; y,

g: aceleración de la gravedad (m/s^2).

En la ecuación del coeficiente inercial de sistema de álabes se debe considerar lo siguiente:

- Para las turbinas Francis y diagonales:

$$\overline{d_{F2}^2} = \overline{D_2}$$

- Para las turbinas Kaplan:

$$\overline{d_{F2}^2} = 1 - \bar{d}_k^2.$$

6.6. Determinación de coeficiente inercial de conducto de restitución

Como último elemento que queda para cuantificar su inercia es el conducto de restitución, para el cual se deberá conocer sus medidas geométricas (sección y longitud) y para el coeficiente de conducto de restitución se considera de la siguiente manera:

- Generalmente:

$$\lambda_{CR} = (4,5 - 5)$$

- Para el caso de casas de máquinas subterráneas puede ser:

$$(\lambda_{CR} > 8 - 9).$$

Posteriormente se determina el área de la sección de salida del conducto de restitución (F_5), usando la siguiente ecuación:

$$F_5 = A_{CR} * B_{CR} \quad (28)$$

Donde:

A_{CR} : altura del conducto de restitución; y,

B_{CR} : base del conducto de restitución.

Por lo tanto, la ecuación para determinar el coeficiente inercial del conducto de restitución es:

$$K_{IN.CR} = \frac{2 \lambda_{CR} D_1}{g \frac{\pi \overline{D}_2^2 D_1^2}{4} + F_5} \quad (29)$$

Donde:

λ_{CR} : coeficiente de conducto de restitución;

D_1 : diámetro nominal de rodete;

F_5 - área de la sección de salida del conducto de restitución;

\overline{D}_2 - diámetro relativo a la salida del rodete; y,

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

En la ecuación para determinar el coeficiente inercial del conducto de restitución ($K_{IN.CR}$), en lugar de $\lambda_{CR} D_1$ es posible colocar la longitud real (L_{CR}) a lo largo del eje del conducto de restitución. Cabe también tomar en cuenta que, en el caso de centrales hidroeléctricas subterráneas, en algunas situaciones el conducto de restitución directamente pasa a ser conducto aguas abajo con flujo a presión, el mismo que debe ser considerado independientemente para determinar ($K_{IN.CR}$).

Para determinar la longitud real del conducto de restitución, se debe tomar en cuenta las longitudes del conducto de restitución, para lo cual se determina con la siguiente ecuación:

$$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR} \quad (30)$$

Donde:

L_{1CR} : longitud de conducto de restitución tramo recto 1 (m);

L_{2CR} : longitud de conducto de restitución tramo un cuarto de círculo (m); y,

L_{3CR} : longitud de conducto de restitución tramo recto 3 (m);

6.7. Determinación de coeficiente inercial del tramo superior

El tramo superior está constituido por el conducto de carga y la cámara espiral, según esto se aplica la siguiente ecuación:

$$K_{IN.S} = K_{IN.CC} + K_{IN.CE} \quad (31)$$

6.8. Determinación de coeficiente inercial del tramo inferior

El tramo inferior está constituido por el sistema de álabes y el conducto de restitución, según esto se aplica la siguiente ecuación:

$$K_{IN.I} = K_{IN.ALAB} + K_{IN.CR} \quad (32)$$

6.9. Determinación coeficiente inercial del tramo de conducción

Una vez determinado el coeficiente inercial para el conducto de carga, turbina – cámara y conducto de restitución, se procede con el cálculo del coeficiente inercial del tramo de conducción con la ayuda de la siguiente ecuación:

$$K_{IN:TR} = K_{IN.CC} + K_{IN.CE} + K_{IN.ALAB} + K_{IN.CR} \quad (33)$$

Donde:

$K_{IN.CC}$: coeficiente inercial del conducto de carga;

$K_{IN.CE}$: coeficiente inercial de la cámara espiral;

$K_{IN.ALAB}$: coeficiente inercial del sistema de álabes; y,

$K_{IN.CR}$: coeficiente inercial de conducto de restitución.

6.10. Determinación de relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción

Para ello se debe contar con el coeficiente inercial del tramo superior y el coeficiente inercial del tramo de conducción, por lo tanto, se aplica la siguiente ecuación:

$$\frac{K_{IN.S}}{K_{IN.TR}} \quad (34)$$

6.11. Determinación de relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción

Para ello se debe contar con el coeficiente inercial del tramo inferior y el coeficiente inercial del tramo de conducción, por lo tanto, se aplica la siguiente ecuación:

$$\frac{K_{IN.I}}{K_{IN.TR}} \quad (35)$$

Una vez cuantificado el grado inercial de todo el sistema o tramo de conducción de la central hidroeléctrica por medio del coeficiente inercial ($K_{IN.TR}$), se debe conocer o determinar el número de fases de golpe hidráulico (j) que se presenta en el sistema, con esto estableceremos el intervalo de tiempo (Δt) para cada fase de golpe hidráulico, todo esto dentro de lo que dura el tiempo de perturbación transitoria o tiempo de cierre o tiempo de apertura de la turbina.

Se debe tomar en cuenta que para cada fase de golpe hidráulico se debe obtener un caudal ($Q_{l(i)}$), para el efecto se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_{l(i)} = Q_{l(0)} * \left(1 - \frac{\Delta t}{T_S}\right) \quad (36)$$

$Q_{l(0)}$: capacidad de flujo inicial $\left(\frac{m^3}{s}\right)$;

Δt : intervalo de tiempo (s); y,

T_S : tiempo de cierre o apertura de la turbina (s).

El parámetro ($Q_{l(0)}$), es la capacidad de flujo inicial y se la determina a partir del caudal máximo y la carga neta, dicho parámetro es fundamental ya que a partir de este se determina el caudal para las demás fases de golpe hidráulico, para ello se ocupa la siguiente ecuación:

$$Q_{l(0)} = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \quad (37)$$

Donde:

$Q_{l(0)}$: capacidad de flujo inicial ($\frac{m^{2.5}}{s}$);

H_0 : carga neta inicial (m); y,

Q_0 : caudal máximo de diseño (m^3/s).

Una vez obtenido estos parámetros iniciales para cada fase de golpe hidráulico, se procede con el cálculo de la carga inercial o incremento de presión por golpe de ariete ($\Delta H_{TR.(i)}$), así como también el respectivo caudal que va cambiando en cada fase de golpe hidráulico (Q_i), a partir del caudal máximo de diseño (Q_{max}).

Antes de presentar las ecuaciones para el cálculo de la carga inercial y la capacidad de flujo que varía en el tiempo para cada fase de golpe hidráulico, se procede a detallar en breves pasos como se obtienen dichas ecuaciones.

La determinación de la carga inercial ($\Delta H_{TR.}$) en los conductos a presión se reduce a la solución de la ecuación diferencial (23), para el efecto es necesario tener dadas las condiciones iniciales y el tipo de acción perturbadora.

En calidad de condición inicial se asumen el caudal del régimen estacionario inicial y la presión en las secciones correspondientes del conducto, que determinan la posición de la línea piezométrica tomando en cuenta las pérdidas hidráulicas.

La acción perturbadora es la variación de la apertura o más propiamente, de la capacidad de flujo de las compuertas o de las máquinas hidráulicas. Bajo esta consideración, el caudal depende tanto de la apertura como de la carga, de la cual forma parte el valor buscado del golpe de ariete. (Krivchenko, 1990)

- Para una compuerta el caudal está dado por la ecuación:

$$Q = \mu F_{comp} \sqrt{2g} \sqrt{H_o + \Delta H} \quad (38)$$

Donde:

μ : coeficiente de caudal;

F_{comp} : área de la apertura de la compuerta;

H_o : carga neta inicial;

ΔH : perdidas de carga; y,

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

- Para una máquina hidráulica:

$$Q = \left(\sum_{j=1}^m Q'_{Ij} \right) D_1^2 \sqrt{H_o + \Delta H} \quad (39)$$

Donde:

Q'_{Ij} : caudal específico de la unidad j ;

m : número hidro unidades adjuntos a la línea dada de conductos a presión;

D_1 : diámetro nominal de la máquina hidráulica;

H_0 : carga neta inicial; y,

ΔH : pérdidas de carga.

Las ecuaciones (38) y (39) pueden ser presentadas en una ecuación generalizada:

$$Q_i = Q_{I(i)} \sqrt{H_0 + \Delta H_{TR(i)}} \quad (40)$$

Donde:

$Q_{I(t)}$: capacidad de flujo, variable en el tiempo;

H_0 : carga neta inicial; y,

ΔH_{TR} : carga inercial de todo el tramo de conducción a presión.

Por otra parte, la solución de la ecuación diferencial (23) y la determinación de (ΔH_{TR}) se desarrolla con un método numérico. En el paso i o en cada fase de golpe hidráulico en un intervalo de tiempo (Δt) se tiene (Krivchenko, 1990).

$$\Delta H_{TR(i)} = -K_{IN.TR} \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta t} \quad (41)$$

Reemplazando el valor de (Q_i), a partir de la ecuación (40) se tiene lo siguiente:

$$\Delta t \Delta H_{TRi} = -K_{IN.TR} Q_{Ii} \sqrt{H_0 + \Delta H_{TRi}} + K_{IN.TR} Q_{i-1} \quad (42)$$

Al resolver la ecuación cuadrática se obtiene la carga inercial del tramo en el paso i o en cada fase de golpe hidráulico.

$$\Delta H_{TRi} = A \mp \sqrt{A^2 - \left(\frac{K_{IN.TR}}{\Delta t}\right)^2 (W_{i-1}^2 - Q_{Ii}^2 H_0)} \quad (43)$$

Donde:

$$A = \frac{K_{IN.TR}}{\Delta t} \left(Q_{i-1} + \frac{K_{IN.TR} Q_{li}^2}{2\Delta t} \right) \quad (44)$$

Por consiguiente, la ecuación para determinar la carga inercial o incremento por golpe de ariete para cada fase de golpe hidráulico es la siguiente:

$$\Delta H_{TRi} = \frac{-K_{IN.TR} Q_{li} \sqrt{H_o + \Delta H_{TRi}} + K_{IN.TR} Q_{i-1}}{\Delta t} \quad (45)$$

Donde:

ΔH_{TRi} : carga inercial del tramo de conducción (m);

$K_{IN.TR}$: coeficiente de inercia de todo el tramo de conducción;

Q_{li} y Q_{i-1} : capacidad de flujo variable en el tiempo; y,

Δt : intervalo de tiempo (s).

La ecuación (45) se resuelve por iteraciones, donde se itera (ΔH_{TRi}).

6.12. Determinación de la carga inercial o incremento de presión por golpe de ariete para cada fase de golpe hidráulico

Cabe recordar que el análisis se lo hace para cada fase de golpe con su respectivo intervalo de tiempo, su respectivo caudal, el coeficiente inercial del tramo de conducción, carga neta inicial y con el caudal que va a cambiar a lo largo del tiempo, para lo cual se inicia a partir del caudal máximo (Q_{max}).

Como se mencionó anteriormente la ecuación de la carga inercial, se la resolverá por medio de iteraciones, para ello se asumirá una carga inercial ($\Delta H_{TR.Asum}$) con la cual se obtendrá una carga inercial calculada ($\Delta H_{TR.Calculado}$), de la siguiente manera:

$$\Delta H_{TR.Calculado} = \frac{-K_{IN.TR} Q_{li} \sqrt{H_o + \Delta H_{TR.Asum}} + K_{IN.TR} Q_{i-1}}{\Delta t} \quad (46)$$

El proceso iterativo para cada fase de golpe hidráulico terminará cuando se cumpla con la siguiente condición:

$$\Delta H_{TR.Calculado} = \Delta H_{TR.Asum}$$

De esta manera se obtiene el coeficiente inercial o incremento de presión por golpe de ariete para cada fase del golpe hidráulico (ΔH_{TRi}).

Cabe señalar que la capacidad de flujo en cada fase de golpe varia a medida que pasa el tiempo se inicia a partir del caudal máximo (Q_{max}) pero para las demás fases del golpe se determina con la ecuación (40).

6.13. Determinación de la carga inercial o incremento de presión por golpe de ariete en el tramo superior

Para determinar esta parte del análisis es necesario determinar la relación de coeficientes inerciales superior y tramo de conducción además de la carga inercial de todo el sistema, y se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta H1_{(i)} = \Delta H_{TR(i)} * \frac{K_{IN:S}}{K_{IN.TR}} \quad (47)$$

6.14. Determinación de la carga inercial o incremento de presión por golpe de ariete en el tramo inferior

De igual manera se debe conocer la relación de coeficientes inerciales del tramo inferior y del tramo en general, para el efecto se aplica lo siguiente:

$$\Delta H2_{(i)} = \Delta H_{TR(i)} * \frac{K_{IN:I}}{K_{IN.TR}} \quad (48)$$

El dato de interés de todo este modelo de análisis será el valor mayor del incremento de presión por golpe de ariete o carga inercial en el tramo de conducción de las centrales hidroeléctricas de derivación.

Finalmente, una vez obtenido el incremento de presión por el golpe de ariete o carga inercial, se procede con la determinación del golpe relativo.

6.15. Determinación del golpe relativo

El golpe relativo es un parámetro que nos permite visualizar la variación porcentual del golpe de ariete, para lo cual se ocupa la siguiente ecuación (Krivchenko, 1990).

$$\Delta h = \frac{\Delta H_{TR}}{H_0} \quad (49)$$

CAPÍTULO VII

FORMULACIÓN DE MODELO DE ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE TRANSICIÓN HIDRODINÁMICA EN LOS SISTEMAS DE AGUA POTABLE QUE OPERAN CON ESTACIONES DE BOMBEO CON CARGA PEQUEÑA Y MEDIANA

Como base para formular el análisis de los procesos de transición hidrodinámica en los sistemas de conducción de agua potable que operan con estaciones de bombeo están dado por ecuaciones empíricas, las cuales son resultados de experimentación en modelos físicos, también por resultados de la practica validad de diseño y las observaciones en la realidad.

Antes de empezar con el análisis del modelo se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- El modelo de análisis para determinar el incremento de presión por golpe de ariete será aplicado en la línea de conducción, la cual se encuentra entre la obra de captación y el tanque de distribución del sistema de abastecimiento de agua potable.
- Se debe conocer las características geométricas de la línea de conducción como por ejemplo la longitud (L), el diámetro (D), la sección transversal (w) y el espesor de la cascara del conducto (δ).
- Para el modelo de análisis también se debe contar con información relacionada al tipo de material del conducto que conforma la línea de conducción, así como también su respectivo módulo de elasticidad del material del conducto (E).
- Además, por esta línea de conducción el líquido que fluye es agua, por tal motivo, se deberá conocer el módulo de elasticidad y la densidad del agua.
- Un dato fundamental para el modelo de análisis es el caudal (Q) que fluye por la línea de conducción, el cual se deberá conocer.

- El golpe de ariete positivo hace referencia a la salida (pérdida) de potencia tiene lugar en caso de cierre de la válvula, debido a esta maniobra se incrementa la presión interna en el conducto, por esta razón se debe tomar en cuenta la resistencia del espesor de la cáscara del conducto.
- El golpe de ariete negativo se presenta en la toma (incremento) de potencia tiene lugar en caso de abertura del orificio, debido a esta maniobra disminuye la presión y puede originar el surgimiento de vacío, cavitación.

7.1. Determinación del tipo de maniobra

Para este caso se debe conocer el tiempo de perturbación transitoria (T_s), el cual estará dado como dato, después se debe calcular el tiempo que tarda una onda de presión en viajar desde el punto donde se interrumpe el flujo hasta donde inicia la tubería y vuelve otra vez al punto inicial (t_f).

Una vez obtenido el tiempo de duración de la fase de golpe de ariete (t_f), se lo compara con el tiempo de perturbación transitoria o tiempo de cierre (T_s) y de esa manera conocer el tipo de maniobra ya sea un cierre rápido o cierre lento.

7.1.1 Para el caso de cierre o interrupción rápida

Se considera cierre o interrupción rápida cuando el tiempo de perturbación transitoria o tiempo de cierre es menor o igual al tiempo de duración de la fase de golpe de ariete, es decir:

$$T_s \leq t_f \quad (50)$$

Cuando se cumple con esta condición de interrupción rápida, se presenta un golpe de ariete directo, por lo tanto, el incremento de presión debe ser determinado con la ecuación de Zhukovsky.

(Calero Hidalgo, 2021)

7.1.2 Para el caso de cierre o interrupción lenta

Se considera cierre o interrupción lenta, cuando el tiempo de perturbación transitoria o tiempo de cierre empleado para detener o mermar el flujo, es mayor al tiempo de duración de la fase de golpe de ariete, de la siguiente manera:

$$T_s > t_f \quad (51)$$

Cuando se cumple esta condición de interrupción lenta, se presenta un golpe de ariete indirecto, por lo tanto, el incremento de presión debe ser determinado por la fórmula de Michaud.

Una vez identificado el tipo de maniobra y el tipo de golpe de ariete, se procede a calcular el incremento de presión por golpe de ariete en la línea de conducción, pero antes de eso se debe determinar la velocidad de flujo (V_0), de la siguiente manera:

$$V_0 = \frac{Q}{\omega} \quad (52)$$

Donde:

Q : caudal de flujo (m^3/s); y,

ω : sección transversal del conducto (m^2).

Como siguiente paso será determinar el incremento de presión por el golpe de ariete en función al tipo de maniobra que se presente.

7.2. Determinación del incremento de presión por el golpe de ariete

Una vez conocido el tipo de maniobra y el tipo de golpe de ariete se determinará el incremento de presión con las siguientes ecuaciones según sea el caso:

7.2.1 Ecuación de Zhukovsky

El valor máximo determinado por medio de la ecuación de Zhukovsky corresponde siempre con el máximo cambio de velocidad posible, esto es, en la mayoría de los sistemas.

Esta ecuación permite el cálculo de la variación de presión en una tubería, igualando la variación de la cantidad de movimiento del agua en el tiempo (dt), al impulso de la fuerza, cuando el tiempo de cierre es instantáneo (Calero Hidalgo, 2021).

$$v\omega dl\rho = \Delta p_{lim}\omega dt \quad (53)$$

O sea:

$$v\frac{dl}{dt}\rho = \Delta p_{lim} \quad (54)$$

Tomando en cuenta que ($\frac{dl}{dt} = a$), se obtiene la ecuación, para determinar el valor límite del incremento de la presión por el golpe de ariete, así como del incremento límite de la carga (ΔH_{lim}), quedando de la siguiente manera:

$$\Delta H_{gol} = \rho a \Delta v \quad (55)$$

Donde:

- ΔH_{gol} : variación de la presión (m);
- a : celeridad de onda (m/s);
- Δv : variación de la velocidad en el conducto (m/s);
- g : aceleración de la gravedad (m/s^2); y,

- ρ : densidad del líquido (kg/m³).

7.2.2 Fórmula de Michaud

A finales del siglo XIX, Michaud propuso la primera fórmula para determinar el incremento de la presión, en caso de golpe de ariete indirecto (REAL, 2016).

$$\frac{\Delta p_{lim}}{\Delta p_{gol}} = \frac{T_s}{t_f} \quad (56)$$

$$\Delta p_{gol} = \frac{\Delta p_{lim} t_f}{T_s} \frac{avg. 2L}{g T_s a} = \frac{2Lv}{g T_s} \rho g \quad (57)$$

$$\Delta H_{gol} = \frac{\Delta p_{gol}}{\rho g} = \frac{2Lv}{g T_s} \quad (58)$$

Donde:

- ΔH_{gol} : variación de la presión (m);
- L: longitud de la tubería (m);
- v : velocidad media del conducto en flujo permanente (m/s);
- g: aceleración de la gravedad (m/s^2); y,
- T_s : tiempo de perturbación transitoria (s)

7.3. Cálculo de la sobrepresión producida por el golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable que operan con estación de bombeo en función del tiempo de parada

Dentro de este modelo de análisis contamos con un caso, el cual hace alusión a los sistemas de conducción de agua potable que operan con estación de bombeo específicamente al parámetro de tiempo de parada de bomba (T_p), por lo tanto, se determinara el incremento de presión por golpe de ariete en función al tiempo de parada de bomba.

En este caso de sistemas de conducción de agua potable que operan con estación de bombeo, se deberá conocer la altura geométrica de la bomba (H_g), las pérdidas de carga por fricción (h_f) y las pérdidas de carga locales (h_l) de la línea de conducción.

7.3.1 Determinación del tiempo de parada de bomba

El tiempo de parada de la bomba se define como el intervalo entre el inicio y el término de la maniobra, sea cierre o apertura, ya que durante este tiempo se origina la variación de movimiento del fluido. Esta concepción es para conducciones por gravedad como también para el caso de conducciones por bombeo haciendo referencia a impulsiones, conociéndose en el primer caso como tiempo de cierre o apertura de la válvula y como tiempo de parada de bomba en el segundo.

El tiempo de cierre de una válvula puede medirse con un cronómetro, es un tiempo físico y real, fácilmente modificable, por ejemplo, cambiando la velocidad de giro en válvulas motorizadas, etc. Por el contrario, en el caso de las bombas, el tiempo de parada no puede medirse de forma directa y es más difícil de controlar. (REAL, 2016, p. 6)

En conclusión, en las conducciones por gravedad, el cierre de la válvula se puede efectuar a diferente ritmo, por lo tanto, el tiempo (T_s) es una variable sobre la que se puede actuar, pero en

las impulsiones el tiempo de parada (T_p) viene impuesto y no es posible actuar sobre él, salvo adicionando un volante al grupo motobomba o un sistema similar.

Mendiluce presenta la siguiente ecuación para el cálculo del tiempo de parada:

$$T_p = C + \frac{K * L * V}{g * H_m} \quad (59)$$

Donde:

V : velocidad (m/s);

L : longitud de la conducción (m);

g : aceleración de la gravedad (m/s^2);

C y K : coeficientes de ajuste empíricos; y,

H_m : altura manométrica proporcionada por el grupo de bombeo;

Para determinar la altura manométrica, se debe conocer la altura de geométrica, que es la suma entre la altura de aspiración y la altura de impulsión y más las pérdidas de carga que se producen a lo largo de la conducción, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_m = H_g + h_f + h_l \quad (60)$$

Donde:

H_g : altura geométrica (m);

h_f : pérdidas por fricción (m); y,

h_l : pérdidas locales (m).

La altura geométrica (H_g) se determina generalmente aguas arriba de la bomba, por lo que la profundidad del agua en el pozo se la debe considera en el caso de bombas sumergidas. Como siguiente paso es determinar los coeficientes empíricos de ajuste, el primer coeficiente en

determinar es el coeficiente (C), el cual se lo obtiene en función de la pendiente hidráulica (i), mediante la siguiente ecuación:

$$i = \frac{H_m}{L} \quad (61)$$

Una vez determinado la pendiente hidráulica, procedemos a ingresar con ese valor a la siguiente tabla y así determinamos el coeficiente empírico de ajuste (C).

Tabla 1

Tabla de valores para el coeficiente (C) según Mendiluce

Pendiente hidráulica (m)	Coeficiente (C)
$\frac{H_m}{L} < 0.20$	1
$\frac{H_m}{L} \geq 0.40$	0
$\frac{H_m}{L} \approx 0.30$	0.60

Nota. Se presenta los coeficientes (C) en función de la pendiente hidráulica. Elaborado por:

Autor.

Como siguiente paso determinamos el coeficiente de ajuste empírico (K), el cual está en función de la longitud de la tubería.

Para el efecto, tomamos el valor de la longitud de la tubería (L) e ingresamos a la siguiente tabla y de esa manera obtenemos el coeficiente de ajuste empírico (K).

Tabla 2

Tabla de valores para el coeficiente (K) según Mendiluce

Longitud de la tubería (L)	Coeficiente (K)
$L < 500$	2
$L \approx 500$	1.75
$500 < L < 1500$	1.5
$L \approx 1500$	1.25
$L > 1500$	1

Nota. Se presenta los valores de coeficiente (K) en función de la longitud. Elaborado por: Autor.

Después de haber determinado los coeficientes de ajuste empíricos, procedemos con el cálculo del tiempo de parada de la bomba (T_p).

Por lo tanto, si $\left(T_p < \frac{2L}{a}\right)$, la maniobra ya habrá concluido cuando se produzca el retorno de la onda de presión y tendremos un cierre rápido, alcanzándose la sobrepresión máxima en algún punto de la tubería. Sin embargo, si $\left(T_p > \frac{2L}{a}\right)$, estaremos ante un cierre lento y ningún punto alcanzará la sobrepresión máxima, ya que la primera onda positiva reflejada regresa antes de que se genere la última negativa. (REAL, 2016, p. 8)

7.3.2 *Determinación de la longitud crítica*

Como siguiente paso en el modelo de análisis es determinar la longitud crítica, por medio de la siguiente ecuación:

$$L_c = \frac{aT_p}{2} \quad (62)$$

Donde:

a: celeridad de onda (m/s); y,

T_p : Tiempo de parada (s).

Cabe recordar que antes de determinar la longitud crítica se debe haber calculado el valor de la celeridad (a).

“En el caso de ser la pendiente hidráulica mayor del 50%, se recomienda considerar la sobrepresión de Allievi en toda la conducción, el valor así calculado lo soportará el tramo de tubería de longitud (L_m), siendo ($L_m = L - L_c$)” (REAL, 2016, p. 12).

Posteriormente, se identificará el tipo de impulsión a partir de la longitud crítica y la longitud de la tubería.

7.3.3 *Impulsión corta*

En el caso de impulsión corta la sobrepresión es creciente desde el final de la impulsión hasta el origen junto a la bomba, donde alcanza los valores máximos (UPCT, 2017).

Para que se trate de una impulsión corta, la longitud de la tubería debe ser menor que la longitud crítica, cumpliéndose con esta condición el incremento por golpe de ariete se calcula con la fórmula de Michaud.

La condición de impulsión corta es la siguiente:

$$L < L_c$$

7.3.4 Impulsión larga.

En el caso de impulsión larga la sobrepresión es creciente desde el final de la impulsión hasta una longitud crítica (L_C) de dicho final. A partir de ese punto se mantiene constante con el valor de la fórmula de Allievi hasta el origen. (UPCT, 2017)

Para que se trate de una impulsión larga, la longitud de la tubería debe ser mayor que la longitud crítica, cumpliéndose con esta condición el incremento por golpe de ariete se calcula con la fórmula de Allievi.

La condición de impulsión larga es la siguiente:

$$L > L_C$$

7.3.5 Determinación del incremento de presión por el golpe de ariete por medio de la ecuación de Allievi

En el caso de que se tenga una impulsión larga se aplica la ecuación de Allievi para determinar el incremento de presión por el golpe de ariete, la ecuación es la siguiente:

$$\Delta H_{gol} = \frac{a * V}{g} \quad (63)$$

Donde:

V : velocidad (m/s);

a : celeridad de onda (m/s); y,

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

CAPÍTULO VIII

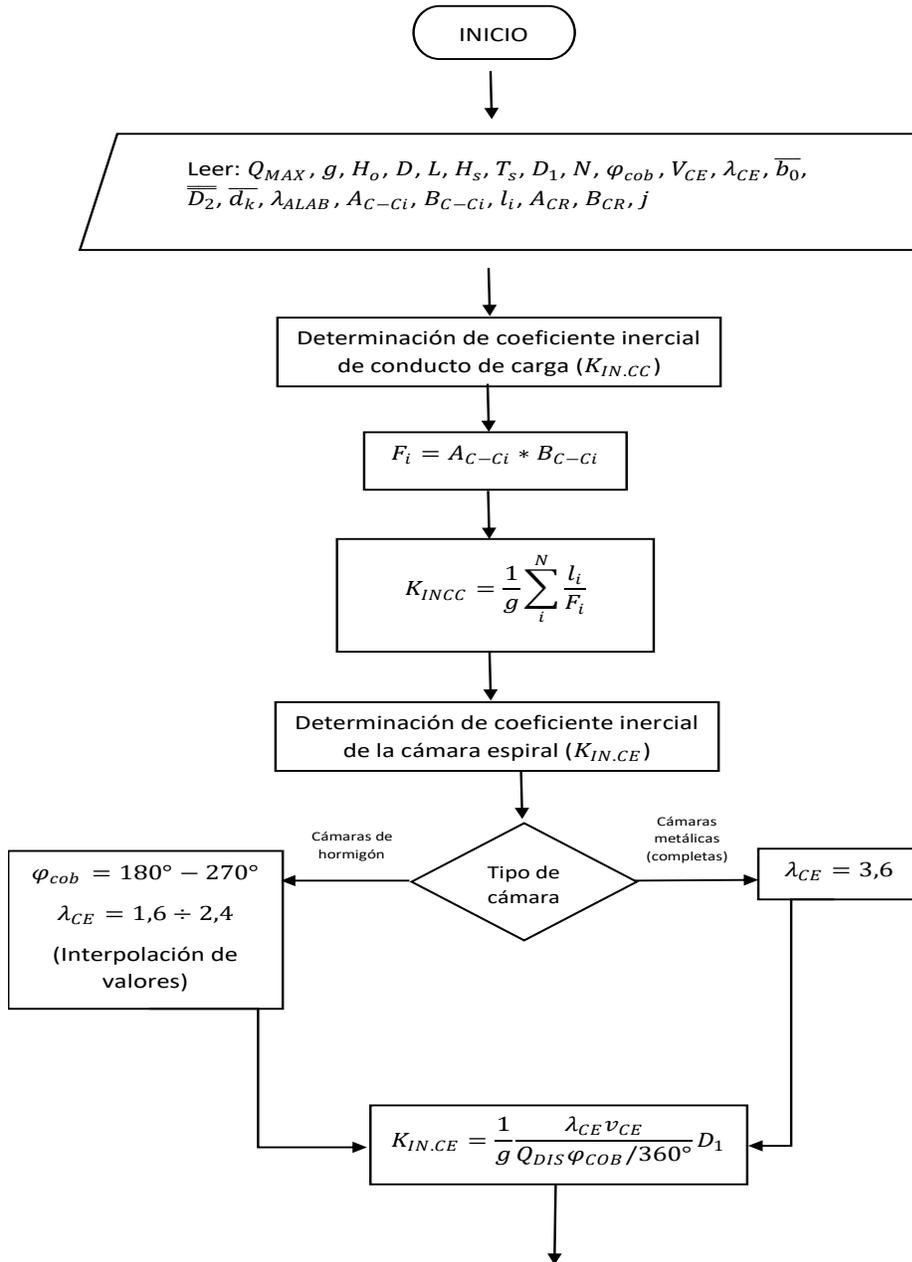
FORMULACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS DEL GOLPE DE ARIETE EN EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

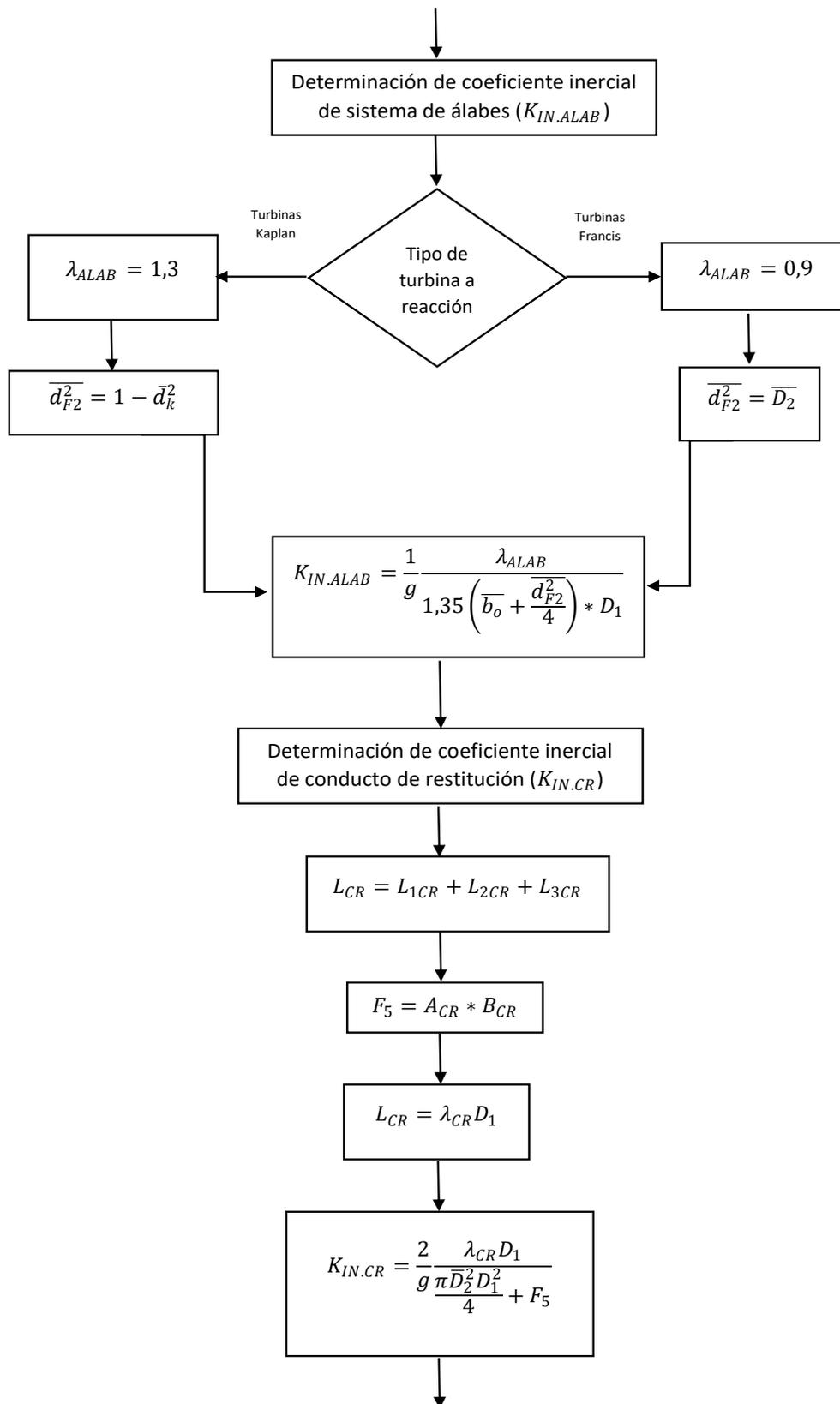
En el presente capítulo se fórmula y aplica el algoritmo para el análisis del golpe de ariete en el diseño del sistema de conducción de una central hidroeléctrica de derivación y en la línea de conducción de un sistema de abastecimiento de agua potable que opera con estaciones de bombeo, establecidos en la base teórica de los capítulos anteriores.

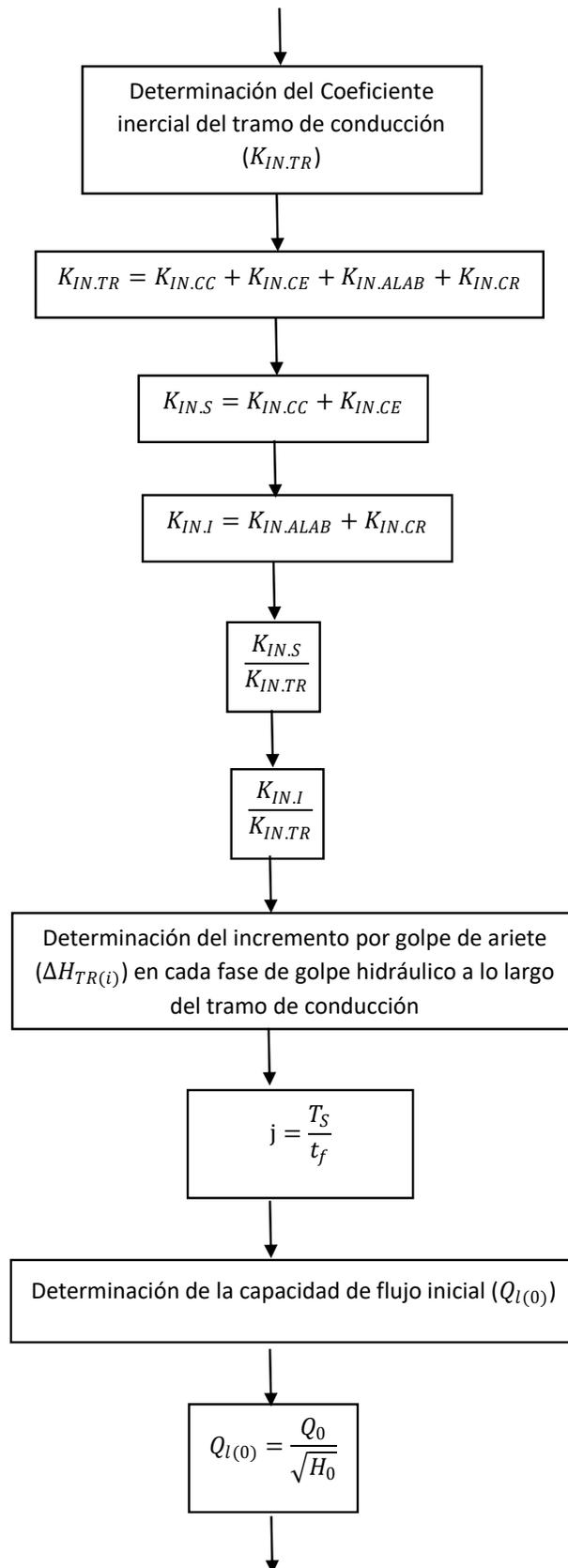
8.1. Algoritmo de cálculo

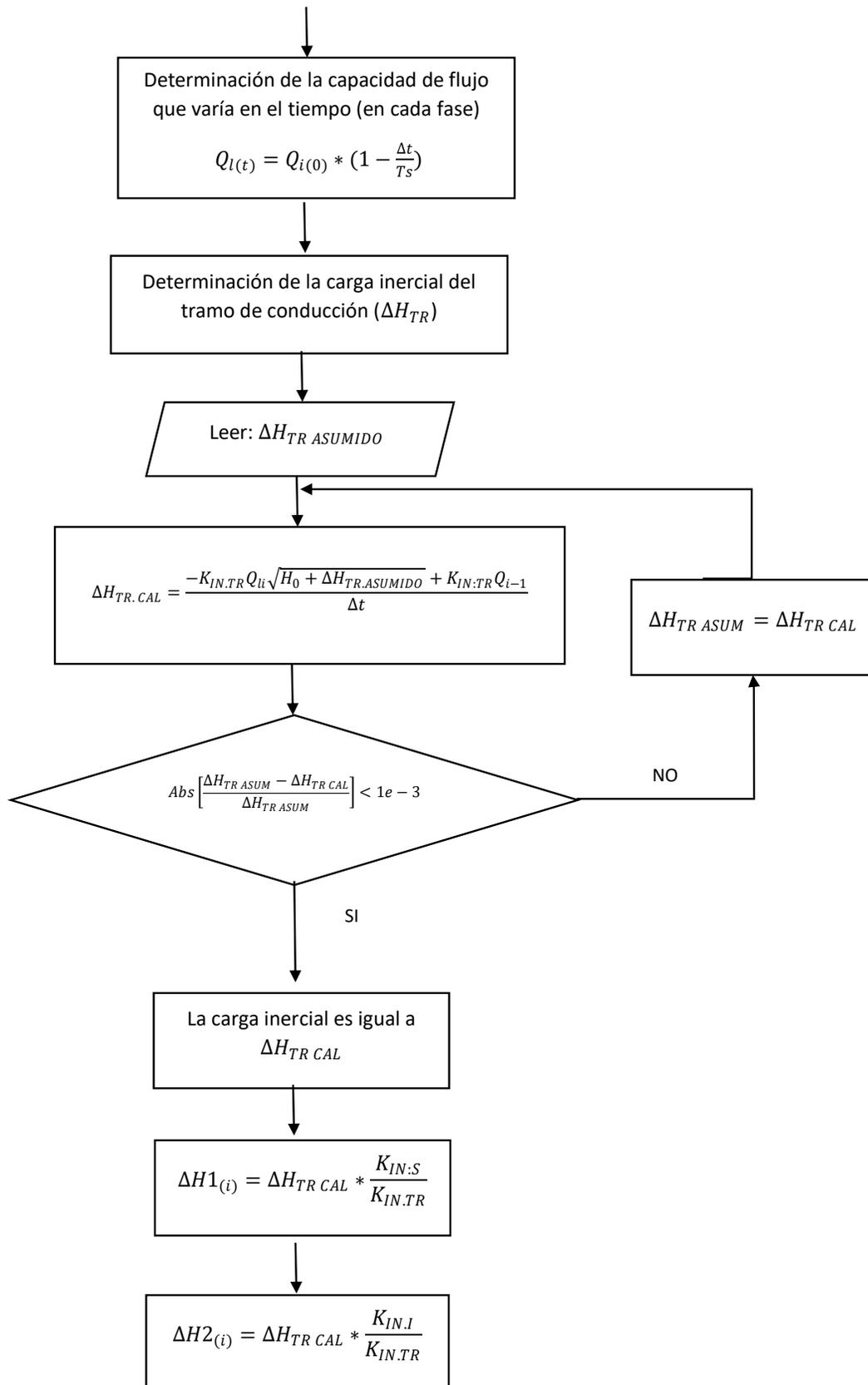
Figura 19

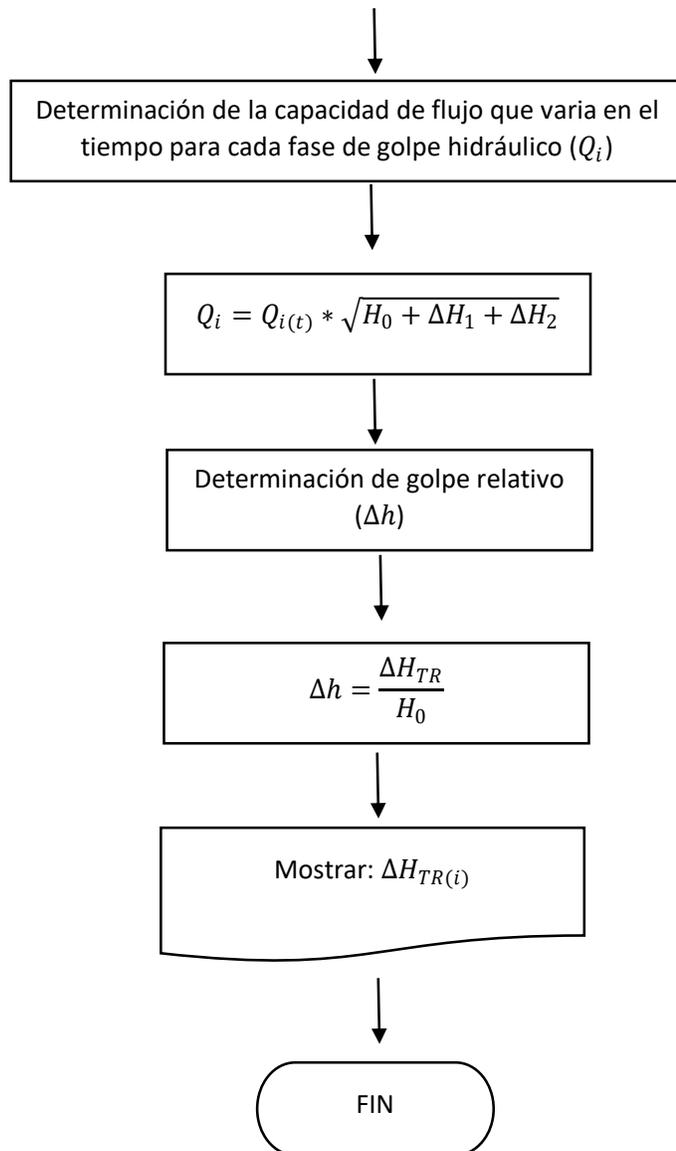
Cálculo del golpe de ariete en el tramo de conducción de una central hidroeléctrica de derivación.







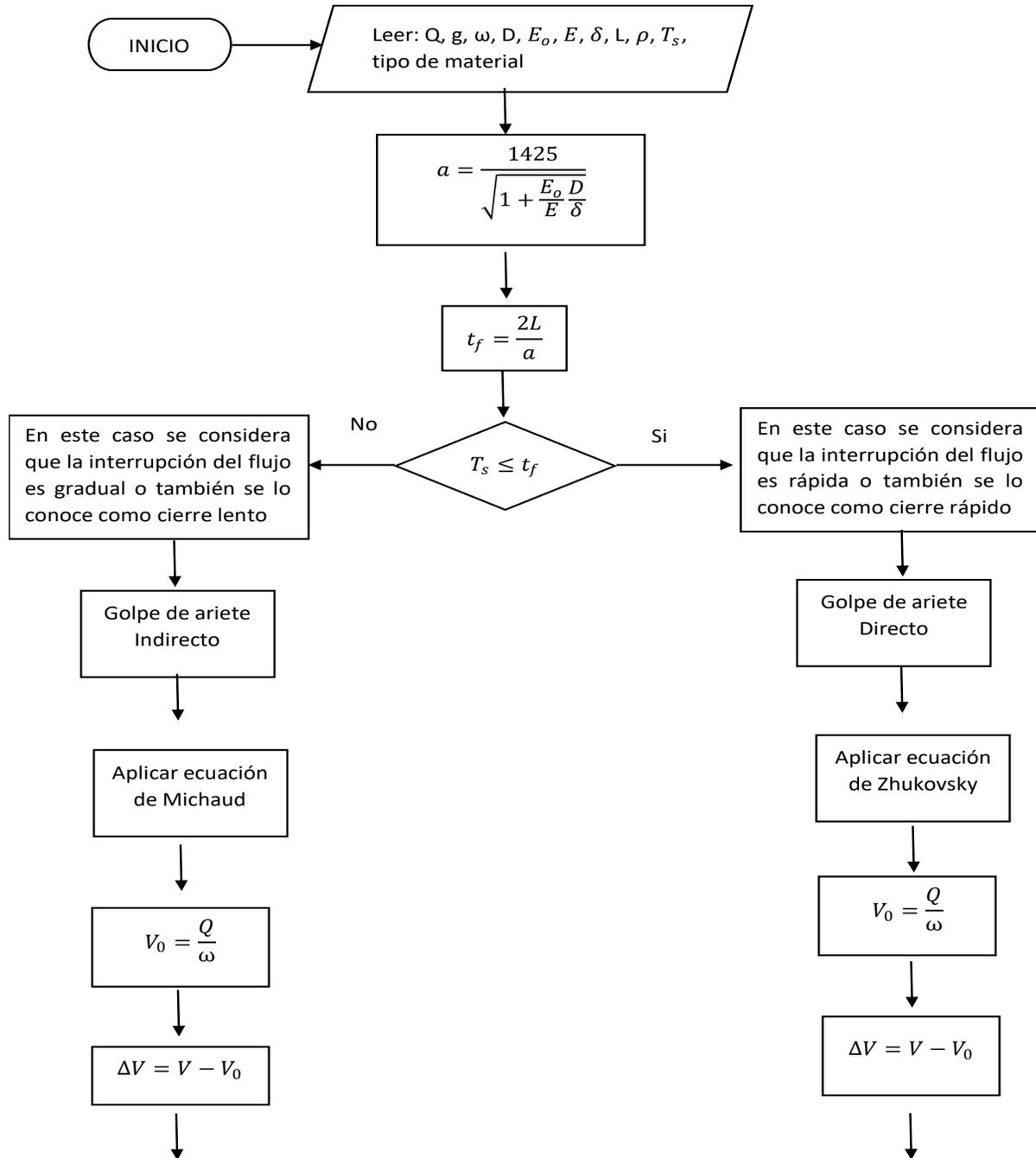


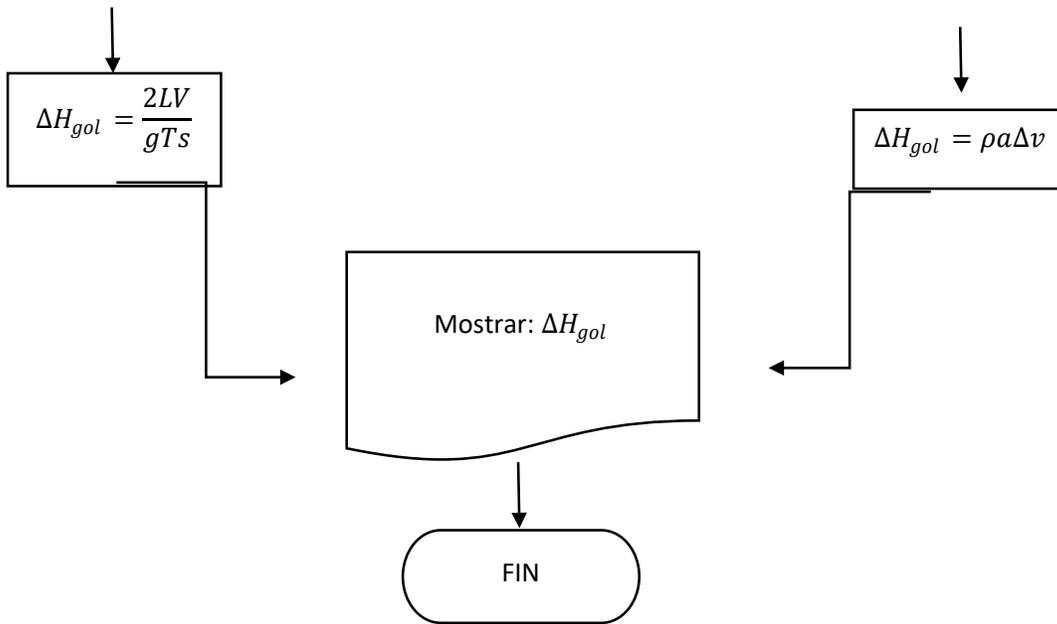


Nota. La gráfica representa el algoritmo de cálculo. Elaborado por: Autor

Figura 20

Cálculo del golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable con opera con estación de bombeo.

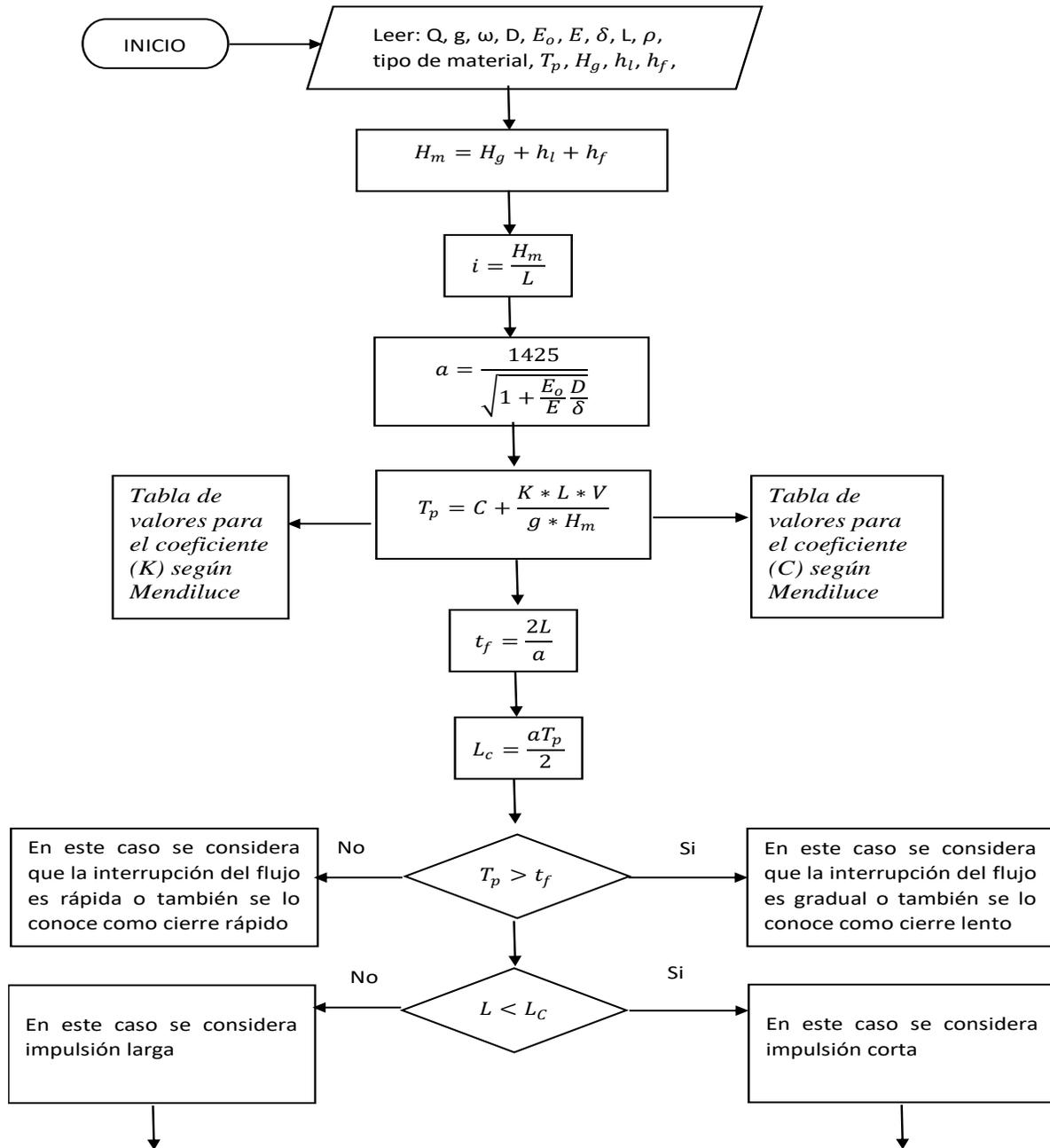


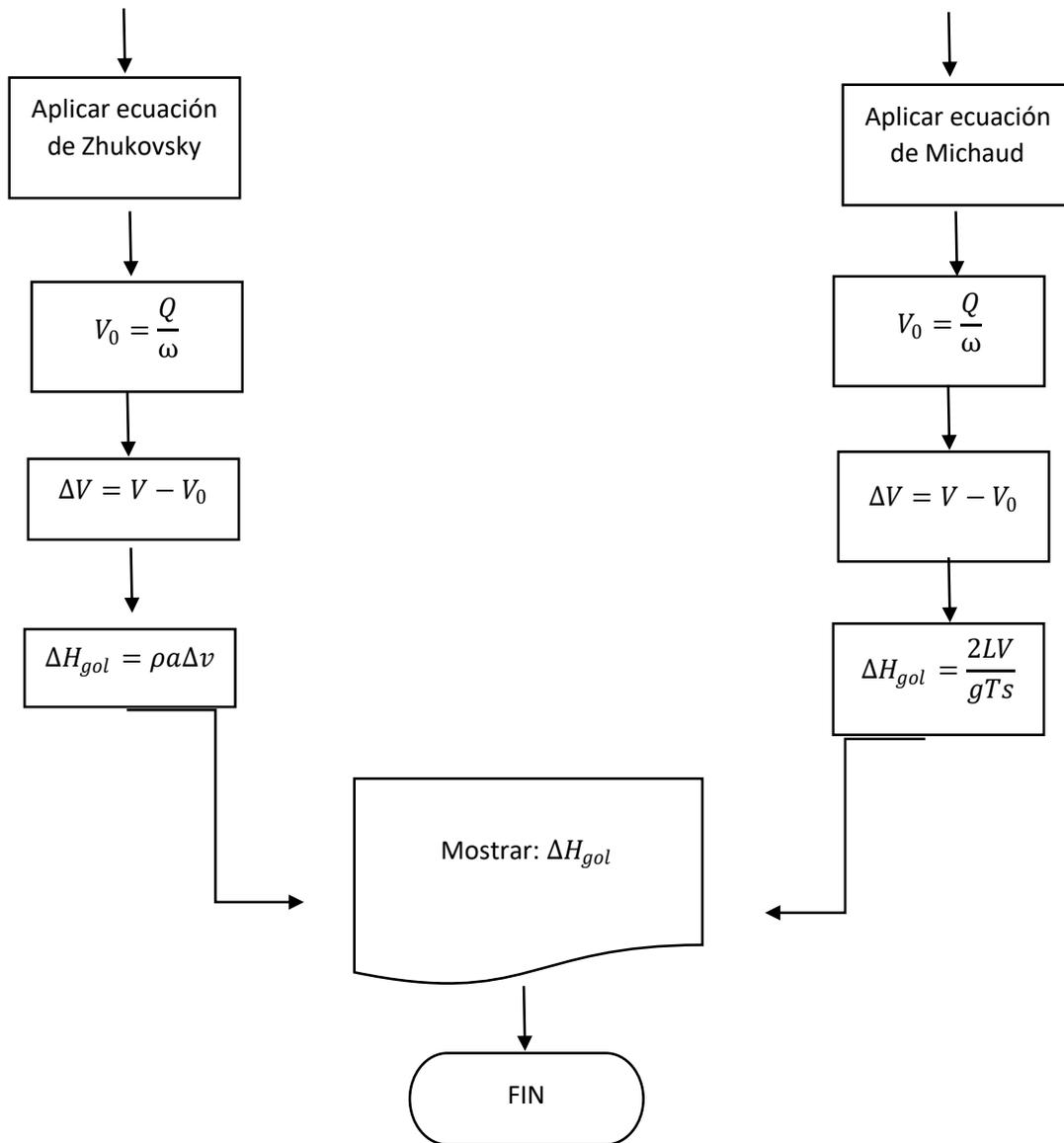


Nota. La gráfica representa el algoritmo de cálculo. Elaborado por: Autor

Figura 21

Cálculo del golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable que opera con estación de bombeo en función al tiempo de parada (T_p).





Nota. La gráfica representa el algoritmo de cálculo. Elaborado por: Autor

8.2. Procedimiento para el análisis del proceso transitorio golpe de ariete en los sistemas de conducción de la infraestructura hidráulica

Se mostrará ejemplos de cálculo de golpe de ariete para el tramo de conducción de centrales hidroeléctricas de derivación y para sistemas de conducción de agua potable que operan con estaciones de bombeo para cada ejemplo de cálculo se aplicarán ecuaciones formuladas en capítulos anteriores. Para formulación de dichos cálculos y poder verificar los resultados se usó un paquete computacional conocido perfectamente en el mercado.

8.2.1 Ejemplo de cálculo para determinar el incremento de presión por golpe de ariete en el tramo de conducción de una central hidroeléctrica de derivación

Tabla 3

Datos a usar para el ejemplo de cálculo

Simbología	Valor	Unidades
Q_{MAX}	345	m^3/s
H_o	36	m
H_s	12	m
T_s	8	seg
N	2	
g	9.81	m/s^2
Tipo de turbina a reacción	Kaplan	

Nota. Se presenta los datos de entrada. Elaborado por: Autor

Tabla 4

Datos de los elementos geométricos de una turbina a reacción Kaplan

Simbología	Valor	Unidades
D_1	6	m
$\overline{b_0}$	0.32	
$\overline{\overline{D_2}}$	1	
$\overline{d_k}$	0.45	

Nota. Se presentan los valores del diámetro del rodete. Elaborado por: Autor

8.2.1.1 Determinación del coeficiente inercial de conducto carga

Antes de calcular el coeficiente inercial de conducto de carga, se debe conocer el número de tramos que está conformado el conducto de carga.

Para el ejemplo de cálculo, como dato nos dice lo siguiente:

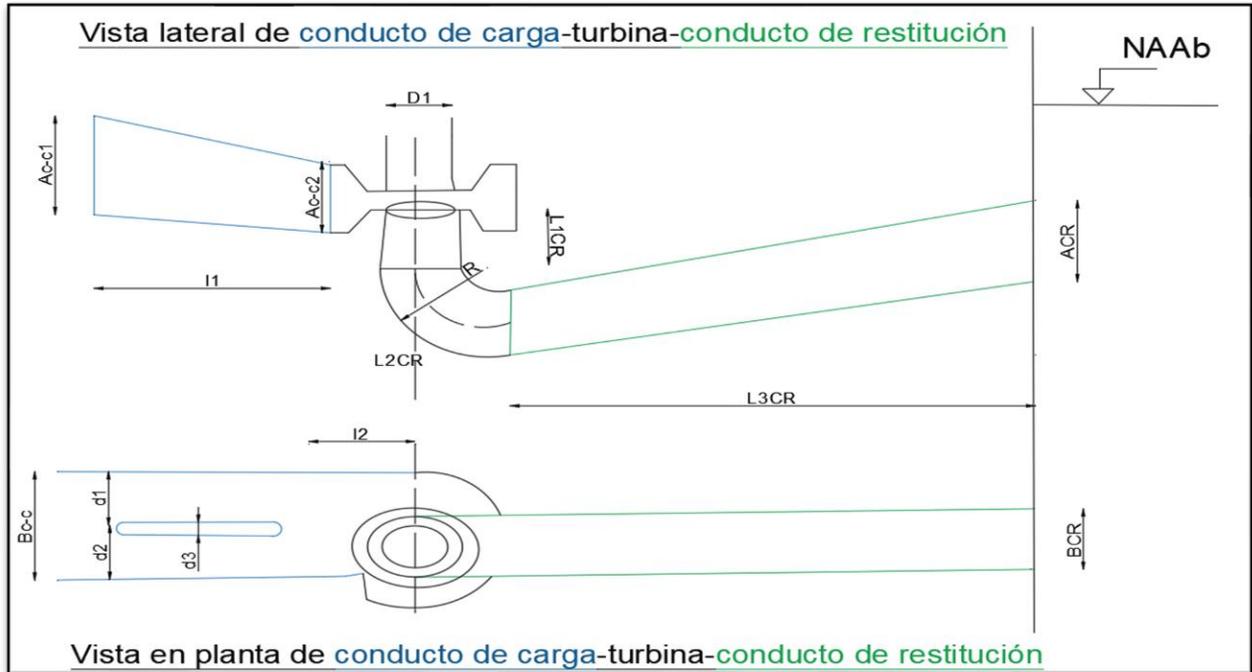
$$N = 2$$

Por lo tanto, el conducto de carga consta de 2 tramos.

Una vez conocido el número de tramos que está conformado el conducto de carga (N), se procede a determinar la sección transversal de cada tramo del conducto de carga (F_i), para lo cual se necesita conocer la altura y base de la sección de conducto de carga para cada tramo, para ello a continuación se presenta un esquema del conducto de carga con sus respectivas medidas.

Figura 22

Esquema de conducto de carga – turbina – conducto de restitución



Nota. La gráfica representa el tramo de conducción. Elaborado por: Autor

Tabla 5

Datos a usar para el cálculo de la sección de cada tramo de conducto de carga

Nro. Tramo	Base de la sección de	Altura de la sección de	Longitud de conducto de
	conducto de carga (B_{C-ci})	conducto de carga (A_{C-ci})	carga (l_i)
	(m)	(m)	(m)
1	13.8	13.5	18.4
2	15.6	12	7.8

Nota. Se presenta los datos geométricos del conducto de carga. Elaborado por: Autor

a) Determinación de la sección transversal del conducto de carga de tramo 1

$$F_1 = A_{C-C1} * B_{C-C1}$$

$$F_1 = 13.5 * 13.8$$

$$F_1 = 186.3 \text{ m}^2$$

b) Determinación de la sección transversal del conducto de carga de tramo 2

$$F_2 = A_{C-C2} * B_{C-C2}$$

$$F_2 = 12 * 15.6$$

$$F_2 = 187.2 \text{ m}^2$$

A continuación, se procede a determinar el coeficiente inercial de conducto de carga:

$$K_{INCC} = \frac{1}{g} \sum_i^N \frac{l_i}{F_i}$$

$$K_{INCC} = \frac{1}{g} \sum_i^2 \frac{l_1}{F_1} + \frac{l_2}{F_2}$$

$$K_{INCC} = \frac{1}{g} \sum_i^2 \frac{18.4}{186.3} + \frac{7.8}{187.2}$$

$$K_{INCC} = 0.0143$$

8.2.1.2 Determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral

Tabla 6

Datos a usar para el cálculo del coeficiente inercial de la cámara espiral

Simbología	Valor	Unidades
φ_{cob}	225	grados
V_{CE}	6	m/s
Tipo de cámara espiral	Cámara de hormigón	

Nota. Se presenta los valores relacionados con la cámara espiral. Elaborado por: Autor

A continuación, se determina el coeficiente de cámara espiral (λ_{CE}), como dato se tiene que la cámara espiral es de tipo cámara de hormigón, para este caso el coeficiente de cámara espiral (λ_{CE}) se lo determina por interpolación, para ello se conoce que cuando la cámara espiral es de hormigón dependiendo del ángulo de cobertura, $\varphi_{cob} = 180^\circ - 270^\circ$, $\lambda_{CE} = 1,6 - 2,4$.

Como dato se tiene que el ángulo de cobertura es igual a:

$$\varphi_{cob} = 225^\circ$$

Por lo tanto, el coeficiente de cámara espiral por interpolación es igual a:

$$\lambda_{CE} = 2$$

Una vez obtenido el coeficiente de cámara espiral (λ_{CE}), se procede al calculo del coeficiente inercial de la cámara espiral:

$$K_{IN.CE} = \frac{1}{g} \frac{\lambda_{CE} v_{CE}}{Q_{DIS} \varphi_{COB} / 360^\circ} D_1$$

$$K_{IN.CE} = \frac{1}{g} \frac{2 * 6}{345 * 225/360^\circ} * 6$$

$$K_{IN.CE} = 0.0340$$

8.2.1.3 Determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes

Como primer paso se debe determinar el coeficiente de sistema de álabes (λ_{ALAB}), para lo cual dependerá el tipo de turbina a reacción.

Para el ejemplo de cálculo, se tiene como dato que es una turbina a reacción Kaplan por lo tanto el coeficiente de sistema de álabes (λ_{ALAB}) es igual a:

$$\lambda_{ALAB} = 1.30$$

Como siguiente paso se determina el coeficiente inercial de sistemas de álabes:

$$K_{IN.ALAB} = \frac{1}{g} \frac{\lambda_{ALAB}}{1,35 \left(\overline{b_o} + \frac{\overline{d_{F2}^2}}{4} \right) * D_1}$$

Para turbinas a reacción Kaplan el término $\overline{d_{F2}^2}$ es igual a:

$$\overline{d_{F2}^2} = 1 - \overline{d_k^2}$$

$$\overline{d_{F2}^2} = 1 - 0.45^2$$

$$\overline{d_{F2}^2} = 0.80$$

Por lo tanto, el coeficiente inercial de sistemas de alabes es igual a:

$$K_{IN.ALAB} = \frac{1}{g} \frac{1.30}{1,35 \left(0.32 + \frac{0.80}{4} \right) * 6}$$

$$K_{IN.ALAB} = 0.0315$$

8.2.1.4 Determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución

Antes de calcular el coeficiente inercial de conducto de restitución, se debe determinar el área de la sección de salida del conducto de restitución (F_5), para lo cual se usa los siguientes datos:

Tabla 7*Datos de las medidas geométricas del conducto de restitución*

Simbología	Valor	Unidades
A_{CR}	13.2	m
B_{CR}	8.1	m
L_{1CR}	13.8	m
R	8.5	m
$L_{2CR} = 2\pi * R * 0.25$	13.35	m
L_{3CR}	75	m

Nota. Se presentan los valores relacionados con la geometría del conducto de restitución.

Elaborado por: Autor

El área de la sección de salida del conducto de restitución (F_5), se lo obtiene de la siguiente manera:

$$F_5 = A_{CR} * B_{CR}$$

$$F_5 = 13.2 * 8.1$$

$$F_5 = 106.92 \text{ m}^2$$

Como siguiente paso se determina la longitud real del conducto de restitución (L_{CR}):

$$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$$

$$L_{CR} = 13.8 + 13.35 + 75$$

$$L_{CR} = 102.15 \text{ m}$$

En la fórmula para determinar el coeficiente inercial de conducto de restitución ($K_{IN.CR}$), en lugar de ($\lambda_{CR}D_1$) es posible colocar la longitud real a lo largo del eje del conducto de restitución, quedando de la siguiente manera:

$$\lambda_{CR}D_1 = L_{CR}$$

El coeficiente inercial de conducto de restitución ($K_{IN.CR}$), se lo obtiene de la siguiente manera:

$$K_{IN.CR} = \frac{2}{g} \frac{\lambda_{CR}D_1}{\frac{\pi \bar{D}_2^2 D_1^2}{4} + F_5}$$

$$K_{IN.CR} = \frac{2}{g} \frac{L_{CR}}{\frac{\pi \bar{D}_2^2 D_1^2}{4} + F_5}$$

$$K_{IN.CR} = \frac{2}{g} \frac{102.15}{\frac{\pi 1^2 6^2}{4} + 106.92}$$

$$K_{IN.CR} = 0.1540$$

8.2.1.5 Determinación del coeficiente inercial del tramo de conducción

$$K_{IN.TR} = K_{IN.CC} + K_{IN.CE} + K_{IN.ALAB} + K_{IN.CR}$$

$$K_{IN.TR} = 0.0143 + 0.0340 + 0.0315 + 0.1540$$

$$K_{IN.TR} = 0.234$$

8.2.1.6 Determinación del coeficiente inercial del tramo superior

$$K_{IN.S} = K_{IN.CC} + K_{IN.CE}$$

$$K_{IN.S} = 0.0143 + 0.0340$$

$$K_{IN.S} = 0.048$$

8.2.1.7 Determinación del coeficiente inercial del tramo inferior

$$K_{IN.I} = K_{IN.ALAB} + K_{IN.CR}$$

$$K_{IN.I} = 0.0315 + 0.1540$$

$$K_{IN.I} = 0.186$$

8.2.1.8 Determinación relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción

$$\frac{K_{IN.S}}{K_{IN.TR}}$$
$$\frac{0.048}{0.234}$$
$$0.21$$

8.2.1.9 Determinación relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción

$$\frac{K_{IN.I}}{K_{IN.TR}}$$
$$\frac{0.186}{0.234}$$
$$0.79$$

8.2.1.10 Determinación del incremento por golpe de ariete en cada fase o intervalo de tiempo a lo largo del tramo de conducción

Antes de calcular el incremento por golpe de ariete, se debe establecer el intervalo de tiempo (Δt) y con eso el número de pasos (*paso i*).

Para el ejemplo de cálculo se tiene como dato un tiempo de cierre ($T_s = 8 \text{ seg}$), con un intervalo de tiempo igual a ($\Delta t = 1 \text{ seg}$), por lo tanto, el número de pasos es igual a 8, quedando de la siguiente manera:

Tabla 8

Número de pasos con su respectivo intervalo de tiempo

Pasos i	Δt (seg)
0	0
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8

Nota. Se presentan los intervalos de tiempo. Elaborado por: Autor

8.2.1.11 Determinación de la capacidad de flujo inicial

Una vez determinado el número de pasos (i), con su respectivo intervalo de tiempo (Δt), dentro del tiempo de cierre (T_s), se procede con el cálculo de la capacidad de flujo inicial ($Q_{l(0)}$) con la siguiente ecuación:

$$Q_{l(0)} = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}}$$

$$Q_{l(0)} = \frac{345}{\sqrt{36}}$$

$$Q_{l(0)} = 57.5 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

Como siguiente paso se determina la capacidad de flujo en función al intervalo de tiempo ($Q_{l(t)}$), es decir se calcula para cada paso (i) con su respectivo intervalo de tiempo (Δt), de la siguiente manera:

$$Q_{l(t)} = Q_{l(0)} * \left(1 - \frac{\Delta t}{T_S}\right)$$

- Capacidad de flujo para paso 1:

$$Q_{l(1)} = 57.5 * \left(1 - \frac{1}{8}\right)$$

$$Q_{l(1)} = 50.31 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

- Capacidad de flujo para paso 2:

$$Q_{l(2)} = 57.5 * \left(1 - \frac{2}{8}\right)$$

$$Q_{l(2)} = 43.13 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

- Capacidad de flujo para paso 3:

$$Q_{l(3)} = 57.5 * \left(1 - \frac{3}{8}\right)$$

$$Q_{l(3)} = 35.94 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

- Capacidad de flujo para paso 4:

$$Q_{l(4)} = 57.5 * \left(1 - \frac{4}{8}\right)$$

$$Q_{l(4)} = 28.75 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

- Capacidad de flujo para paso 5:

$$Q_{l(5)} = 57.5 * \left(1 - \frac{5}{8}\right)$$

$$Q_{l(5)} = 21.56 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

- Capacidad de flujo para paso 6:

$$Q_{l(6)} = 57.5 * \left(1 - \frac{6}{8}\right)$$

$$Q_{l(6)} = 14.38 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

- Capacidad de flujo para paso 7:

$$Q_{l(7)} = 57.5 * \left(1 - \frac{7}{8}\right)$$

$$Q_{l(7)} = 7.19 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

- Capacidad de flujo para paso 8:

$$Q_{l(8)} = 57.5 * \left(1 - \frac{8}{8}\right)$$

$$Q_{l(8)} = 0 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

Tabla 9

Número de pasos con su respectiva capacidad de flujo que varía en el tiempo

Pasos i	Δt (seg)	$Q_{l(t)}(\text{m}^{2.5}/\text{s})$
0	0	57.5
1	1	50.31
2	2	43.13
3	3	35.94
4	4	28.75
5	5	21.56
6	6	14.38
7	7	7.19
8	8	0

Nota. Se presenta el valor de los caudales para cada paso i. Elaborado por: Autor

8.2.1.12 Determinación de la carga inercial del tramo de conducción

Como siguiente paso se determina la carga inercial del tramo de conducción (ΔH_{TR}), para cada paso (i), con la siguiente ecuación:

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-K_{IN.TR} Q_{li} \sqrt{H_0 + \Delta H_{TR.ASUMIDO}} + K_{IN.TR} Q_{i-1}}{\Delta t}$$

Dicho parámetro se lo obtendrá a través de un proceso iterativo, que involucra a la carga neta inicial (H_0), el caudal en función a cada intervalo de tiempo (Q_{li}), el coeficiente inercial del tramo de conducción ($K_{IN:TR}$) y la capacidad de flujo variable en el tiempo (Q_{i-1}).

La capacidad de flujo variable en el tiempo (Q_{i-1}), se lo determina con la siguiente fórmula:

$$Q_i = Q_{i(t)} * \sqrt{H_0 + \Delta H_1 + \Delta H_2}$$

Para determinar la capacidad de flujo variable en el tiempo (Q_i), se debe conocer ΔH_1 y ΔH_2 , que son los incrementos por golpe de ariete del tramo superior y tramo inferior, para ello se aplican las siguientes ecuaciones:

Para tramo superior:

$$\Delta H_{1(i)} = \Delta H_{TR.CAL} * \frac{K_{IN.S}}{K_{IN.TR}}$$

Para tramo inferior:

$$\Delta H_{2(i)} = \Delta H_{TR.CAL} * \frac{K_{IN.I}}{K_{IN.TR}}$$

Para el proceso iterativo se asumirá una carga inercial del tramo de conducción ($\Delta H_{TR.ASUM}$), con el cual se obtendrá una carga inercial del tramo de conducción calculada ($\Delta H_{TR.CAL}$), el proceso iterativo será válido mientras cumpla con la siguiente condición:

$$Abs \left[\frac{\Delta H_{TR.ASUM} - \Delta H_{TR.CAL}}{\Delta H_{TR.ASUM}} \right] < 1e - 3$$

En caso de no cumplir con dicha condición, se seguirá asumiendo valores de carga inercial del tramo de conducción, hasta que cumpla con la condición.

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 1:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 5.178 \text{ m}$$

$$Q_0 = 345 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 50.31\sqrt{36 + 5.1778} + 0.234 * 345}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 5.180 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{5.178 - 5.180}{5.178} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 1:

$$\Delta H1_{(1)} = 5.180 * 0.21$$

$$\Delta H1_{(1)} = 1.071 \text{ m}$$

$$\Delta H2_{(1)} = 5.180 * 0.79$$

$$\Delta H2_{(1)} = 4.109 \text{ m}$$

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 2:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 8.345 \text{ m}$$

$$Q_1 = 50.31 * \sqrt{36 + 1.071 + 4.109}$$

$$Q_1 = 322.86 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 43.13\sqrt{36 + 8.345} + 0.234 * 322.86}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 8.346 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{8.345 - 8.346}{8.345} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 2:

$$\Delta H1_{(2)} = 8.346 * 0.21$$

$$\Delta H1_{(2)} = 1.725 \text{ m}$$

$$\Delta H2_{(2)} = 8.346 * 0.79$$

$$\Delta H2_{(2)} = 6.621 \text{ m}$$

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 3:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 10.100 \text{ m}$$

$$Q_2 = 43.13 * \sqrt{36 + 1.725 + 6.621}$$

$$Q_2 = 287.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 35.94\sqrt{36 + 10.100} + 0.234 * 287.18}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 10.099 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{10.100 - 10.099}{10.100} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 3:

$$\Delta H1_{(3)} = 10.099 * 0.21$$

$$\Delta H1_{(3)} = 2.088 \text{ m}$$

$$\Delta H2_{(3)} = 10.099 * 0.79$$

$$\Delta H2_{(3)} = 8.011 \text{ m}$$

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 4:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 10.98 \text{ m}$$

$$Q_3 = 35.94 * \sqrt{36 + 2.088 + 8.011}$$

$$Q_3 = 244 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 28.75\sqrt{36 + 10.98} + 0.234 * 244}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 10.9803 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{10.98 - 10.9803}{10.98} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 4:

$$\Delta H1_{(4)} = 10.9803 * 0.21$$

$$\Delta H1_{(4)} = 2.270 \text{ m}$$

$$\Delta H2_{(4)} = 10.9803 * 0.79$$

$$\Delta H2_{(4)} = 8.710 \text{ m}$$

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 5:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 11.377 \text{ m}$$

$$Q_4 = 28.75 * \sqrt{36 + 2.270 + 8.710}$$

$$Q_4 = 197.06 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 21.56\sqrt{36 + 11.377} + 0.234 * 197.06}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 11.3773 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{11.377 - 11.3773}{11.377} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 5:

$$\Delta H1_{(5)} = 11.3773 * 0.21$$

$$\Delta H1_{(5)} = 2.352 \text{ m}$$

$$\Delta H2_{(5)} = 11.3773 * 0.79$$

$$\Delta H2_{(5)} = 9.025 \text{ m}$$

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 6:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 11.5335 \text{ m}$$

$$Q_5 = 21.56 * \sqrt{36 + 2.352 + 9.025}$$

$$Q_5 = 148.42 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 14.38\sqrt{36 + 11.5335} + 0.234 * 148.42}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 11.5334 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{11.5335 - 11.5334}{11.5335} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 6:

$$\Delta H1_{(6)} = 11.5334 * 0.21$$

$$\Delta H1_{(6)} = 2.384 \text{ m}$$

$$\Delta H2_{(6)} = 11.5334 * 0.79$$

$$\Delta H2_{(6)} = 9.149 \text{ m}$$

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 7:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 11.5843 \text{ m}$$

$$Q_6 = 14.38 * \sqrt{36 + 2.384 + 9.149}$$

$$Q_6 = 99.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 7.19\sqrt{36 + 11.5843} + 0.234 * 99.11}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 11.5844 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{11.5843 - 11.5844}{11.5843} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 7:

$$\Delta H1_{(7)} = 11.5844 * 0.21$$

$$\Delta H1_{(7)} = 2.395 \text{ m}$$

$$\Delta H_{2(7)} = 11.5844 * 0.79$$

$$\Delta H_{2(7)} = 9.19 \text{ m}$$

- Carga inercial del tramo de conducción para paso 8:

$$\Delta H_{TR.ASUMIDO} = 11.5968 \text{ m.}$$

$$Q_7 = 7.19 * \sqrt{36 + 2.398 + 9.19}$$

$$Q_7 = 49.58 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = \frac{-0.234 * 0.00\sqrt{36 + 11.5968} + 0.234 * 49.58}{1}$$

$$\Delta H_{TR.CAL} = 11.5968 \text{ m}$$

$$Abs \left[\frac{11.5968 - 11.5968}{11.5968} \right] < 1e - 3 \quad ; \text{ por lo tanto si cumple}$$

Cálculo del incremento por golpe de ariete para tramo superior e inferior para paso 8:

$$\Delta H_{1(8)} = 11.5968 * 0.21$$

$$\Delta H_{1(8)} = 2.397 \text{ m}$$

$$\Delta H_{2(8)} = 11.5968 * 0.79$$

$$\Delta H_{2(8)} = 9.199 \text{ m}$$

$$Q_8 = 0.00 * \sqrt{36 + 2.397 + 9.199}$$

$$Q_8 = 0 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 10

Número de pasos con su respectivo incremento por golpe de ariete

Pasos i	Δt (seg)	$Q_{l(t)}$ ($m^{2.5}/s$)	ΔH calculado (m)	$\Delta H1$ tramo superior (m)	$\Delta H2$ tramo inferior (m)	Q_i (m ³ /s)
0	0	57.5	0	0	0	345
1	1	50.31	5.180	1.071	4.109	322.86
2	2	43.13	8.346	1.725	6.621	287.18
3	3	35.94	10.099	2.088	8.011	244.00
4	4	28.75	10.9802	2.270	8.710	197.06
5	5	21.56	11.3773	2.352	9.025	148.42
6	6	14.38	11.5334	2.384	9.149	99.11
7	7	7.19	11.5844	2.395	9.190	49.58
8	8	0	11.5968	2.397	9.199	0

Nota. Se presenta el incremento de presión por el golpe de ariete para cada paso i. Elaborado por:

Autor

Por lo tanto, la carga inercial o incremento por golpe de ariete en el tramo de conducción de la central hidroeléctrica es:

$$\Delta H_{gol} = 11.5968 \approx 11.60 \text{ m}$$

8.2.1.13 Determinación del golpe relativo del tramo de conducción

$$\Delta h = \frac{\Delta H_{TR}}{H_0}$$

$$\Delta h = \frac{11.60}{36}$$

$$\Delta h = 0.32 = 32\%$$

Por lo tanto, supera el límite establecido del 30% de sobrepresión para el caso de turbinas a reacción.

A continuación, se presenta una tabla de resultados del incremento por golpe de ariete para diferentes diámetros del rodete (D_1), cargas netas (H_0) y sus dimensiones relativas (\bar{b}_0 , \bar{D}_2 , \bar{d}_k), permaneciendo constante el caudal máximo (Q_{MAX}), tanto para turbinas Kaplan y turbinas Francis.

Tabla 11

Incrementos por golpe de ariete para diferentes cargas netas y diámetros de rodete (Turbina Kaplan)

Q_{MAX} (m ³ /s)	345	345	345	345
H_0 (m)	40	50	60	40
T_S (seg)	8	8	8	8
D_1 (m)	5	9	9.5	5
\bar{b}_0	0.375	0.375	0.35	0.375
\bar{d}_k	0.45	0.47	0.64	0.45
\bar{D}_2	1	1	1	1

$K_{IN.TR}$	0.241	0.207	0.206	0.264
$\Delta H_{TR}(m)$	11.85	9.74	9.57	13.12
Tipo de cámara espiral	hormigón	hormigón	hormigón	metálica
Δh	0.30	0.19	0.16	0.33

Nota. Se presenta el incremento de presión por el golpe de ariete para diferentes datos de entrada.

Elaborado por: Autor

Tabla 12

Incrementos por golpe de ariete para diferentes cargas netas y diámetros de rodete (Turbina Francis)

Q_{MAX} (m ³ /s)	345	345	345	345
$H_o(m)$	170	310	500	500
$T_s(seg)$	8	8	8	8
$D_1(m)$	5	8	3.6	1.8
\bar{b}_0	0.2	0.12	0.08	0.375
\bar{d}_k	0.45	0.45	0.45	0.45
\bar{D}_2	1.097	1.097	1.097	1.097
$K_{IN.TR}$	0.231	0.21	0.263	0.272

$\Delta H_{TR}(m)$	10.25	9.00	11.462	11.87
Tipo de cámara espiral	hormigón	hormigón	hormigón	hormigón
Δh	0.06	0.03	0.02	0.024

Nota. Se presenta el incremento de presión por el golpe de ariete para diferentes datos de entrada.

Elaborado por: Autor

Cabe recordar que el procedimiento de cálculo para obtener los resultados de la tabla (11) y de la tabla (12), se presentara en la parte de anexos.

8.2.2 Ejemplo de cálculo para determinar el incremento de presión por golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable

Tabla 13

Datos a usar para el ejemplo de cálculo

Simbología	Valor	Unidad
Q	30	<i>lt/s</i>
L	25	m
D	150	mm
w	0.0176	m^2
δ	12	mm
E_T	200000	<i>Mpa</i>
E_o	2000	<i>Mpa</i>
t_s	0.02	seg

ρ_{agua}	1000	Kg/m ³
Tipo de material de conducto	Hierro fundido	

Nota. Se presenta los valores o datos de entrada. Elaborado por: Autor

8.2.2.1 Determinación de la celeridad

Para determinar la celeridad o la velocidad de difusión del frente de la onda del golpe de ariete, se ocupa la siguiente ecuación:

$$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$$

$$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{2000 \cdot 0.15}{200000 \cdot 0.012}}}$$

$$a = 1270 \text{ m/s}$$

8.2.2.2 Determinación del tiempo de duración de la fase de golpe de ariete

$$t_f = \frac{2L}{a}$$

$$t_f = \frac{2 * 25}{1270}$$

$$t_f = 0.04 \text{ seg}$$

Una vez determinado el tiempo de duración de la fase de golpe de ariete (t_f) y la longitud crítica (L_c), se procede a identificar el tipo de maniobra, el tipo de impulsión y el tipo de golpe de ariete, para lo cual se debe comparar el tiempo de cierre o tiempo de parada (T_p) con el tiempo de duración de la fase de golpe de ariete (t_f) de la siguiente manera:

$$T_s \leq t_f$$

$$0.02 \leq 0.04$$

Por consiguiente, el tipo de maniobra corresponde a un **cierre rápido** y a un **golpe de ariete directo**.

8.2.2.3 Determinación del incremento de presión por golpe de ariete

Para el ejemplo de cálculo, se presenta un cierre rápido y un golpe de ariete directo, por lo tanto, el incremento por golpe de ariete se determina con la ecuación de Zhukovsky.

$$\Delta H_{gol} = \rho a \Delta v$$

Antes de calcular el incremento de presión por golpe de ariete, Se determina la variación de la velocidad como resultado de la cual surge el golpe de ariete, de la siguiente manera:

$$V_0 = \frac{Q}{\omega}$$

$$V_0 = \frac{30}{\frac{1000}{0.0176}}$$

$$V_0 = 1.7 \text{ m/s}$$

- Variación de la velocidad:

$$\Delta V = V - V_0$$

$$\Delta V = 0 - 1.7$$

$$\Delta V = -1.7 \text{ m/s}$$

Una vez determinado la variación de la velocidad, se procede con el cálculo del incremento de presión por golpe de ariete por medio de la ecuación de Zhukovsky.

$$\Delta H_{gol} = \rho a \Delta v$$

$$\Delta H_{gol} = 1000 * 1270 * 1.7$$

$$\Delta H_{gol} = 2,16 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\Delta H_{gol} = 2.16 \text{ MPa}$$

A continuación, se presenta una tabla de resultados del incremento por golpe de ariete para diferentes diámetros (D), longitudes (L) y diferente tipo de material del conducto, permaneciendo constante el caudal (Q).

Tabla 14

Incrementos por golpe de ariete para diferentes diámetros, longitudes y material en sistemas de abastecimiento de agua potable

Q (m ³ /s)	0.03	0.03	0.03	345
L (m)	20	50	20	50
T_S (seg)	0.02	0.02	0.02	0.02
D (m)	0.10	0.2	0.2	0.2
<i>Material</i>	Hierro fundido	Hierro fundido	Hierro fundido	PVC
ΔH_{TR} (MPa)	5.23	1.26	1.26	0.39

Nota. Se presentan los resultados para diferentes datos de entrada. Elaborado por: Autor

Cabe recordar que el procedimiento de cálculo para obtener los resultados de la tabla (14), se presentara en la parte de anexos.

8.2.3 Ejemplo de cálculo para determinar el incremento de presión por golpe de ariete en el sistema de conducción de agua potable que opera con estación de bombeo en función al tiempo de parada (T_p)

Tabla 15

Datos a usar para el ejemplo de cálculo

Simbología	Valor	Unidad
Q	1.25	lt/s
L	1000	m
D	600	mm
w	0.2827	m^2
δ	12	mm
E_T	98100	Mpa
E_o	2030	Mpa
ρ_{agua}	1000	Kg/m ³
Tipo de material de conducto	Hierro fundido	
h_f	5	m
f_l	0.8	m
H_g	47	m

Nota. Se presentan los datos de entrada para la determinación de la magnitud del golpe de ariete.

Elaborado por: Autor

8.2.3.1 Determinación de la altura manométrica

$$H_m = H_g + h_f + h_l$$

$$H_m = 47 + 5 + 0.8$$

$$H_m = 52.75 \text{ m}$$

8.2.3.2 Determinación de la pendiente

$$i = \frac{H_m}{L}$$

$$i = \frac{52.75}{1000}$$

$$i = 0.05$$

8.2.3.3 Determinación de la celeridad

$$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$$

$$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{2000}{2000000} \frac{0.6}{0.012}}}$$

$$a = 1164 \text{ m/s}$$

8.2.3.4 Determinación del tiempo de duración de la fase de golpe de ariete

$$t_f = \frac{2L}{a}$$

$$t_f = \frac{2 * 1000}{1164}$$

$$t_f = 1.72 \text{ seg}$$

A continuación, se determina la velocidad de la siguiente manera:

$$V_0 = \frac{Q}{\omega}$$

$$V_0 = \frac{1.250}{0.2827}$$

$$V_0 = 4.42 \text{ m/s}$$

8.2.3.5 Determinación del tiempo de parada

$$C = 1; \frac{H_m}{L} < 0.20$$

$$K = 1.5; 500 < L < 1500$$

$$T_p = C + \frac{K * L * V}{g * H_m}$$

$$T_p = 1 + \frac{1.5 * 1000 * 4.42}{g * 52.75}$$

$$T_p = 13.81 \text{ seg}$$

8.2.3.6 Determinación de la longitud crítica

$$L_c = \frac{aT_p}{2}$$

$$L_c = \frac{1164 * 13.81}{2}$$

$$L_c = 8036.9 \text{ m}$$

Para el tipo de impulsión, se debe comparar la longitud de la tubería (L) con la longitud crítica (L_c), de la siguiente manera:

$$L < L_c$$

$$1000 \text{ m} < 8036.9 \text{ m}$$

Por consiguiente, el tipo de impulsión corresponde a una **impulsión corta**, por lo tanto, el incremento por golpe de ariete se calcula con la fórmula de Michaud.

8.2.3.7 Determinación del incremento de presión por golpe de ariete

$$\Delta H_{gol} = \frac{2LV}{gTp}$$

$$\Delta H_{gol} = \frac{2 * 1000 * 4.42}{g * 13.81}$$

$$\Delta H_{gol} = 65.24 \text{ mca}$$

A continuación, se presenta una tabla de resultados del incremento por golpe de ariete para diferentes diámetros (D), longitudes (L) y diferente altura manométrica (H_m), permaneciendo constante el caudal (Q).

Tabla 16

Incremento de carga para diferentes diámetros, longitud, perdidas por fricción

Q (m ³ /s)	0.03	0.03	0.03
L (m)	1000	500	500
D (m)	0.6	0.5	0.5
H_m (m)	52.75	52.75	33.75
ΔH_{TR} (mcc)	65.24	55.16	36.41

Nota. Se presentan los resultados para diferentes datos de entrada. Elaborado por: Autor

Cabe recordar que el procedimiento de cálculo para obtener los resultados de la tabla (16), se presentará en la parte de anexos.

CAPÍTULO IX
MEDIDAS PARA EVITAR O REDUCIR EL IMPACTO DEL GOLPE DE ARIETE
EN LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA
HIDRÁULICA

9.1. Para el caso de centrales hidroeléctricas de derivación

9.1.1 Chimeneas de equilibrio

También conocido como torre piezométrica, es un depósito abierto a la atmósfera en su extremo superior conectado perpendicularmente a la tubería de conducción.

La chimenea de equilibrio constituye una reserva de agua próxima a la central que permite acelerar o decelerar el agua de la tubería más lentamente de lo que la turbina a veces requiere, reduciendo la amplitud de las oscilaciones de presión. (Alzamora Martínez, Alemany Espert, & Navarro Andreu, 1995)

Dependiendo de la magnitud del golpe de ariete que se puede presentar en el sistema de conducción, pueden ser de varios tipos por ejemplo verticales o con cámara de expansión. Así mismo, para reducir el tiempo en que se disipe el golpe de ariete puede instalarse más de una chimenea de equilibrio.

Las chimeneas de equilibrio obedecen a la magnitud de la constante inercial, normalmente se requiere la chimenea de equilibrio cuando la constante inercial es mayor que 3, en el caso de que la constante inercial es mayor que 8, la chimenea de equilibrio resulta imprescindible.

La parte negativa de las chimeneas de equilibrio es que su costo puede elevarse dependiendo de la altura que se necesite, por lo tanto, se presentaran dificultades para su construcción debido a las condiciones de topografía y espacio.

9.1.2 Válvulas de cierre y seguridad

Se utilizan para seguridad y cierre en turbinas bajo alta presión de funcionamiento, cierran automáticamente sin energía exterior; en casos de emergencia, incluso en contra de la presión unidireccional a la máxima velocidad de flujo.

Estas válvulas en las centrales hidroeléctricas suelen tener funciones de seguridad, por lo tanto, deben cerrar de forma segura y lo más rápido posible cuando se detecta cualquier anomalía en la instalación, como por ejemplo inundación de la caseta de válvulas, exceso de nivel, exceso de caudal o revoluciones en la turbina y fallo de energía eléctrica.

Estas válvulas ofrecen una fiabilidad absoluta en caso de una ruptura de la tubería de presión, además estas válvulas deben ser montadas una por cada hidro grupo con el fin de disipar la sobrepresión.

Entre las válvulas de seguridad se tiene a la válvula mariposa, válvulas esféricas, válvulas de chorro hueco.

Este tipo de válvulas al ser fabricadas industrialmente ofrecen mayores garantías en todos los aspectos, por otra parte, estas válvulas de seguridad no ocupan mucho espacio.

9.1.3 Volante de inercia

Un volante de inercia es un elemento totalmente pasivo con una alta masa específica en la que se almacena energía cinética en forma de rotación, únicamente aporta al sistema una inercia adicional. Al aumentar la inercia del sistema, se reducen las oscilaciones de velocidad.

Es decir, consiste en incorporar a la parte rotatoria del hidro grupo un volante cuya inercia retarde la pérdida de revoluciones del motor, por lo tanto, aumente el tiempo de perturbación transitoria, con la consiguiente reducción de las sobrepresiones.

Como parte negativa de esta medida, es que sí el volante de inercia presenta un peso alto, puede originar problemas mecánicos al sistema.

9.2. Para el caso de sistemas de agua potable que operan con estaciones de bombeo

9.2.1 Cámaras de aire

También conocida como colchón de aire, pararrayos de golpe de ariete, es una tubería relativamente corta, unida verticalmente a la tubería de conducción, llena de aire o cualquier otro gas y con una tapa en su extremo superior.

“Estas cámaras funcionan amortiguando la sobrepresión del golpe de ariete cuando el agua ingresa al conducto lleno de aire y choca contra este, disipando gran parte de la energía de presión que se produce” (Ortiz Masek, 2006, p. 61).

Las cámaras de aire presentan varias ventajas como por ejemplo son fáciles de instalar, tienen gran capacidad de disipar la presión, además esta medida no representa gastos onerosos.

9.2.2 Válvulas de retención

Las válvulas de retención sólo permiten el flujo de agua en un sentido.

Entre sus aplicaciones se destaca que, en la tubería de impulsión, a la salida de la bomba, impide que esta gire en sentido contrario, proteger la bomba contra los incrementos de presión y, además evitar que la tubería de impulsión se vacíe.

9.2.3 Válvulas anticipadoras de onda

Las válvulas anticipadoras de onda entran en funcionamiento (apertura), cuando se produce la parada de la bomba y cuando se produce la disminución de presión inicial, de tal forma que cuando vuelva a la válvula la onda de sobrepresión, ésta se encuentre totalmente abierta, de esa manera reducir los incrementos de presión originados por el proceso transitorio golpe de ariete.

9.2.4 Válvulas de alivio

“Las válvulas de alivio son accesorios que pueden absorber variaciones repentinas de presión mediante la expulsión de agua a través de sí mismas, tienen una salida de desfogue ante el exceso de presión” (Ortiz Masek, 2006, p. 62).

Este tipo de válvulas tienen la ventaja de ser accesorios garantizados ya que son fabricados industrialmente, además se puede regular la velocidad de apertura y cierre de acuerdo a las condiciones en que opera el sistema, la parte negativa de estos accesorios es que los diámetros disponibles son limitados.

CONCLUSIONES

En el desarrollo del proyecto, se obtuvo los algoritmos que permiten realizar el cálculo de la carga inercial o el incremento de presión por el golpe de ariete en el tramo de conducción de las centrales hidroeléctricas de derivación de carga pequeña y mediana y en los sistemas de conducción de agua potable que operan con estación de bombeo.

El análisis del incremento de presión por el golpe de ariete realizado para las centrales hidroeléctricas de derivación fue para dos rangos de carga, el primero con cargas que oscilan entre los 40 y 60 m para turbina Kaplan y el segundo con cargas que oscilan entre 170 y 500 m para turbina Francis, dentro de esto se puede evidenciar, que a medida que aumenta la carga neta en turbinas Kaplan y en turbinas Francis, la carga inercial o incremento de presión por golpe de ariete disminuye, todo esto se cumple siempre y cuando la dimensión nominal de rodete aumente y para un caudal de diseño constante.

A través del análisis del incremento de presión por golpe de ariete en centrales hidroeléctricas de derivación, se puede apreciar que sí el diámetro nominal del rodete aumenta, el coeficiente inercial disminuye, es decir, estos parámetros son inversamente proporcional, y todo esto para un caudal constante y carga neta variable.

En las centrales hidroeléctricas de derivación por medio del análisis de incremento de presión se puede constatar que sí el coeficiente inercial aumenta el incremento de presión por golpe de ariete también lo hace, son dos parámetros directamente proporcionales, para un mismo caudal y a diferente carga neta, y esto ocurre en la turbina Kaplan como también en la turbina Francis.

Una de las características a tomar en cuenta en el análisis de incremento de presión por golpe de ariete en centrales hidroeléctricas, es el tipo de cámara espiral, ya que se pudo apreciar que para una cámara espiral de tipo metálica el incremento de presión por golpe de ariete es mayor

a la de la cámara espiral de tipo hormigón, y todo esto con un caudal, carga neta y diámetro nominal de rodete constantes.

En el análisis del incremento de presión por golpe de ariete en los sistemas de conducción de agua potable, se puede apreciar que si la longitud y el diámetro de la tubería disminuyen, el incremento de presión por golpe de ariete aumenta, esto quiere decir que los parámetros de longitud, diámetro con el incremento de presión por golpe de ariete son inversamente proporcional, y todo esto para un caudal constante.

En los sistemas de conducción de agua potable por medio del análisis del incremento de presión por golpe de ariete se puede constatar que si el diámetro de la tubería aumenta, la velocidad de flujo disminuye y por ende el incremento de presión por golpe de ariete también disminuye, por lo tanto, estos parámetros son inversamente proporcional, y todo esto para un caudal y una longitud de tubería constante.

Una de las características a tomar en cuenta en el análisis de incremento de presión por golpe de ariete en los sistemas de conducción de agua potable, es el tipo de material de la conducción, ya que se pudo verificar que para una conducción de tipo acero el incremento de presión por golpe de ariete es mayor a la de la conducción de tipo PVC, todo esto para un caudal, diámetro y longitud constantes.

Cuando se realizó el análisis del incremento de presión por golpe de ariete en los sistemas de conducción de agua potable que operan con estación de bombeo en función al tiempo de parada de la bomba se puede evidenciar que si se aumenta el diámetro y la longitud de la tubería, el incremento de presión por golpe de ariete disminuye, por lo tanto, estos parámetros son inversamente proporcional, manteniendo un caudal constante.

A través del análisis del proceso transitorio golpe de ariete en los sistemas de conducción de agua potable que operan con estación de bombeo en función al tiempo de parada de la bomba se infiere, que si las pérdidas por fricción o principales disminuyen el incremento de presión por golpe de ariete también lo hace, es decir, son parámetros directamente proporcionales, manteniendo un caudal constante.

El golpe de ariete producido por la parada de una bomba es el que origina oscilaciones de presión de mayor magnitud, por lo tanto, el uso de equipo de bombeo aumenta el riesgo de producir un golpe de ariete que pueda dañar algún elemento del sistema de abastecimiento de agua potable.

RECOMENDACIONES

A parte del proceso hidrodinámico transitorio de golpe de ariete en el diseño de los sistemas de conducción de la infraestructura hidráulica existen otras situaciones de mucha importancia y que también merecen ser analizados, tal es el caso de las pérdidas de energía, el desgaste de los componentes, la cavitación, etc.

Evitar que se produzca un golpe de ariete es casi imposible, en realidad lo más pertinente para controlarlo es buscar algún mecanismo de protección contra el proceso transitorio o alguna forma de atenuar su efecto.

En el caso de centrales hidroeléctricas una de las opciones que se puede implementar para reducir esa sobrepresión generada por el proceso transitorio golpe de ariete, es instalar una chimenea de equilibrio o torre piezométrica o en su defecto montar una válvula neumática por cada hidro grupo (válvula de seguridad), esto disipa la sobrepresión.

Se pueden presentar casos en donde el sistema soporte las variaciones de presión causadas por el proceso transitorio golpe de ariete utilizando tuberías de mayor espesor, de mayor diámetro y de materiales más resistentes, pero se pueden presentar escenarios en donde las sobrepresiones alcanzan valores muy elevados, por lo tanto, el costo del sistema aumenta demasiado, así que lo más sugerible será optar por medidas que mejor se adapten al sistema y de esa manera reducir el impacto del golpe de ariete y por consiguiente reducir la parte económica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, J., Guarga, R., & Izquierdo, J. (1995). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*. Universidad de la República.
- Alzamora Martínez, F., Alemany Espert, V., & Navarro Andreu, M. (1995). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Arias Palacios, L. G., & Zabala Morocho, J. M. (2013). *Análisis en estado estacionario y transitorio de las condiciones de operación del poliducto Quito-Ambato*. [Artículo académico, Escuela Politécnica Nacional].
https://www.academia.edu/8082414/AN%C3%81LISIS_EN_ESTADO_ESTACIONARIO_Y_TRANSITORIO_DE_LAS_CONDICIONES_DE_OPERACION_DEL_POLIDUCTO_QUITO_AMBATO
- Artemchuk, S. V. (2010). *Análisis hidráulico de los sistemas de conducción de instalaciones hidroenergéticas*. Minsk: U.Saharov.
- Calero Hidalgo, I. (2021). *Centrales Hidroeléctricas*. UPS.
- Castillo Orozco, E. A. (2012). *Validación de un modelo CFD para análisis de golpe de Ariete en conductos cerrados*. [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31036>
- CONAGUA. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Conducciones*. SEMARNAT.
- Crane. (s.f.). *Flujo de fluidos en valvulas, accesorios y tuberías*. CRANE.
- Franzini, J., & Finnemore, J. (1999). *Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería*. Concepción Fernández Madrid.

- García Gutierrez, H., & Nava Mastache, A. (2014). *Selección y Dimensionamiento de Turbinas Hidráulicas para Centrales Hidroeléctricas*. UNAM-Universidad Autónoma de México, México.
- IDAE. (2006). *Minicentrales Hidroeléctricas*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Krivchenko, G. I. (1990). *Análisis de los procesos transitorios en centrales hidroeléctricas*. Moscú: Energo Matizdat.
- Lozada Fiallos, J. M. (2010). *Análisis del flujo no permanente en tuberías de presión para aprovechamientos hidroeléctricos*. [Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional], <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2364>
- Mancha, U. d. (s.f.). *Centrales Hidroeléctricas*.
- Martínez Menes, M. R. (2007). *Línea de Conducción por Gravedad*. SAGARPA.
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo S.A.
- Navarro Plana, F. (2019). *Modelización de Transitorios Hidráulicos*. [Máster Universitario en Matemática Computacional, Universitat Jaume I], http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/190061/TFM_Navarro_Plana%2C_Francisco_.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ortíz Flores, R. (2011). *Hidráulica Generación de Energía*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Ortiz Flórez, R. (2011). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Ortiz Masek, G. A. (2006). *EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE agua potable*. [Tesis de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala], http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2611_C.pdf

Pérez Farrás, L., Guitelman, A., & Perez, S. (2002). *Estudio de transitorios: Golpe de ariete*.

Universidad de Buenos Aires.

Ríos Cando, L. E. (2016). *Análisis del flujo transitorio en sistemas de bombeo*. [Tesis de

Posgrado, Escuela Politécnica Nacional],

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16648/1/CD-7264.pdf>

Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías*. Bogota: Alfaomega.

Sánchez Domínguez, U. (s.f.). *Máquinas Hidráulicas*. ECU.

Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidraulica General*. Mexico D.F: Limusa S.A.

Streeter, V. (1970). *Mecanica de los fluidos*. Mexico D.F: Mc Graw-Hill.

Subbotin, A. (1983). *Introducción a la Hidrotecnia*. San Petesburgo: Hidrometeoizdat.

UPCT. (2017). *Golpe de Ariete*. Universidad Politecnica de Cartagena.

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

Simbología.	Significado	Unidad
CH	Central Hidroeléctrica	
EB	Estación de bombeo	
GA	Golpe de ariete	
L	Longitud del conducto	m
D	Diámetro del conducto	m
F	Sección transversal del conducto	m^2
δ	Espesor de la cascara del tubo de acero	mm
h_f	Pérdidas de carga	m
H_{EST}	Carga estática	m
Q	Caudal	m^3/s
V	Velocidad de flujo	m/s
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
ρ	Densidad	kg/m^3
E_T	Módulo de elasticidad del material del conducto	Mpa
E_o	Módulo de elasticidad del agua	Mpa
a	Celeridad de onda	m/s
t_f	Duración de la fase de golpe de ariete	seg
T_s, T_A	Tiempo de cierre, tiempo de apertura	seg
Δv	Variación de la velocidad	m/s
ΔH_{gol}	Incremento de carga por golpe de ariete	m

N	Número de tramos	
T_W	Constante inercial del conducto de carga	seg
H_o	Carga neta inicial	m
Q_{max}	Caudal máximo	m^3/s
K_{iner}	Coefficiente de inercia	
Q_o	Caudal inicial	m^3/s
$Q_{I(t)}$	Capacidad de flujo variable en el tiempo	$m^{2,5}/s$
ΔH_{TR}	Carga inercial de todo el tramo de conducción a presión	m
Δt	Intervalo de tiempo (fases)	seg
H_S	Altura de restitución	m
D_1	Diámetro nominal del rodete	m
$A_{C-C(i)}$	Altura de la sección del conducto de carga	m
$B_{C-C(i)}$	Base de la sección del conducto de carga	m
$F(i)$	Sección transversal del conducto de carga	m^2
$l(i)$	Longitud del conducto de carga	m
$K_{IN.CC}$	Coefficiente inercial de conducto de carga	
φ_{cob}	Ángulo de cobertura	grados
V_{CE}	Velocidad media cámara espiral	m/s
λ_{CE}	Coefficiente de cámara espiral	
$K_{IN.CE}$	Coefficiente inercial de cámara espiral	
\overline{b}_o	Altura relativa del distribuidor o elemento direccional	
\overline{D}_2	Diámetro relativo de salida desde el rodete	

\bar{d}_k	Diámetro relativo del cuerpo del rodete	
$K_{IN.ALAB}$	Coefficiente inercial de sistema de álabes	
A_{CR}	Altura de la sección de salida del conducto de restitución	m
B_{CR}	Base de la sección de salida del conducto de restitución	m
F_5	Área de la sección de salida del conducto de restitución	m^2
$L_{(i)CR}$	Longitud de conducto de restitución	m
R	Radio	m
L_{CR}	Longitud real de conducto de restitución	m
$K_{IN.CR}$	Coefficiente inercial de conducto de restitución	
$K_{IN.TR}$	Coefficiente inercial de tramo de conducción	
$Q_{l(0)}$	Capacidad de flujo inicial	$m^{2,5}/s$
k_{ens}	Coefficiente de ensanchamiento de conducto de restitución	
P_{atm}	Presión atmosférica	Pa
$\frac{P_{C.RESt}}{\rho g}$	Presión hidrodinámica en la sección de entrada de conducto de restitución	m
h_f	Pérdidas de fricción o principales	m
f	Factor de fricción	
Re	Número de Reynolds	
ν	Viscosidad cinemática del fluido	
ε	Rugosidad absoluta	mm
K	Coefficiente de resistencia local	
P	Potencia	kw

D_0	Diámetro de ubicación de los ejes de giro de los álabes del distribuidor o elemento direccional	m
b_0	Alto del elemento direccional o distribuidor	m
T_p	Tiempo de parada de bombas	seg
L_c	Longitud crítica	m
H_m	Altura manométrica proporcionada por el grupo de bombeo	m
H_g	Altura geométrica	m
i	Pendiente hidráulica	
$\frac{V^2}{2g}$	Carga de velocidad	m
$\frac{P}{\gamma}$	Carga de presión	m
Z	Carga de posición	m
V_0	Velocidad inicial	m/s
V_f	Velocidad final	m/s
$\frac{dQ}{dt}$	Derivada de la variación del caudal	
ξ	Magnitud relativa del golpe de ariete	
η_{crest}	Coefficiente de eficiencia de conducto de restitución	
μ	Coefficiente de caudal	
F_{comp}	Área de la apertura de la compuerta	m ²
Q'_{ij}	Caudal específico de la unidad j	m ³ /s
m	número hidro unidades adjuntos a la línea dada de conductos a presión.	

C	Coeficiente de ajuste empírico	
γ	Peso específico del agua	$\frac{N}{m^3}$
LP	Línea piezométrica	
LE	Línea de energía	
NAAB	Nivel aguas abajo	
NAAR	Nivel aguas arriba	
NR	Nivel de referencia	
w	Área de la sección de la tubería	m^2
L_c	Longitud critica	m
j	Número de fases de golpe de ariete.	

ANEXOS

Anexo 1. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con $H_0=40\text{m}$ y $D_1=5\text{m}$

Calculo de golpe de ariete en una central hidroelectrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H_0	carga neta inicial	40	m
Q_{MAX}	caudal maximo de diseño	345	m^3/s
H_S	altura de restitucion	12	m
T_S	Tiempo de cierre	8	seg
D_1	diámetro nominal del rodete	5	m
g	aceleracion de la gravedad	9,81	m/s^2

Anexo 2. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con $H_o=40m$ y $D1=5m$

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la sección de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 + D_3$	13,8	m
Sección transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la sección de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Sección transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
ángulo de cobertura	ϕ_{cob}		225	grados
velocidad media cámara espiral	V_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara hormigón	2	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0284	s.u

Características del sistema de álabes -aspas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,375	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,45	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Kaplan	1,30	s.u
	d^2_{F2}	$d2F2 = 1 - dk^2$	0,80	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0342	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitución	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitución (cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi \times R \times 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitución	$K_{IN,CR}$		0,1646	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,241	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,043	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,199	s.u
Relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,18	s.u
Relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,82	s.u

Anexo 3. Resultados de la carga inercial para una turbina Kaplan con Ho=40m y D1=5m

paso i	Δt (seg)	Proceso iterativo			Tramo superior	Tramo inferior	Q (m ³ /s)
		Q _{i(t)} , (m ^{2.5} /s)	ΔH _{TR asumido} , (m)	ΔH _{TR calculado} , (m)	ΔH ₁ (m)	ΔH ₂ (m)	
0	0	54,5	0	0	0	0	345,00
1	1	47,73	5,530	5,537	0,979	4,558	322,09
2	2	40,91	8,780	8,776	1,551	7,224	285,73
3	3	34,09	10,490	10,495	1,855	8,640	242,27
4	4	27,27	11,3200	11,3172	2,001	9,316	195,38
5	5	20,46	11,6700	11,6711	2,063	9,608	147,04
6	6	13,64	11,8000	11,8036	2,087	9,717	98,15
7	7	6,82	11,8430	11,8438	2,094	9,750	49,10
8	8	0,00	11,8510	11,8529	2,095	9,757	0,00

Anexo 4. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con Ho=50m y D1=9m

Calculo de golpe de ariete en una central hidroelectrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H ₀	carga neta inicial	50	m
Q _{MAX}	caudal maximo de diseño	345	m ³ /s
H _s	altura de restitution	12	m
T _s	Tiempo de cierre	8	seg
D ₁	diámetro nominal del rodete	9	m
g	aceleracion de la gravedad	9,81	m/s ²

Anexo 5. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con $H_o=50m$ y $D1=9m$

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parametro	Simbología	Descripcion	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la seccion de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 - D_3$	13,8	m
Seccion transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la seccion de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Seccion transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parametro	Simbología	Descripcion	Valor	Unidades
angulo de cobertura	Φ_{COB}		225	grados
velocidad media cámara espiral	v_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara hormigón	2	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0511	s.u

Características del sistema de álabes -aspas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parametro	Simbología	Descripcion	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,375	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,47	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Kaplan	1,30	s.u
	d^2_{F2}	$d2F2 = 1 - dk^2$	0,78	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0191	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parametro	Simbología	Descripcion	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitucion	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitucion(cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi * R * 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitucion	$K_{IN,CR}$		0,1221	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,207	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,065	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,141	s.u
Relacion coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conduccion		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,32	s.u
Relacion coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conduccion		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,68	s.u

Anexo 6. Resultados de la carga inercial para una turbina Kaplan con Ho=50m y D1=9m

paso i	Δt (seg)	$Q_{i(t)} = Q_{i(0)} * (1 - \frac{\Delta t}{T_S})$ $\Delta H_{TR,CAL} = \frac{-K_{IN,TR} Q_{i(t)} \sqrt{H_0} + \Delta H_{TR,ASUM} + K_{IN,TR} Q_{i-1}}{\Delta t}$ $\Delta H_1 = \Delta H_{TR,CAL} * \frac{K_{IN,S}}{K_{IN,TR}}$ $\Delta H_2 = \Delta H_{TR,CAL} * \frac{K_{IN,I}}{K_{IN,TR}}$ $Q_i = Q_{i(t)} * \sqrt{H_0 + \Delta H_1 + \Delta H_2}$					
		Proceso iterativo		Tramo superior	Tramo inferior		
		$Q_{i(t)}, (m^3/s)$	$\Delta H_{TR} \text{ asumido }, (m)$	$\Delta H_{TR} \text{ calculado }, (m)$	$\Delta H_1 (m)$	$\Delta H_2 (m)$	$Q (m^3/s)$
0	0	48,8	0	0	0	0	345,00
1	1	42,69	5,544	5,544	1,754	3,790	318,17
2	2	36,59	8,107	8,107	2,565	5,542	278,94
3	3	30,49	9,169	9,169	2,901	6,268	234,56
4	4	24,40	9,5644	9,5646	3,026	6,539	188,28
5	5	18,30	9,6944	9,6944	3,067	6,627	141,36
6	6	12,20	9,7308	9,7308	3,079	6,652	94,27
7	7	6,10	9,7391	9,7391	3,081	6,658	47,14
8	8	0,00	9,7404	9,7404	3,082	6,659	0,00

Anexo 7. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con Ho=60m y D1=9.5m

Calculo de golpe de ariete en una central hidroelectrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H ₀	carga neta inicial	60	m
Q _{MAX}	caudal maximo de diseño	345	m ³ /s
H _s	altura de restitucion	12	m
T _s	Tiempo de cierre	8	seg
D ₁	diámetro nominal del rodete	9,5	m
g	aceleracion de la gravedad	9,81	m/s ²

Anexo 8. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con Ho=60m y D1=9.5m

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la sección de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 - D_3$	13,8	m
Sección transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la sección de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Sección transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
ángulo de cobertura	ϕ_{COB}		225	grados
velocidad media cámara espiral	V_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara hormigón	2	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0539	s.u

Características del sistema de álabes -asas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,35	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,64	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Kaplan	1,30	s.u
	d_{F2}^2	$d2F2 = 1 - dk^2$	0,59	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0208	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitución	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitución (cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi \times R \times 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitución	$K_{IN,CR}$		0,1171	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,206	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,068	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,138	s.u
Relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,33	s.u
Relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,67	s.u

Anexo 9. Resultados de la carga inercial para una turbina Kaplan con Ho=60m y D1=9.5m

paso i	Δt (seg)	$Q_{i(t)} = Q_{i(0)} * (1 - \frac{\Delta t}{T_s})$		$\Delta H_{TR,CAL} = \frac{-K_{IN,TR} Q_{i(t)} \sqrt{H_0} + \Delta H_{TR,ASUM} + K_{IN,TR} Q_{i-1}}{\Delta t}$		$\Delta H_1 = \Delta H_{TR,CAL} * \frac{K_{IN,S}}{K_{IN,TR}}$	$\Delta H_2 = \Delta H_{TR,CAL} * \frac{K_{IN,I}}{K_{IN,TR}}$	$Q_i = Q_{i(t)} * \sqrt{H_0 + \Delta H_1 + \Delta H_2}$
		Proceso iterativo			Tramo superior	Tramo inferior		
		$Q_{i(t)}, (m^{2,5}/s)$	$\Delta H_{TR, asumido}, (m)$	$\Delta H_{TR, calculado}, (m)$	$\Delta H_1 (m)$	$\Delta H_2 (m)$	Q (m ³ /s)	
0	0	44,5	0	0	0	0	345,00	
1	1	38,97	5,900	5,901	1,953	3,948	316,37	
2	2	33,40	8,305	8,305	2,748	5,556	276,08	
3	3	27,84	9,181	9,180	3,038	6,142	231,53	
4	4	22,27	9,4654	9,4654	3,133	6,333	185,61	
5	5	16,70	9,5468	9,5469	3,159	6,387	139,29	
6	6	11,13	9,5666	9,5666	3,166	6,401	92,87	
7	7	5,57	9,5704	9,5704	3,167	6,403	46,44	
8	8	0,00	9,5709	9,5709	3,167	6,403	0,00	

Anexo 10. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con Ho=40m y D1=5m

Calculo de golpe de ariete en una central hidroelectrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H ₀	carga neta inicial	40	m
Q _{MAX}	caudal maximo de diseño	345	m ³ /s
H _s	altura de restitution	12	m
T _s	Tiempo de cierre	8	seg
D ₁	diámetro nominal del rodete	5	m
g	aceleracion de la gravedad	9,81	m/s ²

Anexo 11. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Kaplan con $H_0=40\text{m}$ y $D1=5\text{m}$

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la sección de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 - D_3$	13,8	m
Sección transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la sección de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Sección transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
angulo de cobertura	ϕ_{cob}		225	grados
velocidad media cámara espiral	v_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara metálicas (completas)	3,6	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0511	s.u

Características del sistema de álabes -aspas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,375	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,45	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Kaplan	1,30	s.u
	d^2_{F2}	$d2F2 = 1 - dk^2$	0,80	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0342	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitución	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitución (cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi \cdot R \cdot 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitución	$K_{IN,CR}$		0,1646	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,264	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,065	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,199	s.u
Relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,25	s.u
Relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,75	s.u

Anexo 12. Resultados de la carga inercial para una turbina Kaplan con Ho=40m y D1=5m

paso i	Δt (seg)	$Q_{i(t)} = Q_{i(0)} * (1 - \frac{\Delta t}{T_S})$		$\Delta H_{TR,CAL} = \frac{-K_{IN,TR} Q_{i(t)} \sqrt{H_0 + \Delta H_{TR,ASUM}} + K_{IN,TR} Q_{i-1}}{\Delta t}$	$\Delta H_1 = \Delta H_{TR,CAL} * \frac{K_{IN,S}}{K_{IN,TR}}$	$\Delta H_2 = \Delta H_{TR,CAL} * \frac{K_{IN,I}}{K_{IN,TR}}$	$Q_i = Q_{i(t)} * \sqrt{H_0 + \Delta H_1 + \Delta H_2}$
		Proceso iterativo			Tramo superior	Tramo inferior	Q (m ³ /s)
		$Q_{i(t)}, (m^{2,5}/s)$	$\Delta H_{TR,asumido}, (m)$	$\Delta H_{TR,calculado}, (m)$	$\Delta H_1 (m)$	$\Delta H_2 (m)$	
0	0	54,5	0	0	0	0	345,00
1	1	47,73	5,801	5,804	1,437	4,368	323,04
2	2	40,91	9,380	9,387	2,324	7,064	287,51
3	3	34,09	11,390	11,386	2,818	8,568	244,39
4	4	27,27	12,4000	12,4025	3,070	9,333	197,44
5	5	20,46	12,8600	12,8663	3,185	9,682	148,73
6	6	13,64	13,0500	13,0488	3,230	9,819	99,33
7	7	6,82	13,1100	13,1092	3,245	9,864	49,69
8	8	0,00	13,1200	13,1243	3,248	9,876	0,00

Anexo 13. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con Ho=170m y D1=5m

Calculo de golpe de ariete en una central hidroelectrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H ₀	carga neta inicial	170	m
Q _{MAX}	caudal maximo de diseño	345	m ³ /s
H _S	altura de restitution	12	m
T _S	Tiempo de cierre	8	seg
D ₁	diámetro nominal del rodete	5	m
g	aceleracion de la gravedad	9,81	m/s ²

Anexo 14. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con Ho=170m y D1=5m

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parametro	Simbologia	Descripcion	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la sección de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 - D_3$	13,8	m
Sección transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la sección de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Sección transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parametro	Simbologia	Descripcion	Valor	Unidades
angulo de cobertura	ϕ_{cob}		225	grados
velocidad media cámara espiral	V_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara hormigón	2	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0284	s.u

Características del sistema de álabes -aspas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parametro	Simbologia	Descripcion	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,2	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1,097	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,45	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Francis	0,90	s.u
	d^2_{F2}	$d2F2 = D2$	1,10	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0287	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parametro	Simbologia	Descripcion	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitución	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitución (cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi \times R \times 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitución	$K_{IN,CR}$		0,1595	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,231	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,043	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,188	s.u
Relacion coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,18	s.u
Relacion coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,82	s.u

Anexo 15. Resultados de la carga inercial para una turbina Francis con $H_0=170\text{m}$ y $D_1=5\text{m}$

paso i	Δt (seg)	Ql(t) , (m ² ,5/s)	Proceso iterativo		Tramo superior	Tramo inferior	Q (m ³ /s)
			ΔHTR asumido	ΔHTR calculado	$\Delta H1$ (m)	$\Delta H2$ (m)	
0	0	26,4602921	0	0	0	0	345,00
1	1	23,1527556	8,2800	8,2791	1,5305	6,7485	309,14
2	2	19,8452191	9,9150	9,9156	1,8331	8,0825	266,19
3	3	16,5376826	10,2020	10,2016	1,8860	8,3156	222,00
4	4	13,2301461	10,2455	10,2455	1,8941	8,3514	177,62
5	5	9,92260954	10,2512	10,2512	1,8951	8,3561	133,22
6	6	6,61507303	10,2516	10,2519	1,8953	8,3566	88,81
7	7	3,30753651	10,2510	10,2519	1,8953	8,3567	44,41
8	8	0	10,2519	10,2519	1,8953	8,3566	0,00

Anexo 16. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con $H_0=310\text{m}$ y $D_1=8\text{m}$

Calculo de golpe de ariete en una central hidroelectrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H_0	carga neta inicial	310	m
Q_{MAX}	caudal maximo de diseño	345	m ³ /s
H_s	altura de restitution	12	m
T_s	Tiempo de cierre	8	seg
D_1	diámetro nominal del rodete	8	m
g	aceleracion de la gravedad	9,81	m/s ²

Anexo 17. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con $H_o=310m$ y $D1=8m$

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parámetro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la sección de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 - D_3$	13,8	m
Sección transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la sección de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Sección transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parámetro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
ángulo de cobertura	ϕ_{cob}		225	grados
velocidad media cámara espiral	v_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara hormigón	2	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0454	s.u

Características del sistema de álabes -aspas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parámetro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,12	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1,097	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,45	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Francis	0,90	s.u
	d^2_{F2}	$d2F2 = D2$	1,10	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0215	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parámetro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitución	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitución (cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi \cdot R \cdot 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitución	$K_{IN,CR}$		0,1244	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,206	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,060	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,146	s.u
Relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,29	s.u
Relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,71	s.u

Anexo 18. Resultados de la carga inercial para una turbina Francis con $H_0=310\text{m}$ y $D_1=8\text{m}$

paso i	Δt (seg)	Q(t) , (m ³ /s)	Proceso iterativo		Tramo superior	Tramo inferior	Q (m ³ /s)
			ΔHTR asumido	ΔHTR calculado	ΔH_1 (m)	ΔH_2 (m)	
0	0	19,5946833	0	0,000	0,000	0,000	345,0
1	1	17,1453479	8,066	8,066	2,342	5,725	305,8
2	2	14,6960125	8,912	8,912	2,587	6,325	262,4
3	3	12,2466771	8,99	8,990	2,610	6,380	218,7
4	4	9,79734164	8,9959	8,996	2,611	6,384	175,0
5	5	7,34800623	8,9963	8,996	2,612	6,385	131,2
6	6	4,89867082	8,9962	8,996	2,612	6,385	87,5
7	7	2,44933541	8,9963	8,996	2,612	6,385	43,7
8	8	0	8,9963	8,996	2,612	6,385	0,0

Anexo 19. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con $H_0=500\text{m}$ y $D_1=3.6\text{m}$

Calculo de golpe de ariete en una central hidroelectrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H_0	carga neta inicial	500	m
Q_{MAX}	caudal maximo de diseño	345	m ³ /s
H_s	altura de restitution	12	m
T_s	Tiempo de cierre	8	seg
D_1	diámetro nominal del rodete	3,6	m
g	aceleracion de la gravedad	9,81	m/s ²

Anexo 20. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con $H_o=500m$ y $D1=3.6m$

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la sección de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 - D_3$	13,8	m
Sección transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la sección de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Sección transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
angulo de cobertura	ϕ_{cob}		225	grados
velocidad media cámara espiral	v_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara hormigón	2	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0204	s.u

Características del sistema de álabes -aspas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,08	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1,097	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,45	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Francis	0,90	s.u
	d^2_{F2}	$d2F2 = D2$	1,10	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0533	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitución	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitución (cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi \cdot R \cdot 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitución	$K_{IN,CR}$		0,1748	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,263	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,035	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,228	s.u
Relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,13	s.u
Relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,87	s.u

Anexo 21. Resultados de la carga inercial para una turbina Francis con $H_0=500\text{m}$ y $D_1=3.6\text{m}$

paso i	Δt (seg)	$Q(t)$, (m ³ /s)	Proceso iterativo		Tramo superior	Tramo inferior	Q (m ³ /s)
			ΔH_{TR} asumido	ΔH_{TR} calculado	ΔH_1 (m)	ΔH_2 (m)	
0	0	15,428869	0	0	0	0	345,00
1	1	13,5002604	10,504	10,504	1,388	9,115	305,03
2	2	11,5716518	11,391	11,391	1,506	9,886	261,68
3	3	9,64304315	11,457	11,457	1,515	9,943	218,08
4	4	7,71443452	11,4616	11,462	1,515	9,946	174,47
5	5	5,78582589	11,4618	11,462	1,515	9,947	130,85
6	6	3,85721726	11,4618	11,462	1,515	9,947	87,23
7	7	1,92860863	11,4618	11,462	1,515	9,947	43,62
8	8	0	11,4618	11,462	1,515	9,947	0,00

Anexo 22. Datos para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con $H_0=500\text{m}$ y $D_1=1.8\text{m}$

Cálculo de golpe de ariete en una central hidroeléctrica			
Simbología	Parámetro	Valor	Unidades
H_0	carga neta inicial	500	m
Q_{MAX}	caudal máximo de diseño	345	m ³ /s
H_s	altura de restitución	12	m
T_s	Tiempo de cierre	8	seg
D_1	diámetro nominal del rodete	1,8	m
g	aceleración de la gravedad	9,81	m/s ²

Anexo 23. Resultados de coeficiente inercial para el cálculo de incremento de presión por golpe de ariete para una turbina Francis con $H_o=500m$ y $D1=1.8m$

Características de conducto de carga y determinación del coeficiente inercial de conducto de carga				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
numero de tramos del conducto de carga	N		2	s.u
altura de la sección de conducto de carga 1	A_{C-C1}		15	m
Distancia 1	D_1		7,8	m
Distancia 2	D_2		7,8	m
Distancia 3	D_3		1,8	m
Base de la sección de conducto de carga 1	B_{C-C1}	$B_{C-C1} = D_1 + D_2 - D_3$	13,8	m
Sección transversal del conducto de carga 1	F_1	$F_1 = (A_{C-C1} + A_{C-C2} \times 0,50) \times B_{C-C1}$	186,3	m ²
Longitud de conducto de carga 1	L_1		18,4	m
altura de la sección de conducto de carga 2	A_{C-C2}		12	m
Base de la sección de conducto de carga 2	B_{C-C2}	$B_{C-C2} = D_1 + D_2$	15,6	m
Sección transversal del conducto de carga 2	F_2	$F_2 = A_{C-C2} \times B_{C-C2}$	187,2	m ²
Longitud de conducto de carga 2	L_2		7,8	m
Coeficiente inercial de conducto de carga	$K_{IN,CC}$		0,0143	s.u

Características de la cámara espiral y determinación del coeficiente inercial de la cámara espiral				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
ángulo de cobertura	ϕ_{COB}		225	grados
velocidad media cámara espiral	v_{CE}		6	m/s
Coeficiente cámara espiral	λ_{CE}	Cámara hormigón	2	s.u
Coeficiente inercial cámara espiral	$K_{IN,CE}$		0,0102	s.u

Características del sistema de álabes -aspas y determinación del coeficiente inercial de sistema de álabes				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura relativa del distribuidor o elemento direccional	b_0		0,375	s.u
diámetro relativo de salida desde el rodete	D_2		1,097	s.u
diámetro relativo del cuerpo del rodete	d_k		0,45	s.u
Coeficiente de sistema de álabes	λ_{ALAB}	Turbinas Francis	0,90	s.u
	d^2_{F2}	$d^2_{F2} = D_2$	1,10	s.u
coeficiente inercial de sistema de álabes	$K_{IN,ALAB}$		0,0582	s.u

Características del conducto de restitución y determinación del coeficiente inercial de conducto de restitución				
Parametro	Simbología	Descripción	Valor	Unidades
altura de la sección de salida del conducto de restitución	A_{CR}		13,2	m
base de la sección de salida del conducto de restitución	B_{CR}		8,1	m
área de la sección de salida del conducto de restitución	F_5	$F_5 = A_{CR} \times B_{CR}$	106,92	m ²
Longitud 1 de conducto de restitución	L_{1CR}		13,8	m
Radio	R		8,5	m
Longitud 2 de conducto de restitución (cuarto de círculo)	L_{2CR}	$L_{2CR} = 2\pi \cdot R \cdot 0,25$	13,35	m
Longitud 3 de conducto de restitución	L_{3CR}		75,0	m
Longitud real del conducto de restitución	L_{CR}	$L_{CR} = L_{1CR} + L_{2CR} + L_{3CR}$	102,15	m
Coeficiente inercial de conducto de restitución	$K_{IN,CR}$		0,1894	s.u
Coeficiente inercial del tramo de conducción	$K_{IN,TR}$	$K_{IN,TR} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE} + K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,272	s.u
Coeficiente inercial del tramo superior	$K_{IN,S}$	$K_{IN,S} = K_{IN,CC} + K_{IN,CE}$	0,025	s.u
Coeficiente inercial del tramo inferior	$K_{IN,I}$	$K_{IN,I} = K_{IN,ALAB} + K_{IN,CR}$	0,248	s.u
Relación coeficiente inercial tramo superior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,S} / K_{IN,TR}$	0,09	s.u
Relación coeficiente inercial tramo inferior con coeficiente inercial tramo conducción		$K_{IN,I} / K_{IN,TR}$	0,91	s.u

Anexo 24. Resultados de la carga inercial para una turbina Francis con Ho=500m y D1=1.8m

paso i	Δt (seg)	Q(t) , (m2,5/s)	Proceso iterativo		Tramo superior	Tramo inferior	Q (m3/s)
			ΔHTR asumido	ΔHTR calculado	ΔH1 (m)	ΔH2 (m)	
0	0	15,428869	0	0	0	0	345
1	1	13,5002604	10,845	10,8457106	0,97784461	9,86786594	305,131484
2	2	11,5716518	11,79	11,7923584	1,06319397	10,7291644	261,783491
3	3	9,64304315	11,86	11,8651468	1,06975655	10,7953903	218,168422
4	4	7,71443452	11,87	11,8696873	1,07016592	10,7995214	174,535511
5	5	5,78582589	11,87	11,8699542	1,07018998	10,7997642	130,901668
6	6	3,85721726	11,87	11,8699671	1,07019114	10,799776	87,2677796
7	7	1,92860863	11,87	11,8699679	1,07019122	10,7997767	43,6338898
8	8	0	11,87	11,8699683	1,07019126	10,7997771	0

Anexo 25. Datos y resultados del incremento por golpe de ariete en sistemas de conducción de agua potable con L=20 m, D=0.10m

CALCULO DE INCREMENTO DE CARGA POR GOLPE DE ARIETE CASO DE UN SISTEMA DE CONDUCCION DE AGUA POTABLE				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	
Longitud del conducto	L	20	m	
Diametro del tubo	D	0,10	m	
Área de la sección	W	0,0079	m2	$W = \frac{\pi * D^2}{4}$
Espesor de la cáscara del tubo	δ	12	mm	
Material		Hierro Fundido		
Módulo de elasticidad del conducto	E	200000	Mpa	
Módulo de elasticidad del agua	Eo	2000,0	Mpa	
Tiempo de cierre de la válvula	Ts	0,02	seg	
Caudal	Q	0,030	m3/s	
densidad de agua	ρ	1000	kg/m ³	
Aceleración de la gravedad	g	9,81	m/s2	
Velocidad de difusión de la onda del golpe de ariete	a	1369	m/s	$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$
Velocidad de flujo	Vo	3,82	m/s	$v_o = \frac{Q}{\omega}$
Duración de la fase de golpe de ariete	tf	0,03	seg	$t_f = \frac{2L}{a}$
Determinación del incremento de carga por golpe de ariete				
Tipo de maniobra		cierre rápido		
Tipo de golpe de ariete		golpe de ariete directo		
Incremento por golpe de ariete		fórmula Zhukovsky		
	ΔH _{gol}	5229560,41	Pa	
	ΔH _{gol}	5,23	Mpa	

Anexo 26. Datos y resultados del incremento por golpe de ariete en sistemas de conducción de agua potable con L=50 m, D=0.20m

CALCULO DE INCREMENTO DE CARGA POR GOLPE DE ARIETE				
CASO DE UN SISTEMA DE CONDUCCION DE AGUA POTABLE				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	
Longitud del conducto	L	50	m	$W = \frac{\pi * D^2}{4}$
Diametro del tubo	D	0,20	m	
Área de la sección	W	0,0314	m ²	
Espesor de la cáscara del tubo	δ	12	mm	
Material		Hierro Fundido		
Módulo de elasticidad del conducto	E	200000	Mpa	
Módulo de elasticidad del agua	E _o	2000,0	Mpa	
Tiempo de cierre de la válvula	T _s	0,02	seg	
Caudal	Q	0,030	m ³ /s	
densidad de agua	ρ	1000	kg/m ³	
Aceleración de la gravedad	g	9,81	m/s ²	
Velocidad de difusión de la onda del golpe de ariete	a	1319	m/s	$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$
Velocidad de flujo	V _o	0,95	m/s	$V_o = \frac{Q}{\omega}$
Duración de la fase de golpe de ariete	t _f	0,08	seg	$t_f = \frac{2L}{a}$
Determinación del incremento de carga por golpe de ariete				
Tipo de maniobra		cierre rápido		
Tipo de golpe de ariete		golpe de ariete directo		
Incremento por golpe de ariete		fórmula Zhukovsky		
	ΔH _{gol}	1259832,63	Pa	
	ΔH _{gol}	1,26	Mpa	

Anexo 27. Datos y resultados del incremento por golpe de ariete en sistemas de conducción de agua potable con L=20 m, D=0.20m

CALCULO DE INCREMENTO DE CARGA POR GOLPE DE ARIETE CASO DE UN SISTEMA DE CONDUCCION DE AGUA POTABLE				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	
Longitud del conducto	L	20	m	$W = \frac{\pi * D^2}{4}$
Diametro del tubo	D	0,20	m	
Área de la sección	W	0,0314	m ²	
Espesor de la cáscara del tubo	δ	12	mm	
Material		Hierro Fundido		
Módulo de elasticidad del conducto	E	200000	Mpa	
Módulo de elasticidad del agua	E _o	2000,0	Mpa	
Tiempo de cierre de la válvula	T _s	0,02	seg	
Caudal	Q	0,030	m ³ /s	
densidad de agua	ρ	1000	kg/m ³	
Aceleración de la gravedad	g	9,81	m/s ²	
Velocidad de difusión de la onda del golpe de ariete	a	1319	m/s	$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$
Velocidad de flujo	V _o	0,95	m/s	$V_o = \frac{Q}{\omega}$
Duración de la fase de golpe de ariete	t _f	0,03	seg	$t_f = \frac{2L}{a}$
Determinación del incremento de carga por golpe de ariete				
Tipo de maniobra		cierre rápido		
Tipo de golpe de ariete		golpe de ariete directo		
Incremento por golpe de ariete		fórmula Zhukovsky		
	ΔH_{gol}	1259832,63	Pa	
	ΔH_{gol}	1,26	Mpa	

Anexo 28. Datos y resultados del incremento por golpe de ariete en sistemas de conducción de agua potable con L=50 m, D=0.20m, material de conducto PVC

CALCULO DE INCREMENTO DE CARGA POR GOLPE DE ARIETE CASO DE UN SISTEMA DE CONDUCCION DE AGUA POTABLE				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	
Longitud del conducto	L	50	m	$W = \frac{\pi * D^2}{4}$
Diametro del tubo	D	0,20	m	
Área de la sección	W	0,0314	m ²	
Espesor de la cáscara del tubo	δ	12	mm	
Material		Hierro Fundido		
Módulo de elasticidad del conducto	E	2941	Mpa	
Módulo de elasticidad del agua	E _o	2000,0	Mpa	
Tiempo de cierre de la válvula	T _s	0,02	seg	
Caudal	Q	0,030	m ³ /s	
densidad de agua	ρ	1000	kg/m ³	
Aceleración de la gravedad	g	9,81	m/s ²	
Velocidad de difusión de la onda del golpe de ariete	a	406	m/s	$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$
Velocidad de flujo	V _o	0,95	m/s	$V_o = \frac{Q}{\omega}$
Duración de la fase de golpe de ariete	t _f	0,25	seg	$t_f = \frac{2L}{a}$
Determinación del incremento de carga por golpe de ariete				
Tipo de maniobra		cierre rápido		
Tipo de golpe de ariete		golpe de ariete directo		
Incremento por golpe de ariete		fórmula Zhukovsky		
	ΔH_{gol}	387466,39	Pa	
	ΔH_{gol}	0,39	Mpa	

Anexo 29. Datos y resultados del incremento por golpe de ariete en sistemas de conducción de agua potable en función al tiempo de parada $L=1000m$, $D=0.60m$

CALCULO DE INCREMENTO DE CARGA POR GOLPE DE ARIETE					
EN FUNCION DE TIEMPO DE PARADA					
Parámetro	Variable	Valor	Unidades		
Longitud del conducto	L	1000	m	$W = \frac{\pi * D^2}{4}$	
Diametro del tubo	D	0,60	m		
Área de la sección	W	0,2827	m ²		
Espesor de la cáscara del tubo	δ	12	mm		
Material		Hierro Fundido			
Módulo de elasticidad del conducto	E	200000	Mpa		
Módulo de elasticidad del agua	Eo	2000,0	Mpa		
Perdidas de fricción	hf	5,0	m		
Perdidas locales	hl	0,8	m		
altura geométrica	Hg	47,00	m		
Caudal	Q	1,250	m ³ /s	$\alpha = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$	
densidad de agua	ρ	1000	kg/m ³		
Aceleración de la gravedad	g	9,81	m/s ²		
Altura manométrica	Hm	52,75	m		
Pendiente hidráulica	i	0,05			
Velocidad de difusión de la onda del golpe de ariete	a	1164	m/s		
Velocidad de flujo	Vo	4,42	m/s		
Duración de la fase de golpe de ariete	tf	1,72	seg		
					$V_o = \frac{Q}{\omega}$
					$t_f = \frac{2L}{\alpha}$
Determinación tiempo de parada					
constantes de ajustes empiricos	K	1,5		$T_p = C + \frac{K * L * V}{g * H_m}$	
constantes de ajustes empiricos	C	1			
Tiempo de parada	Tp	13,81496483	seg		
Longitud critica	Lc	8036,908478	m		
				$L_c = \frac{\alpha T_p}{2}$	
Tipo de impulsión		impulsión corta			
Tipo de maniobra		cierre lento			
Incremento por golpe de ariete		fórmula Michaud			
ΔH_{got}		65,24	mca		

Pendiente hidráulica (m)	Coefficiente (C)
$\frac{H_m}{L} < 0.20$	1
$\frac{H_m}{L} \geq 0.40$	0
$\frac{H_m}{L} \approx 0.30$	0.60

Longitud de la tubería (L)	Coefficiente (K)
$L < 500$	2
$L \approx 500$	1.75
$500 < L < 1500$	1.5
$L \approx 1500$	1.25
$L > 1500$	1

Michaud $\Delta H_{got} = \frac{2LV}{gTs}$
Zhukovsky $\Delta H_{got} = \rho a \Delta v$

Anexo 30. Datos y resultados del incremento por golpe de ariete en sistemas de conducción de agua potable en función al tiempo de parada $L=500m$, $D=0.50m$

CALCULO DE INCREMENTO DE CARGA POR GOLPE DE ARIETE				
EN FUNCION DE TIEMPO DE PARADA				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	
Longitud del conducto	L	500	m	$W = \frac{\pi * D^2}{4}$
Diametro del tubo	D	0,50	m	
Área de la sección	W	0,1963	m ²	
Espesor de la cáscara del tubo	δ	12	mm	
Material		Hierro Fundido		
Módulo de elasticidad del conducto	E	200000	Mpa	
Módulo de elasticidad del agua	Eo	2000,0	Mpa	
Perdidas de fricción	hf	5,0	m	
Perdidas locales	hl	0,8	m	
altura geométrica	Hg	47,00	m	
Caudal	Q	1,250	m ³ /s	
densidad de agua	ρ	1000	kg/m ³	
Aceleración de la gravedad	g	9,81	m/s ²	
Altura manométrica	Hm	52,75	m	
Pendiente hidráulica	i	0,11		
Velocidad de difusión de la onda del golpe de ariete	a	1197	m/s	$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_o D}{E \delta}}}$
Velocidad de flujo	Vo	6,37	m/s	$V_o = \frac{Q}{\omega}$
Duración de la fase de golpe de ariete	tf	0,84	seg	$t_f = \frac{2L}{a}$
Determinación tiempo de parada				
constantes de ajustes empiricos	K	1,75		$T_p = C + \frac{K * L * V}{g * H_m}$
constantes de ajustes empiricos	C	1		
Tiempo de parada	Tp	11,76457046	seg	
Longitud critica	Lc	7042,50406	m	
				$L_c = \frac{a T_p}{2}$
Tipo de impulsión		impulsión corta		
Tipo de maniobra		cierre lento		
Incremento por golpe de ariete		fórmula Michaud		
	ΔH_{got}	55,16	mca	

Pendiente hidráulica (m)	Coefficiente (C)
$\frac{H_m}{L} < 0.20$	1
$\frac{H_m}{L} \geq 0.40$	0
$\frac{H_m}{L} \approx 0.30$	0.60

Longitud de la tubería (L)	Coefficiente (K)
$L < 500$	2
$L \approx 500$	1.75
$500 < L < 1500$	1.5
$L \approx 1500$	1.25
$L > 1500$	1

Michaud $\Delta H_{got} = \frac{2LV}{gTs}$
Zhukovsky $\Delta H_{got} = \rho a \Delta v$

Anexo 31. Datos y resultados del incremento por golpe de ariete en sistemas de conducción de agua potable en función al tiempo de parada L=500m, D=0.50m, variación de perdidas por fricción

CALCULO DE INCREMENTO DE CARGA POR GOLPE DE ARIETE EN FUNCION DE TIEMPO DE PARADA				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	
Longitud del conducto	L	500	m	$W = \frac{\pi * D^2}{4}$
Diámetro del tubo	D	0,50	m	
Área de la sección	W	0,1963	m ²	
Espesor de la cáscara del tubo	δ	12	mm	
Material		Hierro Fundido		
Módulo de elasticidad del conducto	E	200000	Mpa	$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_0 D}{E \delta}}}$
Módulo de elasticidad del agua	E ₀	2000,0	Mpa	
Perdidas de fricción	hf	3,0	m	
Perdidas locales	hl	0,8	m	
altura geometrica	Hg	30,00	m	$V_0 = \frac{Q}{\omega}$
Caudal	Q	1,250	m ³ /s	
densidad de agua	ρ	1000	kg/m ³	$\tau_f = \frac{2L}{a}$
Aceleración de la gravedad	g	9,81	m/s ²	
Altura manométrica	Hm	33,75	m	
Pendiente hidráulica	i	0,07		
Velocidad de difusión de la onda del golpe de ariete	a	1197	m/s	
Velocidad de flujo	V ₀	6,37	m/s	
Duración de la fase de golpe de ariete	tf	0,84	seg	
Determinación tiempo de parada				
constantes de ajustes empiricos	K	1,75		$T_p = C + \frac{K * L * V}{g * H_m}$
constantes de ajustes empiricos	C	1		
Tiempo de parada	T _p	17,82462494	seg	
Longitud critica	L _c	10670,17227	m	
Tipo de impulsión		impulsión corta		$L_c = \frac{aT_p}{2}$
Tipo de maniobra		cierre lento		
Incremento por golpe de ariete		fórmula Michaud		
	ΔH _{gol}	36,41	mca	

Pendiente hidráulica (m)	Coefficiente (C)
$\frac{H_m}{L} < 0.20$	1
$\frac{H_m}{L} \geq 0.40$	0
$\frac{H_m}{L} \approx 0.30$	0.60

Longitud de la tubería (L)	Coefficiente (K)
L < 500	2
L ≈ 500	1.75
500 < L < 1500	1.5
L ≈ 1500	1.25
L > 1500	1

Michaud	$\Delta H_{gol} = \frac{2LV}{gTs}$
Zhukovsky	$\Delta H_{gol} = \rho a \Delta v$